

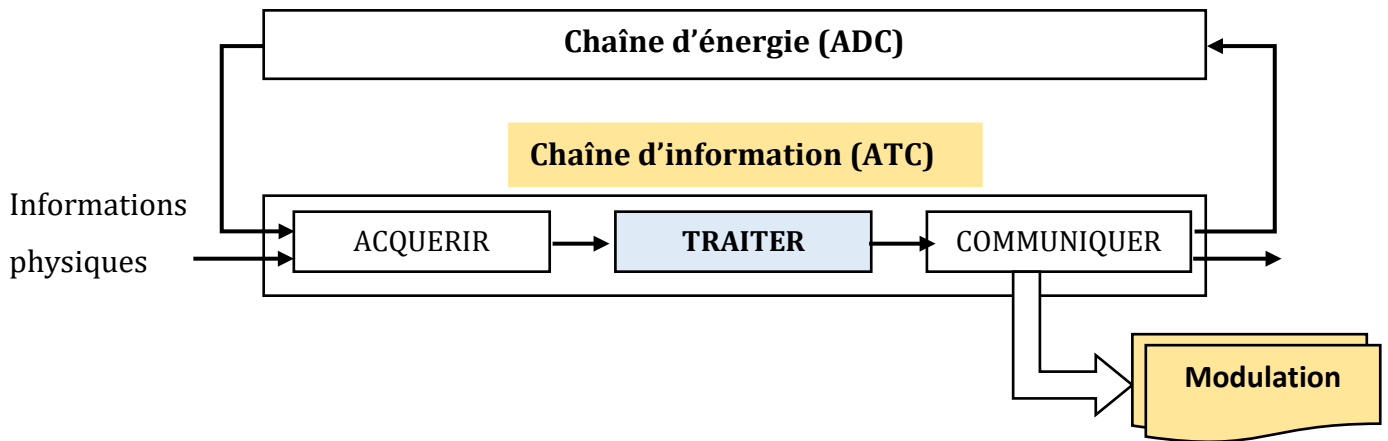
Le grand problème des hommes, c'est la coopération. L'une des clés de la coopération est le partage d'informations. Les télécommunications qui sont l'un des outils fondamentaux pour partager les informations, sont destinées à jouer un rôle majeur dans tous les progrès à venir de l'humanité.

Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...).

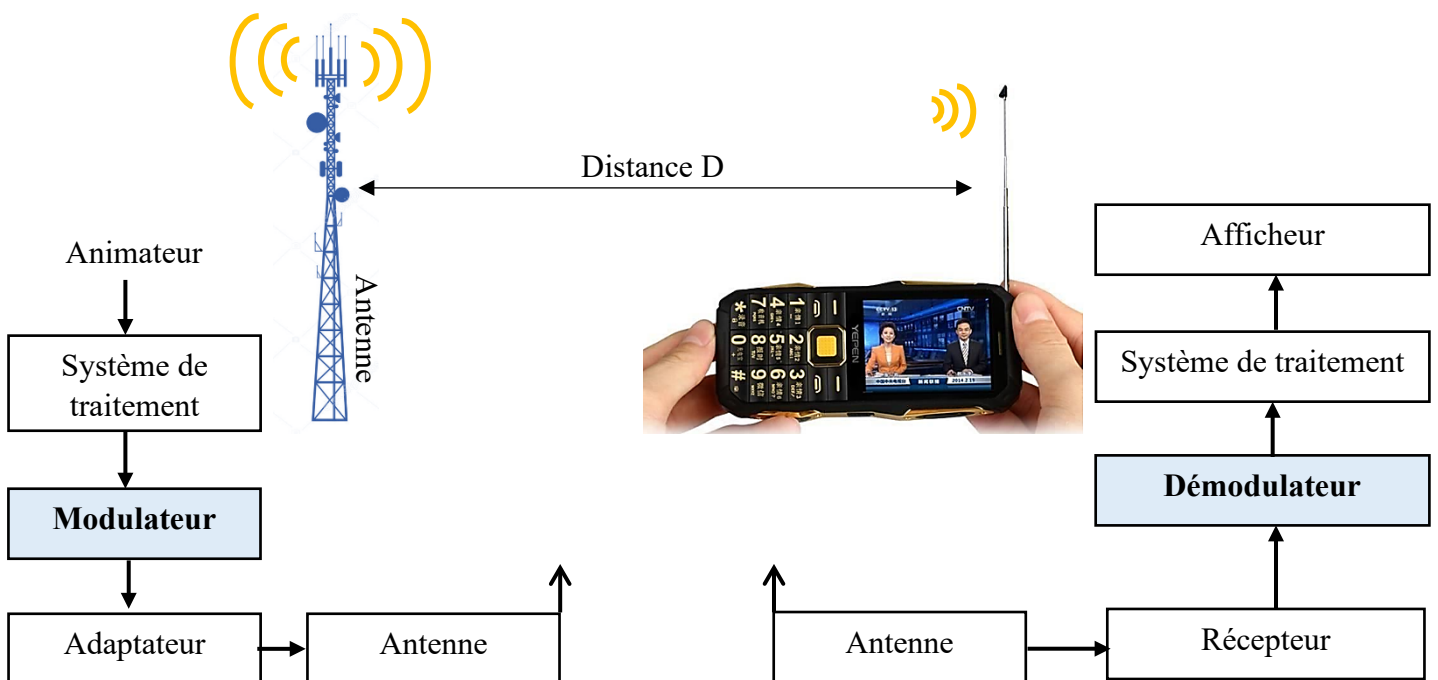
La tâche du système de transmission est d'acheminer le signal de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible.

Le domaine de la modulation des signaux vient du besoin de transmettre un signal physique, support d'une information entre deux points distants.

Dans l'architecture fonctionnelle générique d'un système **pluritechnologique**, la modulation des signaux assure la fonction « **communiquer** » de la chaîne d'Information.



**Exemple : Mini téléphone radio mp3 mp4**

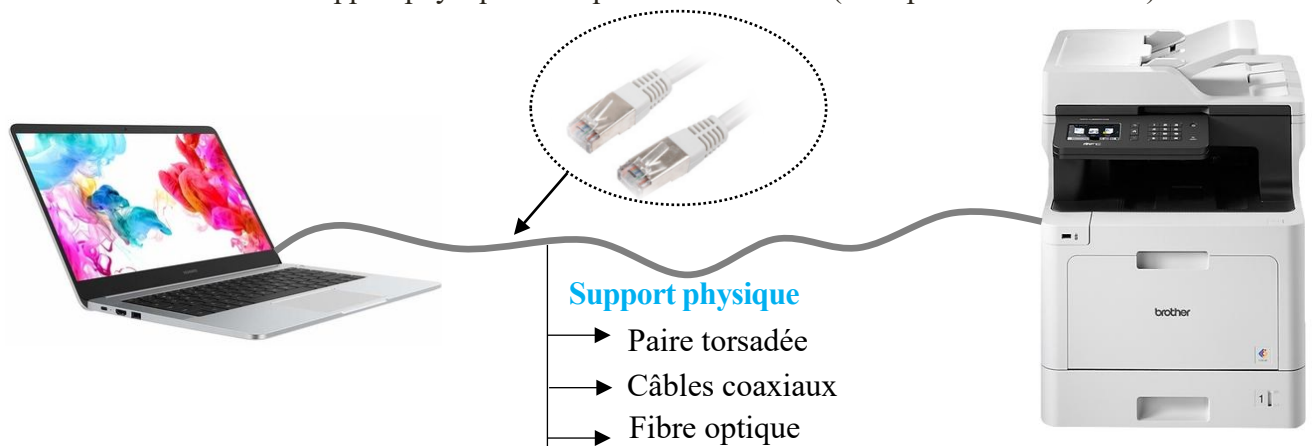


## A- Introduction

La transmission d'un signal va être effectuée soit à l'aide d'un **support physique** de transmission qui peut être un câble métallique (paire bifilaire, câble coaxial) ou une fibre optique, soit en utilisant **une propagation libre d'ondes hertziennes**.

On distingue deux techniques de transmission sont :

- **Transmission en bande de base** : Cette technique est utilisée chaque fois que le milieu de transmission convient au sens des domaines fréquentiels et que les conditions économiques permettent de consacrer un support physique à chaque communication (exemple : réseaux locaux)



- **Transmission par modulation** : cette opération consiste à transposer un signal en un autre signal contenant la même information, mais avec une modification en fréquence du signal. Cette technique est utilisée pour des liaisons de longue distance, les signaux ne sont pas transmis en bande de base. Ils sont transformés en signaux sinusoïdaux

### Alors quelle est l'utilité de la modulation ?

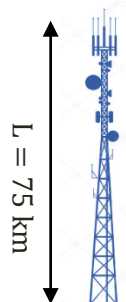
Si on veut transmettre un signal sonore encombrant une plage de fréquence 20hz à 20khz. La transmission directe de ce signal est impossible.

Il serait impossible de distinguer le signal de toute autre signal encombrant la même plage de fréquence. Alors les dimensions de l'antenne étant de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde :  $\lambda = \frac{c}{f}$  avec  $c = 3.10^8 \text{ m/s}$

**Exemple** : pour transmettre un signal  $s(t) = \hat{A} \cdot \sin(2\pi \cdot 1000t)$  alors  $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.10^8}{1000} = 300 \text{ Km}$ , généralement les dimensions de l'antenne s'exprime par :  $L = \frac{\lambda}{4} = 75 \text{ km}$

Cette antenne est irréalisable, même si on peut la construire mais ne sera pas adaptable à toute plage de fréquence.

Pour toutes ses raisons, qu'on fait appelé à la modulation pour modifier les caractéristiques statiques d'un signal porteur de fréquence  $fc$  beaucoup plus élevée.



Même exemple maintenant, si on effectue la modulation avec une fréquence de porteuse

$$f_c = 1 \text{ Mhz}, \text{ alors les dimensions de l'antenne devient : } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{1 \cdot 10^6} = 300 \text{ m}$$

→  $L = \frac{\lambda}{4} = 75 \text{ m}$ , les dimensions de l'antenne deviennent raisonnables



**La modulation** a pour objectif d'adapter le signal à émettre au canal de transmission. Cette opération consiste à modifier un ou plusieurs paramètres d'une onde porteuse  $S_p(t) = A \cos(\omega \cdot t + \varphi)$  centrée sur la bande de fréquence du canal.

## B- Modulation analogique

La modulation analogique consiste à modifier un ou plusieurs paramètres d'une onde porteuse centrée sur la bande de fréquence du canal :  $S_p(t) = A \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi)$ .

Les paramètres modifiables sont :

- **L'amplitude : A** (modulation d'amplitude AM)
- La fréquence :  $f$  (modulation de fréquence FM)
- La phase :  $\varphi$  (modulation de phase PM)

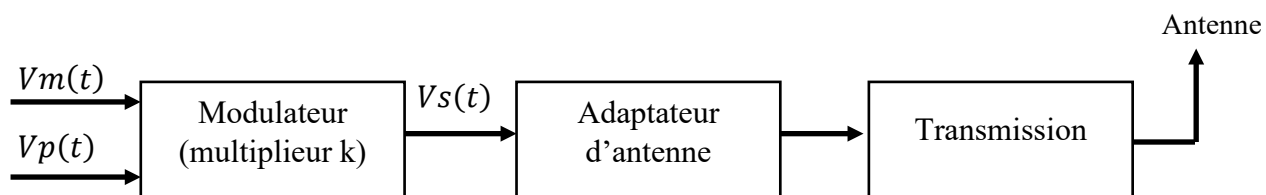
Dans ce cours, on se limite seulement à l'étude de la modulation et démodulation d'amplitude AM. Nous allons voir les types de modulation suivants :

- Modulation d'amplitude sans porteuse **DBSP** (Double Bande Sans Porteuse),
- Modulation d'amplitude avec porteuse **DBAP** (Double Bande Avec Porteuse),

### I. Modulation d'amplitude sans porteuse DBSP (Double Bande Sans Porteuse),

#### 1. Principe de la modulation

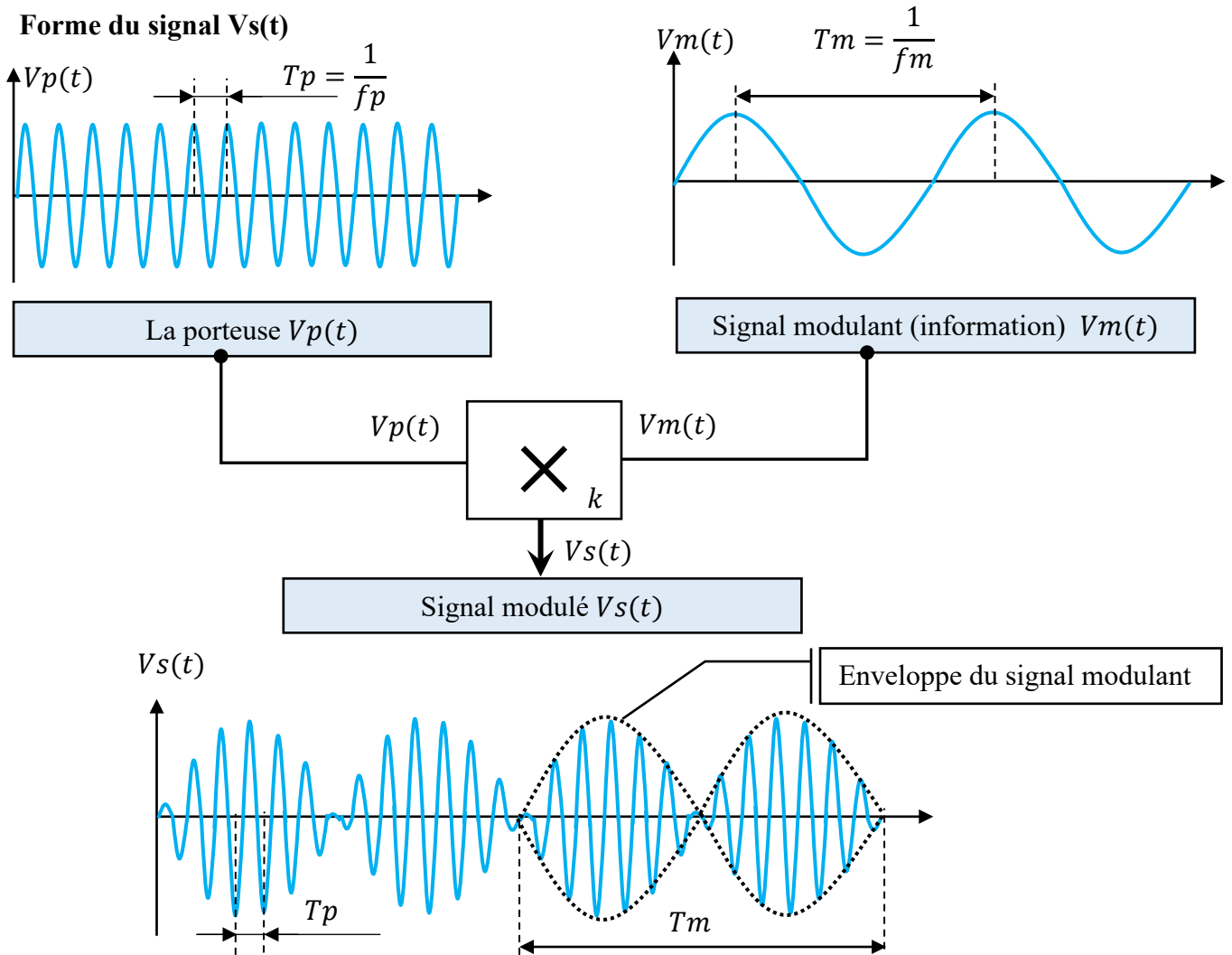
Le signal modulant est appelé :  $V_m(t) = A_m \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t)$ . La porteuse est appelée :  $V_p(t) = A_p \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t)$ .



Le signal modulé en amplitude est le produit de  $V_m(t)$  et  $V_p(t)$  :  $V_s(t) = K \times V_m(t) \times V_p(t)$

⇒ Alors  $V_s(t) = K \times A_m \cdot A_p \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t)$  avec  $k$  : le facteur d'échelle de multiplier

2. Forme du signal  $V_s(t)$



Alors l'information est située dans l'enveloppe extérieur du signal modulé.

3. Spectre du signal modulé  $V_s(t)$

Le signal modulé est exprimé par :

$$\Rightarrow V_s(t) = K \times V_m(t) \times V_p(t)$$

$$\Rightarrow V_s(t) = K \times A_m \cdot A_p \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t)$$

$$\Rightarrow V_s(t) = \frac{K \times A_m \times A_p}{2} [ \cos(2\pi \cdot (f_p + f_m) \cdot t) + \cos(2\pi \cdot (f_p - f_m) \cdot t) ]$$

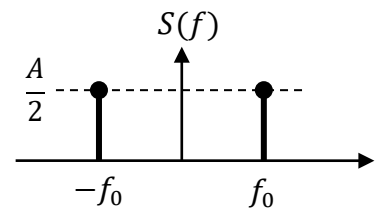
la transformée de Fourier de  $s(t) = A \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t)$ .

$$S(f) = \frac{A}{2} ((\delta(f - f_0) + (\delta(f + f_0))) \text{ avec } \delta : \text{impulsion de Dirac}$$

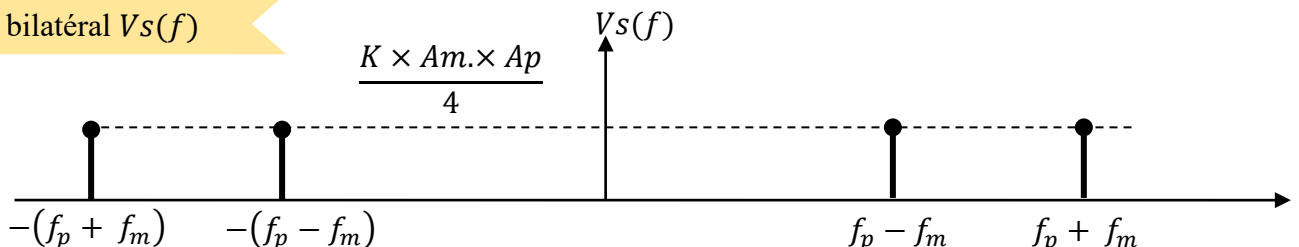
Donc la transformée de Fourier du signal modulé est :

$$V_s(f) = \frac{K \times A_m \times A_p}{4} [ \delta(f - (f_p + f_m)) + \delta(f + (f_p + f_m)) + \delta(f - (f_p - f_m)) + \delta(f + (f_p - f_m)) ]$$

**Rappel :**  
 $\cos(a) \cdot \cos(b) = \frac{1}{2} (\cos(a + b) + \cos(a - b))$

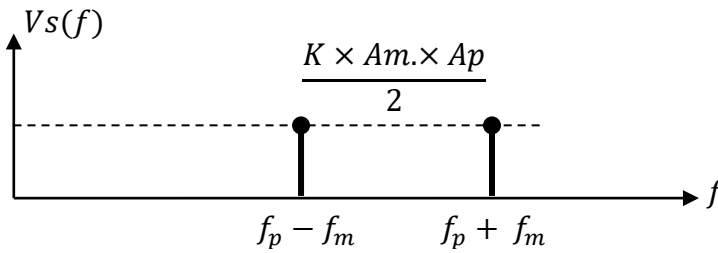


spectre bilatéral  $V_s(f)$

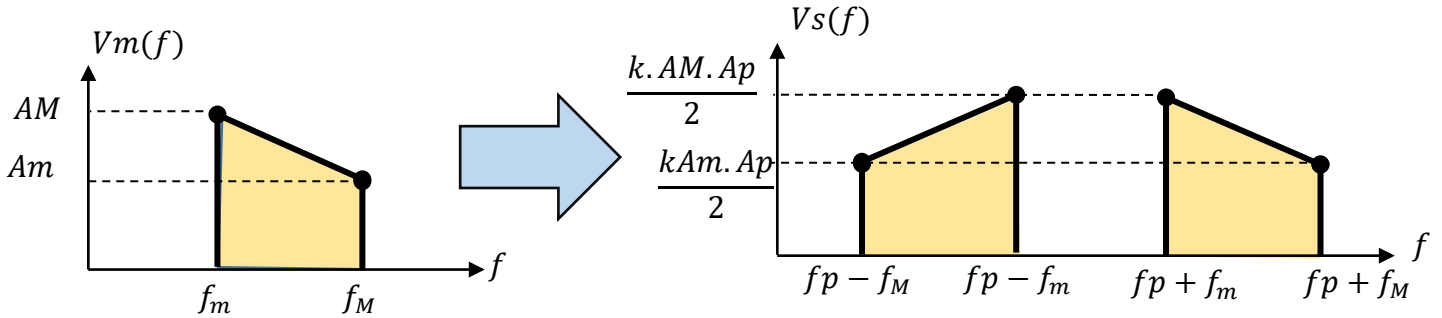


spectre unilatéral

$$V_s(f) = \frac{K \times A_m \times A_p}{4} \left[ \delta(f - (f_p + f_m)) + \delta(f - (f_p - f_m)) \right]$$

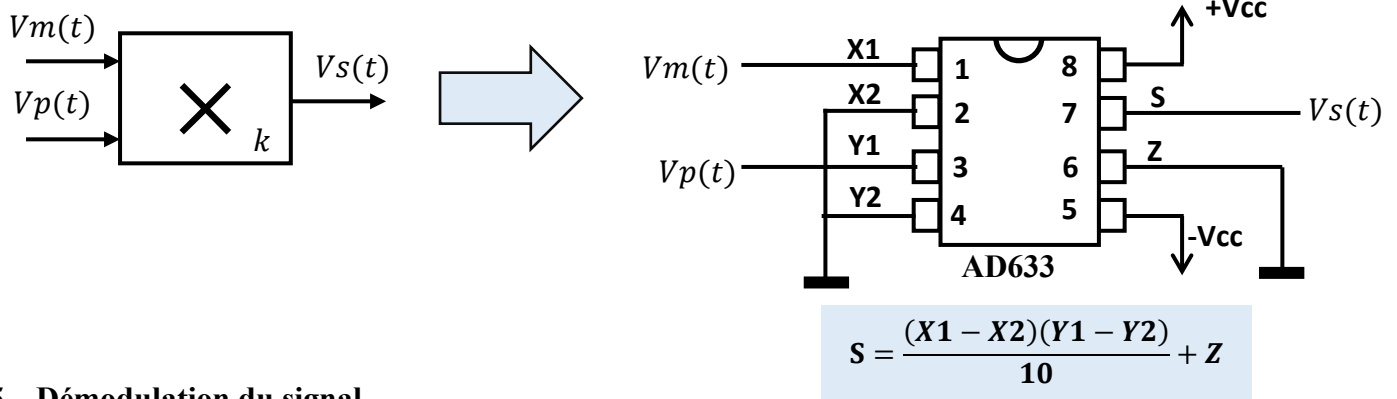


Dans le cas général où le spectre de  $V_m(t)$  est quelconque :



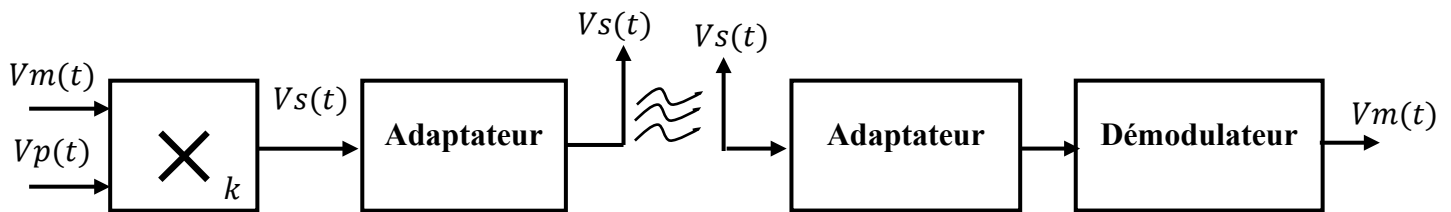
#### 4. Production du signal

Le modulateur peut être réalisé à l'aide du multiplieur analogique : AD633 ;

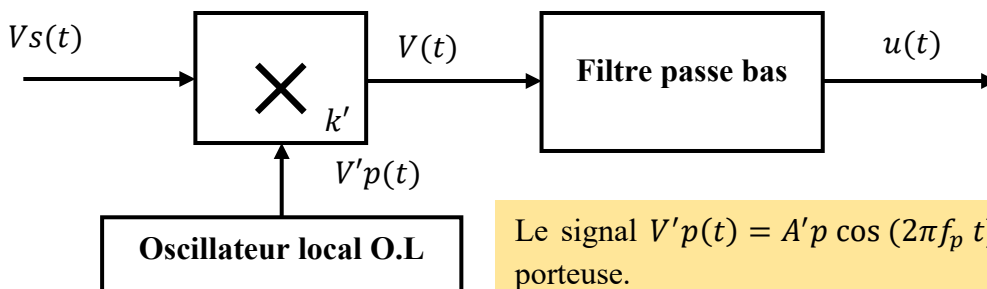


#### 5. Démodulation du signal

La démodulation consiste à restituer le signal à transmettre  $V_m(t)$  à partir du signal modulé  $V_s(t)$  :



Dans le cas d'une modulation sans porteuse, pour extraire  $V_m(t)$ , on réalise le démodulateur suivant :



Le signal  $V'p(t) = A'p \cos(2\pi f_p t)$  est un signal image de la porteuse.

Le signal  $V(t)$  est :

$$\Rightarrow V(t) = k'.Vs(t).V'p(t) \quad \text{Avec } Vs(t) = K \times Am. Ap \cos(2\pi. f_m. t) . \cos(2\pi. f_p. t)$$

$$\Rightarrow V(t) = k'.K \times Am. Ap. A'p. \cos(2\pi. f_m. t) \cos(2\pi. f_p. t)^2$$

on note :  $A = k'.K \times Am. Ap. A'p$

$$\Rightarrow V(t) = \frac{A}{2}. \cos(2\pi. f_m. t) (1 + \cos(2\pi. 2f_p. t))$$

$$\Rightarrow V(t) = \frac{A}{2}. \cos(2\pi. f_m. t) + \frac{A}{2} \cos(2\pi. f_m. t) . \cos(2\pi. 2f_p. t)$$

$$\Rightarrow V(t) = \underbrace{\frac{A}{2}. \cos(2\pi. f_m. t)}_{\text{La composante utile A1}} + \underbrace{\frac{A}{4} \cos(2\pi. (2f_p - f_m). t) + \frac{A}{4} \cos(2\pi. (2f_p + f_m). t)}_{\text{La composante haute fréquence A2}}$$

**La composante utile A1  
(information)**

**La composante haute fréquence A2**

Pour restituer le signal modulant, on utilise **un filtre passe bas** qui va atténuer les composantes au-dessus de la fréquence  $F_m$ . L'atténuation  $A_1$  est faible (Ex 0.5 dB) alors que l'atténuation  $A_2$  est élevée (Ex 60 dB).

alors le signal de la sortie du filtre :  $u(t) = \frac{A}{2}. \cos(2\pi. f_m. t) \rightarrow$  image de l'information transmise.

### **Remarque :**

Ce démodulateur présente l'inconvénient de nécessiter à la réception un oscillateur local délivrant exactement la même fréquence que la porteuse est de déphasage constant par rapport au signal porteur.

On réalité les deux signaux  $Vp(t)$  et  $V'p(t)$  n'ont pas la même référence, ce qui rend impossible de contrôler le déphasage entre eux.

On note  $\varphi$  le déphasage entre la porteuse et le signal d'oscillateur local, alors l'expression de  $V'p(t)$  devient:  $V'p(t) = A'p \cos(2\pi f_p t + \varphi)$

Le signal  $V(t)$  est :

$$\Rightarrow V(t) = k'.Vs(t).V'p(t) \quad \text{Avec } Vs(t) = K \times Am. Ap \cos(2\pi. f_m. t) . \cos(2\pi. f_p. t)$$

$$\Rightarrow V(t) = k'.K \times Am. Ap. A'p. \cos(2\pi. f_m. t) \cos(2\pi. f_p. t) \cos(2\pi. f_p. t - \varphi)$$

on note :  $B = k'.K \times Am. Ap. A'p$

$$\Rightarrow V(t) = \frac{B}{2}. \cos(2\pi. f_m. t) (\cos(\varphi) + \cos(2\pi. 2f_p. t - \varphi))$$

$$\Rightarrow V(t) = \frac{B}{2}. \cos(\varphi) . \cos(2\pi. f_m. t) + \frac{B}{2} \cos(2\pi. f_m. t) . \cos(2\pi. 2f_p. t - \varphi)$$

$$\Rightarrow V(t) = \frac{B}{2}. \cos(\varphi) . \cos(2\pi. f_m. t) + \frac{B}{4} \cos(2\pi. (2f_p - f_m). t - \varphi) + \frac{B}{4} \cos(2\pi. (2f_p + f_m). t - \varphi)$$

alors le signal de la sortie du filtre :  $u(t) = \frac{B}{2}. \cos(\varphi) . \cos(2\pi. f_m. t)$

si  $\varphi = Cte \rightarrow u(t)$  est une image de  $Vm(t)$  (le signal modulant)

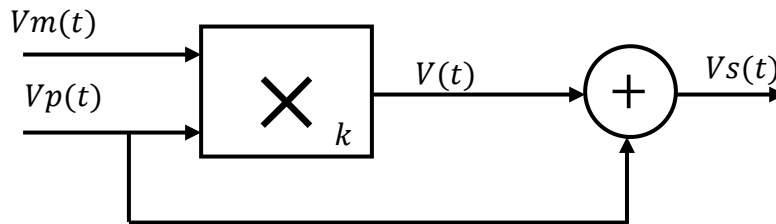
en réalité  $\varphi \neq Cte \rightarrow$  modulation résiduelle (local) **est difficile à extraire le signal informatif** ( $Vm(t)$ ) à cause que **la porteuse et l'oscillateur local ne sont pas de même origine.**

**II. Modulation d'amplitude avec porteuse DBAP (Double Bande Avec Porteuse),**

Parce que le signal modulé en amplitude du type double bande avec porteuse est plus facile à démoduler avec un circuit simple comme un démodulateur d'enveloppe à diode, ce type de modulation était préférée à celle sans porteuse.

**1. Principe de modulation**

Le signal modulant est appelé :  $V_m(t) = A_m \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t)$ . La porteuse est appelée :  $V_p(t) = A_p \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t)$ .



Le signal modulé en amplitude est le produit de  $V_m(t)$  et  $V_p(t)$  :

$$V_s(t) = V_p(t) + K \times V_m(t) \times V_p(t)$$

⇒ Alors  $V_s(t) = K \times A_m \cdot A_p \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t) + A_p \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t)$

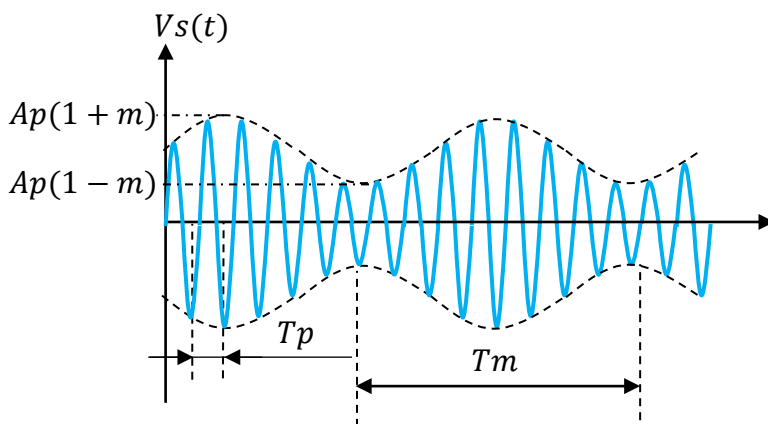
Avec  $k$  : le facteur d'échelle de multiplieur

⇒  $V_s(t) = A_p ( 1 + K \cdot A_m \cdot \cos 2\pi \cdot f_m \cdot t ) \cdot \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t)$

Le signal peut se mettre sous la forme :  $V_s(t) = A_p ( 1 + m \cdot \cos 2\pi \cdot f_m \cdot t ) \cdot \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t)$

avec :  $m = K \cdot A_m$  est appelé l'indice de modulation.

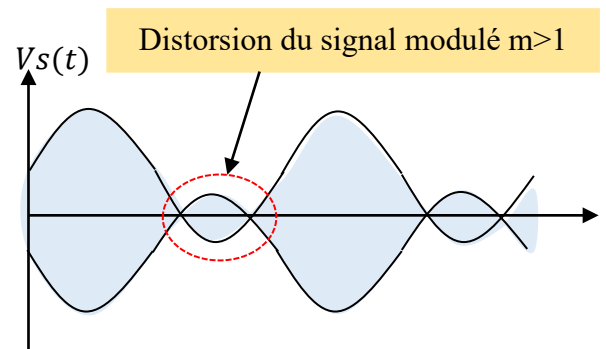
**2. La forme du signal**



Pour ne pas avoir la distorsion du signal modulé, il faut :

⇒  $A_p(1 - m) > 0$

Donc l'indice de modulation reste toujours  $m < 1$



### 3. Le spectre du signal modulé

Le signal modulé s'exprime :  $V_s(t) = A_p (1 + m \cdot \cos 2\pi \cdot f_m \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t)$

$$\Rightarrow V_s(t) = A_p (1 + m \cdot \cos 2\pi \cdot f_m \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t)$$

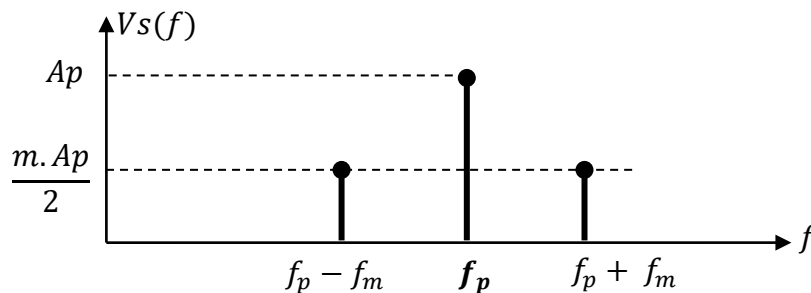
$$\Rightarrow V_s(t) = A_p \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t) + m \cdot A_p \cdot \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t)$$

$$\Rightarrow V_s(t) = A_p \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t) + \frac{m \cdot A_p}{2} \cdot \cos(2\pi \cdot (f_p - f_m) \cdot t) + \frac{m \cdot A_p}{2} \cdot \cos(2\pi \cdot (f_p + f_m) \cdot t)$$

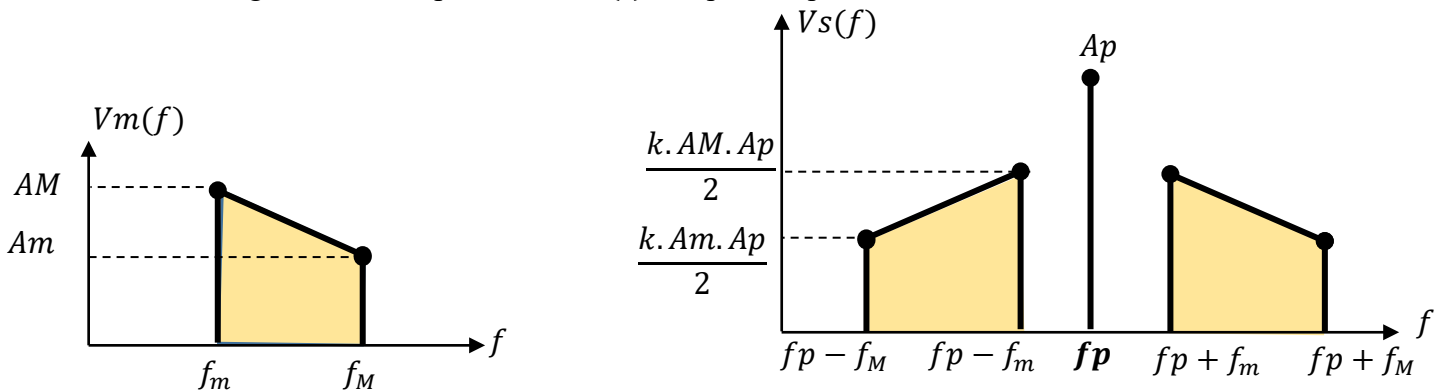
La transformé  $V_s(f)$  pour une représentation unilatérale s'écrit :

$$V_s(f) = A_p \cdot \delta(f - f_p) + \frac{m \cdot A_p}{2} \delta(f - (f_p - f_m)) + \frac{m \cdot A_p}{2} \delta(f - (f_p + f_m))$$

Donc le spectre du signal modulé est le suivant :

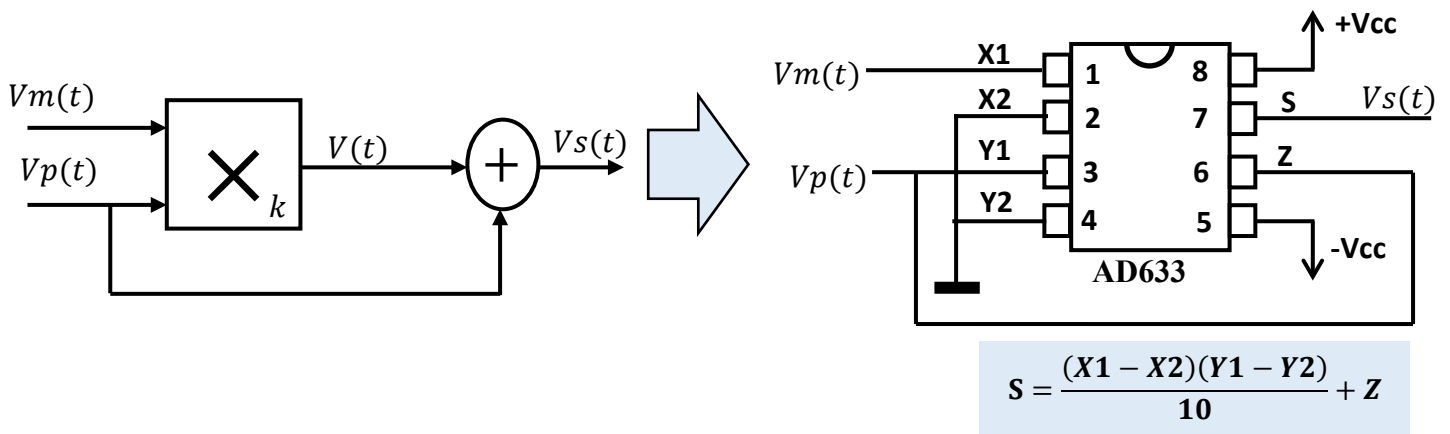


Dans le cas général où le spectre de  $V_m(t)$  est quelconque :



### 4. Production du signal

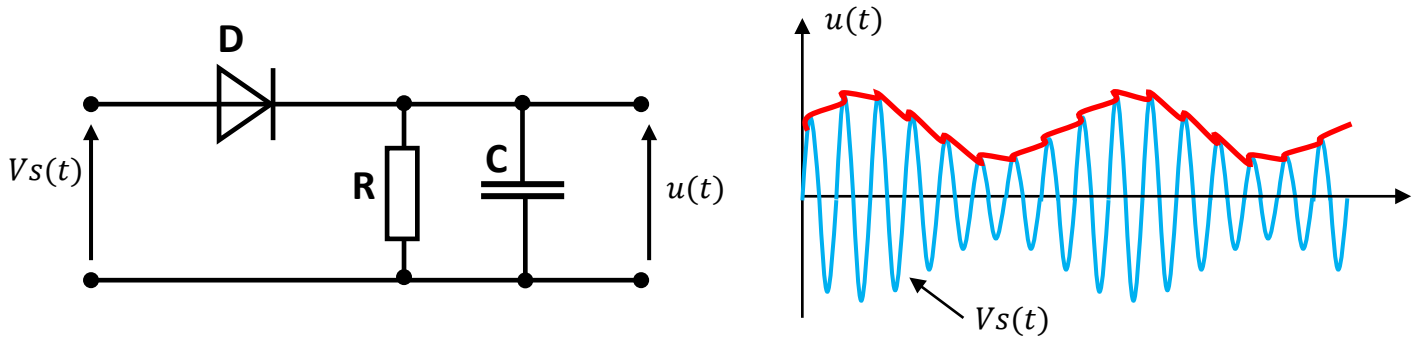
Le modulateur peut être réalisé à l'aide du multiplieur analogique : AD633 ;



### 5. Démodulateur du signal

#### 5.1. Démodulation d'enveloppe à diode

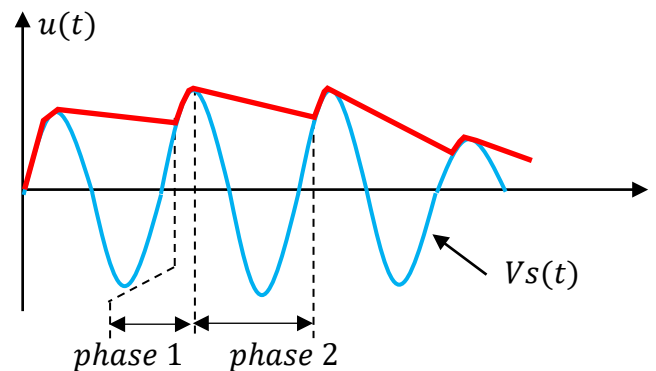
Le principe consiste à utiliser une diode pour bloquer la partie négative du signal modulé en amplitude. Le filtre RC élimine la porteuse et sa constante de temps doit être judicieusement choisie.



Le signal DBAP est donnée par l'expression suivante :

On distingue 2 phases :

- Phase 1 : charge de C
- Phase 2 : décharge de C dans R.



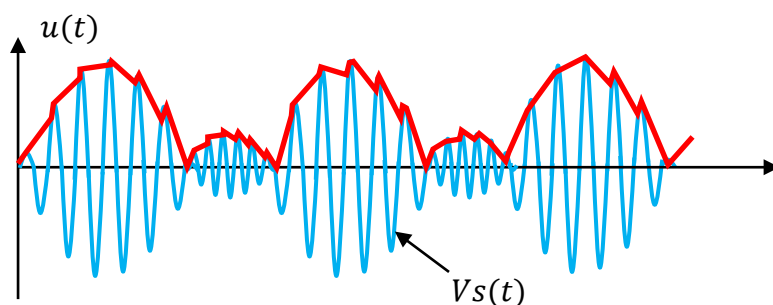
A chaque alternance, la capacité est chargée jusqu'à la valeur max de  $V_s(t)$ , dès que  $V_s(t)$  devient inférieure à cette valeur max, la diode se bloque et la capacité se décharge dans R avec la constante de temps  $\tau = RC$ . Si  $\tau$  est trop grande, la décharge est trop lente et la tension de sortie  $u(t)$  ne suit pas l'enveloppe. De la même façon, si  $\tau$  est trop faible la décharge est trop rapide, et là aussi on ne suit pas l'enveloppe. Donc il faut choisir  $\tau$  suffisamment grande pour ne pas suivre la HF ( $\tau > T_c = \frac{1}{f_c}$ ) et suffisamment faible pour pouvoir suivre la BF ( $\tau < T_m = \frac{1}{f_m}$ ).

Au final, la constante de temps RC est encadrée par :

$$\frac{1}{2\pi f_p} \ll R.C < \frac{\sqrt{1 - m^2}}{m} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f_m}$$



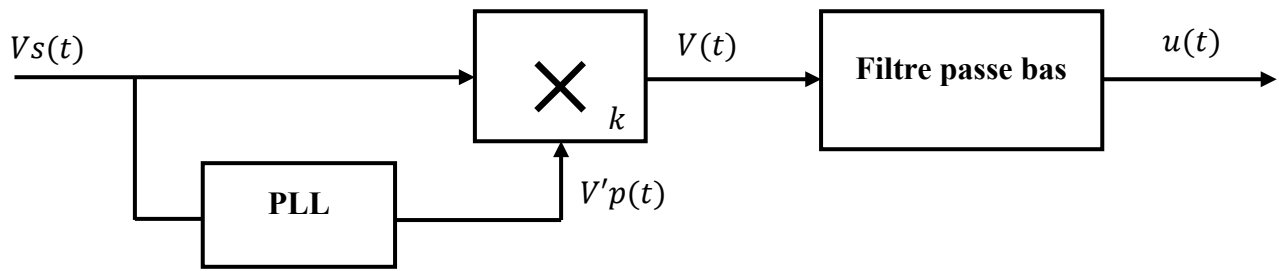
Pour  $m$  tendant vers 1, la démodulation devient difficile. Le circuit ne démodule pas si  $m > 1$  car la diode écrête la partie négative.



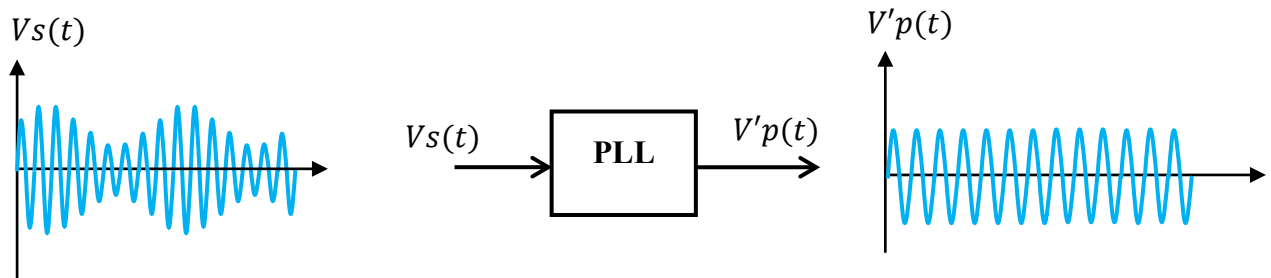
La démodulation synchrone que nous décrivons au paragraphe suivant présente moins de distorsions et la démodulation se fait même si  $m > 1$ .

### 5.2. Démodulation synchrone

Le principe est décrit par le schéma bloc en bas :



La démodulation synchrone démodule le signal même si  $m > 1$ . La difficulté de ce montage est de restituer, coté réception, la porteuse car celle-ci n'est pas transmise. Il est alors utilisé une **boucle à verrouillage de phase (PLL)**.



$$V_s(t) = A_p (1 + m \cdot \cos 2\pi \cdot f_m \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t)$$

$$V'_p(t) = A'p \cdot \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t + \varphi_0)$$

Alors maintenant PLL est synchronisé en fréquence et en phase  $\varphi_0 = Cte$

Le signal  $V(t)$  est :

$$\Rightarrow V(t) = k' \cdot V_s(t) \cdot V'_p(t) \text{ Avec } V_s(t) = A_p (1 + m \cdot \cos 2\pi \cdot f_m \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t)$$

$$\Rightarrow V(t) = k' \cdot A_p \cdot A'p (1 + m \cdot \cos 2\pi \cdot f_m \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t) \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t + \varphi_0)$$

on note :  $A = k' \cdot A_p \cdot A'p'$ .

$$\Rightarrow V(t) = \frac{A}{2} \cdot (1 + m \cdot \cos 2\pi \cdot f_m \cdot t) (\cos(\varphi) + \cos(2\pi \cdot 2f_p \cdot t + \varphi))$$

$$\Rightarrow V(t) = \underbrace{\frac{A}{2} \cdot \cos(\varphi) (1 + m \cdot \cos 2\pi \cdot f_m \cdot t)}_{\text{La composante utile A1 (information)}} + \underbrace{\frac{A}{2} \cdot (1 + m \cdot \cos 2\pi \cdot f_m \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot 2f_p \cdot t + \varphi)}_{\text{La composante haute fréquence A2}}$$

Pour restituer le signal modulant, on utilise **un filtre passe bas** qui va atténuer les composantes au-dessus de la fréquence  $F_m$ . L'atténuation  $A1$  est faible (Ex 0.5 dB) alors que l'atténuation  $A2$  est élevée (Ex 60 dB).

alors le signal de la sortie du filtre :  $u(t) = \frac{A}{2} \cdot \cos(\varphi) (1 + m \cdot \cos 2\pi \cdot f_m \cdot t)$

On a maintenant  $\varphi = Cte \rightarrow u(t)$  est une image de  $V_m(t)$  (le signal modulant)

## C- Modulation numérique

Le principal avantage de la modulation numérique par rapport à la transmission analogique réside dans le fait qu'elle offre une plus grande fidélité. Avec la modulation analogique, tout bruit ou toute interférence qui tombe dans la largeur de bande de fréquence donnée se mélange avec le signal réel.

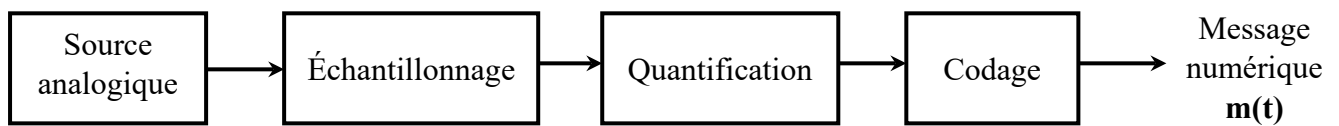
Bien qu'il existe un certain nombre de moyens d'atténuer le bruit,

Une modulation numérique offre les avantages suivants :

- Immunité au bruit
- Optimisation de la bande passante
- Facilité de traitement de l'information

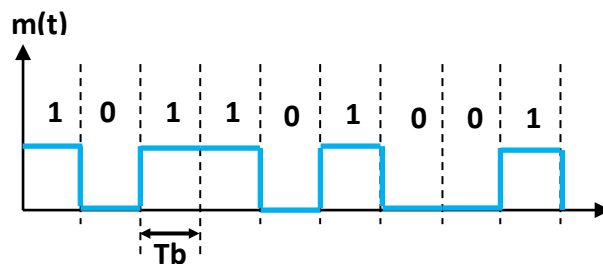
### 1- Définition et appellations

Générateur d'un message numérique est composé de :



Soit un message numérique  $m = 101101001$

Donc le signal  $m(t)$  est le suivant :



$T_b$  : le temps de bit (en s)

- le débit binaire  $D$  est défini par :  $D = \frac{1}{T_b}$  en bit par second ( b/s)
- rapidité de modulation est le nombre d'états transmis sur le canal :  $R = \frac{D}{\log_2 v}$  (en bauds)

Avec  $v$  est la valence.

### Exercice :

On considère une ligne téléphonique de bande passante 300hz à 3khz.

On transmet un signal avec rapidité de modulation de 1200 bauds et une valence de 8.

- 1- Déterminer le débit binaire disponible sur la ligne ?
- 2- Déterminer la rapidité de modulation pour un canal de transmission ait un débit  $D=2400$  bits/s. si les signaux transmis sont binaires.

### Réponse :

- 1- le débit binaire est défini :  $D = R \cdot \log_2 v = 1200 \cdot \log_2 8 = 3600 \text{ b/s} = 3.51 \text{ Kb/s}$
- 2- la rapidité de modulation est défini par :  $R = \frac{D}{\log_2 v}$  avec  $v=2$  car les signaux transmis sont binaire donc :  $R=2400$  bauds

## 2- Type de modulation

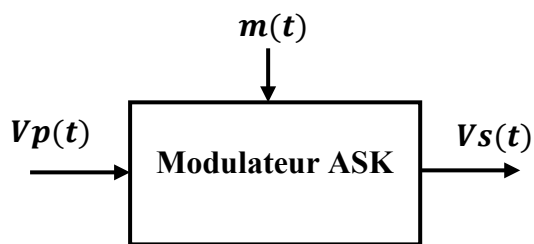
Les types de modulation les plus fréquemment rencontrés sont les suivants :

- Modulation ASK (Amplitude Shift Keying ASK) : Modulation numérique d'amplitude.
- Modulation FSK (Frequency Shift Keying FSK) : modulation numérique de fréquence.
- Modulation PSK (Phase Shift Keying PSK) : modulation numérique de phase
- Modulation QAM (Quadrature Amplitude modulation QAM) : modulation d'amplitude de deux porteuse en quadrature

Dans ce cours on se limite à l'étude de la modulation **ASK, FSK et PSK**

## 3- Modulation numérique d'amplitude

Un modulateur numérique d'amplitude appelé aussi ASK (Amplitude Shift Keying ASK) ou modulation par déplacement d'amplitude dans lequel l'information est située dans l'amplitude du signal modulé.



$m(t)$  : le signal modulant (information)

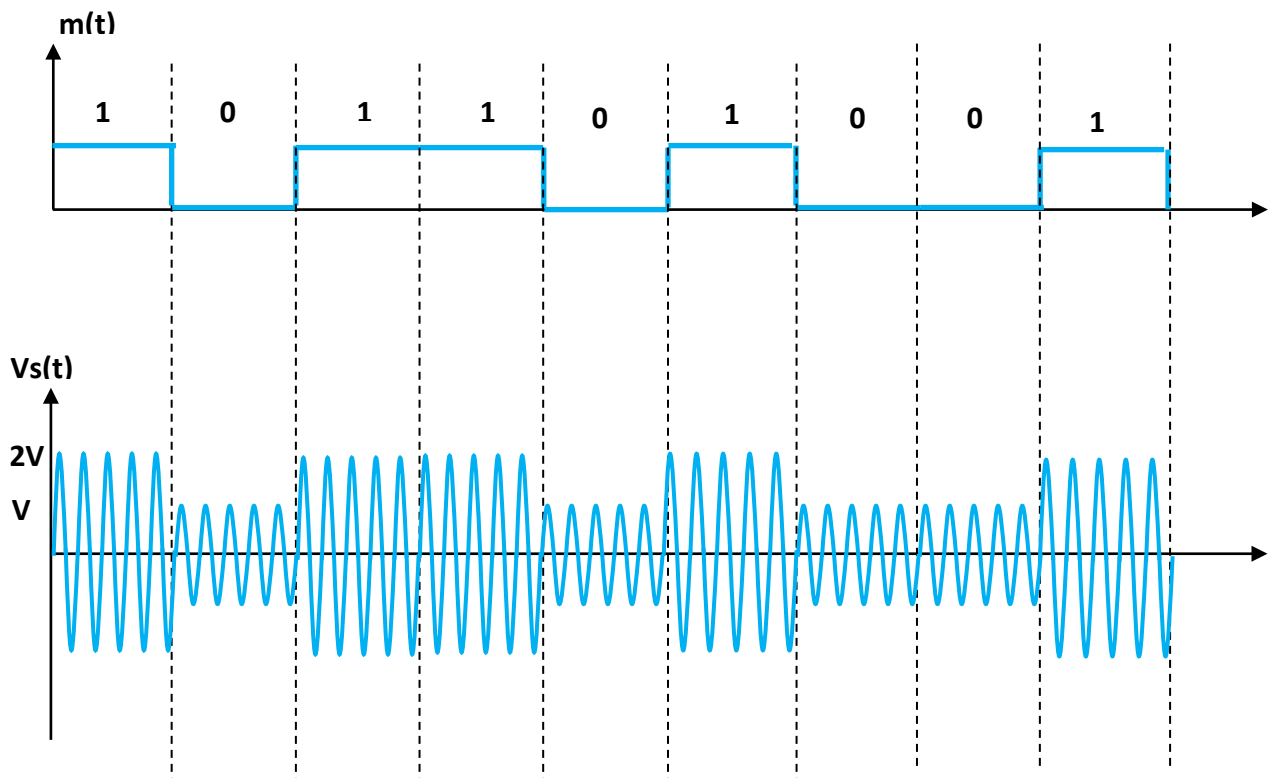
$Vp(t)$  : la porteuse

$Vs(t)$  : le signal modulé

Le signal modulé alors est exprimé par :

$$Vp(t) = V(1 + m(t)). \cos(2\pi. fp. t)$$

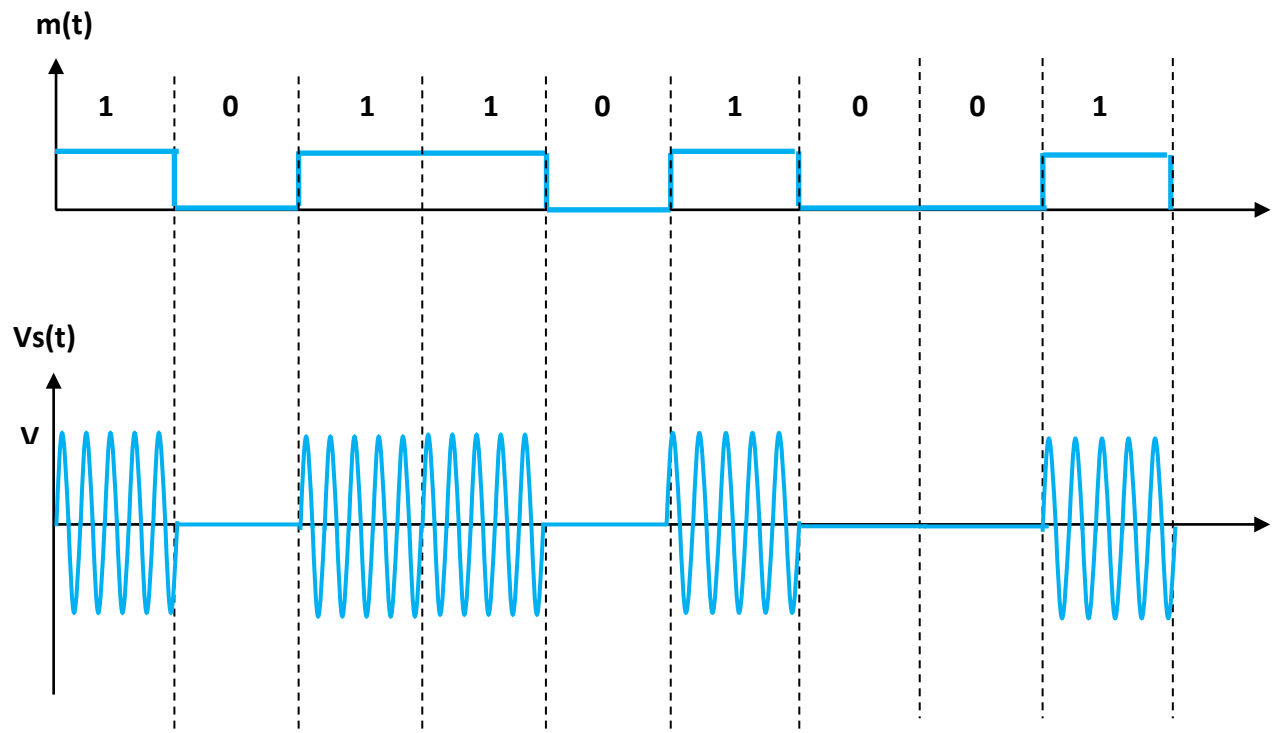
Supposons que le message à transmettre  $m(t) = 101101001$



Le cas particulier de ce type de modulation numérique est la modulation toute ou rien OOK (ON OFF Keying), dans lequel le signal modulé soit la porteuse ou rien :

$$V_p(t) = V \cdot m(t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t)$$

Le signal modulé alors est exprimer par :



○ Exemple : Émetteur /récepteur radio fréquence Aurel

Émetteur	Récepteur
<p><b>Emetteur Aurel TX433 SAW</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fréquence : 433.92 Mhz</li> <li>▪ Puissance : 10 mW (10 dbm)</li> <li>▪ Modulateur : type OOK</li> </ul>	<p><b>Récepteur Aurel BCNB3V3</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fréquence : 433.92 Mhz</li> <li>▪ Sensibilité : 5 μV = -93 dBm</li> <li>▪ Résistance d'entrée : 50 Ω</li> <li>▪ Démodulateur : détecteur d'enveloppe</li> </ul>

Finalement, ce type de modulation est simple à réaliser mais est assez peu employé pour M>2 car ses performances sont moins bonnes que celles d'autres modulations, notamment pour sa résistance au bruit. Elle est utilisée dans la commande sans fils des jouets.

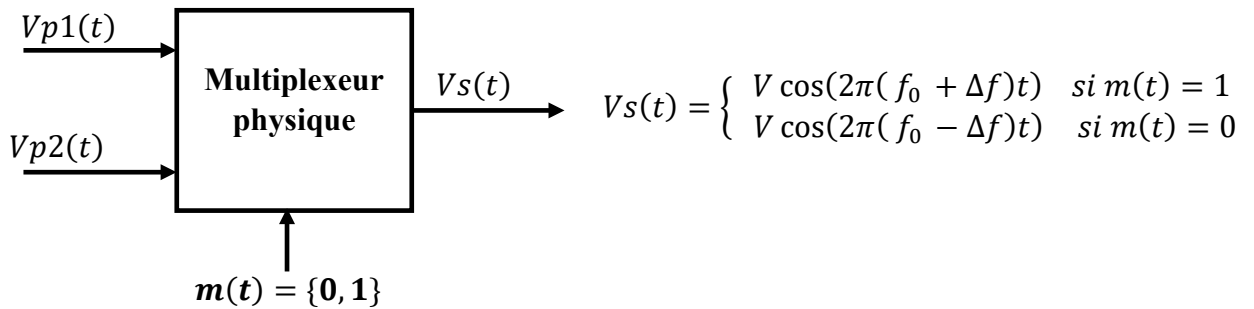
### 4- Modulation numérique de fréquence

Appelée aussi FSK (Frequency Shift Keying) c-à-dire la modulation par déplacement de fréquence, le signal modulé s'écrit sous la forme :

$$V_s(t) = V \cos((2\pi f_0 + m(t) \cdot \Delta f)t)$$

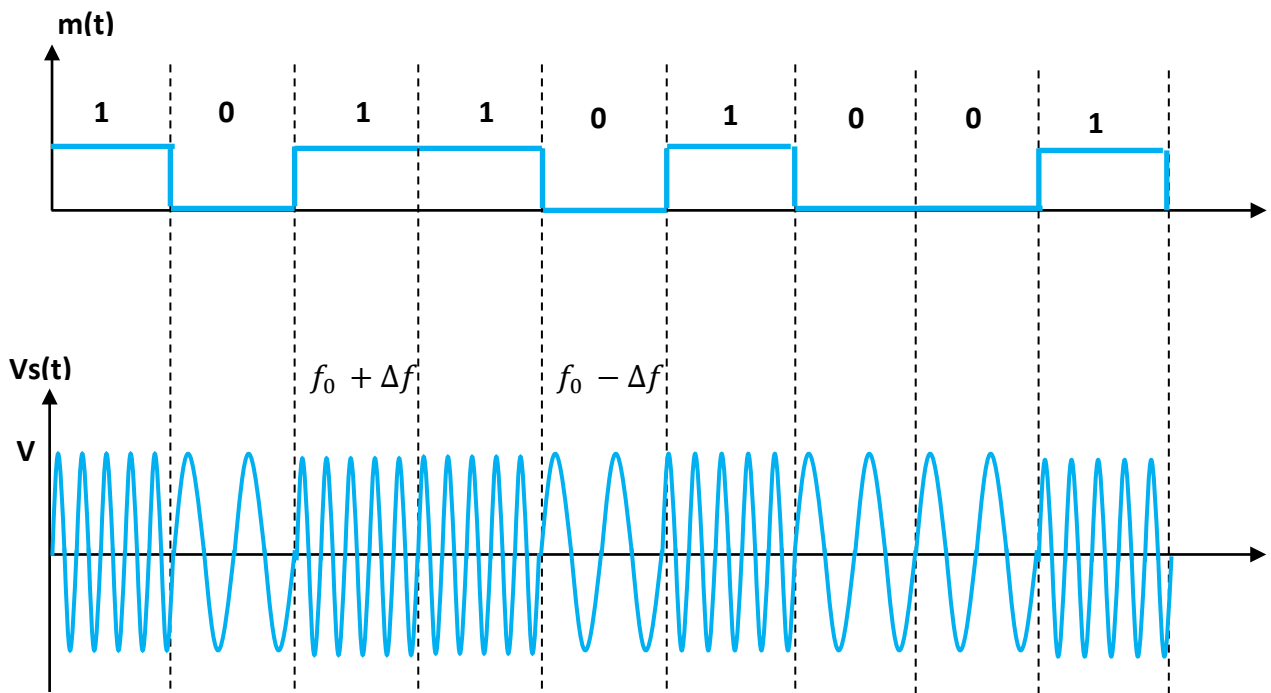
On se limite une **transmission binaire FSK-2**, donc on ne transmet que de 0 ou bien 1 si  $f_i$  est la fréquence instantanée du signal :

- $f_i = f_0 + \Delta f$  si  $m(t) = 1$
- $f_i = f_0 - \Delta f$  si  $m(t) = 0$  c-à-dire (-1)



On définit l'indice de modulation :  $m = \frac{\Delta f}{f_0}$  avec  $\Delta f$  : la déviation de fréquence  
 $f_0$  : la fréquence de transmission (porteuse)

Supposons que le message à transmettre  $m(t) = 101101001$



#### Exemples d'utilisation :

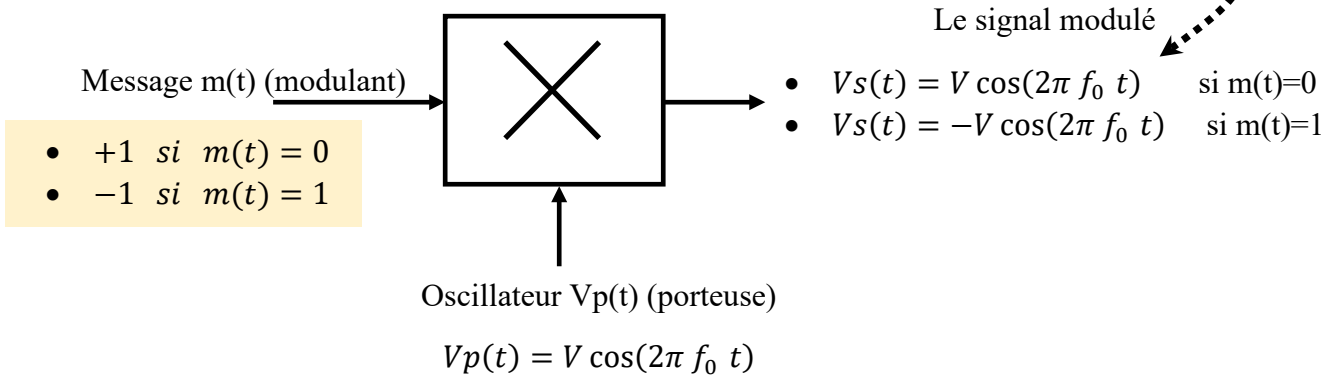
- La MDF à phase discontinue est fréquemment utilisée dans les systèmes de transmission de données sur voie téléphoniques (MODEM).
- Un cas particulier de la FSK à phase continue est la modulation GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) qui a été choisie pour le système radio cellulaire.

### 5- Modulation numérique de phase

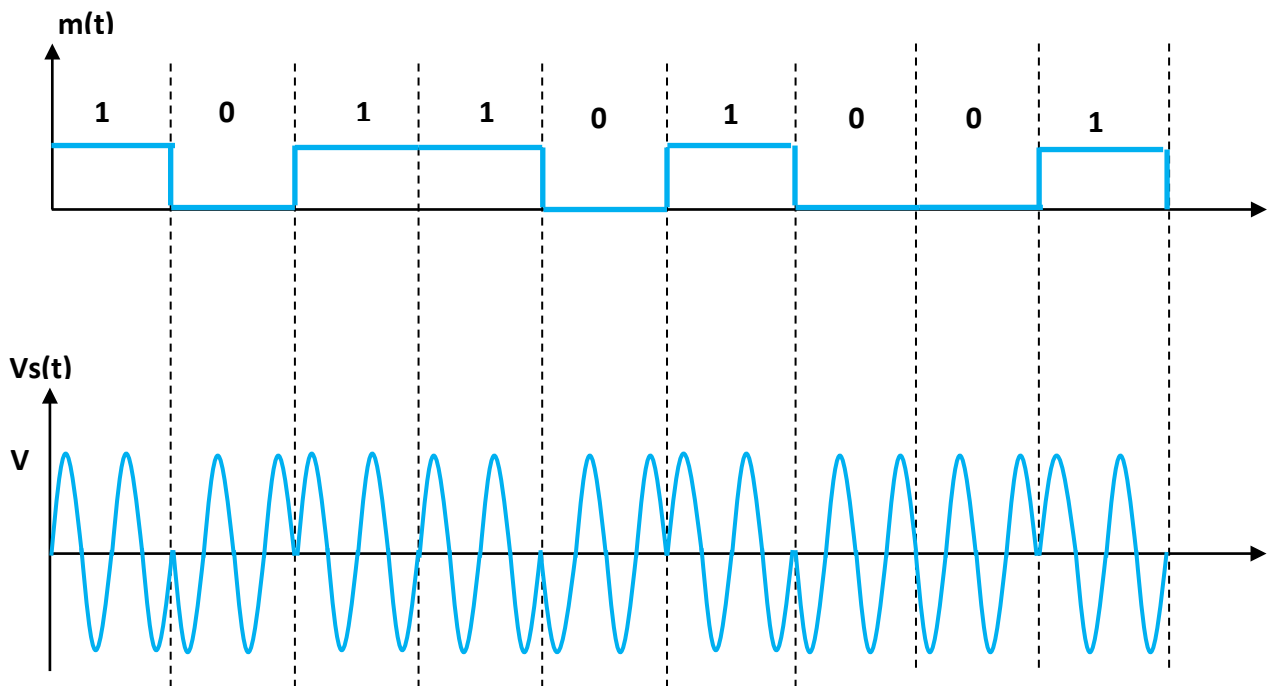
Appelée aussi PSK pour Phase Shift Keying, c-à-dire modulation par déplacement de phase, lorsque la transmission dite binaire PSK-2, le signal modulé s'écrit :

$$V_s(t) = V \cos(2\pi f_0 t + m(t) \cdot \pi)$$

Le schéma synoptique d'un modulateur de phase binaire PSK-2 par :



Supposons que le message à transmettre  $m(t) = 101101001$



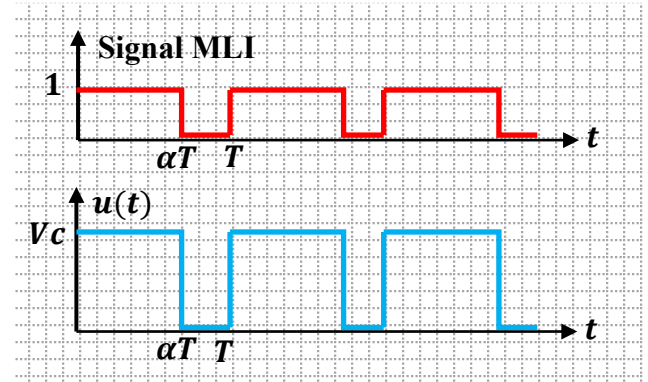
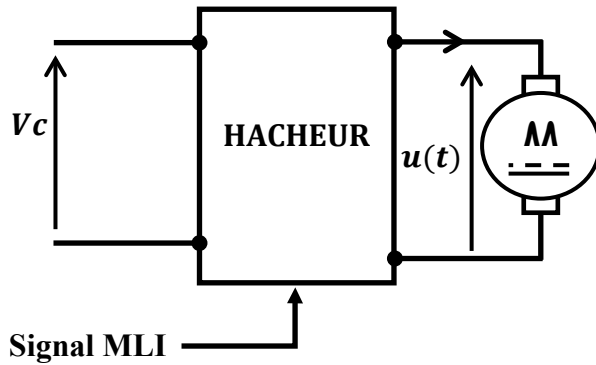
#### Domaine d'utilisation :

La MDP un outil de choix par exemple pour **les transmissions par satellites**. L'intérêt d'avoir un signal modulé à enveloppe constante est que cela permet d'employer les amplificateurs dans leur zone de meilleur rendement qui correspond souvent à un mode de fonctionnement non linéaire.

## D- Modulation de largeur d'impulsion MLI (PWM en anglais)

Quand on veut faire varier la vitesse d'un moteur, la première idée qui vient à l'esprit est de faire varier la tension aux bornes du moteur.

Un hacheur est un moyen qui permet de fournir une tension variable aux bornes de moteur, le signal qui commande du hacheur est appelé **signal MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)**.

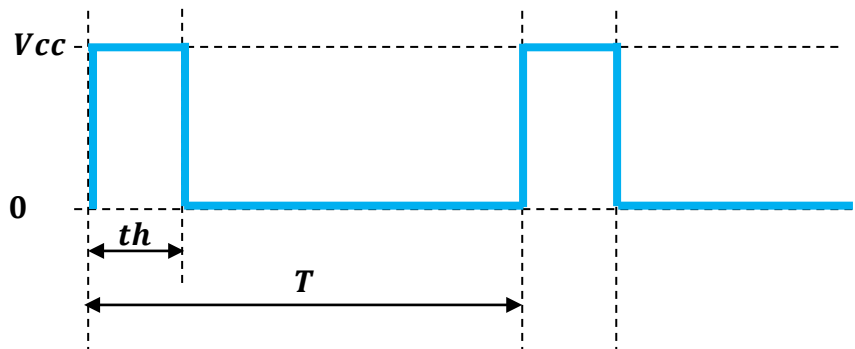


$$U = \langle u(t) \rangle = \alpha \cdot Vc = K \cdot \Omega$$

### 1. Définition

Le PWM est un signal numérique, donc la tension peut prendre deux valeurs seulement. Dans certains cas très spécifiques (Hacheur par exemple).

Le signal est carré. Le niveau bas correspond généralement à 0 Volt. La période est notée T ; la durée de l'impulsion (pour laquelle la tension est celle de l'état haut) est appelée th.



### 2. Rapport cyclique

On appelle rapport cyclique le rapport :  $\alpha = \frac{th}{T}$ , ce rapport est comprise entre 0 et 1.

- Si  $th = 0$  alors  $\alpha = 0\%$  et la tension moyenne de sortie est nulle.
- Si  $th = T$  alors  $\alpha = 100\%$  et la tension moyenne de sortie est égale à  $Vc$ .

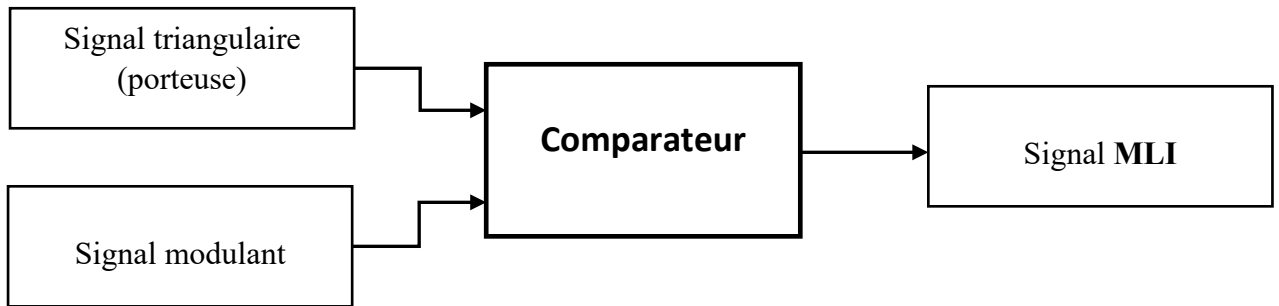
### 3. Choix de fréquence

La commande d'actionneurs de puissance par PWM est très liée à la notion de fréquence. Pour que l'impression d'une valeur moyenne constante d'allumage apparaisse, il faut que l'alternance

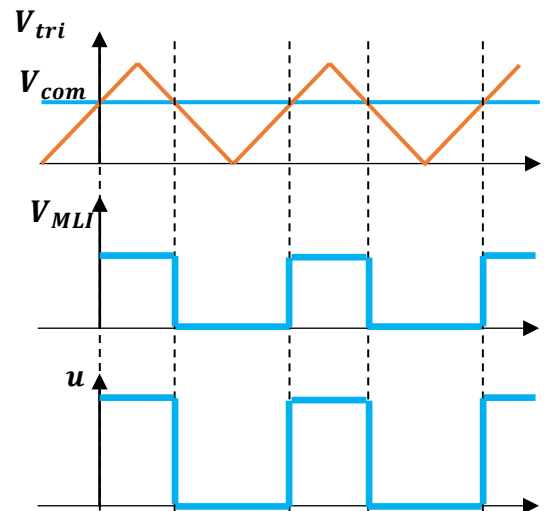
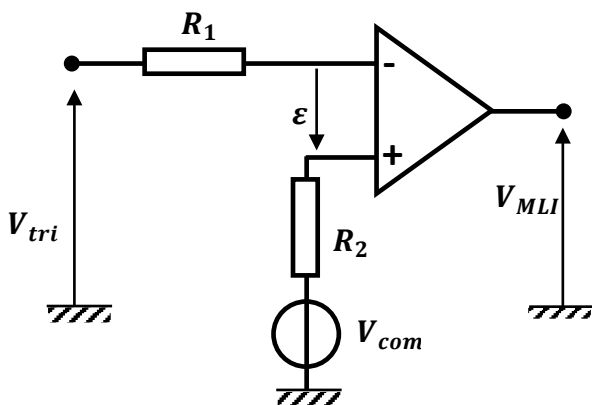
d'allumage/extinction soit suffisamment rapide pour qu'elle ne se remarque pas. Selon les utilisations la fréquence du PWM va de 100 Hz (100 cycles par seconde) à 200 kHz.

### 4. Production du signal MLI

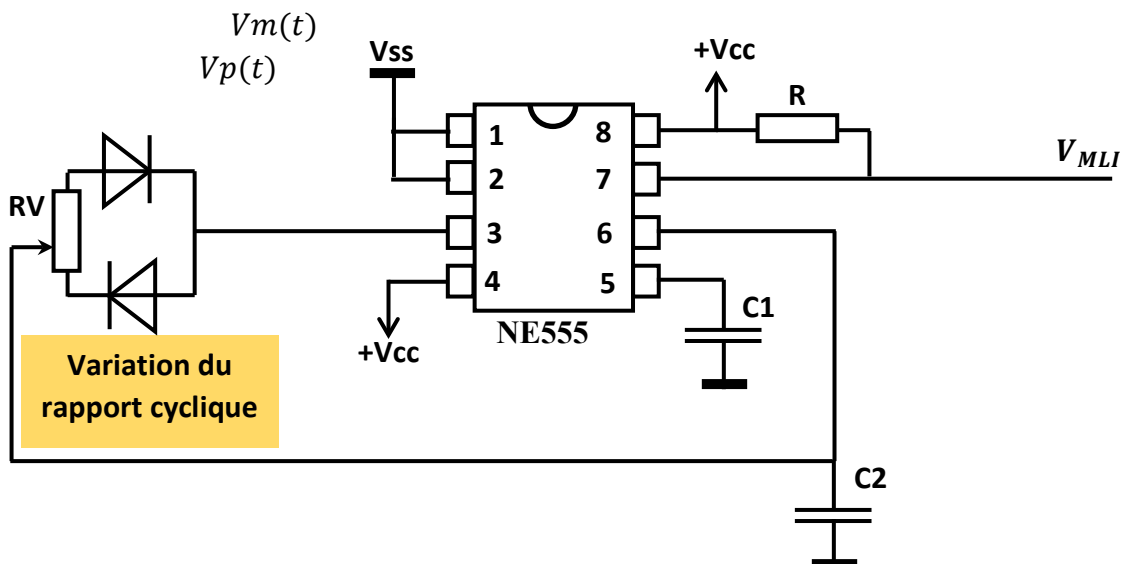
Le principe de la commande MLI est donné ci-dessous ; où une tension de commande  $V_{con}$  est comparée avec la tension issue d'un générateur de signaux triangulaire  $V_{tri}$ .



#### 4.1. Réalisation avec un comparateur à AOP

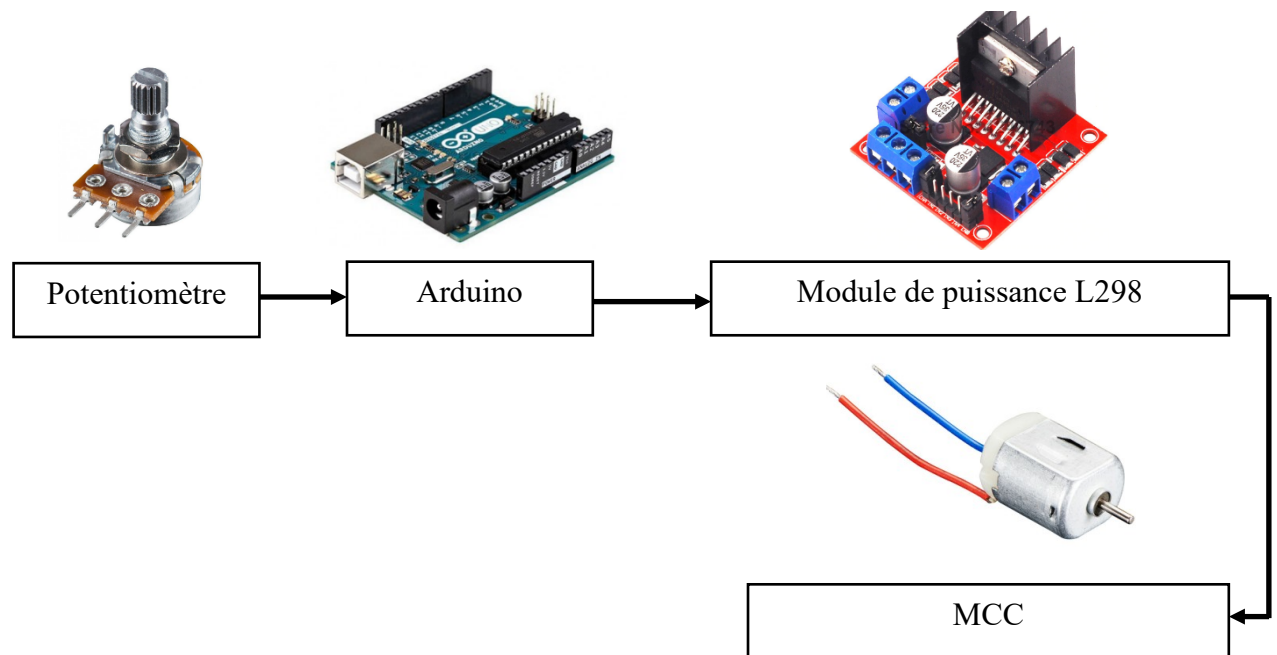


#### 4.2. Réalisation avec circuit NE555



### 4.3. Réalisation avec microcontrôleur cas de l'Arduino

Exemple : variation de vitesse d'une MCC



#### Programme ARDUINO :

```
const int brocheMLI = 3;
const int potar = 0;

void setup()
{
  // configuration en sortie de la
  // broche 3
  pinMode(brocheMLI, OUTPUT);
}
```

```
void loop()
{
  // on lit la valeur du potentiomètre
  int vitesse = analogRead(potar);

  // division de la valeur lue par 4
  vitesse /= 4;

  /*envoie la nouvelle vitesse sur le
  moteur */
  analogWrite(enable, vitesse);

  /*on affiche la vitesse sur le
  moniteur série */

  delay(50);
}
```