

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.

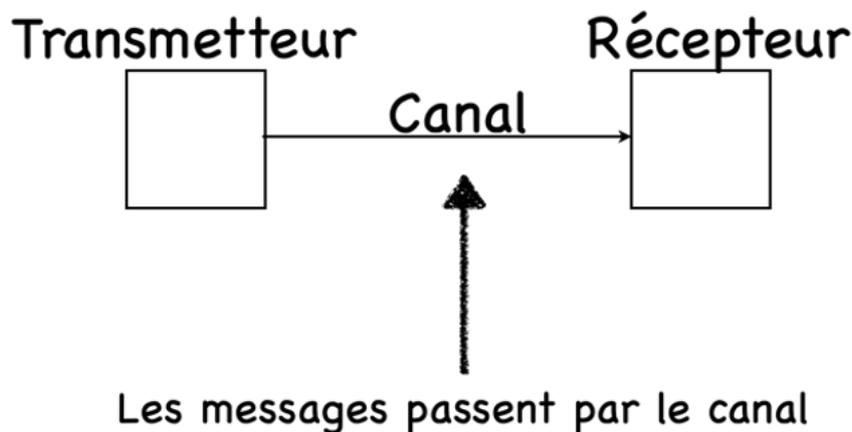


Figure 1. Diagramme illustrant la télécommunication entre une source et un puits

Si les deux parties que désirent communiquer sont des êtres humains qui se trouvent dans la 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 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$. 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 à 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

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

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 en tant que signal analogique se fait.

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.

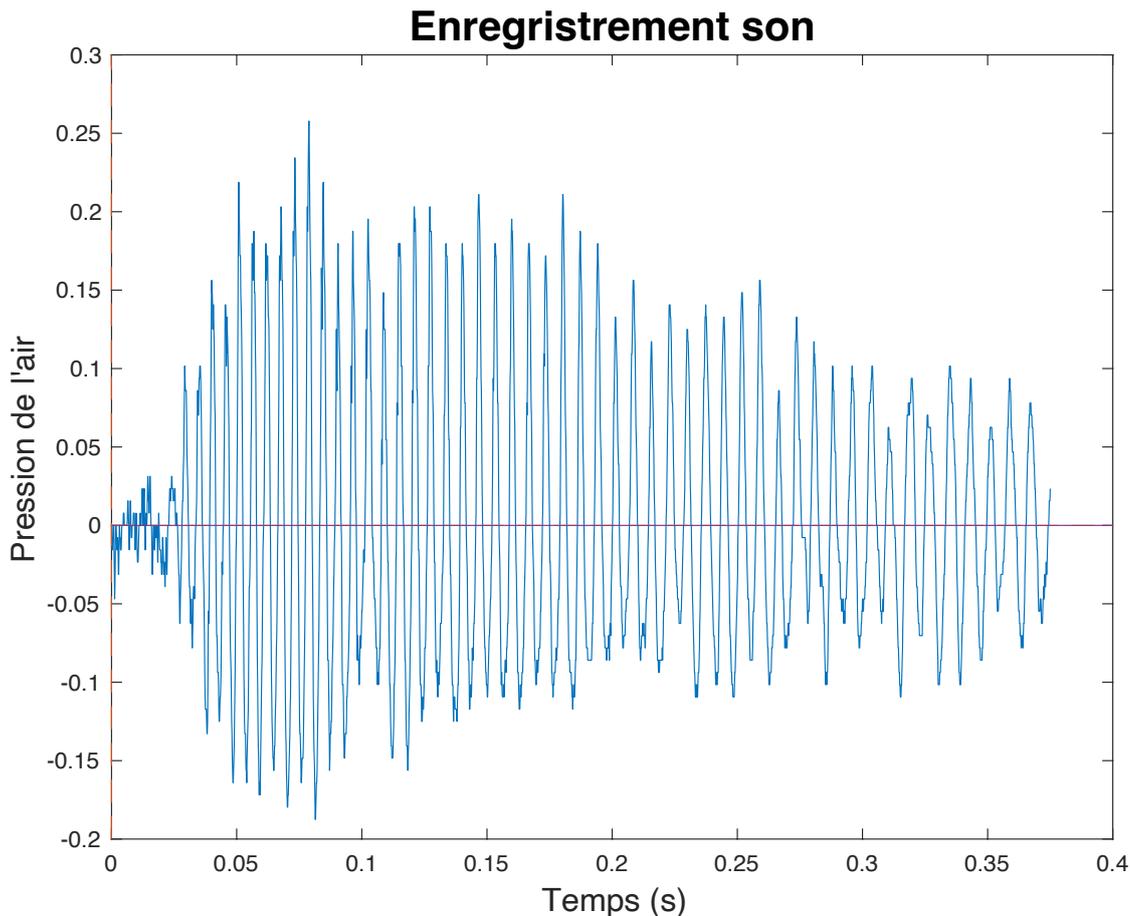


Figure 2. Pression de l'air en fonction du temps créé lorsque l'on prononce le mot « one » en anglais.

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 généralement d'une 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.

1.1 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 zoomée.

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

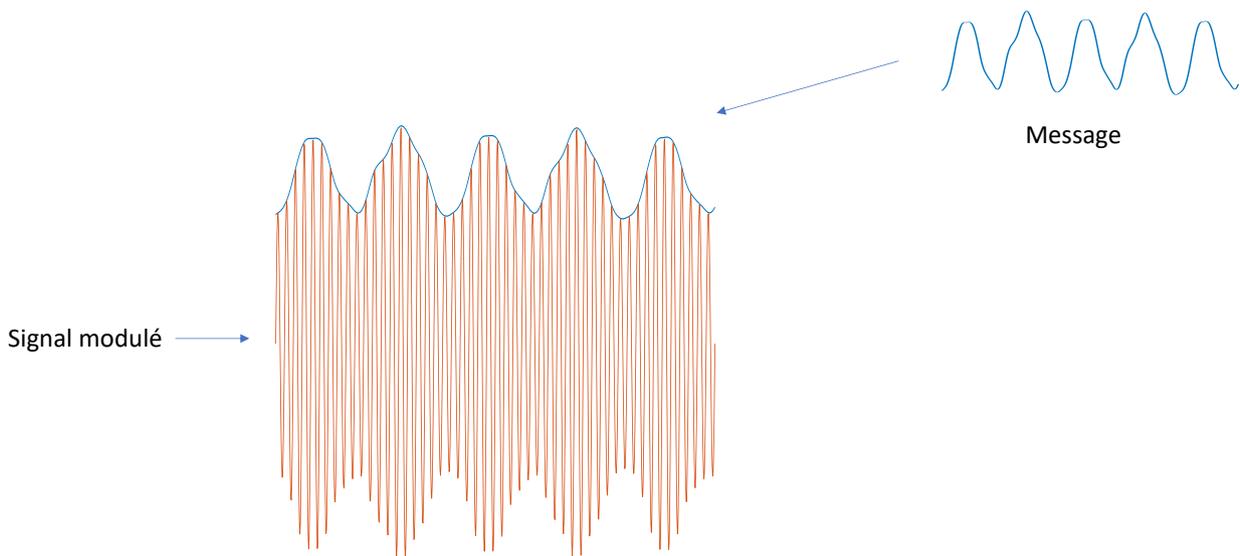


Figure 5. Signal modulé. On voit comment l'enveloppe de la porteuse suit la forme d'onde du message

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

La porteuse est une onde sinusoïdale à une fréquence suffisamment élevée pour pouvoir se propager sur de grandes distances dans le milieu de transmission, qui peut être, par exemple, un câble ou l'air. La porteuse peut être représentée de manière générale par l'équation suivante :

$$p(t) = A_p \cos(\omega_p t + \phi_p) \quad (1)$$

Pour les analyses que nous allons réaliser, la phase de la porteuse ne joue aucun rôle. Nous allons donc utiliser la porteuse avec phase nulle :

$$p(t) = A_p \cos(\omega_p t) \quad (2)$$

Cette porteuse est un signal qui a, comme déjà mentionné, une fréquence élevée par rapport au message (voir la figure 5).

Nous appellerons le message à transmettre $m(t)$. Le message normalisé est

$$m_n(t) = \frac{m(t)}{m_{max}} \quad (3)$$

L'amplitude maximale de $m_n(t)$ est donc 1.

L'expression du signal modulé en amplitude est la suivante :

$$s(t) = A_p (1 + \mu_a m_n(t)) \cos(\omega_p t) \quad (4)$$

Dans (4), μ_a est appelé l'index de modulation.

Exercice à faire en Matlab :

Supposez que

- la fréquence de la porteuse est $f_p = 100$ Hz et son amplitude est $A_p = 6$
- le message est une onde sinusoïdale de fréquence $f_m = 5$ Hz et amplitude $A_m = 3$
- L'index de modulation est $\mu_a = 1$

Tracez le signal modulé.

2.1 Démodulation AM

La démodulation est un procédé utilisé 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 avec le résultat 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 (4)

$$s(t)^2 = A_p^2 (1 + \mu_a m_n(t))^2 \cos^2(\omega_p t) \quad (5)$$

Utilisant l'identité trigonométrique suivante :

$$\cos^2(\alpha) = \frac{\cos(2\alpha) + 1}{2} \quad (6)$$

Nous pouvons écrire (5) de la manière suivante :

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

Après des manipulations, on peut écrire (7) comme suit

$$s(t)^2 = \frac{A_p^2}{2} (1 + \mu_a m_n(t))^2 + \frac{A_p^2}{2} (1 + \mu_a m_n(t))^2 \cos(2\omega_p t) \quad (8)$$

Dans le domaine fréquentiel, on a le graphique suivant pour le signal dans (9) :

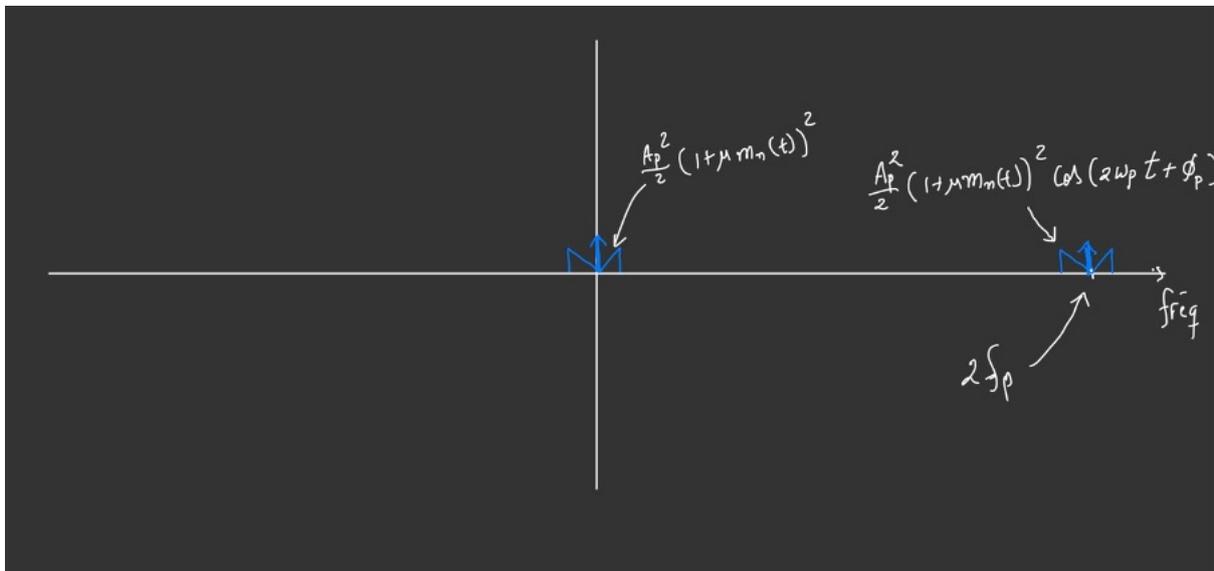


Figure 6. Spectre du signal modulé carré. Les parties bleues représentent le spectre possiblement décalé du message sauf les flèches qui représente la fréquence de la porteuse.

Appelons la fréquence maximale contenue dans le message f_m et rappelons-nous que la fréquence de la porteuse est f_p .

Si l'on filtre passe-bas avec fréquence de coupure entre f_m et $2f_p - f_m$, on obtient

$$s(t)_{\text{filtre}}^2 = \frac{A_p^2}{2} (1 + \mu_a m_n(t))^2 \quad (9)$$

On peut maintenant trouver le message normalisé en le mettant en évidence dans l'équation (9) comme suit :

$$m_n(t) = \frac{\sqrt{2}s(t)_{\text{filtre}}}{A_p \mu_a} - \frac{1}{\mu_a} \quad (10)$$

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 a 3 pour dessiner le spectre d'une signal modulé en amplitude si le message est une sinusoïde.