

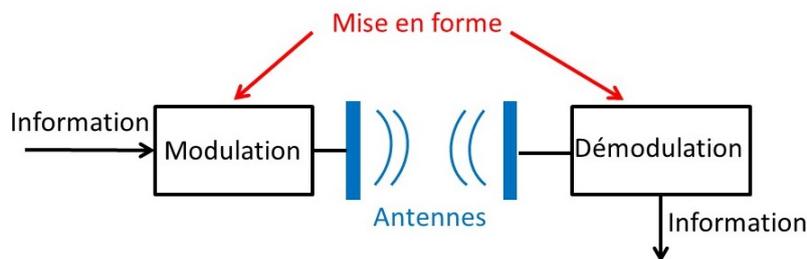
Modulation d'amplitude et de fréquence

| Compétence | En détail | ++ | + | - | -- |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|---|---|----|
| Analyser | Élaborer un protocole pour déterminer l'indice de modulation α (II.2.c) et pour choisir les composants du filtre RC (II.3). | | | | |
| Réaliser | Utiliser un multiplieur. | | | | |
| Réaliser | Obtenir un spectre à l'oscilloscope en respectant le critère de Shannon et en optimisant la résolution spectrale. | | | | |
| Valider | Analyser <u>tous</u> les résultats ou observations, de manière critique. | | | | |
| Communiquer | Écrire tous les protocoles en détails (choix de la fréquence, de l'amplitude...) lorsque ces éléments ne sont pas imposés. | | | | |
| Communiquer | Indiquer les objectifs du TP en introduction du compte-rendu. | | | | |
| Communiquer | Dans un compte-rendu expérimental, écrire le nom de chaque partie (protocole, mesures, etc.). | | | | |

I Pourquoi et comment moduler ?

I.1 Qu'est-ce que la modulation ?

Plutôt que de transmettre directement une information (parler à quelqu'un par exemple), on va coder l'information sonore dans une onde électromagnétique de bien plus haute fréquence que la voix (principe de la radio par exemple).



Le principe est le suivant : une onde électromagnétique sinusoïdale est émise en continu, même en l'absence d'information à transmettre. Cette onde est appelée *la porteuse*. On vient alors modifier de manière dynamique une des propriétés de cette porteuse (son amplitude, sa fréquence ou sa phase à l'origine) afin de coder l'information à transmettre.

À la fin de la chaîne, une fois l'onde reçue, il faut encore effectuer une *démodulation* pour retrouver l'information initialement transmise.

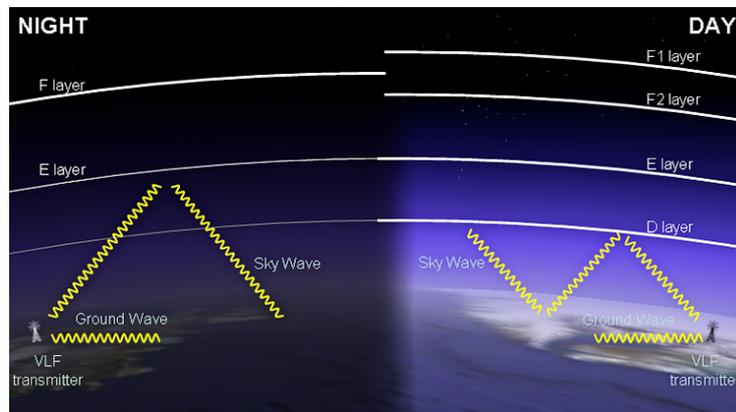
I.2 Intérêt de la modulation

Pourquoi réalise-t-on ces deux étapes de mise en forme du signal (modulation + démodulation) pour transmettre une information ? Il y a trois atouts principaux :

1. La taille d'une antenne de transmission d'un signal est de l'ordre de la longueur d'onde λ de l'onde émise. Utiliser une onde à haute fréquence pour transporter l'information permet donc de diminuer λ et donc de diminuer la taille de l'antenne.

Ordre de grandeur : La modulation de fréquence pour la radio utilise une onde porteuse d'une fréquence de l'ordre de 100 MHz, soit une longueur d'onde $\lambda = \frac{c}{f} \sim 1$ m. Les antennes ont une taille de l'ordre du mètre.

2. En pratique, différentes informations doivent pouvoir être transmises en même temps (différentes radios ou différents téléphones par exemple). Il faut pouvoir séparer chaque information. On attribue alors des canaux (= des bandes de fréquence) différents pour chaque information. Les porteuses ayant des fréquences différentes, les signaux ne se mélangent pas. On parle de multiplexage.
3. On peut adapter la fréquence de l'onde à transmettre au comportement de l'atmosphère. En particulier, nous verrons, lors de l'étude des plasmas (chapitre O3), que l'ionosphère joue le rôle de "miroir" pour des ondes électromagnétiques de fréquence $f < \sim 1$ MHz (la fréquence plasma), ce qui peut permettre d'émettre des ondes à grande distance sur Terre en profitant de la réflexion sur l'ionosphère (cas des radios internationales). On notera aussi que la propagation aura tendance à être moins dispersive à haute fréquence.



I.3 Exemples de modulation

Dans la suite de ce TP nous étudierons deux grands types de modulation : la modulation d'amplitude (AM : amplitude modulation) et la modulation en fréquence (FM : frequency modulation).

Dans tous les cas, notons $m(t)$ l'information à transmettre, appelée la *modulante*. Il s'agit du signal basse fréquence. Soit la porteuse sinusoïdale : $s_p(t) = A_p \cos(2\pi f_p t)$. Il s'agit du signal haute fréquence.

- Dans la modulation d'amplitude, on fait varier l'amplitude de la porteuse en fonction de l'information $m(t)$ à coder.
- Dans la modulation de fréquence, on fait varier la fréquence de la porteuse en fonction de l'information $m(t)$ à coder.

II Modulation d'amplitude (AM) (2h)

J'attends un compte-rendu soigné sur cette partie.

II.1 Multiplication de deux sinusoïdes

Dans un premier temps, supposons que le modulateur soit sinusoïdale : $m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t + \varphi)$. La modulation d'amplitude va consister à multiplier $s_p(t)$ par $m(t)$.

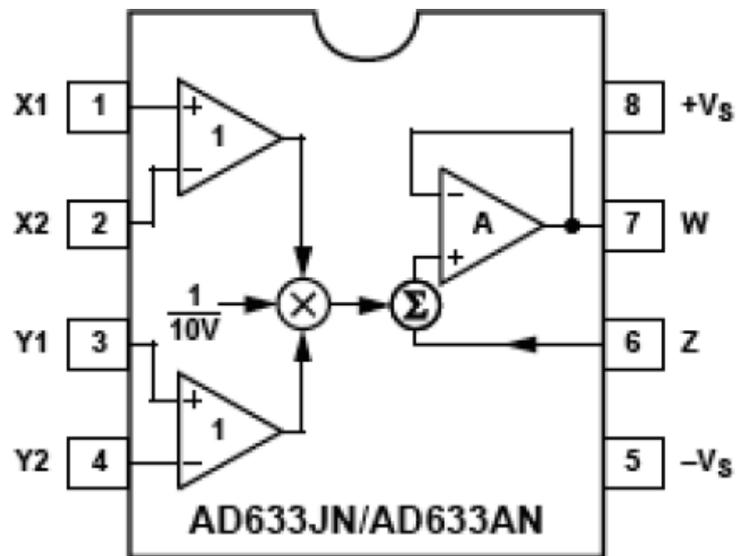
- Représenter graphiquement l'allure temporelle du signal produit

$$u(t) = s_p(t) \times m(t) = A_p A_m \cos(2\pi f_p t) \cos(2\pi f_m t + \varphi)$$

avec $f_p \gg f_m$.

Expérimentalement, on peut réaliser ce signal produit avec un composant électronique appelé multiplieur.

Le multiplieur AD633 possède deux entrées différentielles, $x = X_1 - X_2$ et $y = Y_1 - Y_2$, ainsi qu'une entrée auxiliaire, z . Il s'agit d'un composant actif devant être toujours alimenté en ± 15 V. La sortie vaut $xy/E_0 + z$ avec ici $E_0 = 10$ V. La bande passante est de 1 MHz à -3 dB. Noter que les tensions appliquées sur les entrées ne doivent **pas dépasser 10 V**. On mettra X_2 , Y_2 et z à 0 dans tout le TP.



II.2 Etude du signal modulé dans un cas simple

a Rappel mathématique

$$A \cos(\omega_p t) (1 + \alpha \cos(\omega_m t + \varphi)) = A \cos(\omega_p t) + \frac{A\alpha}{2} (\cos((\omega_p + \omega_m)t + \varphi) + \cos((\omega_p - \omega_m)t - \varphi))$$

b Modulation d'amplitude sans porteuse

Appliquer sur une entrée du multiplieur la porteuse : un signal sinusoïdal de valeur moyenne nulle à la fréquence f_p de 30 kHz (à conserver jusqu'à indication contraire) et sur l'autre entrée du multiplieur le signal modulant : un signal sinusoïdal de valeur moyenne nulle à la fréquence $f_m = 2.999$ kHz.

- Utiliser l'oscilloscope pour visualiser le signal modulant et le signal modulé (sortie du multiplieur) : on effectuera la synchronisation sur le signal modulant (à justifier).
- Visualiser le spectre du signal de sortie et vérifier que l'on peut y isoler des composantes de fréquence $f_p - f_m$ et $f_p + f_m$. Justifier le nom "sans porteuse".

Reprendre l'étude qualitative précédente avec pour signal modulant un signal triangulaire de valeur moyenne nulle.

c Modulation d'amplitude avec porteuse

Prendre comme signal modulant un signal sinusoïdal comportant une composante continue non nulle : $m(t) = E_1(1 + \alpha \cos(2\pi f_m t))$ de fréquence $f_m = 2.999$ kHz.

- Observer le signal modulé en temporel et commenter.
- Proposer désormais un protocole permettant de mesurer l'indice de modulation α à partir de la transformée de Fourier du signal modulé.
- Mettre en œuvre ce protocole et donner la valeur de α .
- Justifier le nom "avec porteuse".

II.3 Démodulation d'amplitude par détection synchrone

Le but est désormais de retrouver le signal modulant à partir du signal modulé (c'est ce que doit faire l'opérateur réceptionnant le signal modulé transmis par antennes).

- Revenir à un signal modulant de valeur moyenne nulle (cas de la modulation sans porteuse).
- Entrer sur un second multiplieur le signal modulé issu du premier multiplieur, et le signal de la porteuse.
- Montrer théoriquement que le signal de sortie du second multiplieur contient, entre autres, le signal de fréquence f_m .
- Proposer puis mettre en œuvre un filtre passe-bas RC pour isoler cette composante f_m .
- Visualiser à l'oscilloscope le signal démodulé en temporel, ainsi qu'en spectral. Commenter.
- Changer la fréquence de la porteuse pour améliorer le résultat de la démodulation, sans changer de filtre passe-bas.

II.4 Etude du signal modulé dans un cas plus complexe

En pratique, une station radio émet de la musique de fréquences audibles via une modulation avec une porteuse à $f_p \sim 100$ MHz. Le rapport entre la fréquence de la porteuse et la fréquence de la modulante est donc bien plus important que dans le cas étudié ci-avant.

Prendre désormais un signal de porteuse de fréquence $f_p = 100$ kHz et de valeur moyenne nulle. Prendre comme signal modulant un signal sinusoïdal de fréquence $f_m = 100$ Hz et de valeur moyenne nulle.

L'objectif de cette partie n'est pas de démoduler, mais uniquement d'observer le spectre du signal modulé.

- Observer le spectre du signal modulé. On mettra en particulier en évidence le fait que l'on peut y isoler des composantes de fréquence $f_p - f_m$ et $f_p + f_m$.

III Modulation de fréquence (FM) (45 min)

Le compte-rendu de TP n'est pas un objectif de cette partie.

Si la modulante $m(t)$ est sinusoïdale, alors l'expression mathématique d'un signal modulé en fréquence est :

$$u(t) = A \cos(2\pi f_p t + \beta \sin(2\pi f_m t))$$

avec $\beta = \frac{\Delta f}{f_m}$ l'indice de modulation. Δf est appelé excursion ou déviation en fréquence.

De cette manière, vous pouvez vérifier que la phase totale du signal modulé $\Phi(t) = 2\pi f_p t + \beta \sin(2\pi f_m t)$ vérifie bien :

$$\frac{d\Phi}{dt} = 2\pi f_p + 2\pi \Delta f \cos(2\pi f_m t) = 2\pi (f_p + m(t))$$

Autrement dit, l'information $m(t)$ est bien codée dans la fréquence instantanée du signal modulé.

III.1 Modulation de fréquence à basse fréquence de modulation

On réalise ici directement le GBF pour produire le signal modulé en fréquence. Sur le canal 1, on peut définir une porteuse de fréquence f_p (touches « waveform » pour choisir la sinusoïde et « parameters » pour la fréquence et l'amplitude) et un signal modulant de type sinusoïdal, avec une fréquence de modulation f_m et une déviation Δf (touche "Modulate", en cochant « on » puis "Type" FM, "Source" Interne, FM frequency, Deviation, "Shape" Sinus).

Dans cette partie, on choisira les paramètres suivants :

- $f_p = 30$ kHz
- $\Delta f = 1$ kHz
- $f_m = 1$ Hz

Réaliser alors les étapes expérimentales suivantes :

- Observer le signal modulé en fréquence en temporel. Commenter.
- Tracer le spectre du signal modulé à l'oscilloscope. Déterminer la plage de fréquences couverte par le signal modulé. Est-ce cohérent avec les paramètres de modulation choisis ?

III.2 Modulation de fréquence à haute fréquence de modulation

On reprend les paramètres précédents, à l'exception de la fréquence de modulation qui vaudra désormais $f_m = 1$ kHz.

- Observer le signal modulé en fréquence en temporel. Commenter.
- Tracer le spectre du signal modulé à l'oscilloscope. Déterminer alors la plage de fréquences où l'amplitude des pics est supérieure à un dixième de l'amplitude maximale.

Cette plage de fréquence correspond à la plage de fréquences contenant 98 % de la puissance du signal total. On l'appelle la bande de Carson du signal modulé en fréquence. Théoriquement, il

a été établi que cette plage est de largeur $2(\Delta f + f_m)$ avec Δf la déviation en fréquence et f_m la fréquence de modulation.

- Vérifier expérimentalement que la largeur de la bande de Carson correspond à la valeur théoriquement attendue.