

Introduction à la modulation analogique

1 Introduction

La télécommunication peut être définie comme la communication à distance (d'où la racine « télé ») utilisant de moyens techniques, le plus souvent électroniques et les ondes électromagnétiques transmises dans l'air ou par des conducteurs.

Un diagramme en bloque de haut niveau d'abstraction du processus de télécommunication est montré à la figure 1.

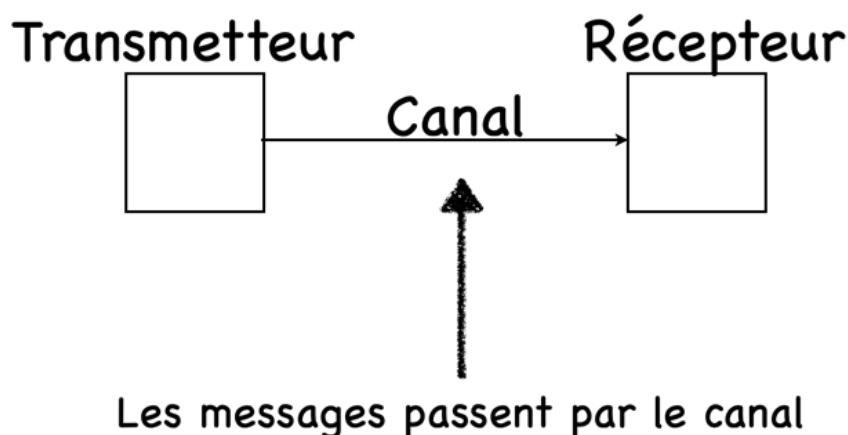


Figure 1. Diagramme illustrant la télécommunication entre une source et un récepteur

Si les deux parties que désirent communiquer sont des êtres humains qui se trouvent dans une même salle, elles peuvent tout simplement se parler. En effet, les signaux sonores se propagent sans problème à de courtes distances. En revanche, si les deux personnes se trouvent loin l'une de l'autre, le signal sonore n'est pas adapté et une autre façon de transmettre l'information devra être utilisée.

A de longues distances, les messages sont typiquement transportés par des ondes électromagnétiques. Celles-ci se propagent dans l'air et dans le vide à une vitesse de 3×10^8 m/s. La vitesse de propagation peut être inférieure dans certains câbles comme nous verrons plus tard dans le cours.

A la vitesse évoquée, une transmission d'Yverdon et Fribourg implique un délai de propagation pour ces 34 km de

$$t_{\text{délai}} = \frac{34e3}{3e8} \cong 0.1 \text{ ms}$$

Avec un dixième de milliseconde de latence, on ne remarque pas la distance lors d'une communication téléphonique. Juste pour mettre en exergue le fait que, même si la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques est extrêmement grande, elle est tout de même finie, calculons le temps de propagation entre la terre et le soleil. La distance terre-soleil est $148.74 \times 10^9 \text{ m}$. Le délai pour traverser cette distance est donc

$$\frac{148.74 \times 10^9 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m}} = 8 \text{ minutes et } 16 \text{ secondes}$$

2 Modulation

Comment faire qu'une onde électromagnétique joue le rôle de porteuse de l'information ?

Nous allons d'abord présenter la façon dont la transmission de la voix se fait en forme analogique.

2.1 La voix est une onde de pression

Si on fait un plot en fonction du temps de la pression de l'air lorsqu'on prononce un mot, on obtient un graphique comme celui de la figure 2.

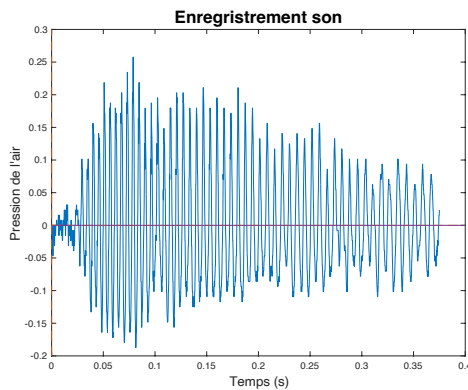


Figure 2. Pression de l'air en fonction du temps créé par lorsque l'on prononce le mot « one » en anglais.

Pour pouvoir enregistrer le son sous la forme d'un graphique comme à la figure 2, un microphone est utilisé. La figure 3 illustre le processus de conversion de l'onde sonore en onde électrique de la même allure.

Le microphone est capable de recevoir des vibrations de pression d'un côté et de produire à sa sortie un courant électrique dont la vibration est identique à celle de la pression sonore à son entrée.



Figure 3. Microphone. Le graphique à l'entrée est la variation de la pression par rapport au temps. Le graphique à la sortie est identique en forme mais c'est un courant électrique d'une plus faible amplitude.

Une fois qu'on a le signal électrique contenant la même information que le signal sonore (tout est dans la forme d'onde du signal), comment faire pour que le signal électromagnétique porte ces informations ? A ce but, on utilise la modulation. La modulation peut être définie comme une technique qui permet à une onde de devenir la porteuse d'un message. On peut aussi penser à la modulation comme une modification du message pour que celui-ci puisse se propager par un milieu de transmission pour lequel il n'est autrement pas adapté.

2.2 Modulation d'amplitude

Dans la modulation d'amplitude analogique, connue comme modulation AM, l'amplitude d'un signal sinusoïdal appelé la porteuse est modifiée pour qu'elle suive la forme d'onde du message. Le signal modulé en amplitude est transmis par l'air ou par un câble et le récepteur utilise une procédure connue comme démodulation pour éliminer la porteuse et en sortir le message.

Voyons comme ceci se présente pour le cas de la voix et le microphone illustrés à la figure 3. Cette figure est répétée ci-dessous avec une partie de l'onde de sortie du microphone zoomée :



Figure 4. Comme la figure 3 mais une partie du signal à la sortie du microphone est zoomé.

Un signal modulé en amplitude transportant la partie zoomée montrée à la figure 4 est montré à la figure 5 ci-dessous.

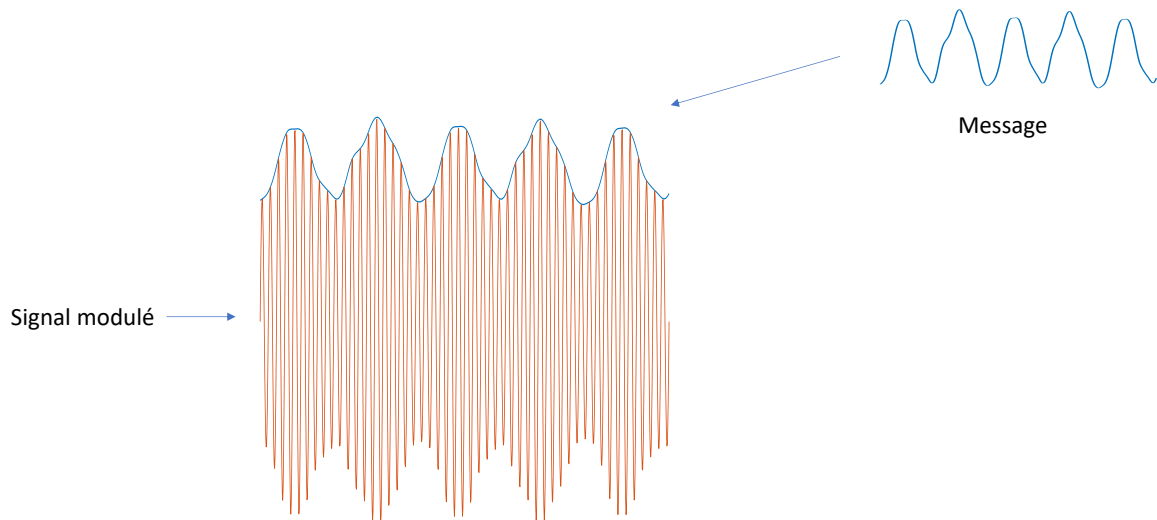


Figure 5. Signal modulé. On voit comment l'enveloppe de la porteuse suit la forme d'onde du message

Voyions maintenant quelles sont les équations qui définissent la modulation d'amplitude AM.

La porteuse est l'onde sinusoïdale à une fréquence suffisamment haute pour pouvoir se propager dans le milieu de transmission à de grandes distances lorsqu'un câble ou une antenne appropriés sont utilisés. La porteuse peut être calculée de manière générale par l'équation suivante :

$$p(t) = A_p \cos(\omega_p t + \phi_p) \tag{1}$$

Nous appellerons le message à transmettre $m(t)$. Nous allons utiliser également le message normalisé, $m_n(t)$, dont l'amplitude maximale est 1. Il est défini comme suit :

$$m_n(t) = \frac{m(t)}{\text{Max}(m(t))} \quad (2)$$

Signal modulé se construit par l'équation (3):

$$s(t) = A_p(1 + \mu m_n(t))\cos(\omega_p t + \phi_p) \quad (3)$$

dans laquelle μ est l'indice de modulation calculé par le rapport entre la valeur maximale du message et l'amplitude de la porteuse :

$$\mu = \frac{\text{Max}(m(t))}{A_p} \mu.$$

2.1 Démodulation AM

La démodulation est une procédée utilisée pour récupérer le message à partir de l'onde modulée reçue.

Il y a différentes techniques pour effectuer la démodulation.

Une façon relativement simple de démoduler un signal AM est de calculer le carré de l'onde modulée, de faire passer le résultat par un filtre passe-bas, et de faire quelques opérations algébriques simples telle la racine carrée, soustraction et division comme illustré dans la dérivation ci-dessous.

Prenons d'abord le carré de l'onde modulée donnée à l'équation (3)

$$s^2(t) = A_p^2(1 + \mu m_n(t))^2 \cos^2(\omega_p t + \phi_p) \quad (4)$$

Utilisant l'identité trigonométrique suivante :

$$\cos^2(\alpha) = \frac{\cos(2\alpha)+1}{2} \quad (5)$$

Nous pouvons écrire (4) de la manière suivante :

$$s^2(t) = \frac{A_p^2}{2} (1 + \mu m_n(t))^2 (\cos(2\omega_p t + 2\phi_p) + 1) \quad (6)$$

Après des manipulations, on peut écrire

$$s^2(t) = \frac{A_p^2}{2} (1 + \mu m_n(t))^2 + \frac{A_p^2}{2} (1 + \mu m_n(t))^2 \cos(2\omega_p t + 2\phi_p) \quad (7)$$

Dans le domaine fréquentiel, on a le graphique suivant pour le signal dans (7) :

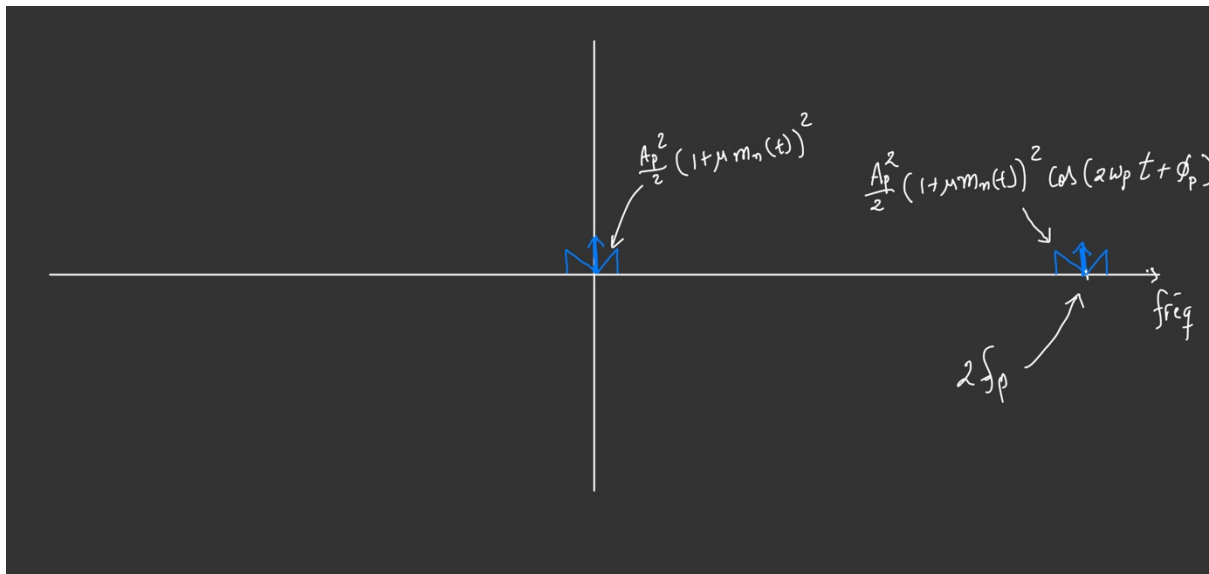


Figure 6. Spectre du signal modulé carré. Les parties bleues représentent le spectre possiblement décalé du message sauf les flèches qui représente la fréquence de la porteuse.

Si l'on filtre passe-bas avec fréquence de coupure entre ω_m et $2\omega_m - \omega_p$, on obtient

$$s_{filtré}^2(t) = \frac{A_p^2}{2} (1 + \mu m_n(t))^2 \quad (8)$$

On peut maintenant trouver le message en le mettant en évidence dans l'équation (8) comme suit :

$$m_n(t) = \frac{\sqrt{2s_{filtré}^2(t)}}{\mu A_p^2} - \frac{1}{\mu} \quad (9)$$

Exercice :

1. Montrez utilisant des identités trigonométriques que la multiplication d'un signal sinusoïdal à une fréquence f_1 par un autre signal sinusoïdal de fréquence f_2 produit des signaux à des fréquences égales à la somme et la différence des deux fréquences.
2. Dessinez le spectre d'un signal sinusoïdal de fréquence 1 kHz.
3. Dessinez le spectre d'un signal sinusoïdal de fréquence zéro.
4. Utilisez les résultats des exercices 1 à 3 pour dessiner le spectre d'un signal modulé en amplitude si le message est une sinusoïde.