



Université de Haute-Alsace

IUT de COLMAR

Cours
de
Modulation Numérique

S. FEMMAM
Département GTR

Table des matières

0.1	Introduction	1
0.2	Modulation sur fréquence porteuse	1
0.2.1	Transmission en bande de base : rappel	1
0.2.2	Transmission sur fréquence porteuse = Modulation	1
0.2.3	Modulations en impulsion	2
0.2.4	Rappels sur les notions de débit et de rapidité	3
0.3	Modulation d'amplitude (Modulation ASK)	4
0.3.1	Principe	4
0.3.2	Caractéristiques des signaux modulés en amplitude	4
0.3.3	Modulateurs	9
0.3.4	Démodulateurs	10
0.3.5	Applications	11
0.3.6	Récapitulatif	11
0.4	Modulations angulaires (Modulation FSK)	12
0.4.1	Principe	12
0.4.2	Modulation FSK	13
0.5	Modulation n-PSK	18
0.5.1	Principe de la modulation PSK (modulation 2-PSK)	18
0.5.2	Largeur spectrale d'une modulation n-PSK	22
0.5.3	Modulateurs	23
0.5.4	Démodulateurs	23
0.5.5	Applications	24
0.5.6	Récapitulatif	24
0.6	Modulation combinée d'amplitude et de phase QAM (MAQ)	25
0.6.1	Principe	25
0.6.2	Largeur spectrale d'une modulation QAM	26
0.6.3	Modulateurs	27
0.6.4	Démodulateurs	27
0.6.5	Applications	27
0.6.6	Récapitulatif	27
0.7	Multiplexage	29
0.7.1	Multiplexage fréquentiel	29
0.7.2	Multiplexage temporel	32

0.1 Introduction

MODULATION	ASK BLU	FSK	n-PSK	n-QAM
DOMAINE D'UTILISATION	radiotéléphonie V35, V36	radiotéléphonie digitale V23 minitel	radiotéléphonie digitale V22, V26 4-PSK	radiotéléphonie digitale
NORMALISATION CCITT	D<144 Kbits/s fax, transfert de fichiers	D<1200 bits/s	V27 8-PSK transmissions données	transmission données sync V22bis, V29, V32 et V33
REALISATION MODEM	peu compliqué	moyennement complexe	complexité augmente avec n	très complexe
SUPPORT	groupe primaire	réseau commuté lignes spécialisées	réseau commuté lignes spécialisées	réseau commuté lignes spécialisées
PROBABILITE D'ERREURS p	sensible aux perturbations p élevée	<P(ASK)	<P(FSK) augmente avec n	>P(nPsk)
D DEBIT BW BANDE PASSANTE R RAPIDITE	BW>D R=D	BW<D R=D	pour n=2 BW=D/p D=Rp	BW=D/p D=Rp

Les caractéristiques des Modulations Numériques

0.2 Modulation sur fréquence porteuse

0.2.1 Transmission en bande de base : rappel

- Les données après codage sont directement acheminées sur un support de transmission.
- Les fréquences de base du signal émis sont préservées.

0.2.2 Transmission sur fréquence porteuse = Modulation

1. Modification du spectre du signal pour :
 - Adaptation au support de transmission.
 - Adaptation à la bande de fréquence allouée (multiplexage).
2. Signal "information" analogique ou numérique.
3. Principe de base : utilisation d'une **porteuse**.
 - Porteuse = signal sinusoïdal

$$p(t) = A_p \cos(\omega_p t + \varphi_p)$$

- Modulation = variation d'un des paramètres de la porteuse

$$\begin{array}{ccc}
 A_p & \omega_p & \varphi_p \\
 \uparrow & \uparrow & \uparrow \\
 \text{Amplitude} & \text{Fréquence} & \text{Phase}
 \end{array}$$

4. \Rightarrow spectre modulé peut être plus large ou plus étroit ou aussi large.

5. Quelques notations

- Signal “information” = signal modulant = $m(t)$
- Porteuse = signal sinusoïdal = $p(t)$
- Résultat de la modulation = signal modulé

0.2.3 Modulations en impulsion

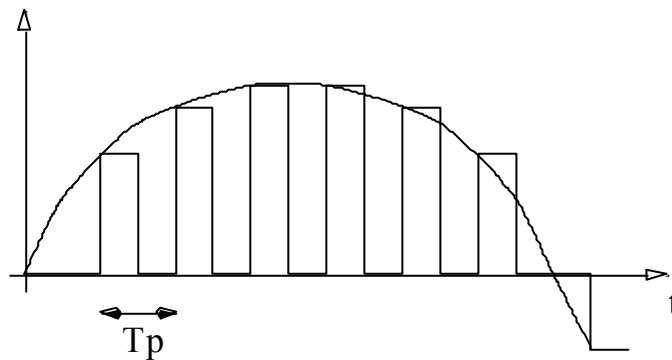
- “Porteuse” = signal carré.
- Caractéristique de la “porteuse” :
 Amplitude : A_p
 Fréquence f_p
 Rapport cyclique R_p

Modulation en impulsion en amplitude

PAM Pulse Amplitude Modulation.

Amplitude de la “porteuse” proportionnelle à l’amplitude du signal à modulé.

Fréquence f_p et rapport cyclique R_p fixe.



Equivalent à un échantillonnage blocage de temps de maintien = $T_p/2$.

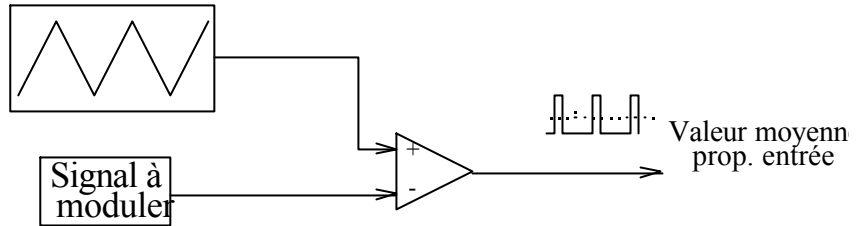
(Rapport cyclique = $1/2$)

Modulation en largeur d’impulsion

PWM Pulse Width Modulation.

1. Largeur de l’impulsion (Rapport cyclique) proportionnelle à l’amplitude du signal à modulé.

Fréquence f_p et amplitude A_p fixe.



2. Principe

3. Application

Commande de moteur.

Télécommande car composante continue ne se transmet pas par voie hertzienne.

0.2.4 Rappels sur les notions de débit et de rapidité

– Débit : $D = \frac{\text{Nombre : de : bits}}{\text{Sec}} :: \text{bits/s}$

⇒ lié à la quantité d'information binaire.

– Rapidité : $R = \frac{\text{Nombre : d'IE}}{\text{Sec}} :: \text{bauds}$

IE = Intervalle Élémentaire = plus petit intervalle de temps pour un même état du signal (état = niveau de tension, fréquence, phase, amplitude...)

⇒ lié à la largeur spectrale du signal.

0.3 Modulation d'amplitude (Modulation ASK)

0.3.1 Principe

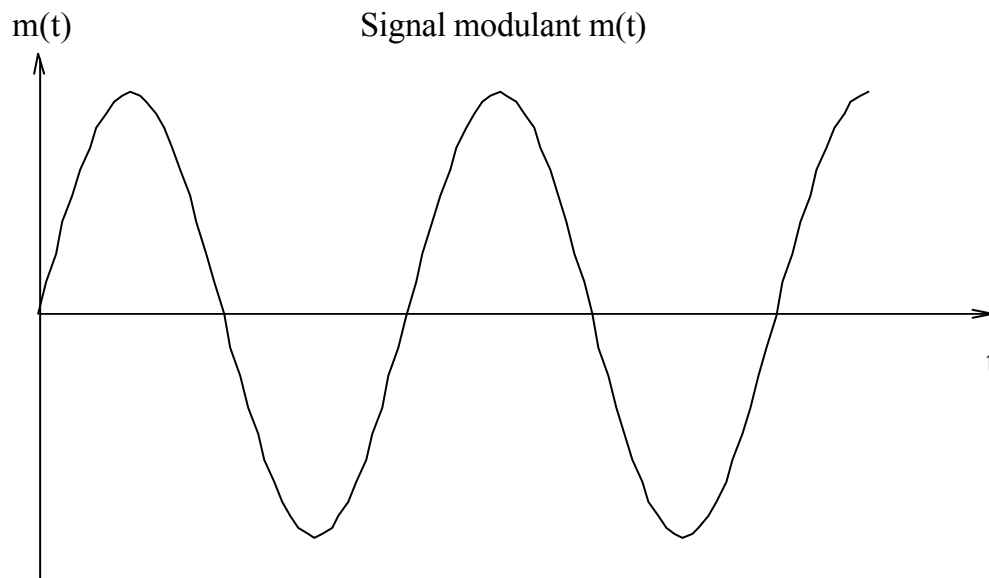
- Amplitude A_p de la porteuse $p(t) = A_p \cos(\omega_p t)$ dépend du signal modulant $m(t)$.
- Opération linéaire car translation du spectre initial.
- Plusieurs types :
 1. Modulation avec porteuse M.A.P.C
(Modulation d'Amplitude à Porteuse Conservée)
$$s(t) = S_p (1 + K m(t)) \cos(\omega_p t)$$
 2. Modulation sans porteuse M.A.P.S.
(Modulation d'Amplitude à Porteuse Supprimée)
$$s(t) = S_p K m(t) \cos(\omega_p t)$$
 3. \exists modulation à bande latérale unique.
 4. Modulation d'amplitude de signaux numériques = ASK (Amplitude Shift Keying).

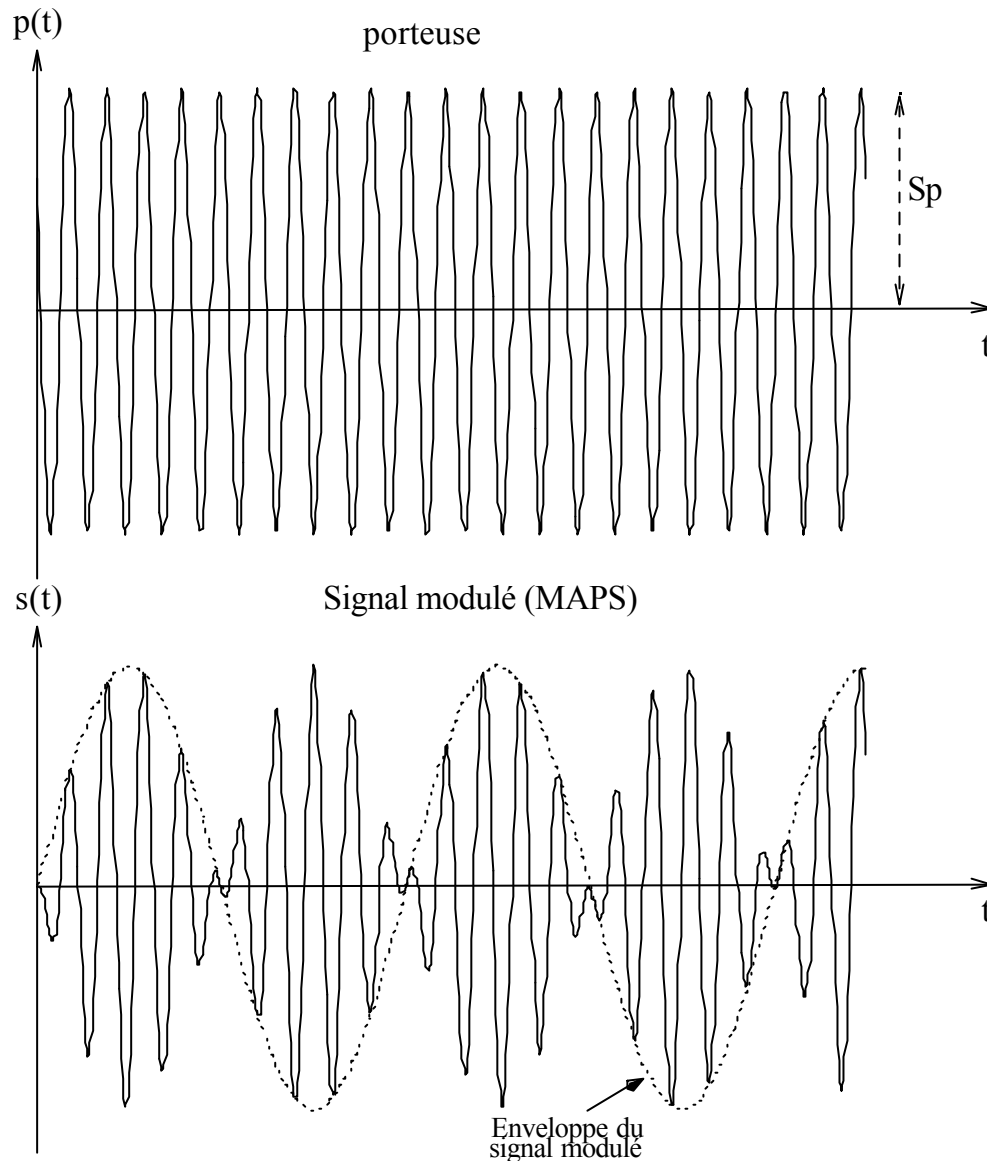
0.3.2 Caractéristiques des signaux modulés en amplitude

Cas d'un signal modulant de la forme $m(t) = S_m \cos(\omega_0 t)$

- cas de la modulation sans porteuse :

$$s(t) = \frac{K}{2} S_m S_p (\cos((\omega_0 + \omega_p)t) + \cos((\omega_p - \omega_0)t))$$

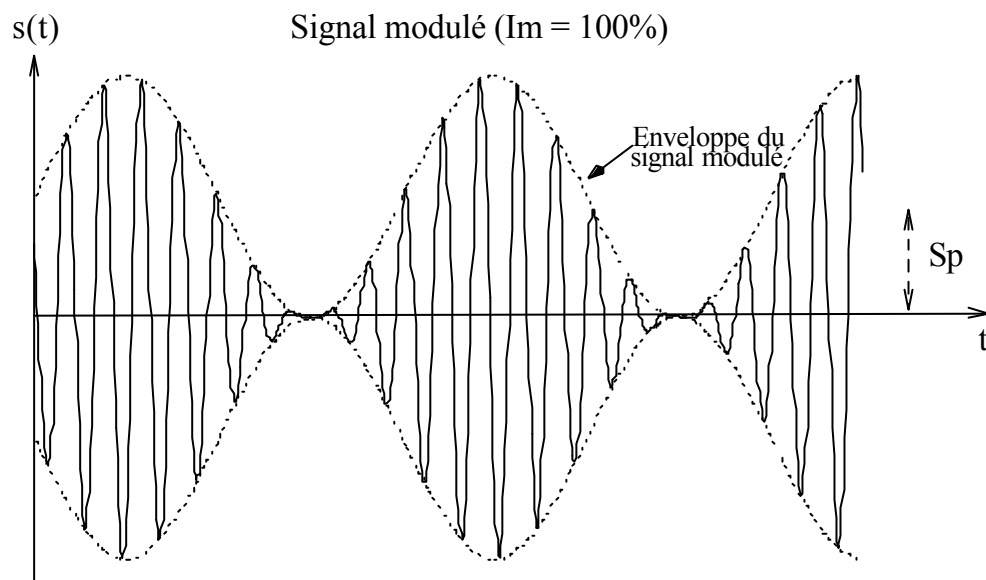
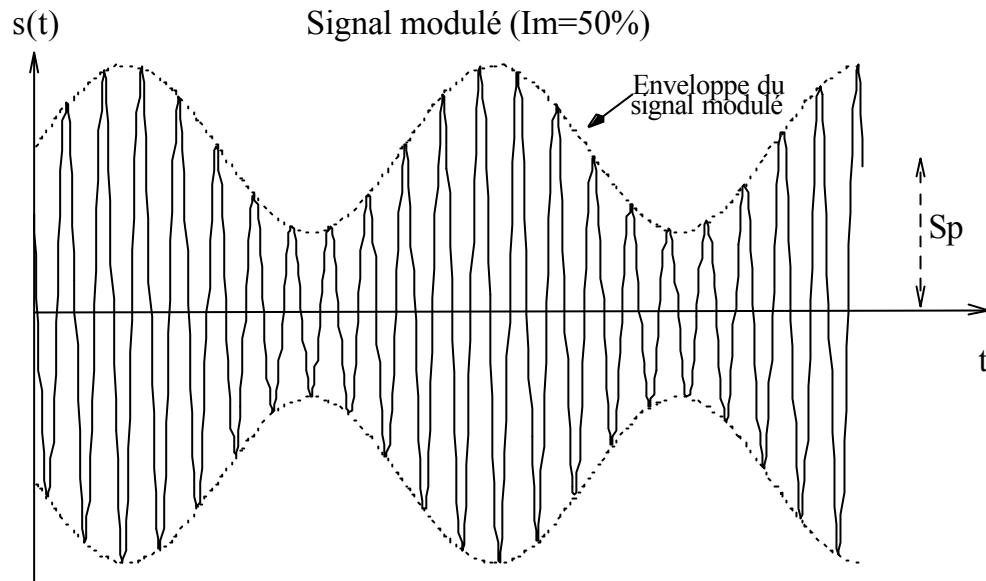




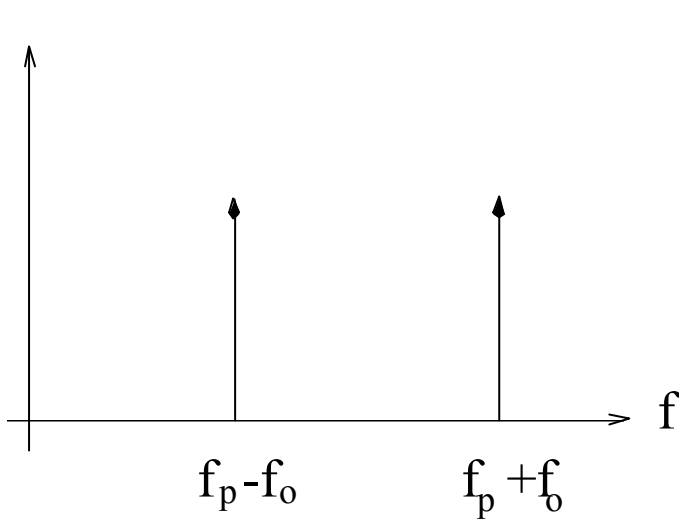
– cas de la modulation avec porteuse :

$$s(t) = S_p \cos(\omega_p t) + \frac{K}{2} S_m S_p (\cos((\omega_0 + \omega_p)t) + \cos((\omega_p - \omega_0)t))$$

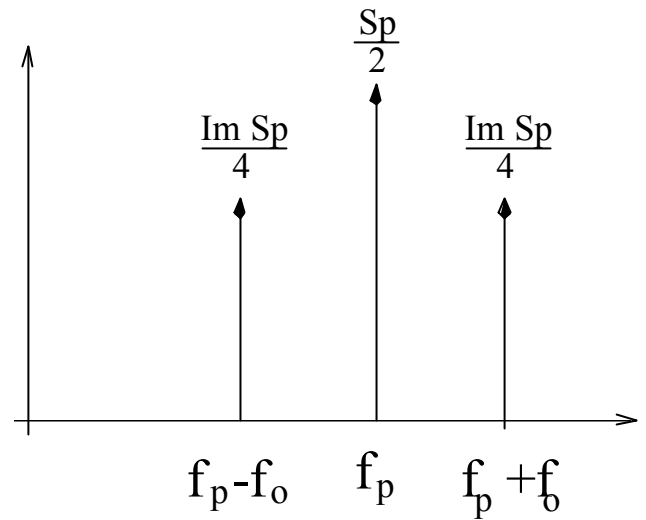
Indice de modulation $I_m = K S_m$



– Spectre de ces signaux :

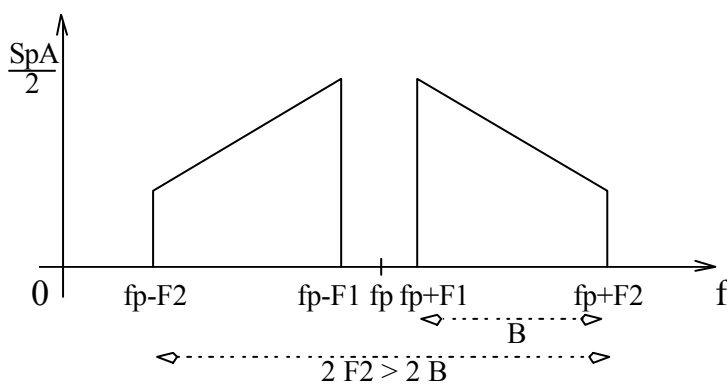
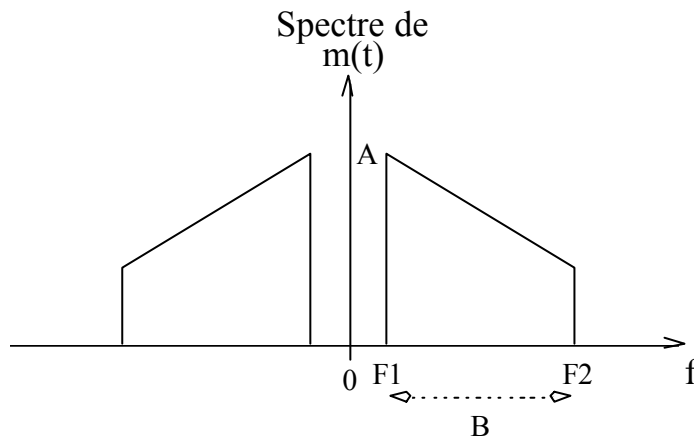


M.A.P.S.

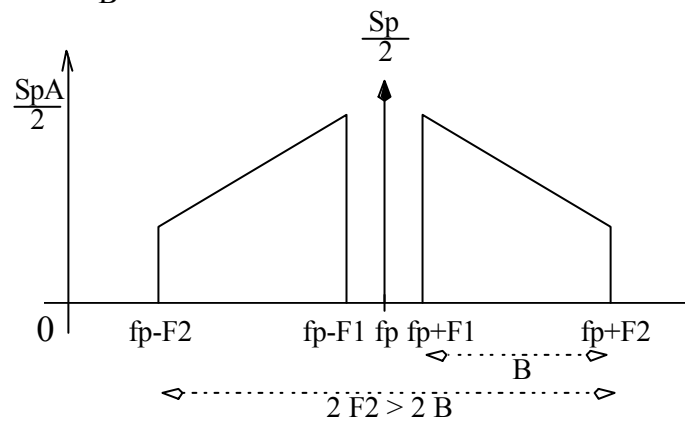


M.A.P.C.

Cas d'un signal modulant $m(t)$ quelconque



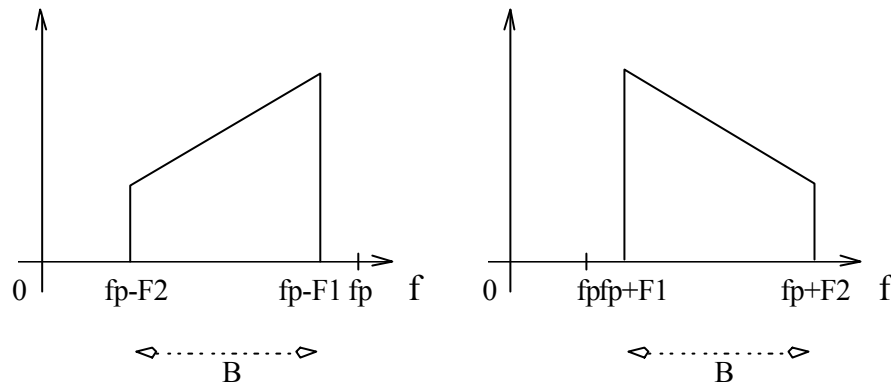
Spectre MAPS



Spectre MAPC

- La modulation à porteuse conservée nécessite plus d'énergie que la modulation sans porteuse.

- Si $m(t)$ est de bande passante $B = F_2 - F_1$ alors le signal modulé $s(t)$ est de bande passante $2F_2 \geq B$.
- Modulation en bande latérale unique inférieure (BLU inférieure) = transmission de la bande inférieure \rightarrow généralement réalisée.
- Modulation en bande latérale unique supérieure (BLU supérieure) = transmission de la bande supérieure.

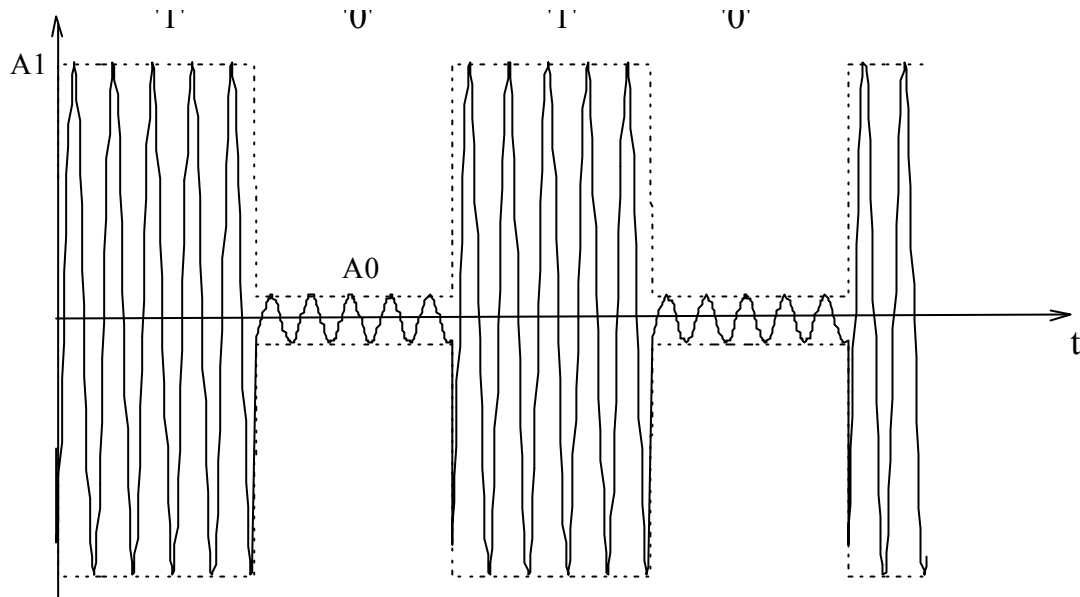


Spectre BLU inférieure (MAPS) Spectre BLU supérieure (MAI)

- Possibilité de BLU (inférieure ou supérieure) à porteuse conservée ou à porteuse supprimée.
- Bande passante en BLU MAPS = bande passante B du signal modulant.

Modulation de signaux numériques = ASK

- "1" est codé par une fréquence f_p d'amplitude A_1 et "0" par la même fréquence f_p d'amplitude A_0 .



- On utilise souvent $A_0 = 0$.
- Le spectre de $m(t)$ doit être limité avant modulation.
- Transmission en BLU inférieure ou supérieure.
- La modulation ASK est nécessairement de type MAPC (cf TD).

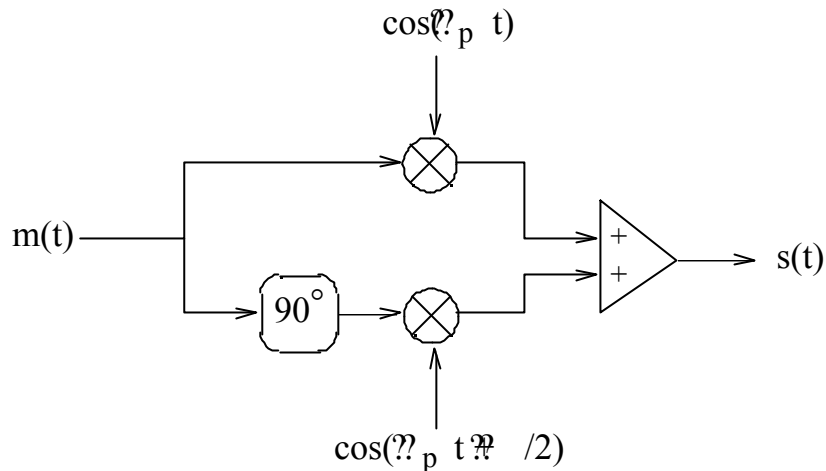
0.3.3 Modulateurs

Deux principaux types de modulateurs analogiques :

1. Utilisation de multiplieur analogique.
2. Utilisation de système à découpage : méthode basée sur échantillonnage analogique à la fréquence f_p + filtrage ($\equiv PAM$).

Modulateur BLU :

1. Par filtrage
Inconvénient : rendement énergétique, difficulté en cas d'énergie en BF du signal modulant.
2. Par produit (opérateur de Hilbert)

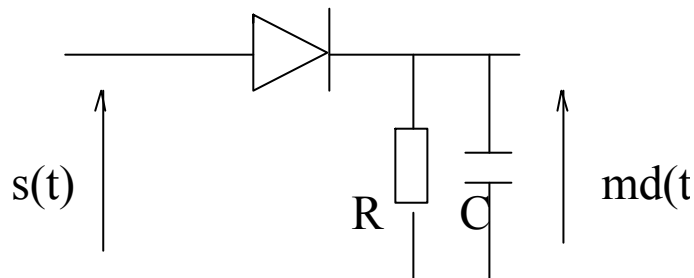


Inconvénient : déphasage de $\pi/2$ constant.

0.3.4 Démodulateurs

Deux possibilités :

1. Démodulation non cohérente par détection d'enveloppe :



- Uniquement pour la modulation avec porteuse (donc également pour ASK).
 - Plus l'indice de modulation est faible, plus la démodulation est aisée.
2. Démodulation cohérente (ou synchrone) :
- Démodulation possible quelque soit le type de modulation (y compris BLU).
 - Obtenu par produit du signal modulé par la porteuse régénérée puis filtrage.

$$m_d(t) = s(t) \cos(\omega_p t)$$

Or (Cas MAPS) :

$$s(t) = S_p K m(t) \cos(\omega_p t)$$

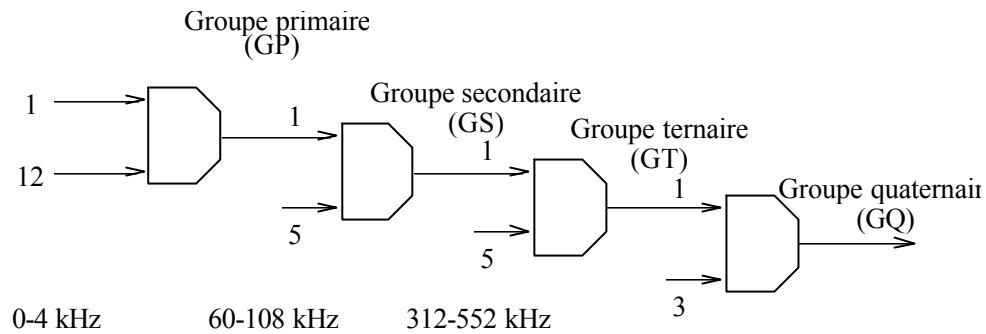
Donc :

$$m_d(t) = \frac{1}{2} S_p K m(t) (1 + \cos(2\omega_p t))$$

par filtrage on ne conserve que le terme $\frac{1}{2} S_p K m(t)$

0.3.5 Applications

1. Transmissions hertziennes : radio (grandes ondes), télé, certains mobiles de voitures.
2. Modems selon les avis V35, V36 et V37 : accès direct sur groupe primaire à haut débit (48 kbit/s) en BLU (cf TD).



0.3.6 Récapitulatif

- Robustesse modulation :

Si existence d'un bruit additif ($s_m(t) + b(t)$), après démodulation on obtient : $m(t) + b(t) \Rightarrow$ très sensible au bruit.

- Spectre large (B minimum).
- Réalisation aisée.
- Débit : $D = R$
- Rapidité : $R = B$ (minimum)

0.4 Modulations angulaires (Modulation FSK)

0.4.1 Principe

- La pulsation instantanée de la porteuse $\phi_s(t)$ est modulée par le signal modulant $m(t)$

$$\begin{aligned} \text{Porteuse} & : \cos(\omega_p t + \varphi_p) \\ \text{signal modul} & : S_p \cos(\underbrace{\omega_s(t)t + \varphi_s(t)}_{\phi_s(t)}) \end{aligned}$$

- l'amplitude S_p est constante.
- non superposabilité (non linéarité) :
 $s_1(t)$ signal modulé de $m_1(t)$ et $s_2(t)$ signal modulé de $m_2(t)$
 $s(t)$ signal modulé de $m_1(t) + m_2(t)$: $s(t) \neq s_1(t) + s_2(t)$

Modulation de phase (PM)

$$\begin{aligned} \omega_s & = \omega_p = cte \\ \varphi_s(t) & = K_p m(t) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \phi_s = \omega_p t + K_p m(t)$$

$$\begin{aligned} \text{Exemple : cas d'un signal modulant sinusoïdal } m(t) & = S_m \cos(\omega_0 t) \\ \Rightarrow s(t) & = S_p \cos[\omega_p t + K_p S_m \cos(\omega_0 t)] \end{aligned}$$

Modulation de fréquence (FM)

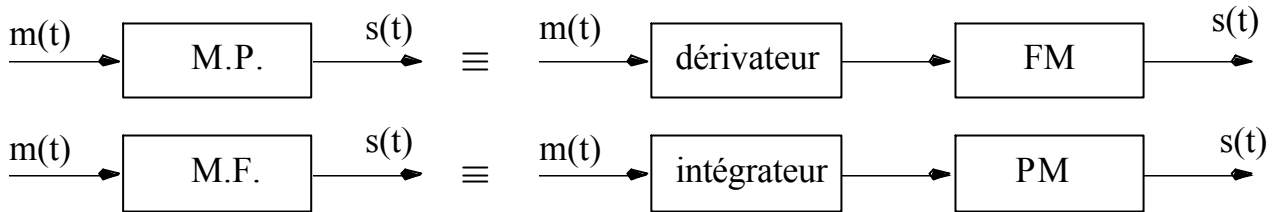
$$\begin{aligned} f_s & = f_p + K_f m(t) \\ \varphi_s & = cte \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \phi_s(t) = \omega_p t + \int 2\pi K_f m(t) dt + \underbrace{\varphi}_{cte}$$

$$\begin{aligned} \text{Exemple : cas d'un signal modulant sinusoïdal } m(t) & = S_m \cos(\omega_0 t) \\ \Rightarrow s(t) & = S_p \cos\left[\omega_p t + \frac{2\pi K_f}{\omega_0} S_m \cos(\omega_0 t + \frac{\pi}{2})\right] \end{aligned}$$

Relation entre modulations de phase et de fréquence

- moduler $m(t)$ en phase est équivalent à moduler $\frac{dm(t)}{dt}$ en fréquence avec $K_f = \frac{K_p}{2\pi}$
- moduler $m(t)$ en fréquence est équivalent à moduler $\int m(t)dt$ en phase avec $K_p = 2\pi K_f$.



Modulations numériques

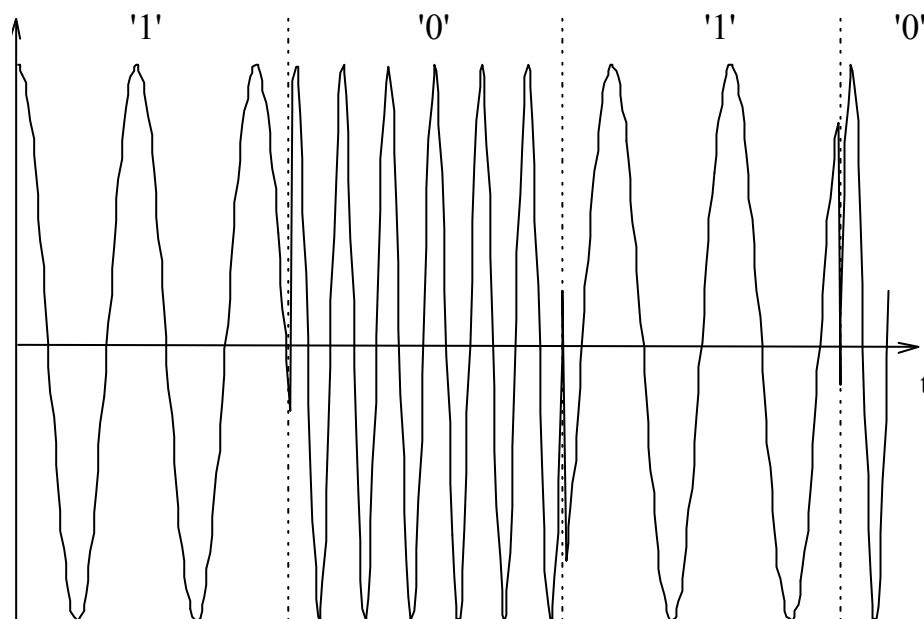
- modulation de fréquence de signaux numériques = FSK
- modulation de phase de signaux numériques = PSK

0.4.2 Modulation FSK

Principe

Le signal modulé sinusoïdal prend deux valeurs de fréquences déterminées par la valeur des bits de données :

- au niveau "1" on associe une fréquence F_1
- au niveau "0" on associe une fréquence F_2

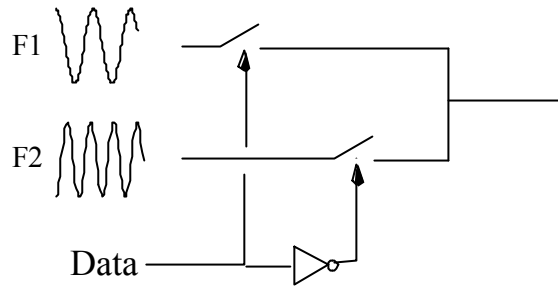


- on définit la 'porteuse' à $f_p = \frac{F_1 + F_2}{2}$

- La modulation peut se faire avec (modulation cohérente) ou sans (modulation non cohérente) continuité de phase entre les deux sinusöides.
- On définit un indice de modulation : $\chi = \frac{|F_2 - F_1|}{R}$

Modulation FSK non cohérente

Principe : on utilise 2 oscillateurs à fréquences fixes F_1 et F_2 .

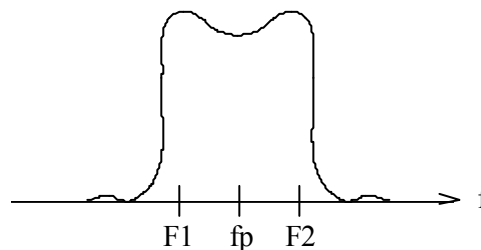


- le signal modulé FSK est équivalent à deux modulations ASK aux fréquences F_1 et F_2 . \Rightarrow Spectre large, dont l'allure dépend de $F_2 - F_1$.
- \approx la moitié de la puissance se trouve concentrée sur les raies aux fréquence F_1 et F_2 .
- Très peu utilisé en transmission.

Modulation FSK cohérente

Principe : on utilise 1 oscillateur dont on fait varier la fréquence selon $m(t)$ sans discontinuité de phase.

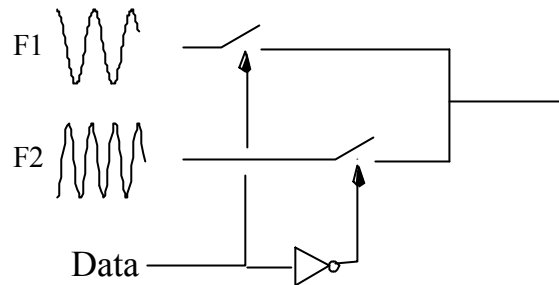
- La largeur et la forme du spectre dépendent de l'indice de modulation $\chi = \frac{|F_2 - F_1|}{R}$.
- Pour $\chi = 2/3 \Rightarrow R = \frac{3}{2}(F_2 - F_1)$, le spectre d'une modulation FSK cohérente est sensiblement rectangulaire, de largeur de l'ordre de $(F_2 - F_1)$ centré sur $f_p = (F_2 + F_1)/2 \Rightarrow$ souvent utilisé en transmission numérique



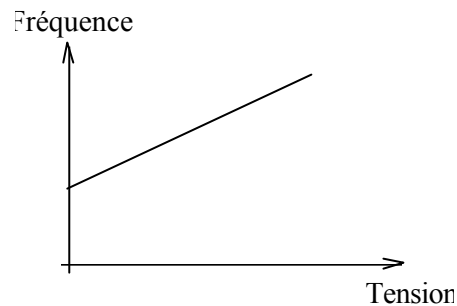
Modulateurs

Différents types de modulateurs :

1. Système transmettant une des deux fréquences en fonction du signal de données sans possibilité de cohérence.

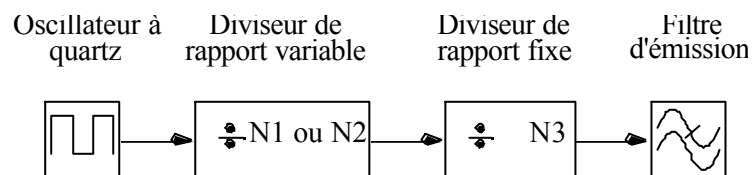


2. Modulateurs cohérents à base d'oscillateurs commandés en tension (VCO)



Surtout utilisé pour les modulations analogiques.

3. Modulateurs cohérents à base de diviseur de fréquences commandé par le signal de données.

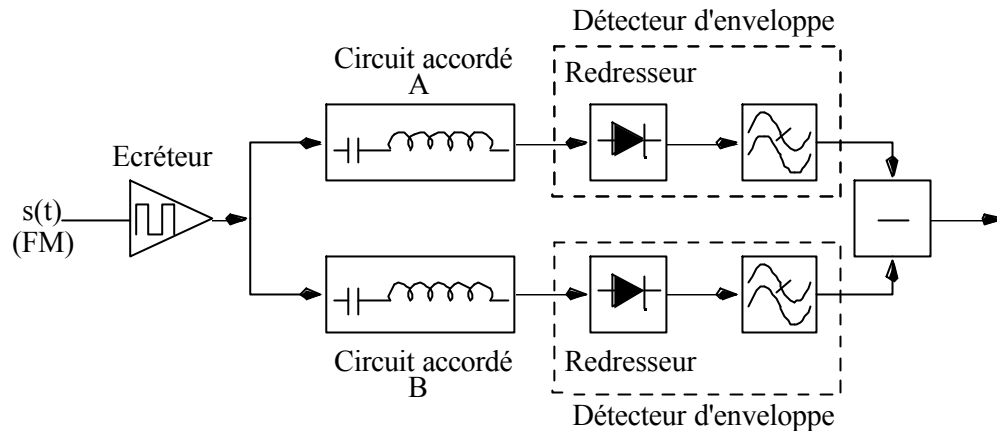


Utilisé pour les modulations numériques.

Démodulateurs

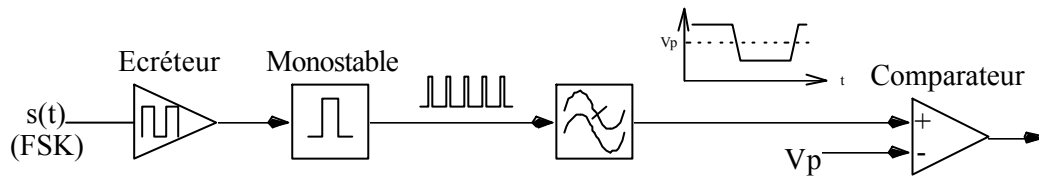
Différents types de démodulateurs :

1. Par discriminateur à circuits accordés



Solution analogique difficile à manipuler \Rightarrow peu adapté à la FSK.

2. Par discriminateur à comptage



3. Par boucle d'asservissement de phase (PLL)

Applications

1. Transmission hertzienne : radio (fm), télécommandes.
2. Modems selon les avis V21 (transmission bidirectionnelle simultanée sur RTC au débit maximal de 300 bit/s) et V23 (transmission au débit maximal de 1200 bit/s sur le RTC, minitel).

Récapitulatif

- Robustesse modulation.

Si existence d'un bruit additif ($s_m(t) + b(t)$), le signal démodulé étant obtenu par mesure de la fréquence \Rightarrow peu sensible au bruit.

Mais modulation sensible à la gigue de phase

Transmission fréquence $F_1 \rightarrow$ Déphasage $\phi_1 \rightarrow$ Décalage Δt_1

Transmission fréquence $F_2 \rightarrow$ Déphasage $\phi_2 \rightarrow$ Décalage Δt_2

\Rightarrow Temps de transmission différents \Rightarrow phénomène de gigue de phase.

- Largeur (et forme) du spectre dépend de $(F_2 - F_1)/R$.
- Largeur de spectre minimale : $F_2 - F_1$ (si modulation cohérente).
- Réalisation assez aisée.

– Débit : $D = R$

Rapidité : $R = \frac{3}{2}(F_2 - F_1)$ (minimum + modulation cohérente)

0.5 Modulation n-PSK

La valeur des données à moduler est utilisée pour coder la phase de la porteuse.

L'amplitude et la fréquence de la porteuse sont constantes.

0.5.1 Principe de la modulation PSK (modulation 2-PSK)

1. Principe :

Un '1' est codé par la porteuse.

Un '0' est codé par la porteuse en opposition de phase.

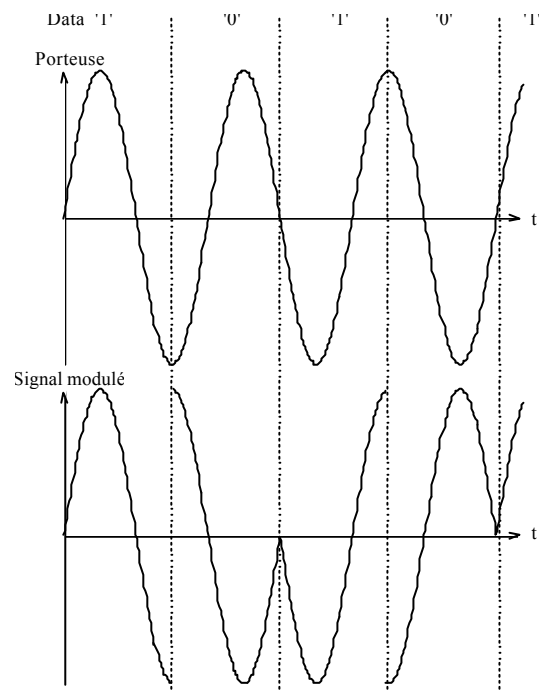
De manière plus générale, la valeur des bits définissent la phase **par rapport à la porteuse**.

bit	Phase
1	0
0	π

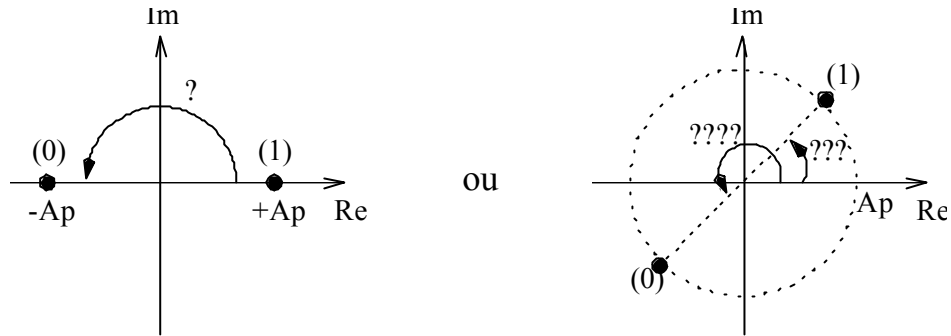
ou

bit	Phase
1	$\pi/4$
0	$3\pi/4$

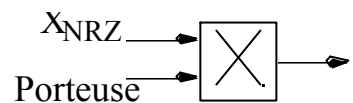
ou ...



2. Description de la modulation par une diagramme spatial :



3. Principe d'un modulateur 2-PSK :



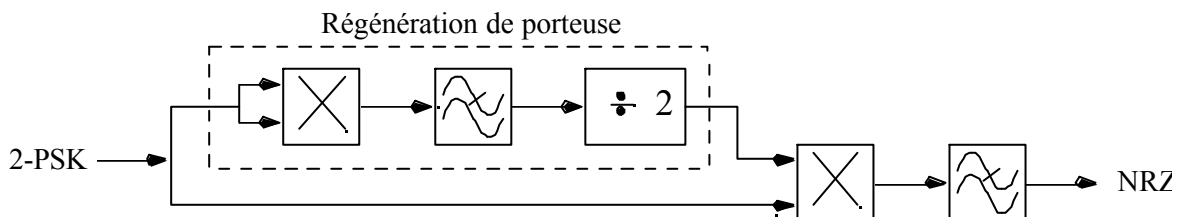
⇒ Equivalent à la modulation d'amplitude d'un signal NRZ sans transmission de porteuse.

⇒ Si B est la bande passante de x_{nrz} alors la bande passante du signal modulé 2-PK est $2B$.

Mais : moins sensible aux bruits car la démodulation repose sur une mesure de phase.

4. Principe d'un démodulateur 2-PSK :

Démodulation par produit avec une porteuse localement régénérée



Problème : on récupère \pm NRZ \Rightarrow Modulation PSK différentielle.

5. Modulation PSK différentielle (**toujours utilisée**)

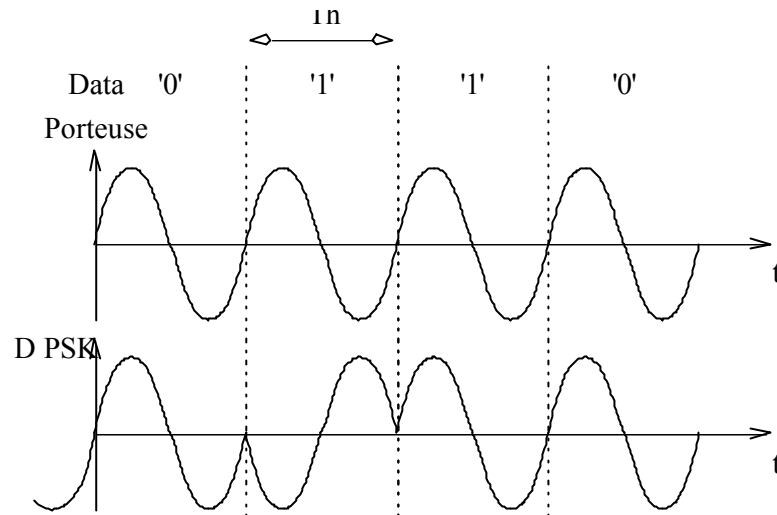
Pour la modulation, on ne code plus la phase par rapport à la porteuse mais les **sauts de phase**.

bit	Saut de phase
0	0
1	π

ou

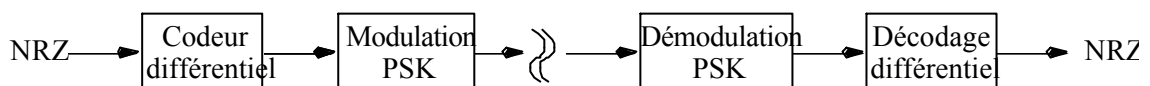
bit	Saut de phase
0	$\pi/4$
1	$3\pi/4$

ou ...



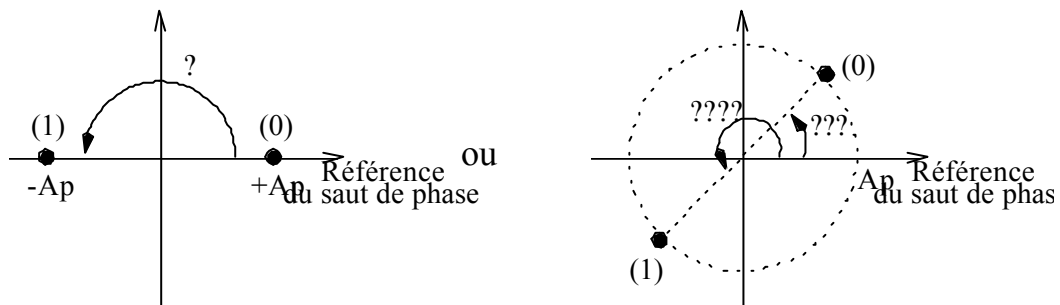
Pour la démodulation, on décode les sauts de phase par rapport à l'état précédent, non par rapport à la porteuse.

Principe d'une transmission DPSK :



Seule la modulation PSK différentielle est utilisée pour éviter des erreurs de phase
 \Rightarrow D PSK.

Description de la modulation PSK Différentielle par un diagramme spatial :



Attention : on représente maintenant les sauts de phases par rapport à l'état précédent
 \Rightarrow implicitement fonction du temps.

Modulation n-PSK

On réalise un précodage sur les données (train binaire) pour limiter le spectre puis on réalise une modulation PSK.

- Décomposition du train binaire en symboles (mots) de q bits.

A chaque valeur du symbole, on associe une valeur de phase ϕ (ou du saut de phase pour la modulation DPSK).

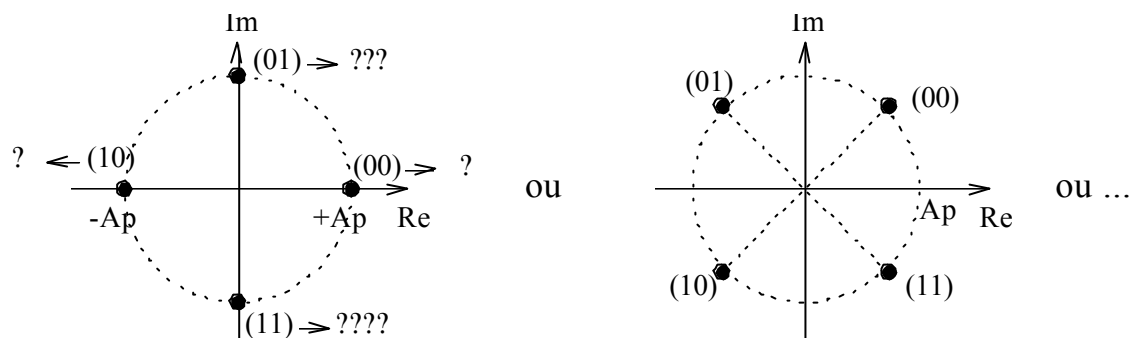
- Pour un symbole de q bits on a $n = 2^q$ possibilités de codage donc $n = 2^q$ valeurs différentes de phase (ou de saut de phase).
- Les phases (ou les sauts de phase) sont choisis équidistants tels que :

$$\text{Pour } n = 2^q \rightarrow \phi_k = 2\pi \frac{k}{n} :: (0 < k < n - 1)$$

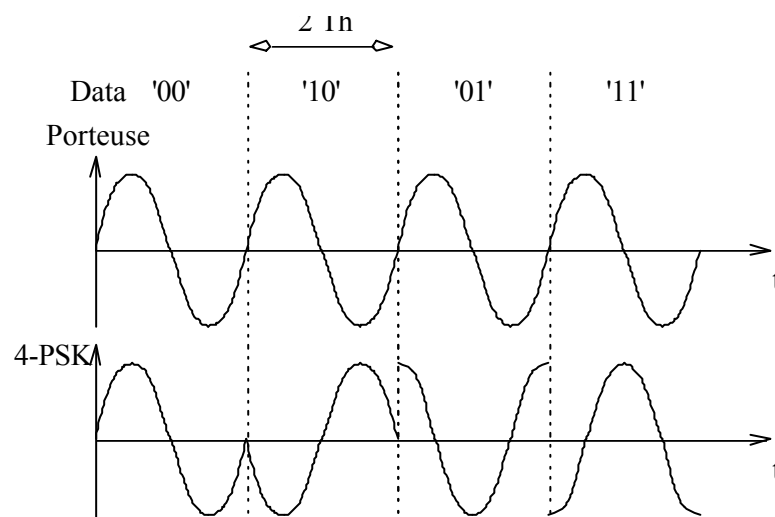
- Exemple 1 :

Pour $n = 4$, les données sont codées en dibit (modulation QPSK ou 4-PSK).

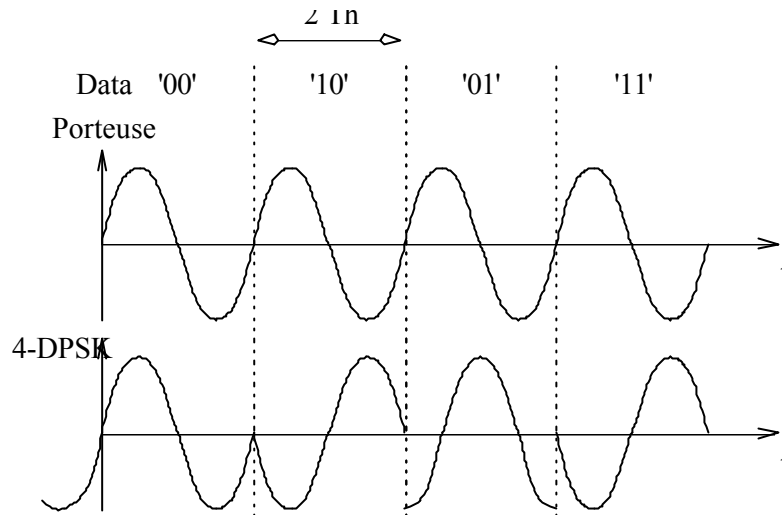
Description par un diagramme spatial :



Modulation 4-PSK :



Modulation 4-PSK Différentielle :



⇒ Equivalent à une modulation de 2 porteuses en quadrature (QPSK).

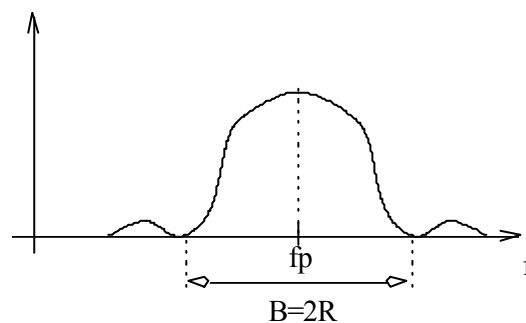
– Exemple 2 :

Pour $n = 8$, les données sont codées en tribit (modulation 8-PSK).

Phases (ou saut de phase) multiples de $\frac{\pi}{4}$.

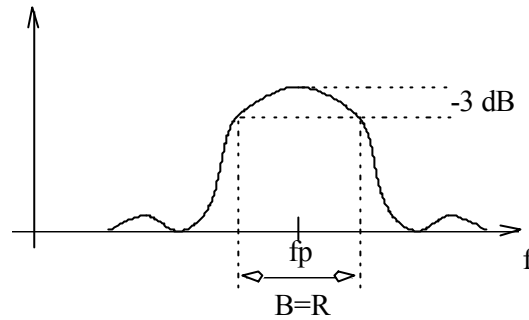
0.5.2 Largeur spectrale d'une modulation n-PSK

– En raisonnant sur les zéros d'énergie, on montre que la largeur spectrale (entre deux zéros d'énergie) est égale à $2R$, centrée sur la fréquence de la porteuse f_p .



– En raisonnant sur la démodulation (en présence de bruit), on montre qu'il est suffisant de transmettre une bande définie à $-3dB$ (bande passante utile).

La largeur spectrale dans ces conditions est égale à la rapidité R .



- Selon la définition de la rapidité de transmission, on a pour une modulation n-PSK (ou n-DPSK) :

$$R = \frac{D}{q} \quad \text{avec } n = 2^q$$

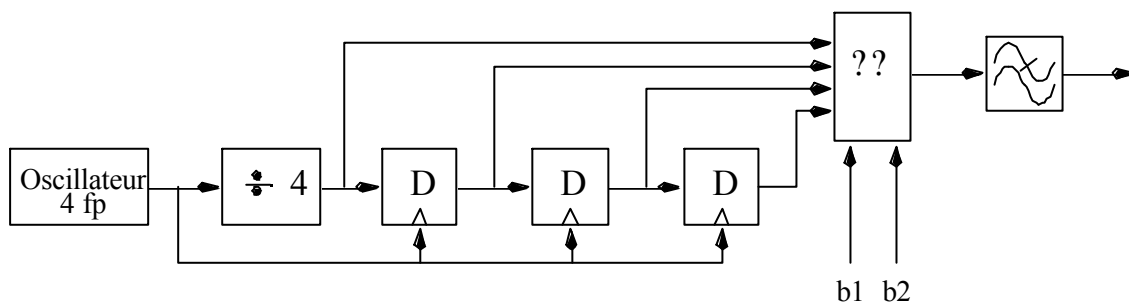
0.5.3 Modulateurs

1. Modulateurs PSK numériques :

Exemple pour $q = 2$ (dibits $(b_1 b_2)$) \rightarrow 4 états de phase.

On travaille sur un signal carré de fréquence f_p , puis on filtre.

0 N°	\rightarrow	Décalage 0
90 N°	\rightarrow	Décalage $T_p/4$
180 N°	\rightarrow	Décalage $T_p/2$
270 N°	\rightarrow	Décalage $3T_p/4$



2. Modulateurs DPSK numériques : On conserve la structure du modulateur précédent, auquel on ajoute un transcodeur et un registre à décalage.

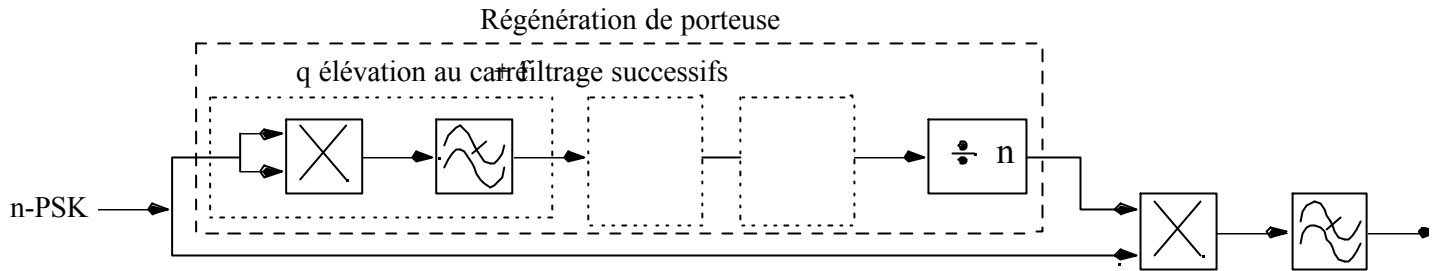
0.5.4 Démodulateurs

Principe : démodulation par mesure du saut de phase : comparaison de la phase avec la phase de la porteuse régénérée.

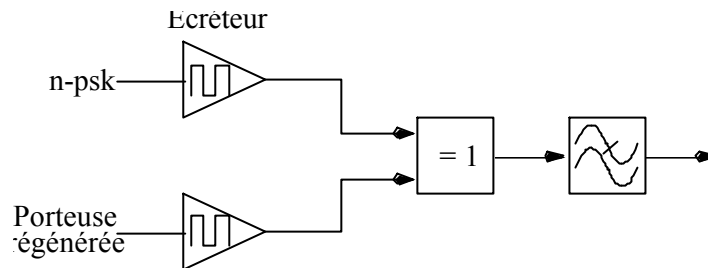
Régénération de porteuse : obtenue par technique d'élévation successive du signal au carré afin de supprimer les sauts de phases.

Démodulation obtenue par :

1. Par filtrage :



2. Par mesure directe du déphasage :



3. Par comptage :

0.5.5 Applications

Modems selon les avis :		
Avis	Type de modulation	Débit max
V22	4-DPSK	1200 <i>bit/s</i>
V26	4-DPSK	2400 <i>bit/s</i>
V27	8-DPSK	4800 <i>bit/s</i>

0.5.6 Récapitulatif

- Bonne robustesse de la modulation en présence de bruits additifs.
- La modulation PSK Différentielle est toujours utilisée en pratique.
- La bande passante utile (à -3 dB) du signal modulé est égale à la rapidité R . (bande passante entre 2 zéros d'énergie $= 2R$).
- Le débit est lié à la rapidité par $R = D/q$ où q est le nombre de bits composant les symboles et $n = 2^q$ le nombre d'états de phase.
- En pratique, en raison des difficultés de démodulation, on se limite aux modulations 4-DPSK et 8-DPSK.

0.6 Modulation combinée d'amplitude et de phase QAM (MAQ)

La valeur des données à moduler est utilisée pour coder la phase et l'amplitude de la porteuse.

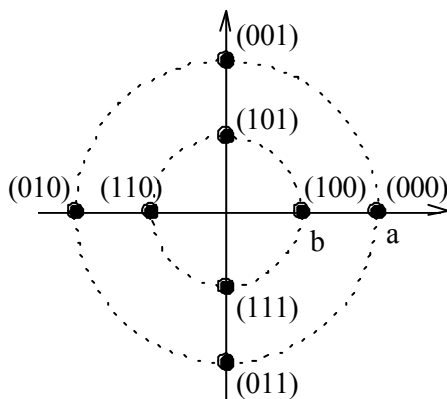
La fréquence de la porteuse est constante.

MAQ = Modulation d'amplitude de 2 porteuses en quadrature

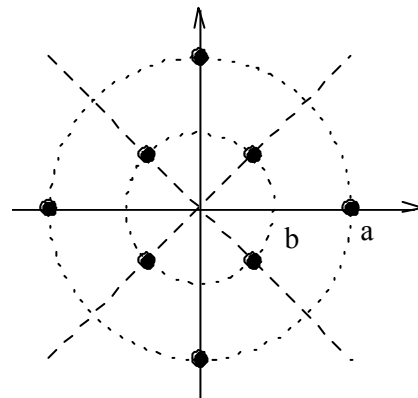
QAM = Quadrature Amplitude Modulation

0.6.1 Principe

- Combinaison d'une modulation de type PSK et d'amplitude.
 \Rightarrow L'information est contenue dans la phase et dans l'amplitude de l'onde porteuse.
- Principe : le train binaire est décomposé en symboles de q bits, a bits sont utilisés pour coder l'amplitude et p bits pour coder la phase avec $q = a + p$.
 Amplitude : a bits $\rightarrow 2^a$ valeurs différentes d'amplitude
 Phase : p bits $\rightarrow 2^p$ valeurs différentes de phase
- On montre qu'une telle modulation peut toujours se mettre sous la forme d'une modulation de type 4-PSK (deux porteuses en quadrature) et d'une modulation d'amplitude (avec amplitude complexe).
- Le codage de la phase est toujours de type différentiel.
- Exemple : Modulation 8-QAM
 Utilisation de tribits : 2 bits pour la phase, 1 bit pour l'amplitude.
 \Rightarrow chaque intervalle de modulation dépend de l'état de 3 bits de données : 2 pour la phase du signal de sortie et 1 pour son amplitude soit 4 valeurs de phase et 2 d'amplitude
 \Rightarrow au total 8 valeurs différentes.



Principe de base

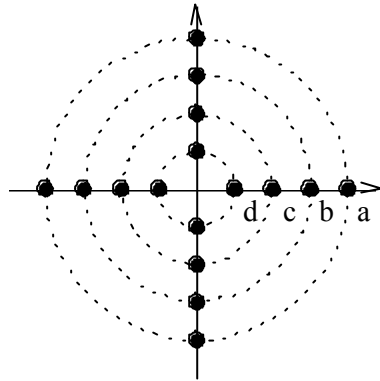


Autre possibilité (plus favorable pour la démodulation)

Remarque : la modulation 8-QAM est peu utilisée en pratique car 8-PSK marche bien.

- Exemple : modulation 16-QAM

Utilisation de quadribits : chaque intervalle de modulation dépend de l'état de 4 bits de données : 2 pour la phase du signal de sortie, 2 pour son amplitude soit au total 16 valeurs différentes.



Principe de base

Principe retenu

- On ajoute parfois un bit supplémentaire sur la partie servant à coder l'amplitude (code convolutionnel) pour faire de la détection d'erreur (cas des avis V32 et V33).

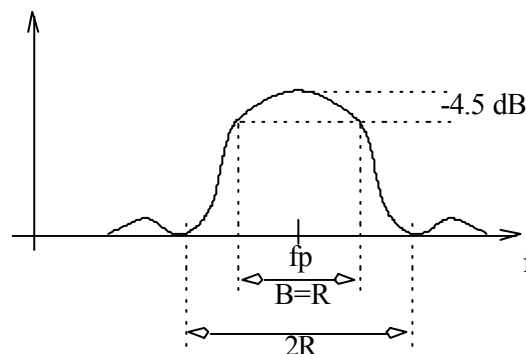
0.6.2 Largeur spectrale d'une modulation QAM

- Forme : La modulation QAM est une combinaison de modulation ASK et de modulation PSK (\equiv modulation ASK à porteuse supprimée) d'un signal modulant de rapidité R .

\Rightarrow la forme du spectre d'une modulation n -QAM est équivalente à celui d'une modulation n -PSK.

- En raisonnant sur les zéros d'énergie, on montre que la largeur spectrale (entre deux zéros d'énergie) est égale à $2R$, centrée sur la fréquence de la porteuse f_p .
- En raisonnant sur la démodulation (en présence de bruit), on montre qu'il est suffisant de transmettre une bande définie à $-4,5 \text{ dB}$ (bande passante utile).

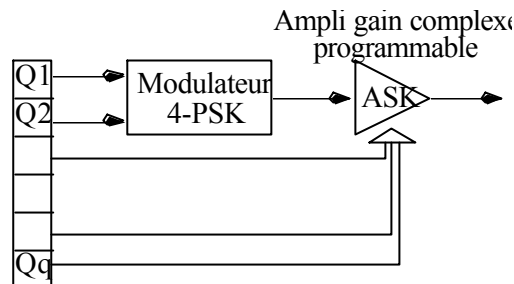
La largeur spectrale dans ces conditions est égale à la rapidité R .



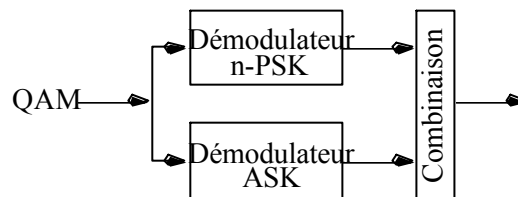
- Selon la définition de la rapidité de transmission, on a pour une modulation n-QAM (Modulation QAM à n états) :

$$R = \frac{D}{q} \quad \text{avec } n = 2^q$$

0.6.3 Modulateurs



0.6.4 Démodulateurs



0.6.5 Applications

Avis	Modems selon les avis :	
	Type de modulation	Débit max
V22bis	QAM 16 états	2400 <i>bit/s</i>
V29	QAM 16 états	9600 <i>bit/s</i>
V32	QAM 4 à 32 états	9600 <i>bit/s</i>
V33	QAM 64 à 128 états	14400 <i>bit/s</i>

Remarque 1 : Possibilité de faire du multiplexage temporel de voies.

Remarque 2 : Dans le case des avis V32 et V33, ajout d'un bit supplémentaire sur la partie servant à coder l'amplitude (code convolutionnel) pour faire de la détection d'erreur.

0.6.6 Récapitulatif

- Bonne robustesse de la modulation en présence de bruits additifs.
- Complexité assez importante des modulateurs et démodulateurs.

- La bande passante utile (à $-4,5\text{ dB}$) du signal modulé est égale à la rapidité R . (bande passante entre 2 zéros d'énergie $= 2R$).
- Le débit est lié à la rapidité par $R = D/q$ où q est le nombre de bits composant les symboles et $n = 2^q$ le nombre d'états.
- Utilisé principalement à partir des modulations à plus de 16 états.
- A partir, de 9600 bit/s , la transmission en duplex exige des systèmes à annulation d'écho auto-adaptatif d'où augmentation du taux d'erreur et nécessité de procéder à un codage convolutionnel.

0.7 Multiplexage

Objectif : regrouper sur un même support (à haut débit) le trafic provenant de liaisons à plus faible débit.

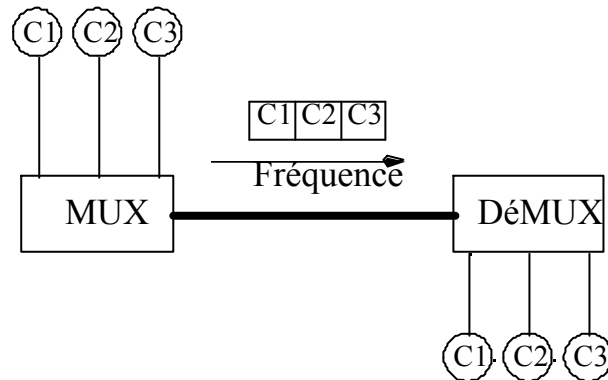
Deux techniques de multiplexage : en fréquence (le plus ancien) ou en temps.

1. Multiplexage fréquentiel (FDM : Frequency Division Multiplexing) :
Transmission de données en même temps mais après modulations sur des fréquences porteuses différentes.
 \Rightarrow *Multiplexage par répartition en fréquence.*
2. Multiplexage temporel (TDM : Time Division Multiplexing) :
Transmission de données à la même fréquence mais à des instants différents ce qui permet de regrouper des liaisons de faibles débits sur une liaison de fort débit (voie composite).
 \Rightarrow *Multiplexage par répartition en temps.*

0.7.1 Multiplexage fréquentiel

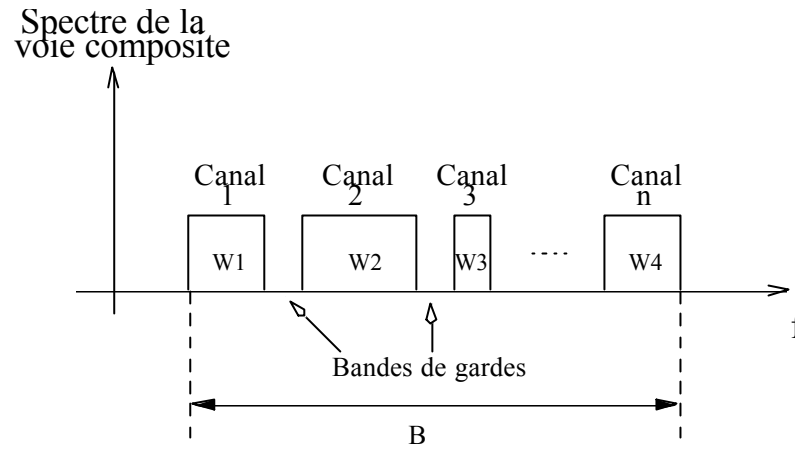
Principe

Division de la largeur de bande d'un canal B en n canaux de largeur de bande W_i .

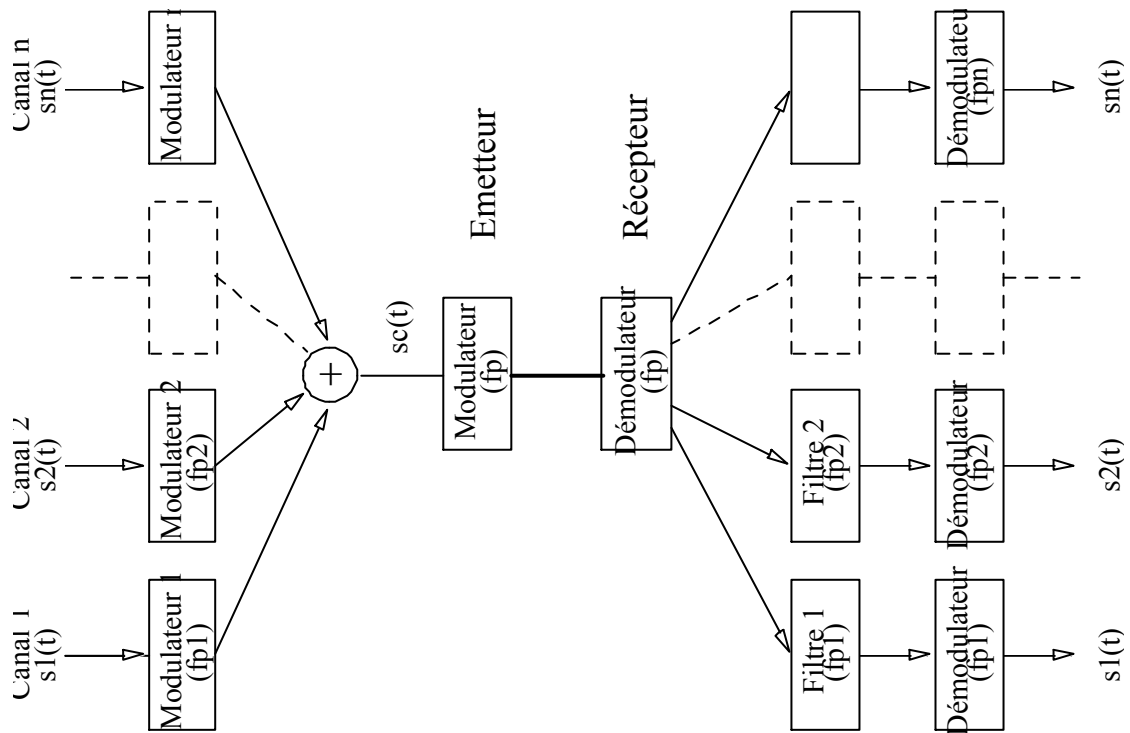


- Le signal multiplexé (voie composite) est obtenu par sommation des signaux modulés à des fréquences porteuses différentes.
- Le démultiplexage est obtenu par filtrage (passe-bandes accordés sur la fréquence centrale du canal) puis démodulation.
- Lorsque les spectres des canaux sont trop proches \rightarrow interférences entre deux canaux consécutifs = *diaphonie*.
 \Rightarrow nécessité de séparer chaque canal par des bandes de gardes.
- La largeur de spectre sur la voie composite est la somme des différentes largeurs des sous-canaux et des bandes de garde entre les canaux.

- Efficacité : rapport entre la somme des largeurs utiles W_i et la largeur de la voie composite.



Le signal sur la voie composite peut éventuellement être remodulé avant transmission ou remultiplexé (cas de la téléphonie).

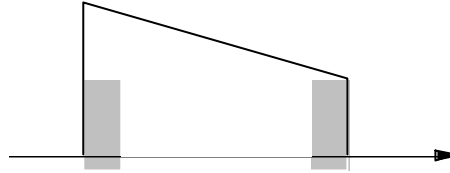


Exemples

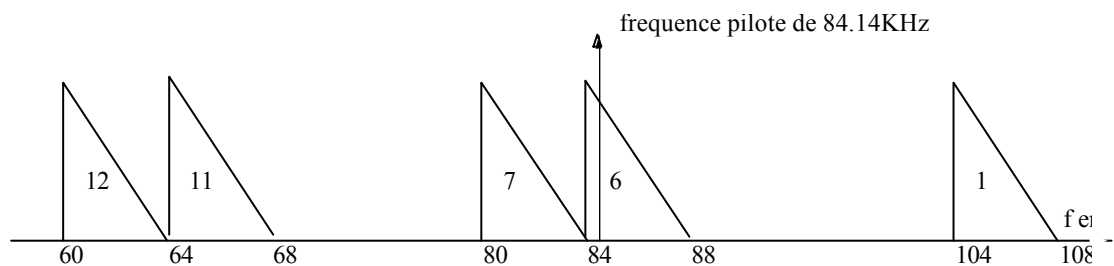
1. En radiophonie ou en télévision après modulation en FM, PM ou AM BLU en fonction de la gamme de fréquence.
2. Télégraphie : modulation de type FSK de 24 voies à 50 bauds
3. Modems : transmission sur deux fils en full duplex (V21, V22, ...).

4. Téléphonie :

Rappel : une voie téléphonique analogique correspond à un canal de 4000 Hz comprenant une bande de garde de chaque côté de 500 Hz .



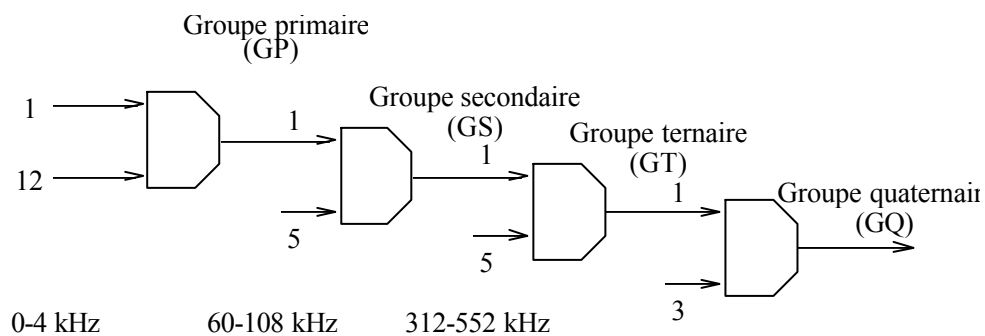
Groupe primaire : multiplexage en modulation BLU inférieure de 12 voies de 4 kHz donnant une bande de 48 kHz ou pouvant être directement utilisé par l'abonné avec location de lignes spécialisées (avis V35 débit atteignant 144 kbits/s après modulation en BLU).



spectre du signal multiplex sur groupe primaire

Hiérarchisation du système FDM (norme CCITT)

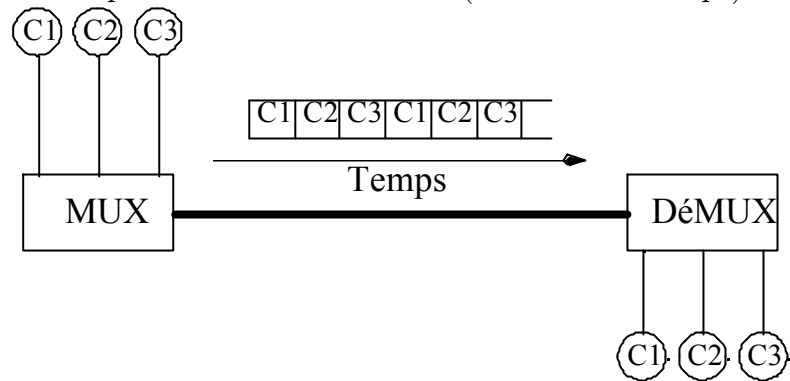
Nb de canaux	Largeur de bande (MHz)	Spectre (MHz)	Désignation
12	0.048	0.06 - 0.108	groupe primaire
60	0.24	0.312 - 0.552	super groupe
300	1.232	0.812 - 2.044	maître groupe
900	3.872	8.516 - 12388	super maître groupe



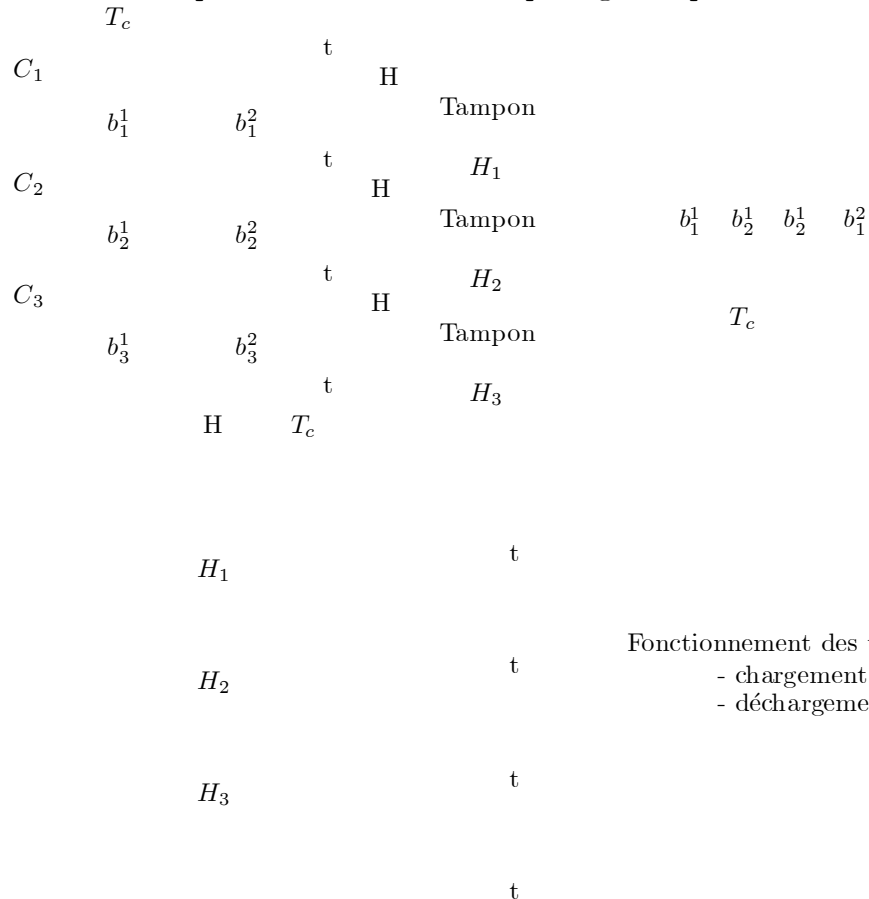
0.7.2 Multiplexage temporel

Principe

Répartition sur un même canal (voie composite) de n voies périodiquement dans le temps en leur allouant un IT (intervalle de temps).



Exemple élémentaire de multiplexage temporel :



- Nécessite la transmission de bits supplémentaires pour la signalisation et la synchronisation.
- Efficacité = rapport entre la somme des débits faibles vitesses et le débit de la voie composite.
- Possibilité de mélanger des signaux de débits, de codage et de mode de transmission différents.

Caractéristiques

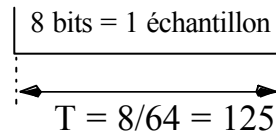
- Efficacité comprise entre 0.7 et 0.9
- Types de multiplexeur :
 1. temporel fixe par bit : un IT comprend 1 bit
 2. temporel fixe par caractère : un IT comprend 1 caractère
 3. temporel statistique : remplissage de l'IT si le canal a besoin de transmettre des infos. L'efficacité est plus importante > 1 .
- la signalisation peut se faire :
 1. dans la bande : 1 bit supplémentaire est mis dans l'IT
 2. 1 IT est réservé pour la signalisation

Exemple du RNIS

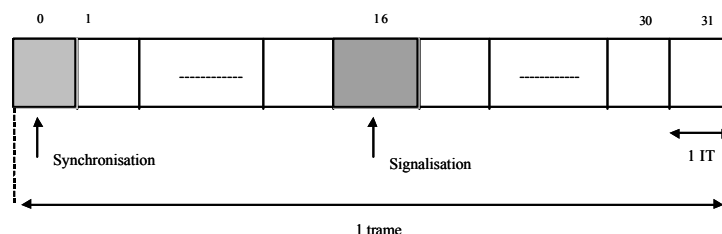
Rappel : numérisation d'un échantillon de voix sur 8 bits à $f_e = 8\text{kHz}$.

→ débit d'un canal = 64 kbps .

- On réalise un multiplexage par caractère de 8 bits.



- Constitution de la trame (voie composite) : 30 IT sont réservés pour 30 canaux de données + 1 pour la synchronisation + 1 pour la signalisation.
- débit de la voie composite = $32 * 64 = 2,048 \text{ Mbps}$.
- Efficacité : $\eta = \frac{\text{Dbit utile}}{\text{Dbit rel}} = \frac{30}{32} = 0,9375$.

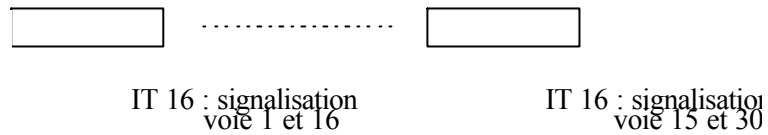


Mais 1 IT par trame est insuffisant pour la signalisation \rightarrow pour ne pas diminuer l'efficacité, on répartit la signalisation sur plusieurs trames = multi-trame.

- Constitution de la multi-trame :
la trame 0 de chaque multitrame est utilisée pour le verrouillage de la multi-trame.
l'IT 0 est utilisée une trame sur deux pour le mot de verrouillage de trame (les

autres sont utilisées pour informations annexes).

l'IT 16 sert à la transmission des signalisations.



Hiérarchisation du système TDM (norme CCITT)

Niveau	Nb voies	Nb bits/période de $125\mu s$	Débit binaire (Mbps)	Désignation
TNL 1	30	256 (32 IT)	2,048	2 Mbps
TNL 2	120	1056 (132 IT)	8,448	8 Mbps
TNL 3	480	4296 (537 IT)	34,368	34 Mbps
TNL 4	1920	17408 (2176 IT)	139,264	140 Mbps
TNL 5	7680	70624 (8828 IT)	554,992	565 Mbps

