
OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Nathalie Thomas
IRIT/ENSEEIHT
Nathalie.Thomas@enseeiht.fr

Sommaire

- La modulation OFDM

- Rappels - Contexte
- Génération et réception d'un signal OFDM
- Problèmes posés : synchronisation, facteur de crête

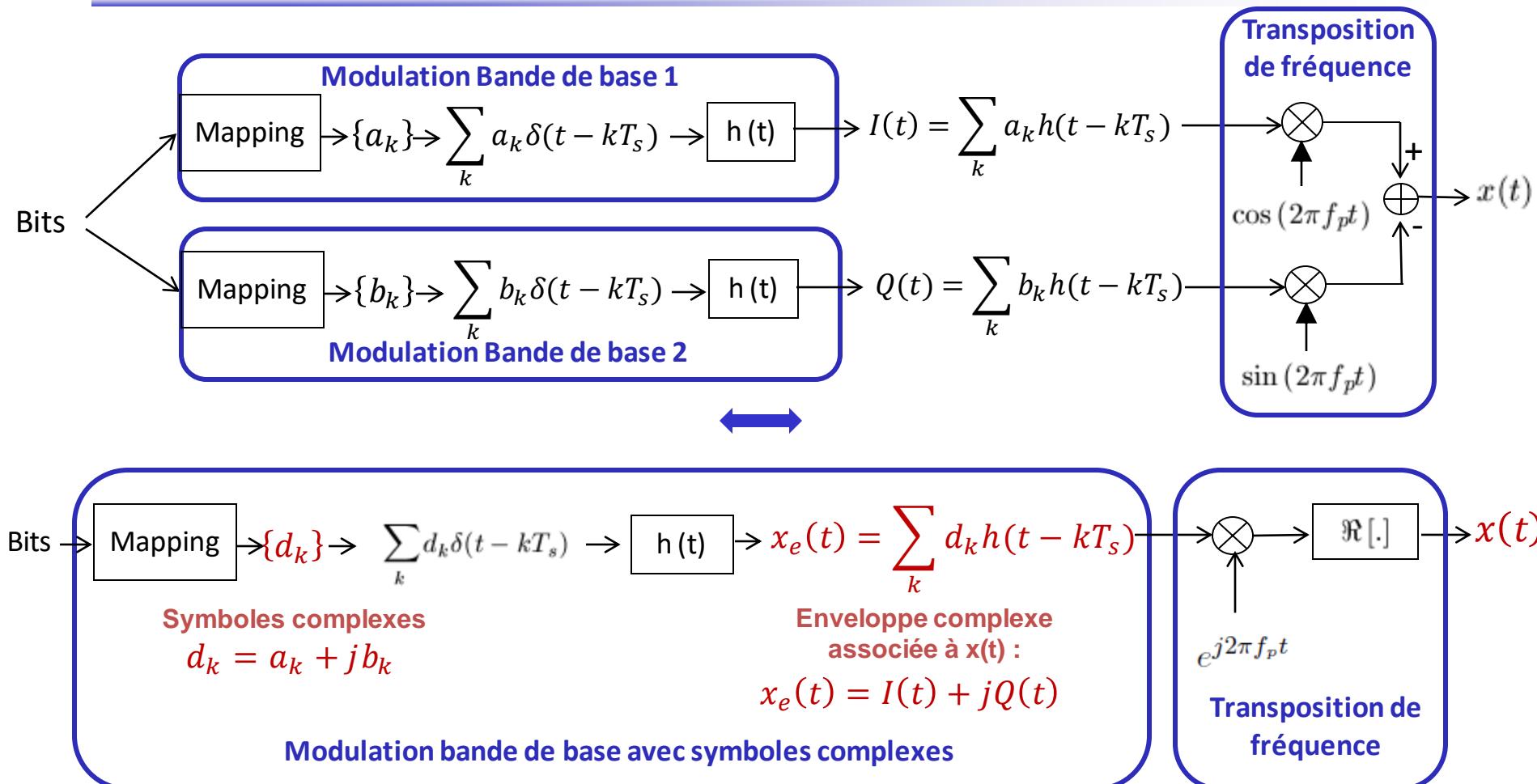
- Des exemples d'application dans :

- Les réseaux locaux sans fil ([IEEE802.11a, g, n, ac, ax](#))
- Les réseaux métropolitains sans fil (IEEE802.16d, e)
- La télévision numérique terrestre ([DVB-T, DVB-T2](#)) et la radio numérique (DAB)
- Les modems xDSL
- Les courants porteurs en ligne (CPL)
- 4G (LTE), 5G

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Rappels et contexte

- Chaine de transmission sur porteuse

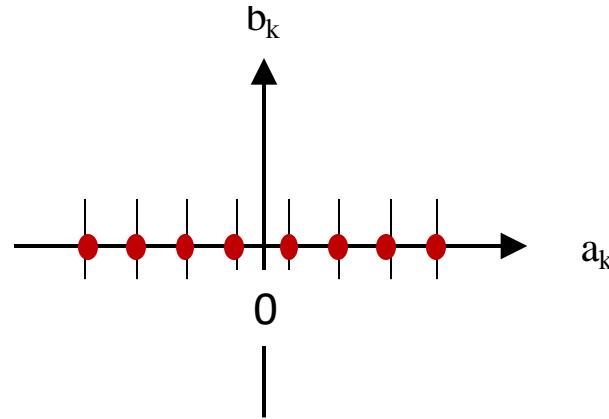


$$x(t) = I(t)\cos(2\pi f_p t) - Q(t)\sin(2\pi f_p t) = \Re[x_e(t)e^{j2\pi f_p t}]$$

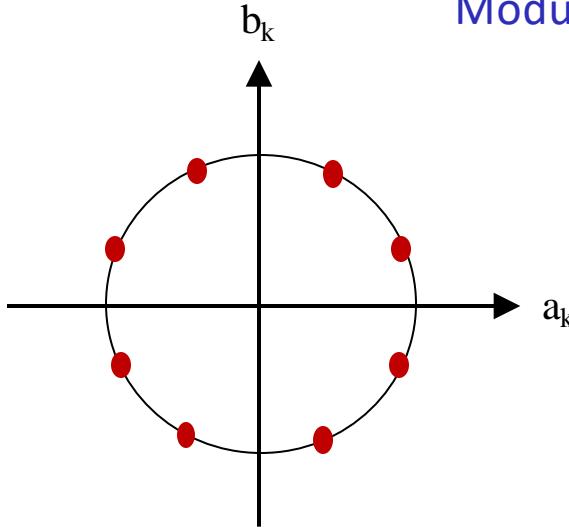
$$x_e(t) = I(t) + jQ(t) = \sum_k (a_k + jb_k)h(t - kT_s) = \sum_k d_k h(t - kT_s)$$

- Chaine de transmission sur porteuse

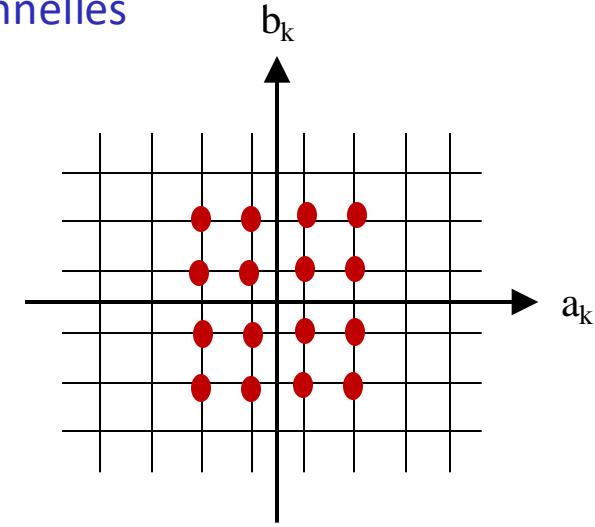
Modulation monodimensionnelle : ASK



Modulations bi-dimensionnelles

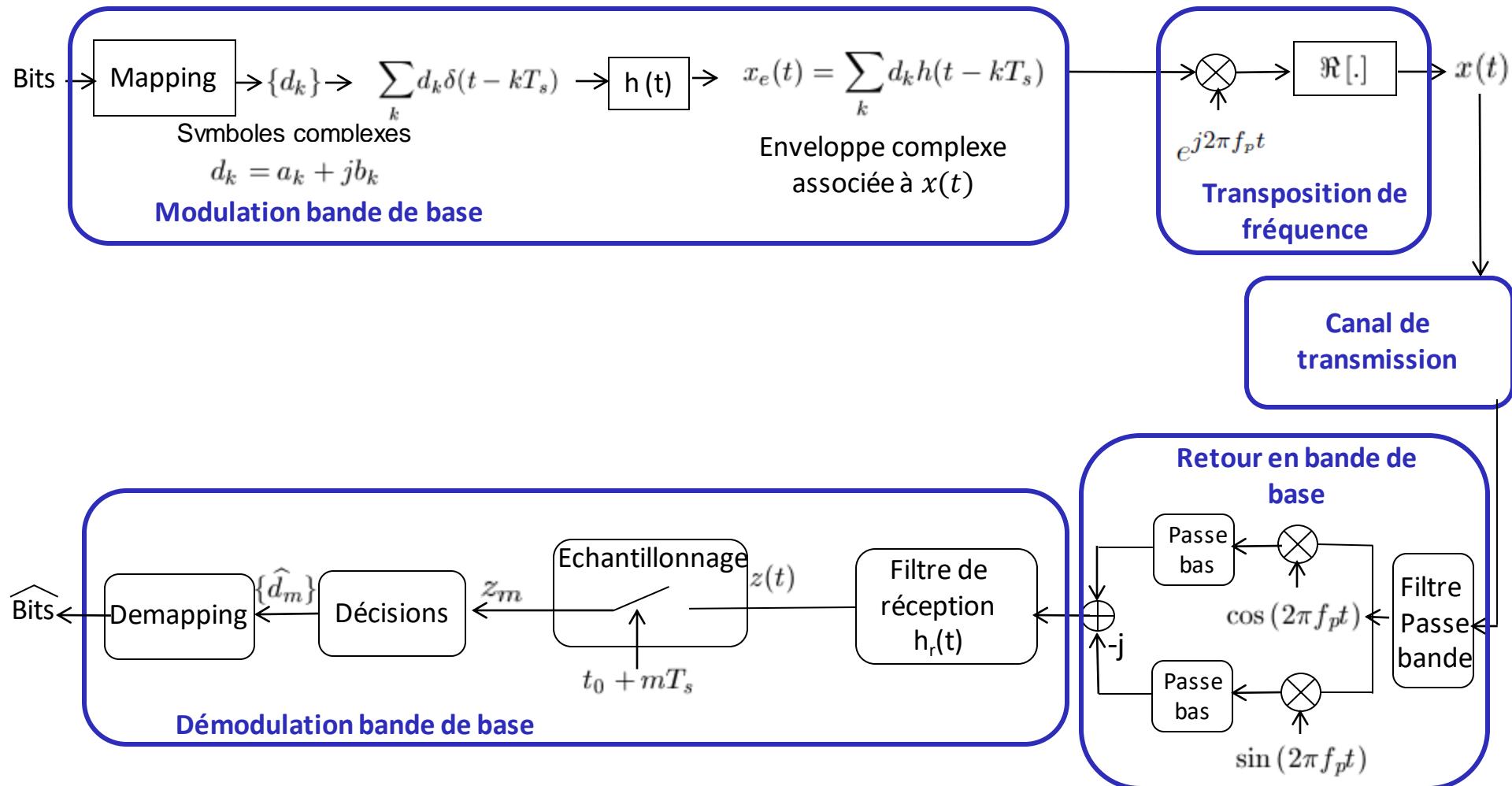


Modulation de type PSK

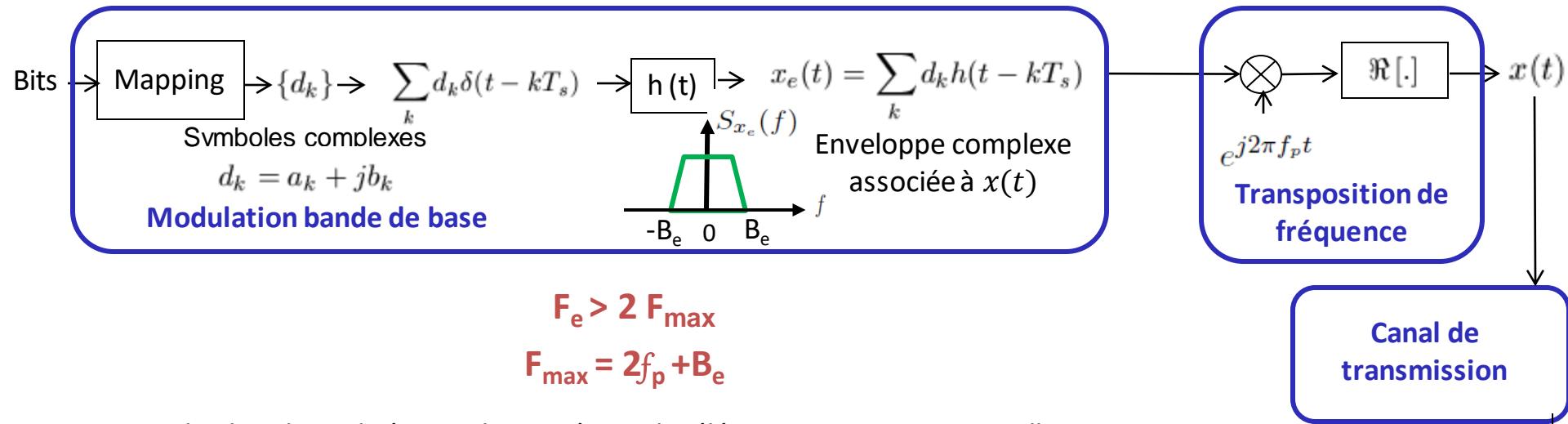


Modulation de type QAM

- Chaine de transmission sur porteuse

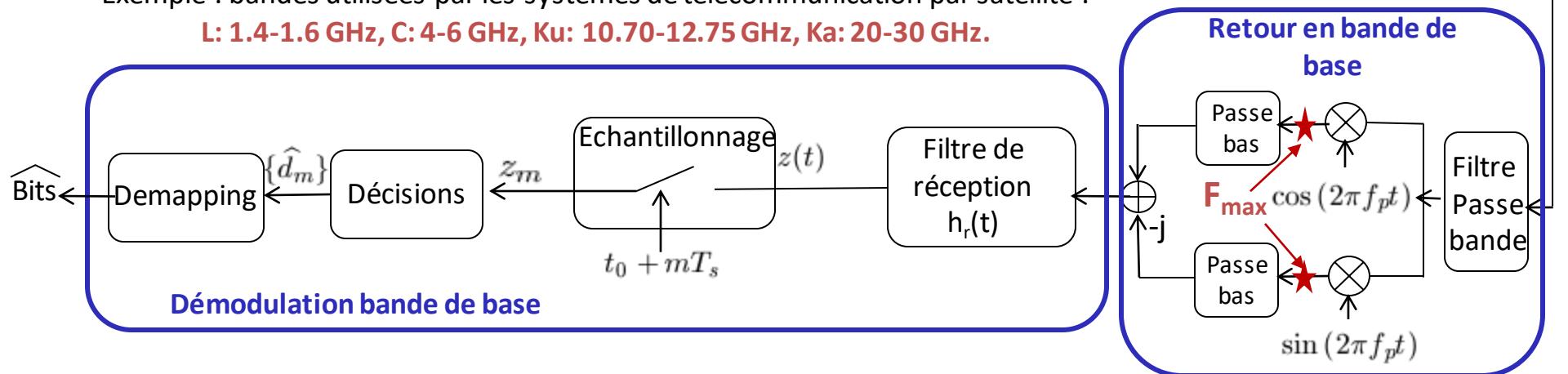


- Chaine de transmission sur porteuse

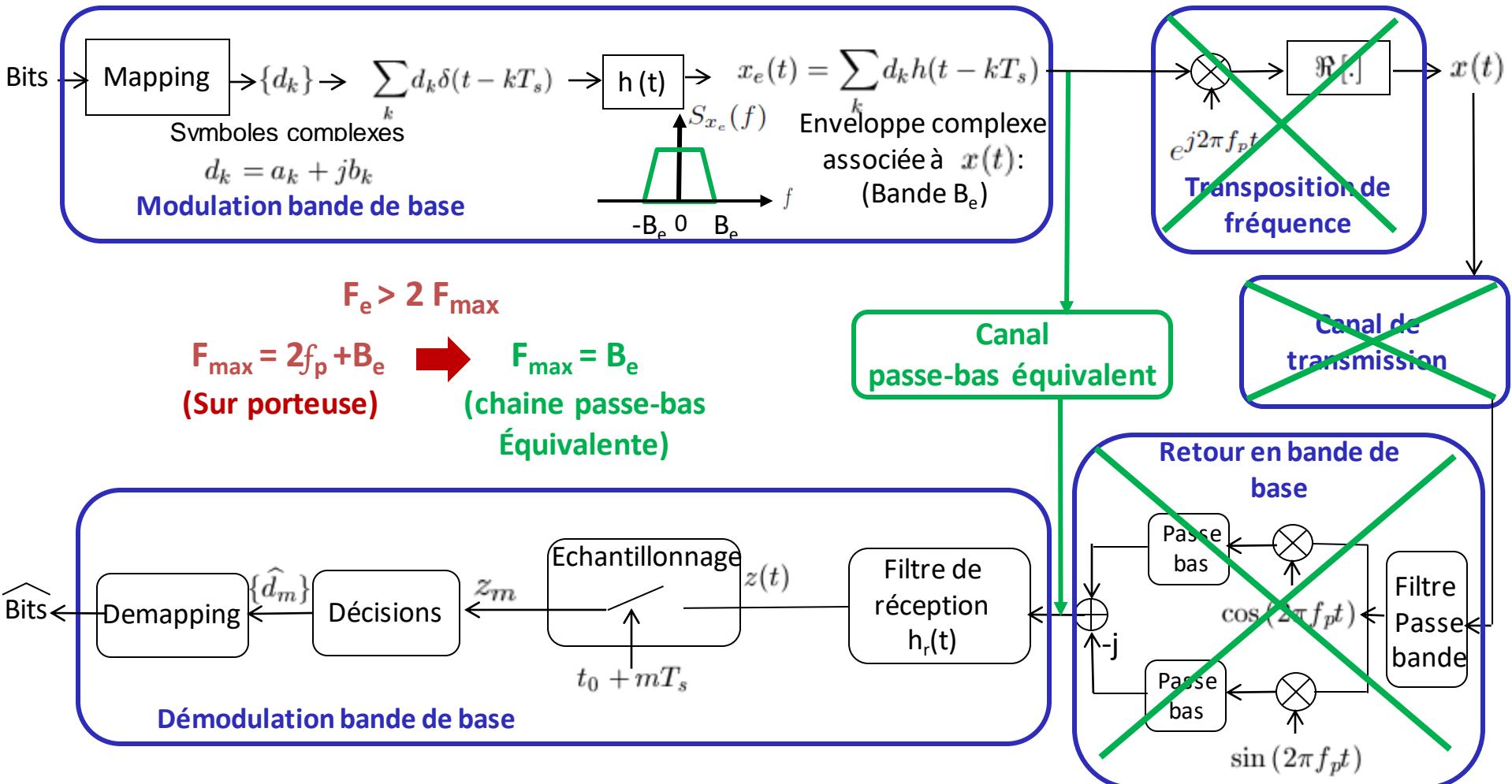


Exemple : bandes utilisées par les systèmes de télécommunication par satellite :

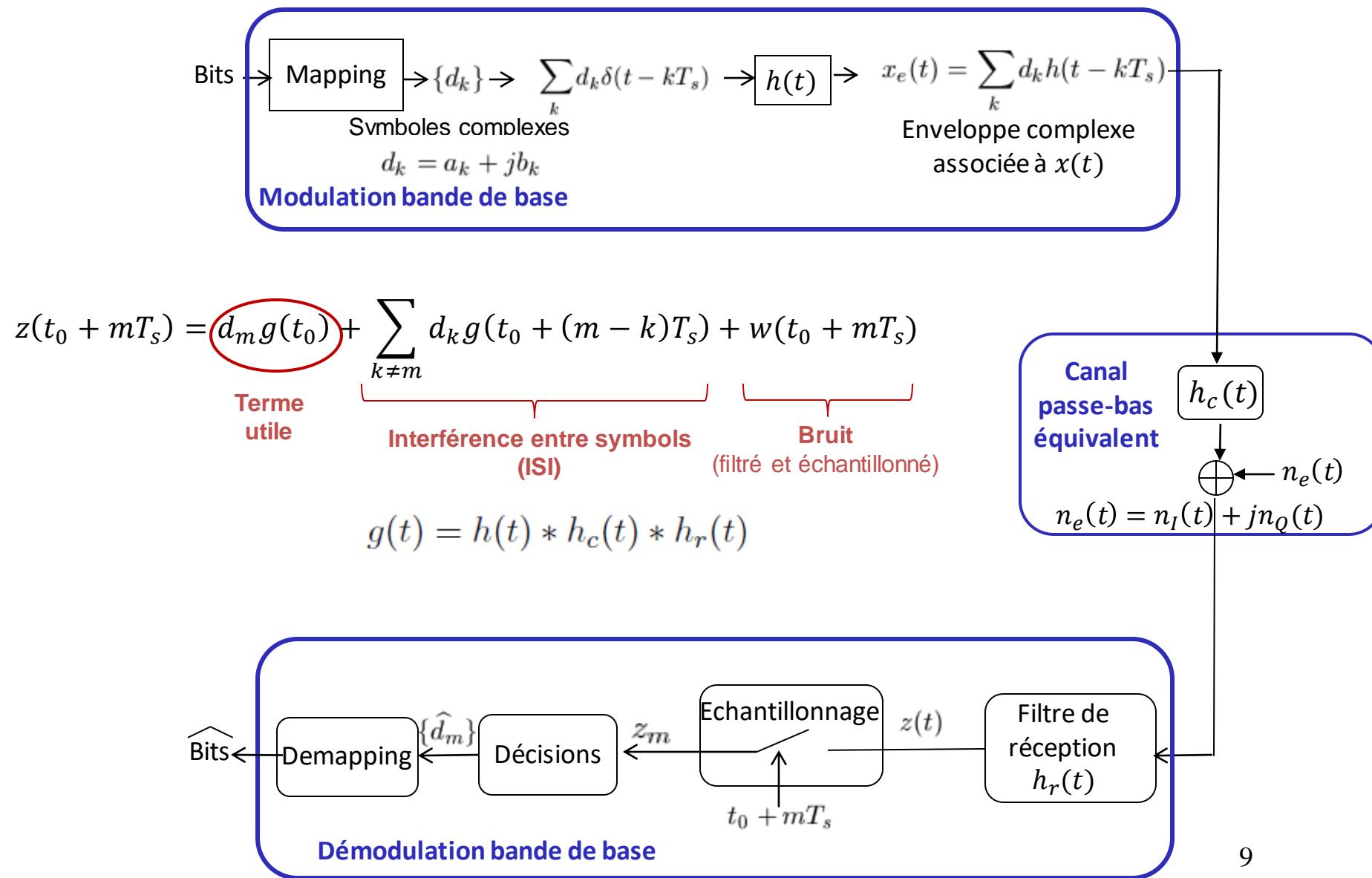
L: 1.4-1.6 GHz, C: 4-6 GHz, Ku: 10.70-12.75 GHz, Ka: 20-30 GHz.



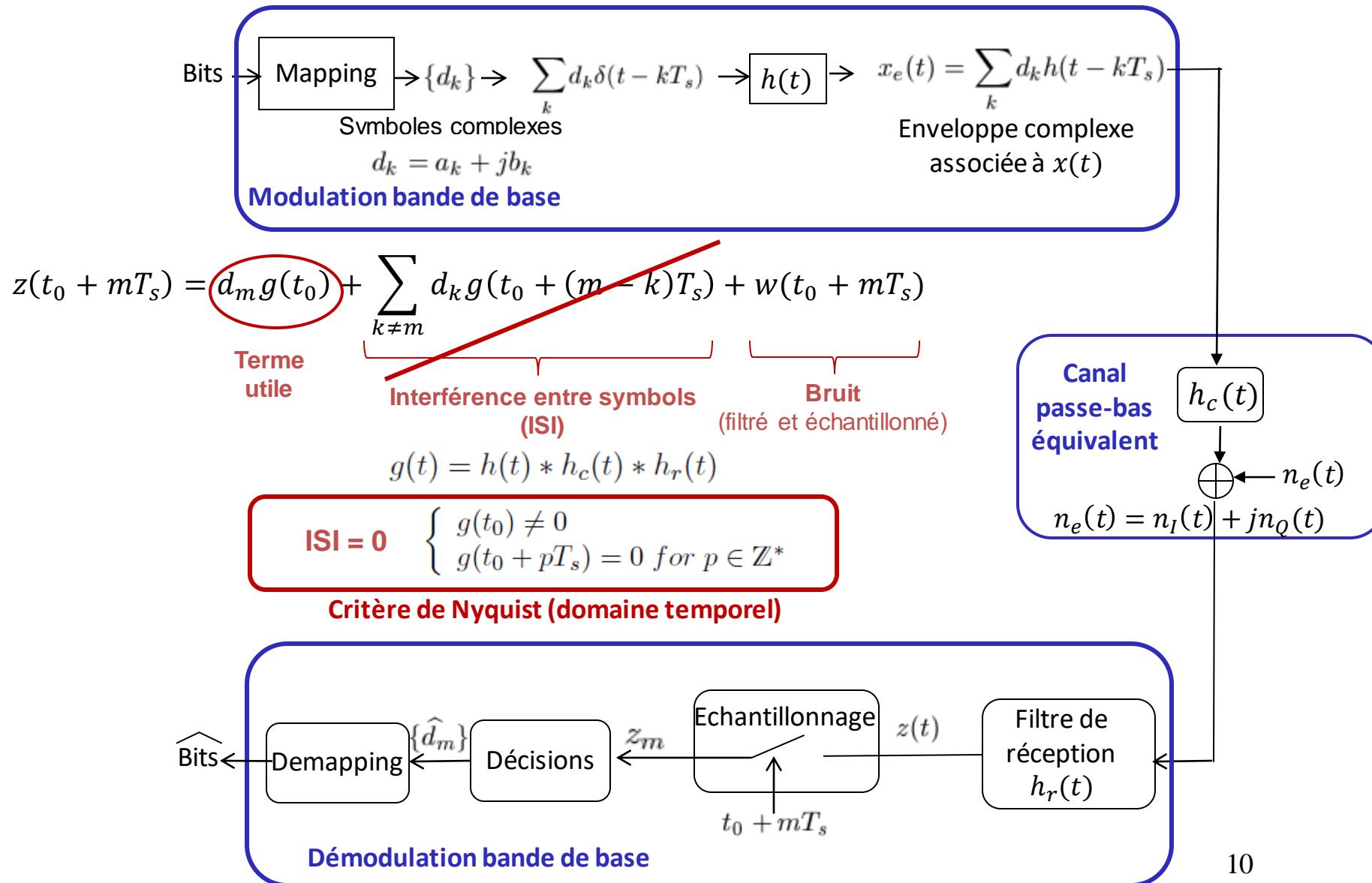
- Chaine passe-bas équivalente



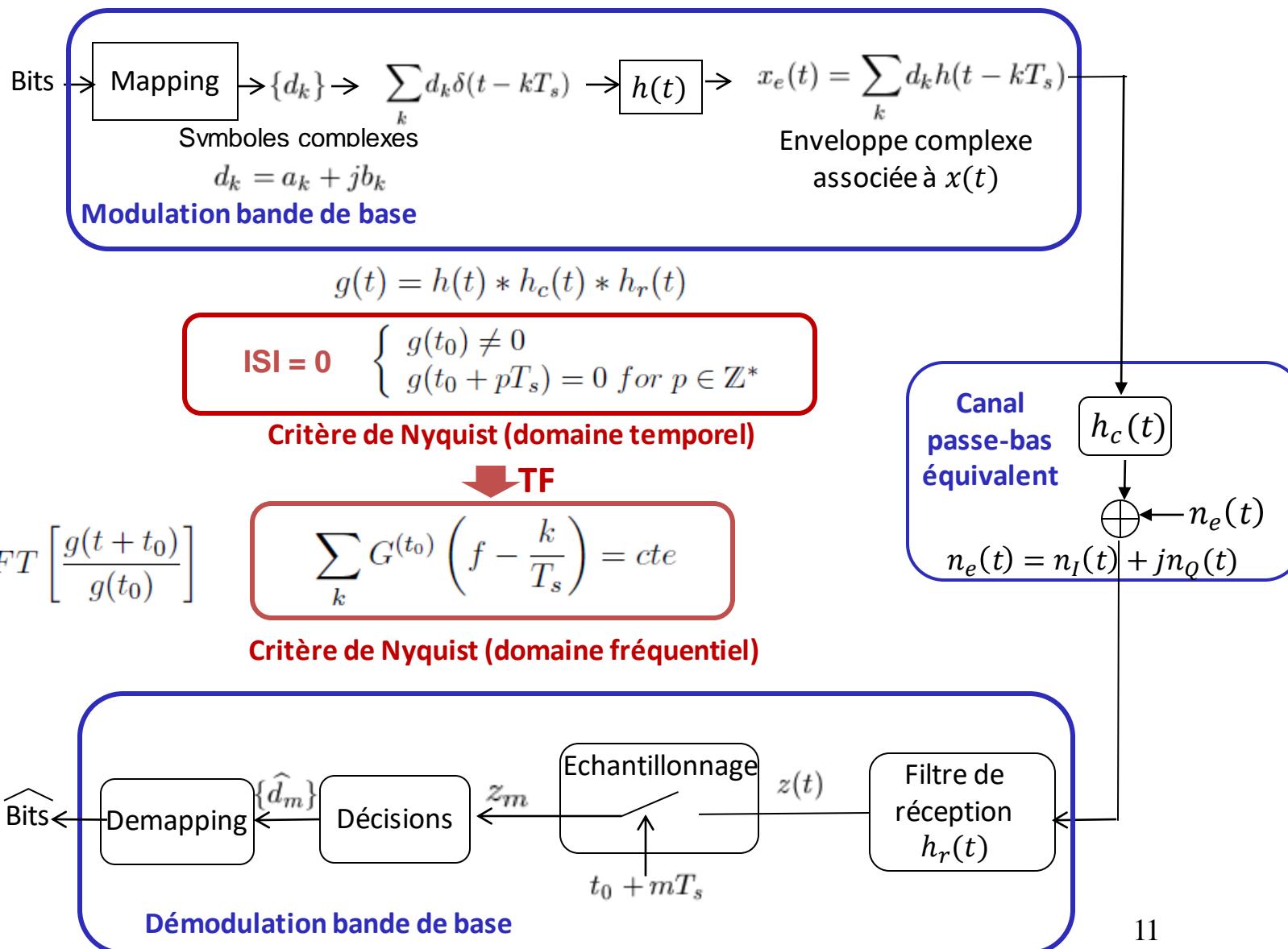
- Critère de Nyquist



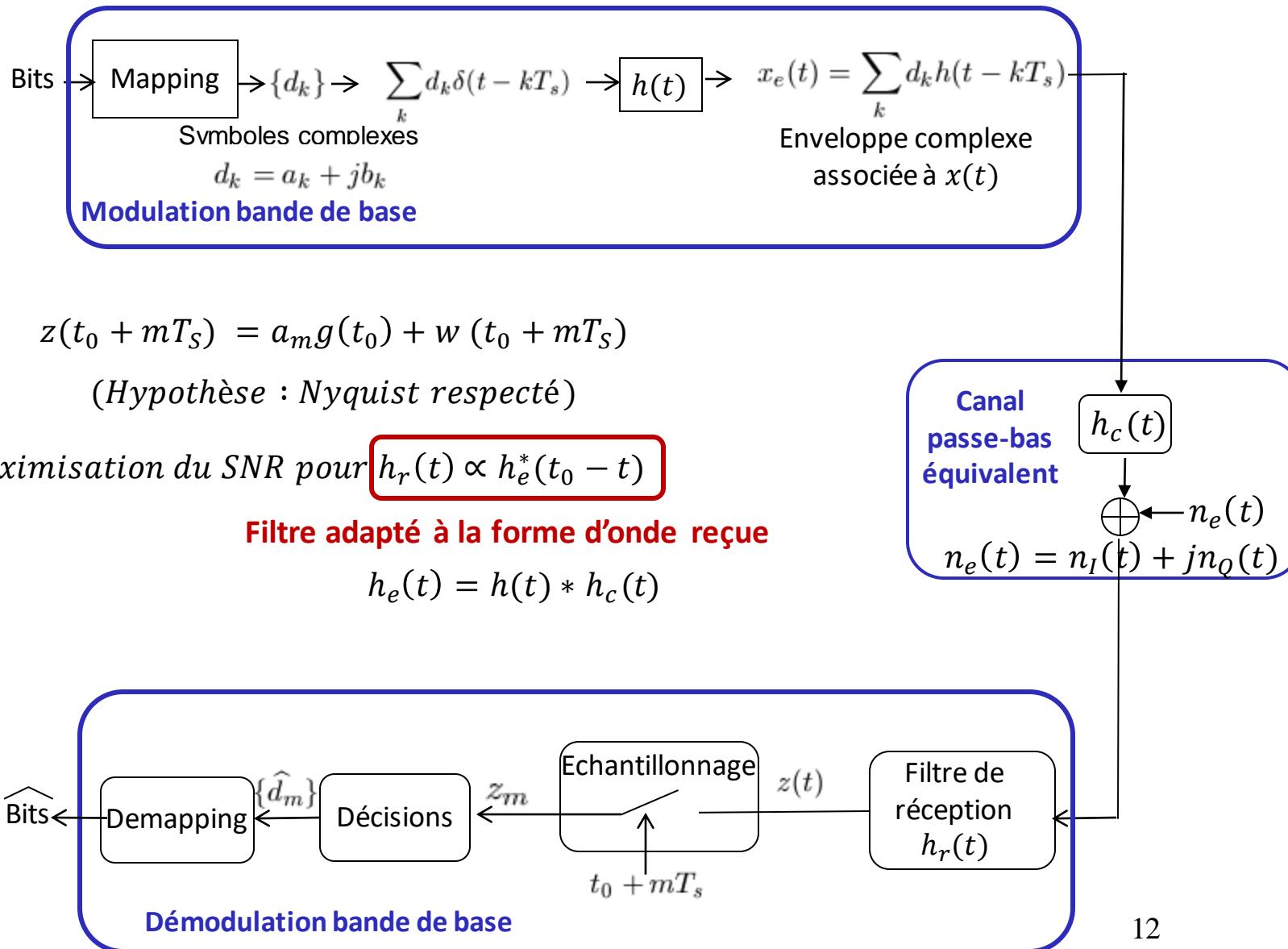
- Critère de Nyquist



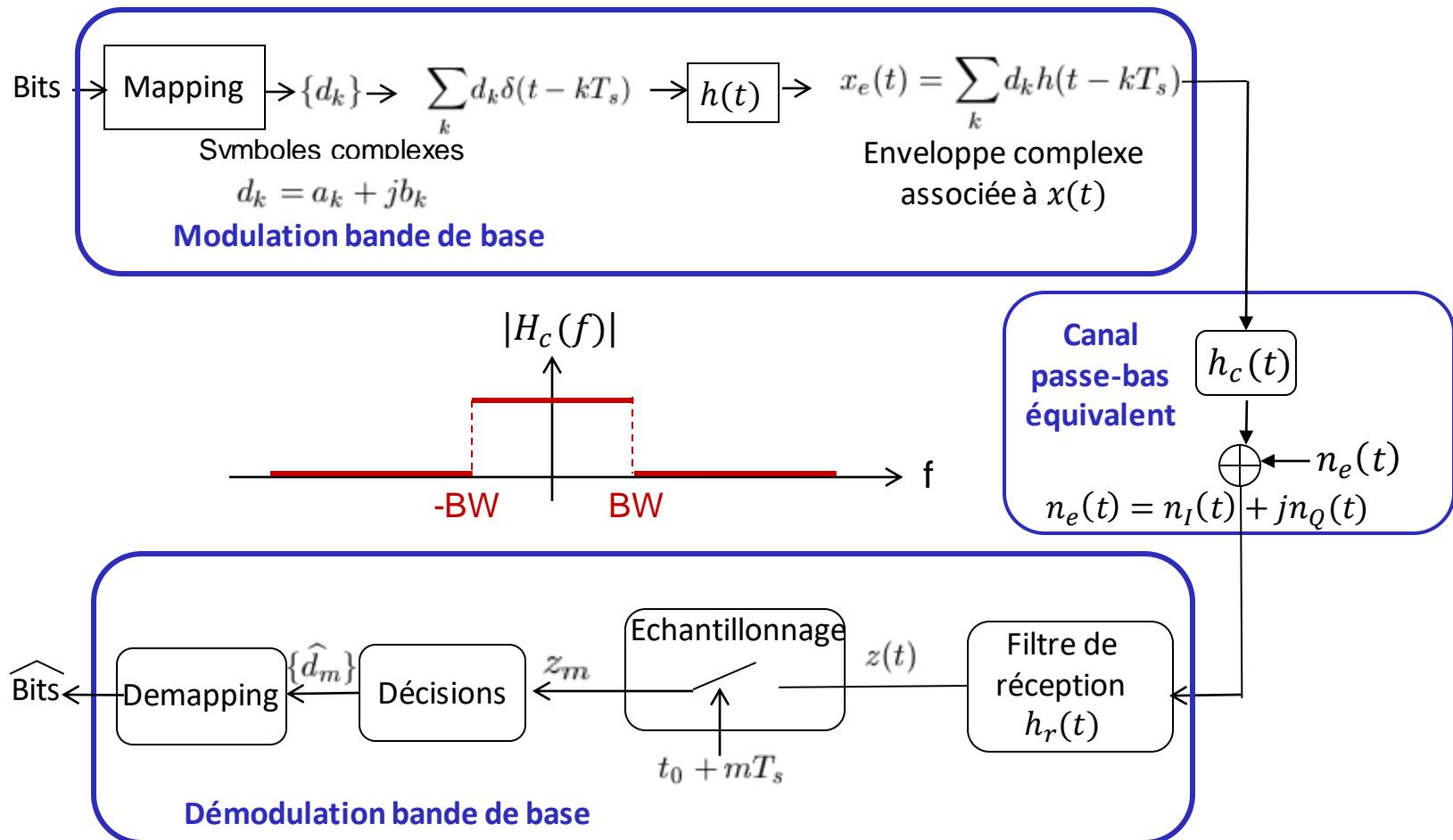
- Critère de Nyquist



- Filtrage adapté

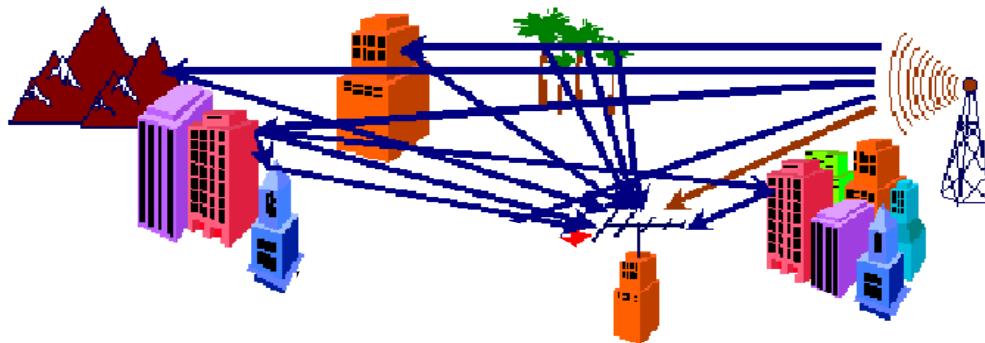


- Canal passe-bas équivalent « idéal »

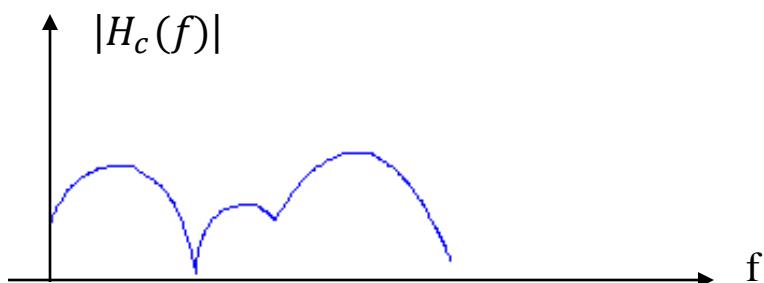


→ Respect du Critère de Nyquist + Filtrage adapté OK si bande de $H(f)H_r(f) < BW$

- Canaux de transmissions sélectifs en fréquences

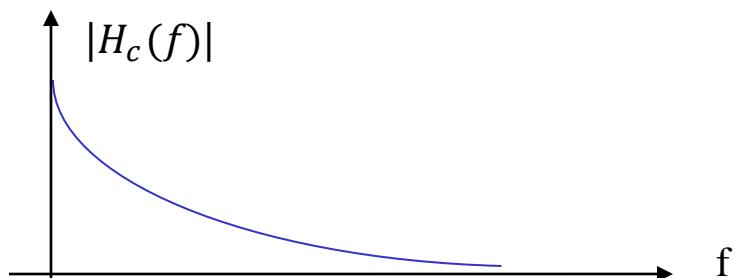
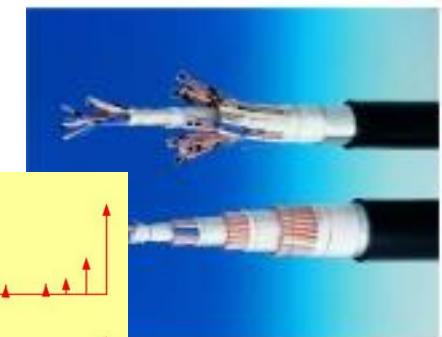
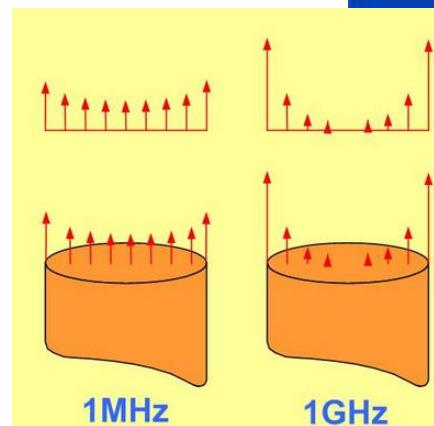


Trajets multiples



Canal hertzien terrestre

Effet de peau



Canal téléphonique

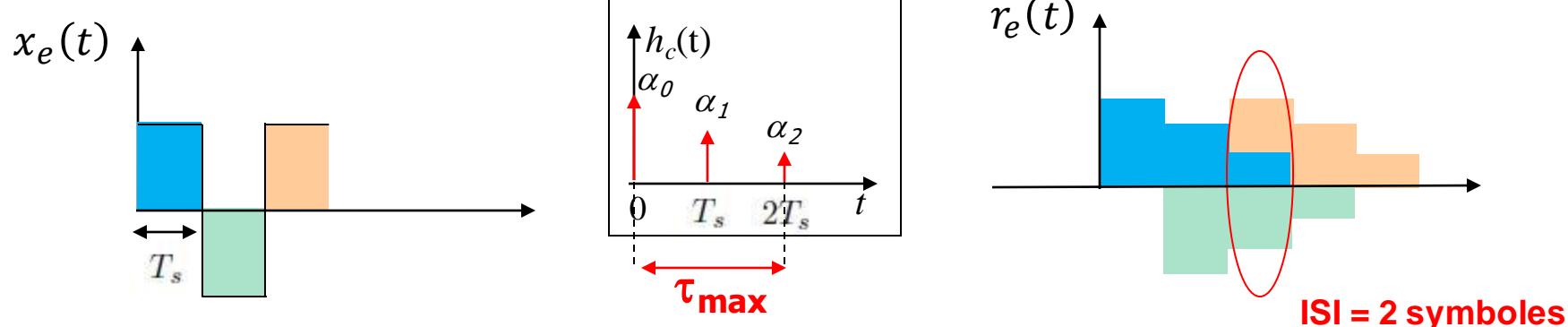
→ Paramètre : Bande de cohérence du canal (B_c)

- Interférence entre symboles (ISI : Inter Symbol Interference)

Exemple (réponse impulsionnelle du canal échantillonnée à la période symbole T_s) :

$$x_e(t) = \sum_k d_k h(t - kT_s), \quad d_k \in \{-1, +1\}, \quad h(t) = \Pi_{T_s}(t - kT_s)$$

bits	1	0	1
d_k	1	-1	1



$$r_e(t) = \alpha_0 x_e(t) + \alpha_1 x_e(t - T_s) + \alpha_2 x_e(t - 2T_s)$$

$$r_e(t) = d_0(\alpha_0 h(t) + \alpha_1 h(t - T_s) + \alpha_2 h(t - 2T_s))$$

$$+ d_1(\alpha_0 h(t - T_s) + \alpha_1 h(t - 2T_s) + \alpha_2 h(t - 3T_s)) + d_2(\alpha_0 h(t - 2T_s) + \alpha_1 h(t - 3T_s) + \alpha_2 h(t - 4T_s))$$

→ Paramètre : Étalement maximal des retards (τ_{max})

- Impact de l'ajout d'un bruit sur le signal émis (canal AWGN)

Image transmise

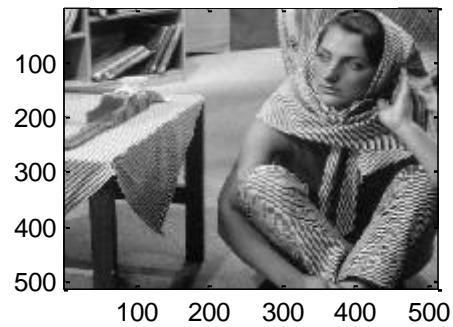


Image reçue, $\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \text{ dB}$

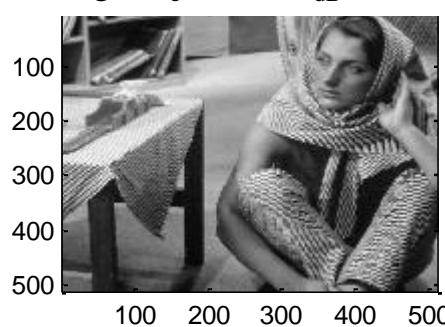
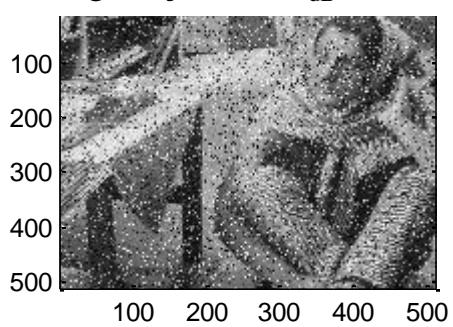


Image reçue, $\text{SNR}_{\text{dB}} = 0 \text{ dB}$



$\text{TEB} = 2.38 \cdot 10^{-6}$

$\text{TEB} = 0.0784$

- Impact d'un canal sélectif en fréquence, $\text{SNR} = 10 \text{ dB}$

$$\mathbf{c} = [0.407, 0.815, 0.407]$$

Image émise

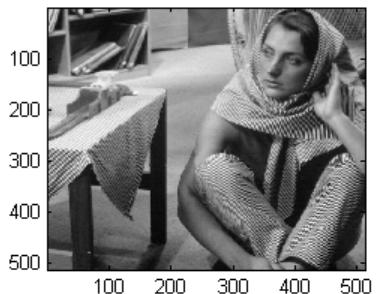
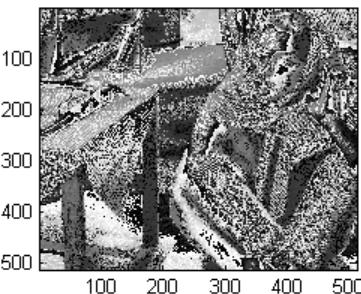


Image reçue



$$\mathbf{c} = [0.04, -0.05, 0.07, -0.21, -0.5, 0.72, 0.36, 0, 0.21, 0.03, 0.07]$$

Image émise

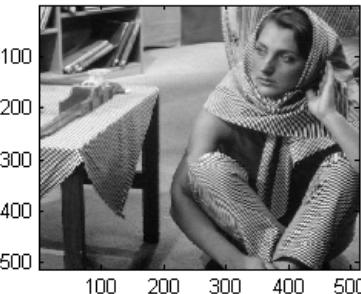
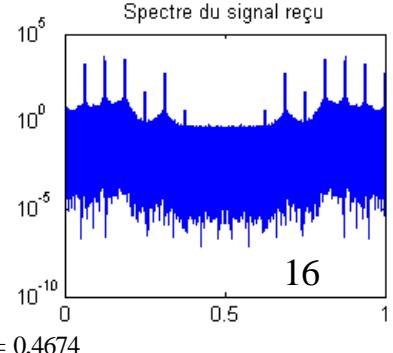
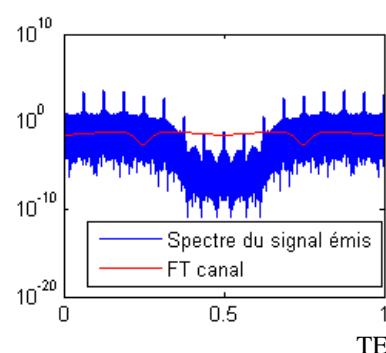
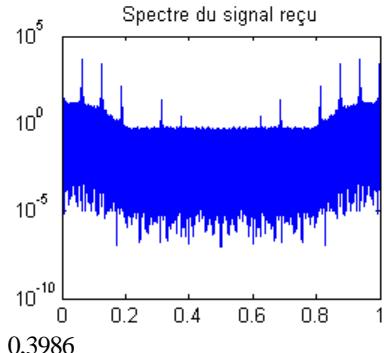
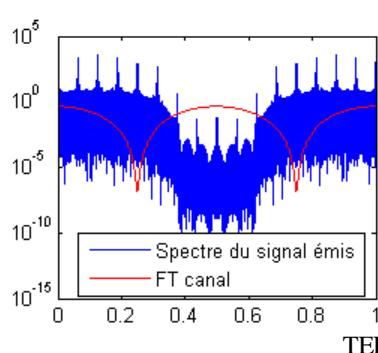
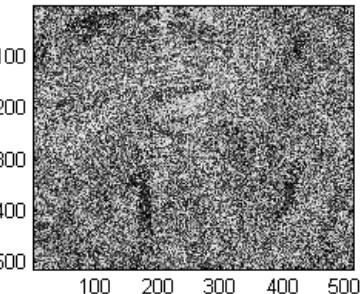
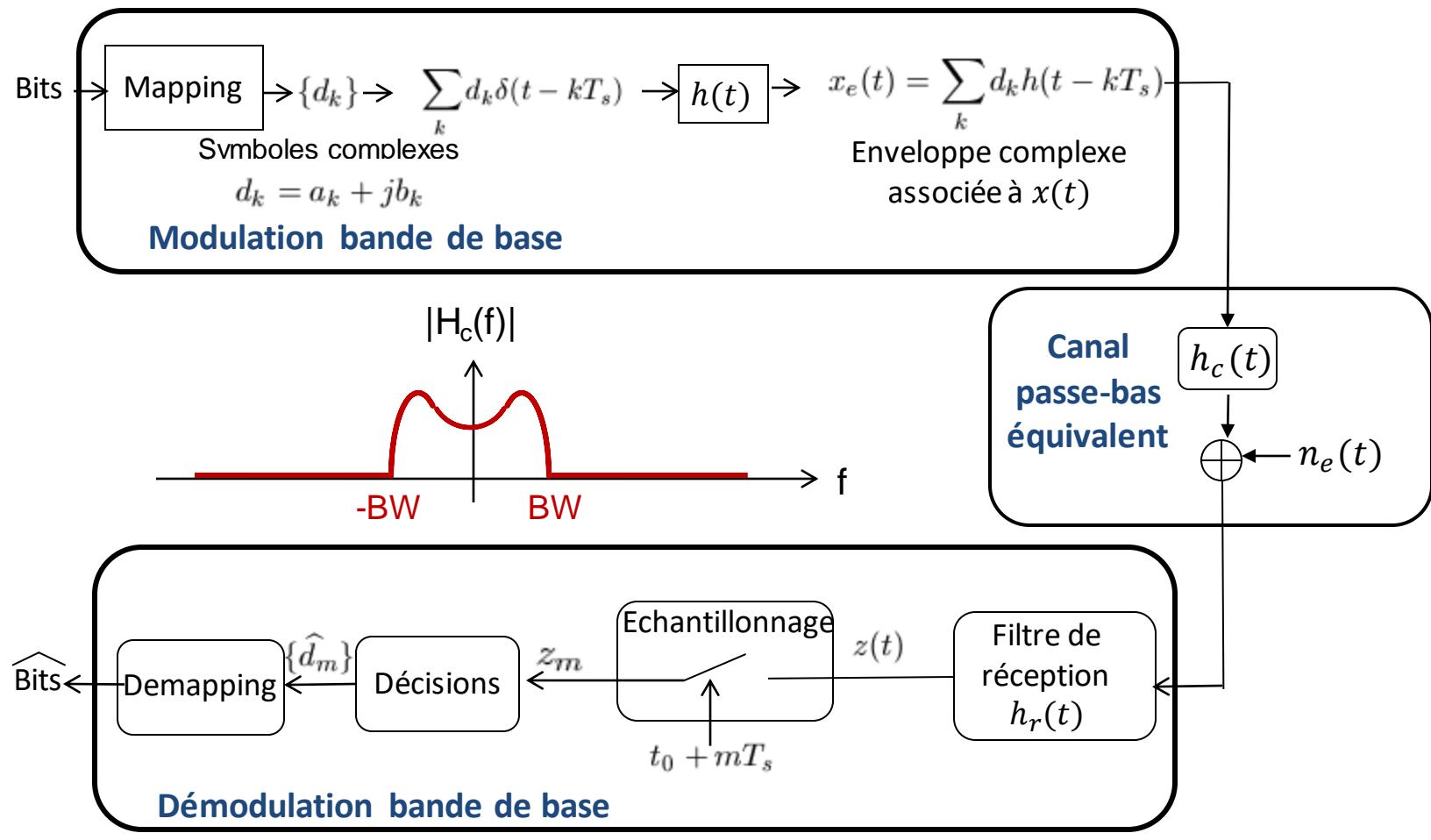


Image reçue



Solutions couches physiques

- Canal sélectif en fréquences



→ Egalisation

→ Techniques multi porteuses

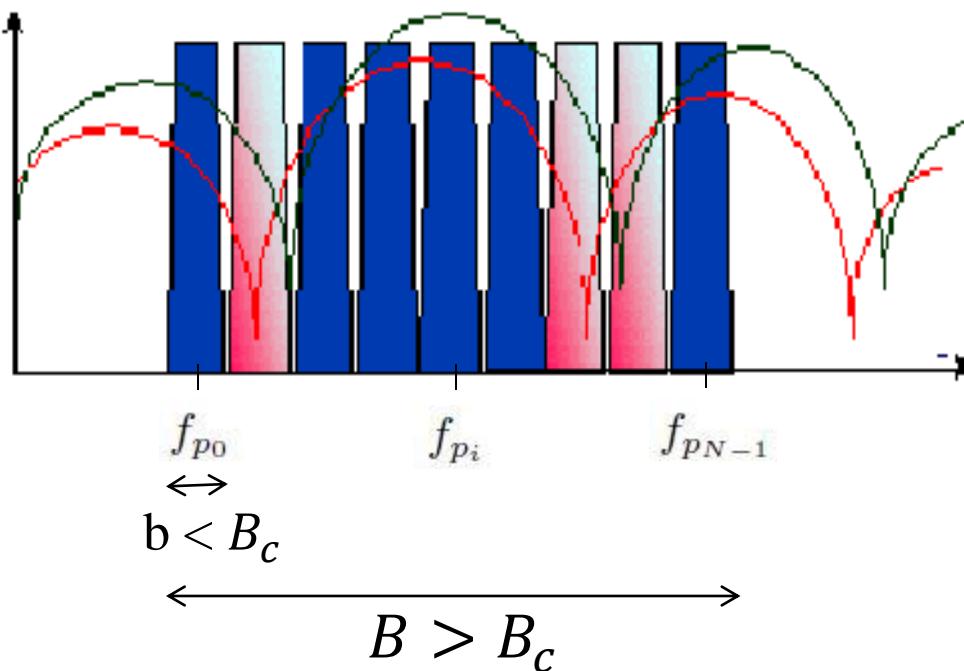
OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Techniques multi-porteuses

Techniques multi porteuses

- Principe : transmissions simultanées sur N porteuses

→ Point de vue fréquentiel : utilisation de N sous canaux de largeurs réduites



=> Réduction de la sélectivité sur chaque sous canal

Techniques multi porteuses

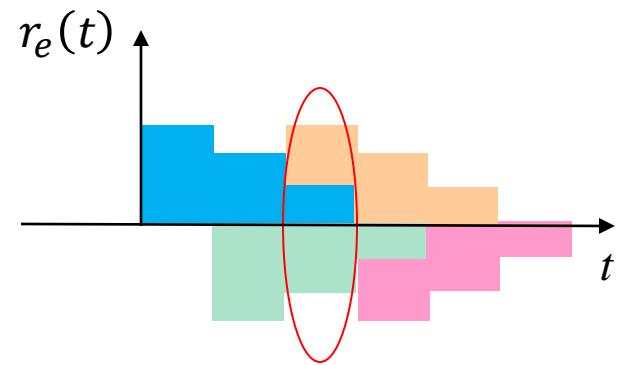
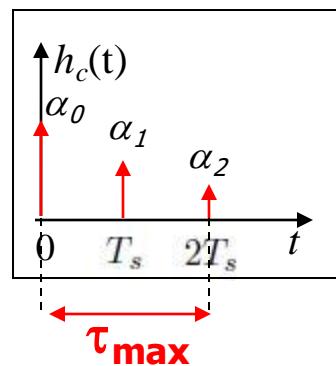
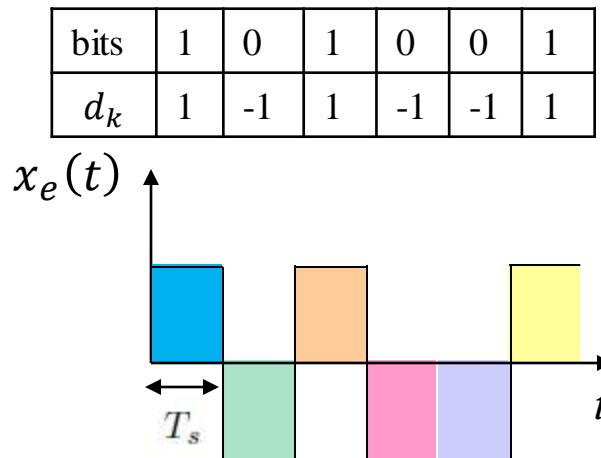
- Principe : transmissions simultanées sur N porteuses

→ Point de vue temporel : réduction du débit sur chaque porteuse

Exemple

Monoporteuse

$$x_e(t) = \sum_k d_k h(t - kT_s), \quad d_k \in \{-1, +1\}, \quad h(t) = \Pi_{T_s}(t - kT_s)$$



$$R_s = \frac{1}{T_s}$$

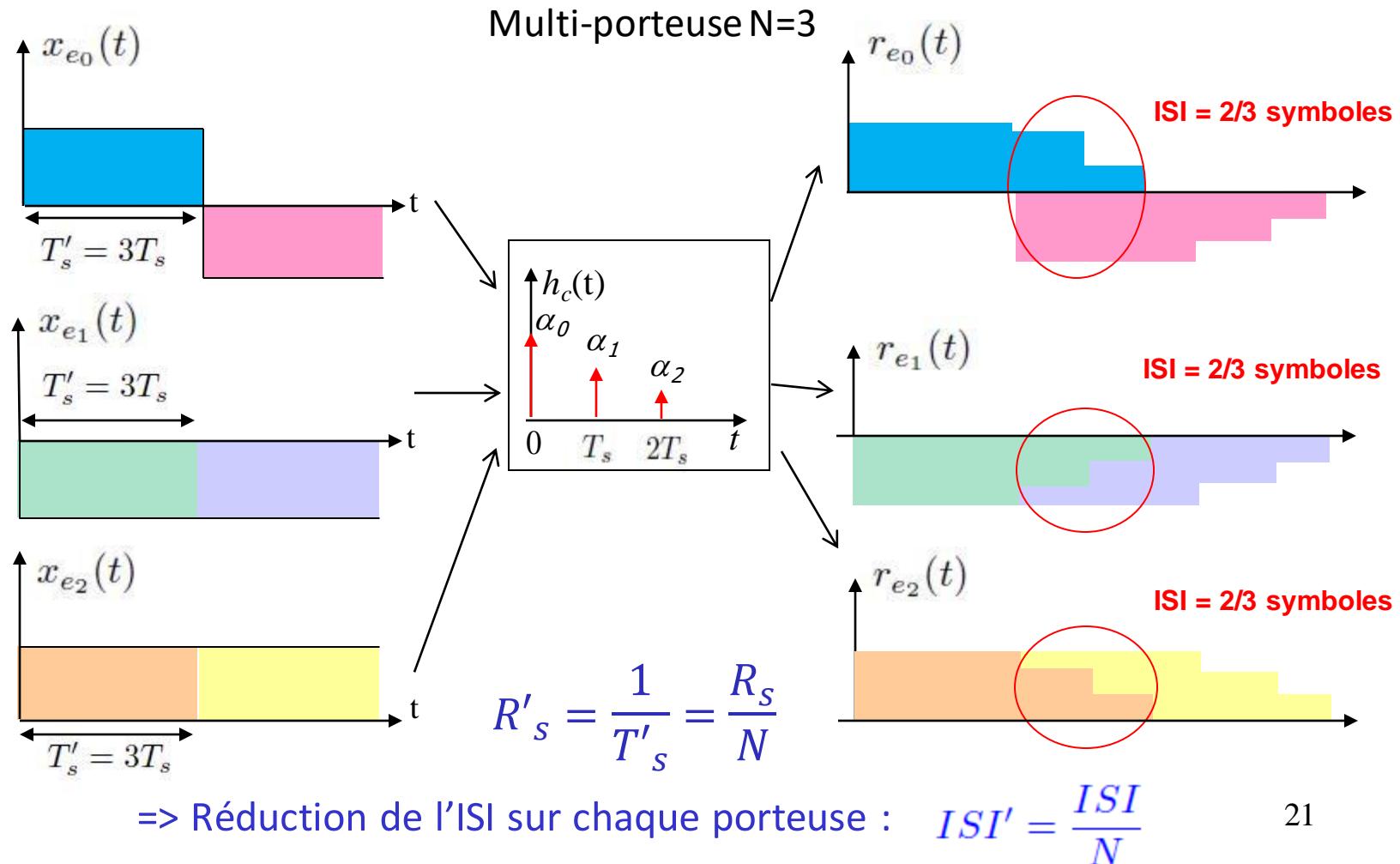
$$\text{ISI} = \frac{\tau_{\max}}{T_s} = 2 \text{ symboles}$$

Techniques multi porteuses

- Principe : transmissions simultanées sur N porteuses

→ Point de vue temporel : réduction du débit sur chaque porteuse

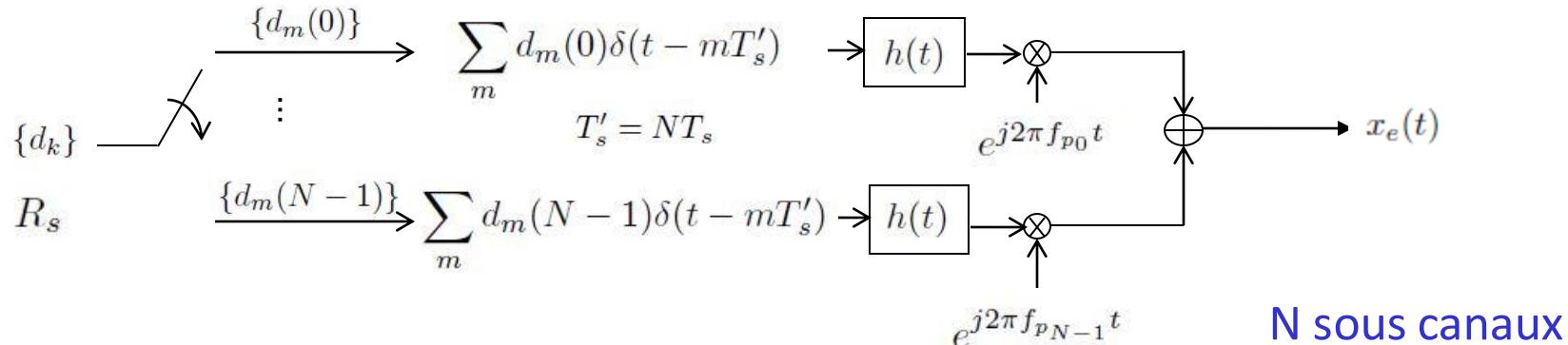
Exemple



Techniques multi porteuses

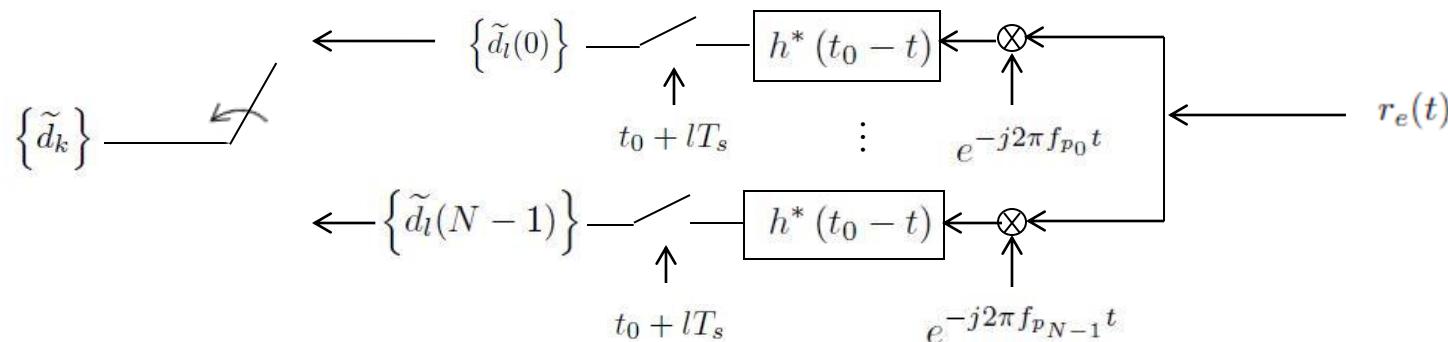
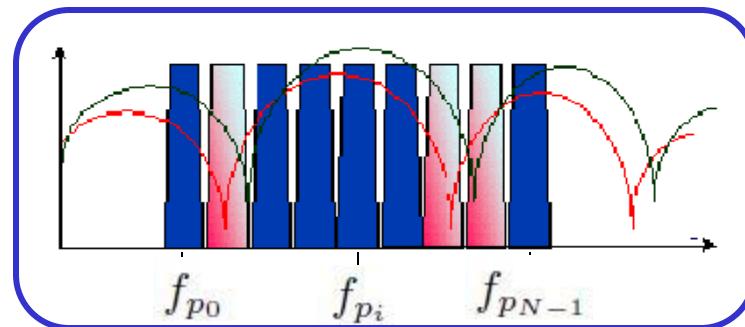
- Implantation

→ Emission :



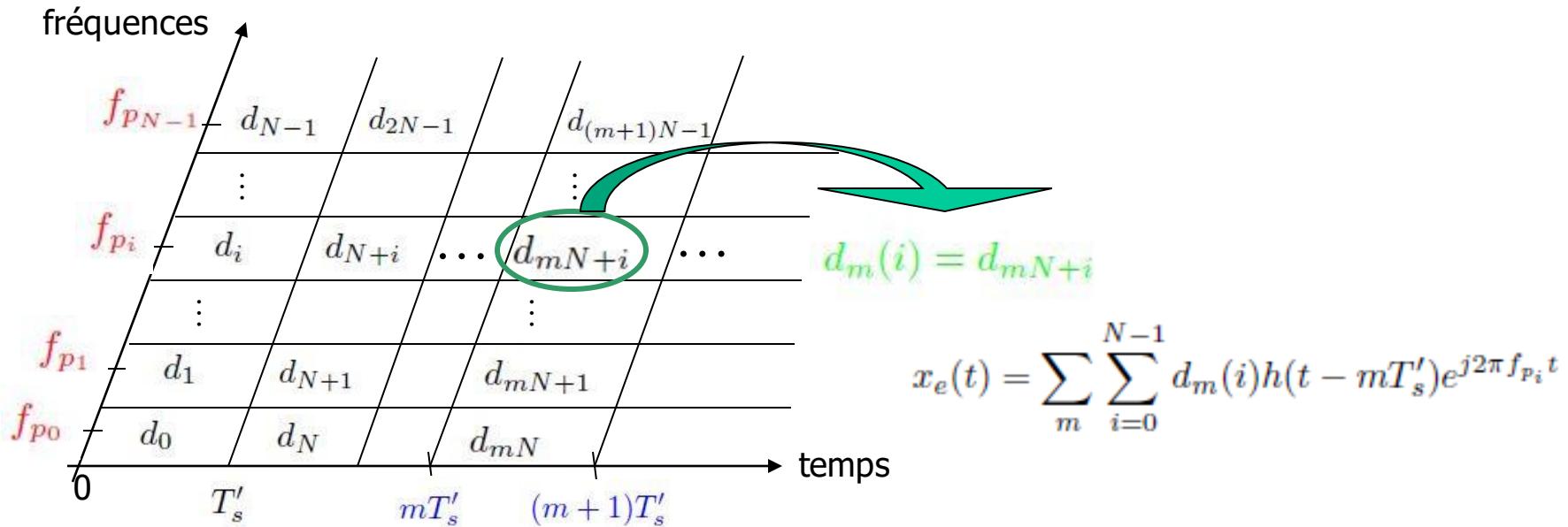
N sous canaux

→ Réception :



Techniques multi porteuses

- Enveloppe complexe associée au signal multi porteuses



- Difficultés

- Implantation complexe pour N grand
- Perte en bande allouée
(bande de garde pour récupération par filtrage sur chaque sous canal)

Résolues par l'OFDM = forme particulière de multi porteuses

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Bases de l'OFDM

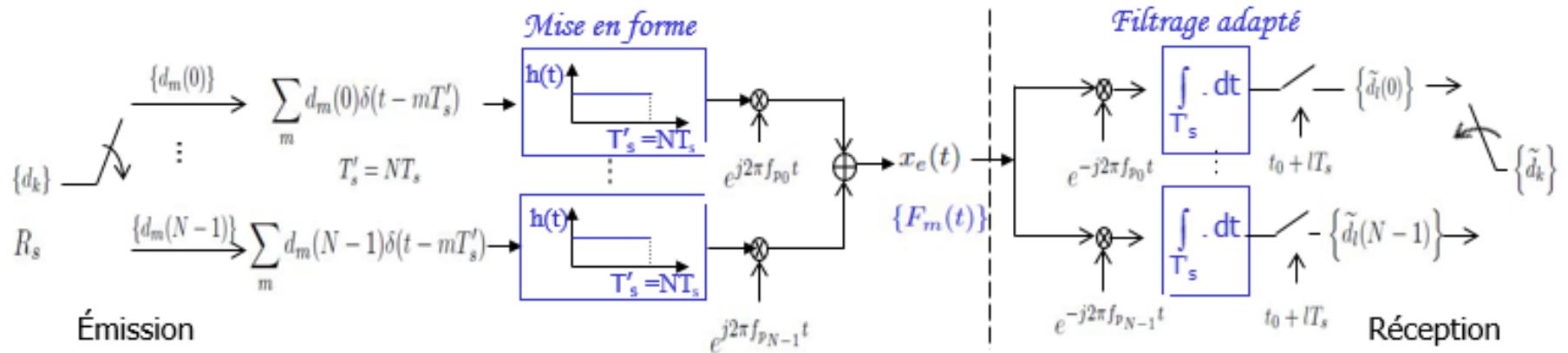
- Orthogonalité des porteuses
 - Implantation par iFFT/FFT
 - Ajout du préfixe cyclique
-

OFDM : génération du signal

Enveloppe complexe associée au signal multi porteuses :

$$x_e(t) = \sum_m \sum_{i=0}^{N-1} d_m(i) h(t - mT'_s) e^{j2\pi f_{p_i} t}$$

- Forme particulière de multi porteuse : mise en forme rectangulaire



m^{ime} symbole OFDM ($t \in [mT'_s, (m+1)T'_s]$) :

$$F_m(t) = \sum_{i=0}^{N-1} d_m(i) e^{j2\pi f_{p_i} t}$$

et $x_e(t) = \sum_m F_m(t)$

OFDM : génération du signal

- Orthogonalité des porteuses

Sans canal, Réception voie l entre mT'_s et $(m+1)T'_s$:

$$\tilde{d}_m(l) = \int_{mT'_s}^{(m+1)T'_s} F_m(t) e^{-j2\pi f_{pl} t} dt = d_m(l)T'_s + \underbrace{\sum_{i=0, i \neq l}^{N-1} d_m(i) \int_{mT'_s}^{(m+1)T'_s} e^{j2\pi(f_{pi} - f_{pl})t} dt}_{\text{Inter Carrier Interference (ICI)}}$$

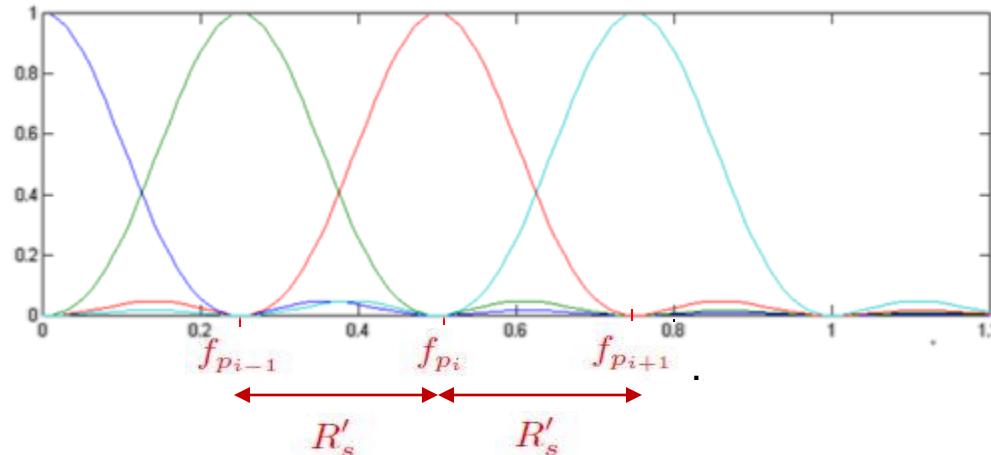
Annulation de l'interférence entre porteuses :

$$\text{ICI} = 0 \Rightarrow f_{pi} - f_{pl} = \frac{p}{T'_s}, p \in \mathbb{N}^*$$

Condition d'orthogonalité des porteuses



Utilisation optimale de la bande allouée :



OFDM : génération du signal

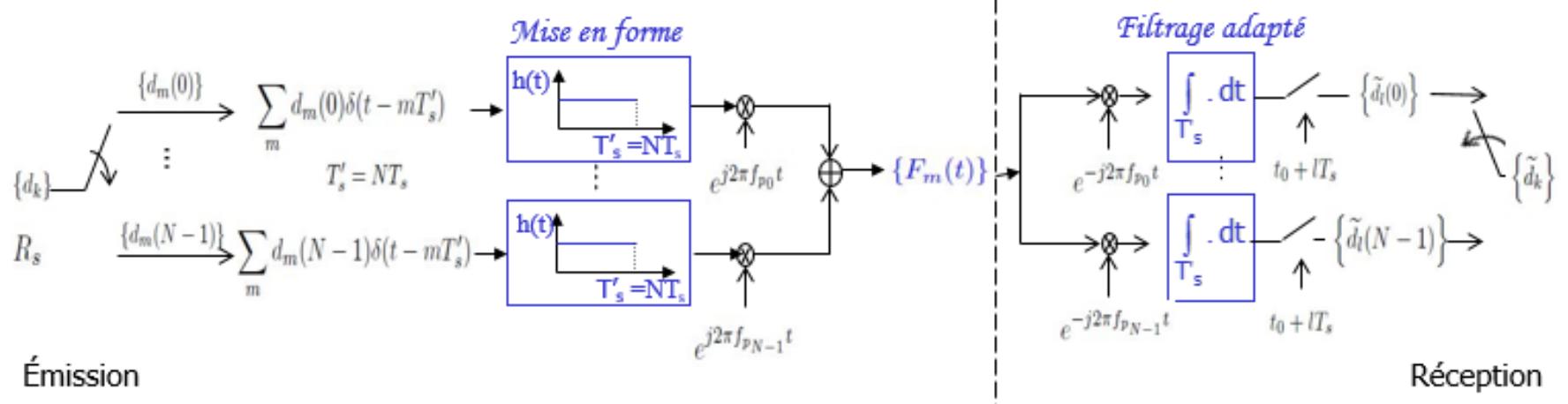
- Implantation numérique par iFFT/FFT

$$F_m(n) = \sum_{i=0}^{N-1} d_m(i) e^{j2\pi \frac{in}{N}} = N TFD^{-1}[d_m(i)]$$

$n = 0, \dots, N - 1$



Simplicité d'implantation



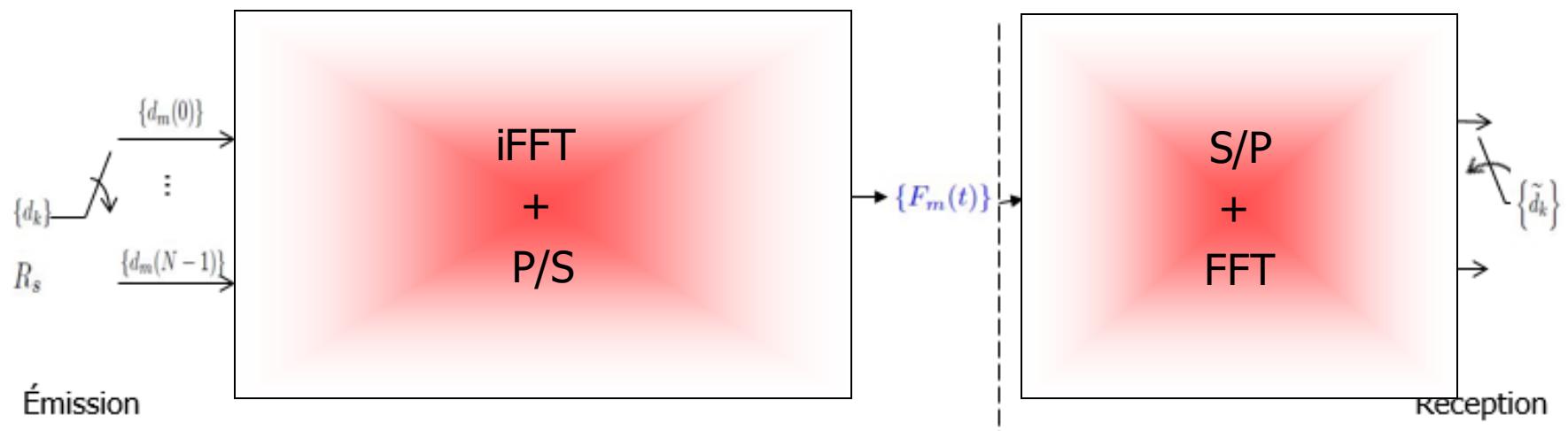
OFDM : génération du signal

- Implantation numérique par iFFT/FFT

$$F_m(n) = \sum_{i=0}^{N-1} d_m(i) e^{j2\pi \frac{in}{N}} = N TFD^{-1}[d_m(i)]$$

$n = 0, \dots, N - 1$

Simplicité d'implantation

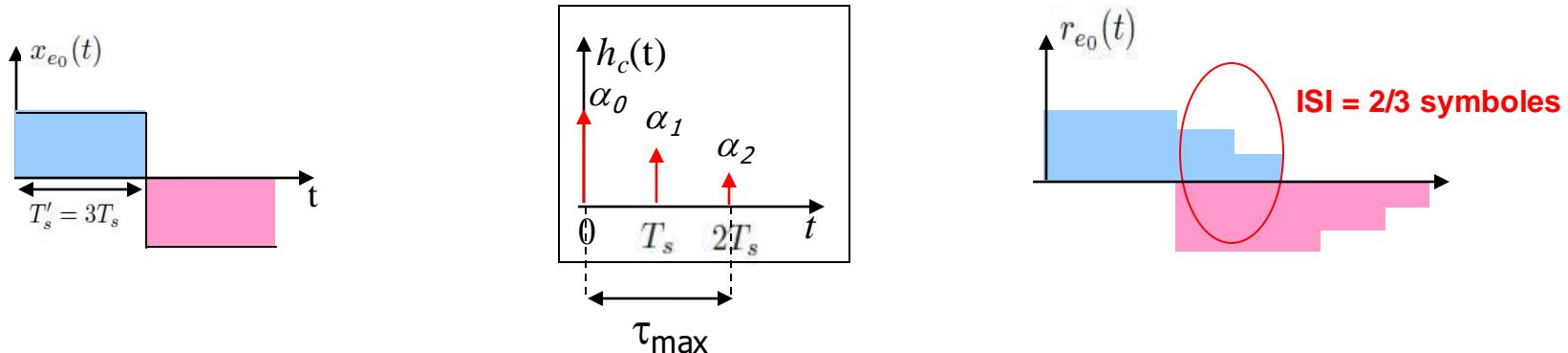


- Fin des années 50 : concept multi porteuses
 - Fin des années 60 : OFDM, modems militaires hautes fréquences, peu de porteuses
 - **Brevet en 1970 avec utilisation de la TFD**
S. B. Weinstein, P. M. Ebert, IEEE Trans. On Comm.Tech. , Vol COM-19, n°5, oct. 71
« Data transmission by frequency division multiplexing using discrete Fourier transform »,
 - **Années 80** : projet européen Eureka pour le DAB avec utilisation de la **FFT**
 - Début 90 : normalisation du DAB
 - **Déploiement dans de nombreux standards de fin 90 à aujourd’hui**
xDSL (DMT), DVB-T et T2, WLAN (IEEE802.11a,g,n,ac), DVB-H et SH, WiMax (IEEE802.16d,e), CPL, 4G (LTE), 5G
-

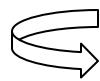
OFDM : génération du signal

- Effet du canal de transmission : génération d'ISI

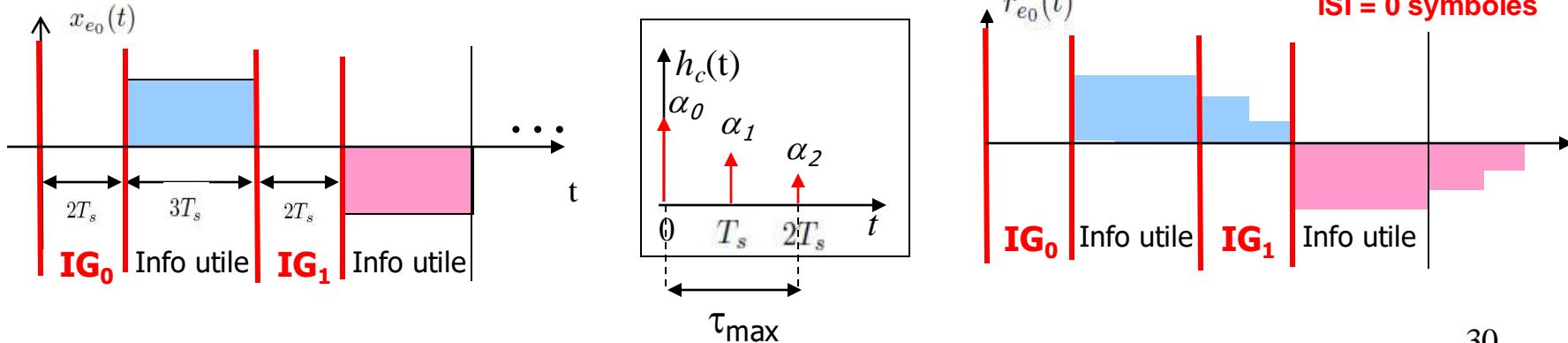
Exemple : mise en forme rectangulaire, $c(t) = \alpha_0\delta(t) + \alpha_1\delta(t-T_s) + \alpha_2\delta(t-2T_s)$, 3 porteuses, visualisation porteuse 0



Interférence entre symbole (ISI)



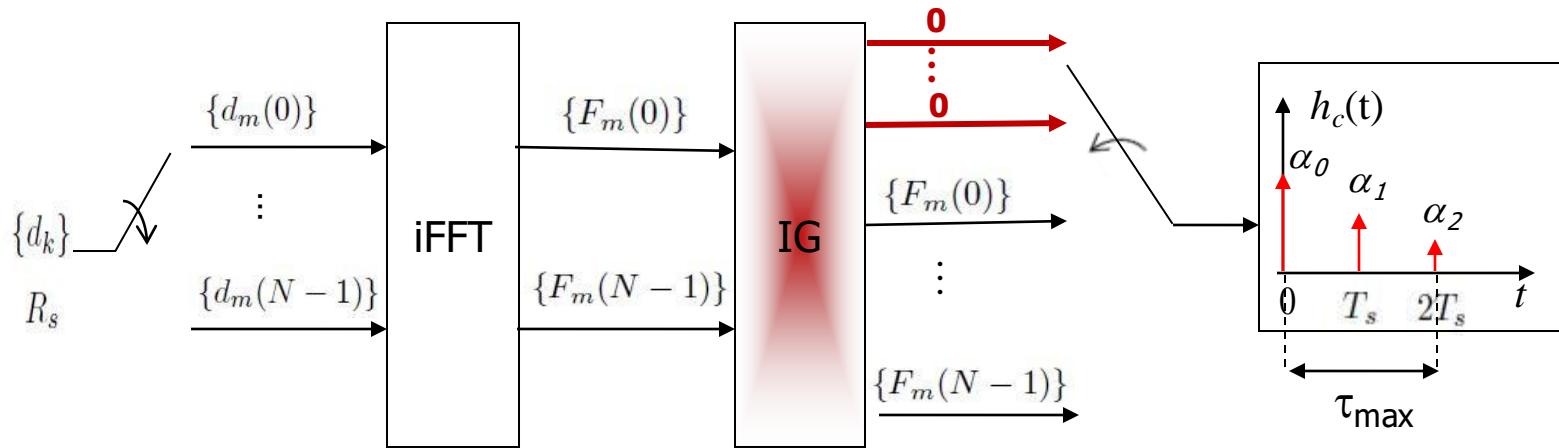
Mise en place d'un intervalle de garde (IG) :



OFDM : génération du signal

- Effet du canal de transmission : génération d'ISI => intervalle de garde

→ Introduit à l'émission derrière la iFFT :



$$\text{Durée IG} \geq \tau_{\max}$$

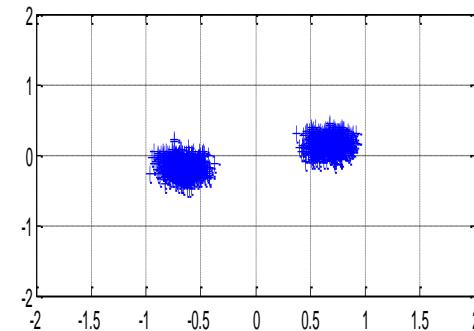
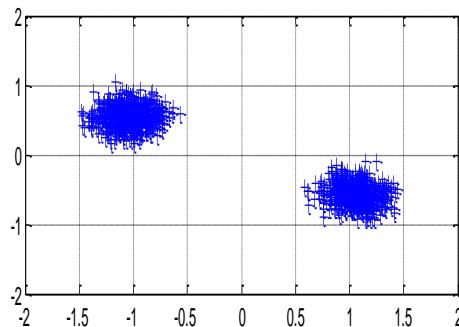
OFDM : génération du signal

- Effet du canal de transmission : génération d'ISI => intervalle de garde

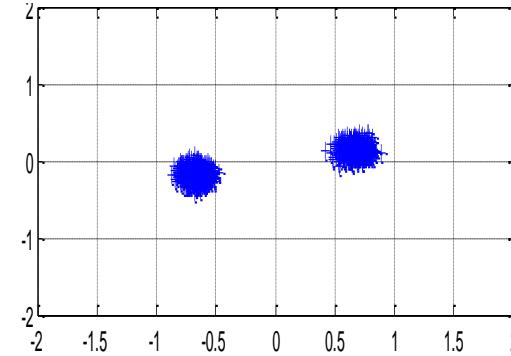
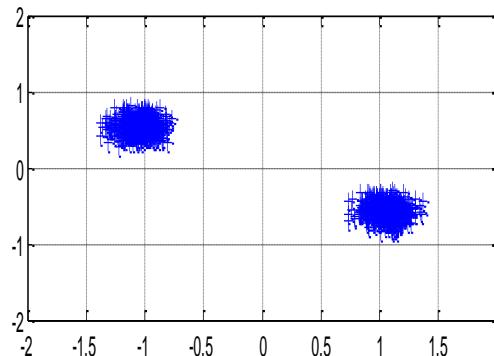
Exemple : Canal sans bruit, BPSK émise sur 16 porteuses

$$h_c(t) = \delta(t) + 0,5 \delta(t - T_s) + 0,2 \delta(t - 2T_s)$$

Constellations reçues sur les porteuses n° 3 et 10 sans ajout d'intervalle de garde



Constellations reçues sur les porteuses n° 3 et 10 avec ajout d'intervalle de garde



??

OFDM : génération du signal

- Effet du canal de transmission : génération d'ISI => intervalle de garde

$$h_c(t) = 0,407\delta(t) + 0,815 \delta(t - T_s) + 0,407\delta(t - 2T_s)$$

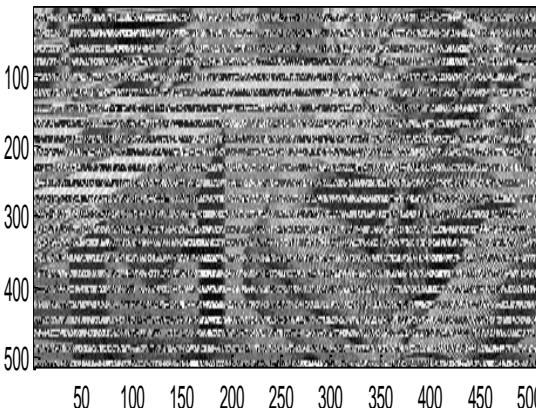
Image émise

Transmitted image

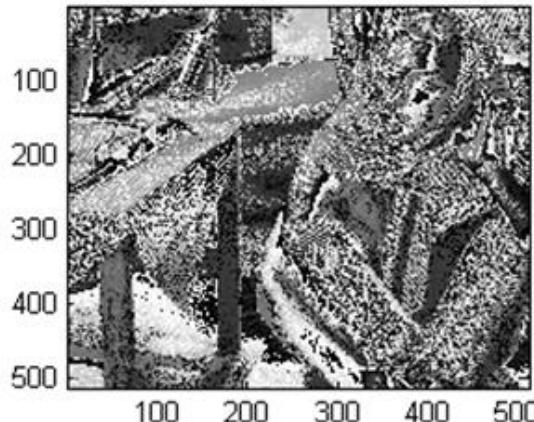


Image reçue,

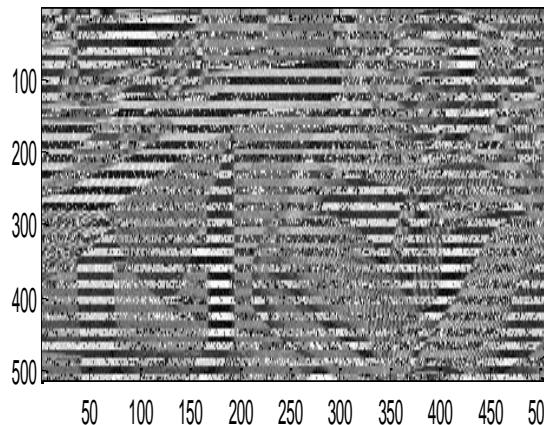
Transmission sur 16 porteuses, sans IG



**Image reçue
transmission monoporteuse**



**Image reçue
Transmission sur 16 porteuses, avec IG**



??

OFDM : génération du signal

- Effet du canal de transmission : génération d'ISI => intervalle de garde

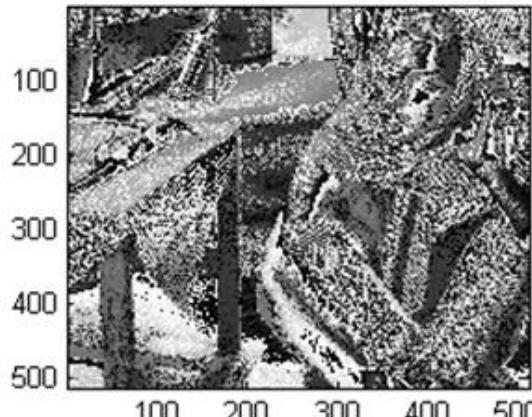
$$h_c(t) = 0,407\delta(t) + 0,815 \delta(t - T_s) + 0,407\delta(t - 2T_s)$$

Image émise

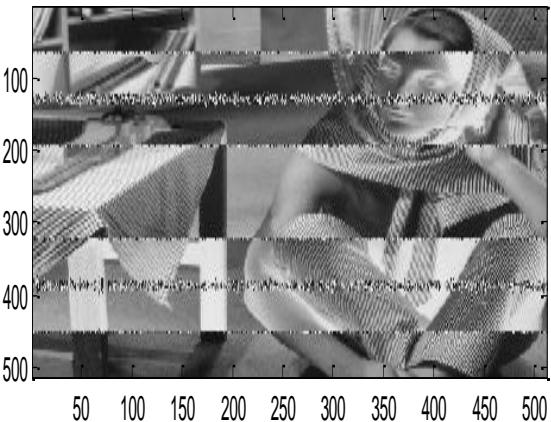
Transmitted image



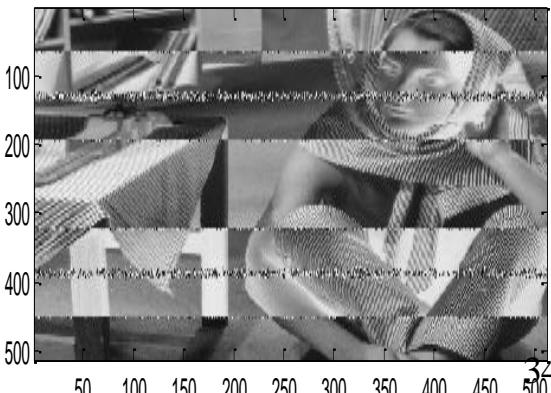
**Image reçue
transmission monoporteuse**



**Image reçue,
Transmission sur 2048 porteuses, sans IG**



**Image reçue
Transmission sur 2048 porteuses, avec IG**



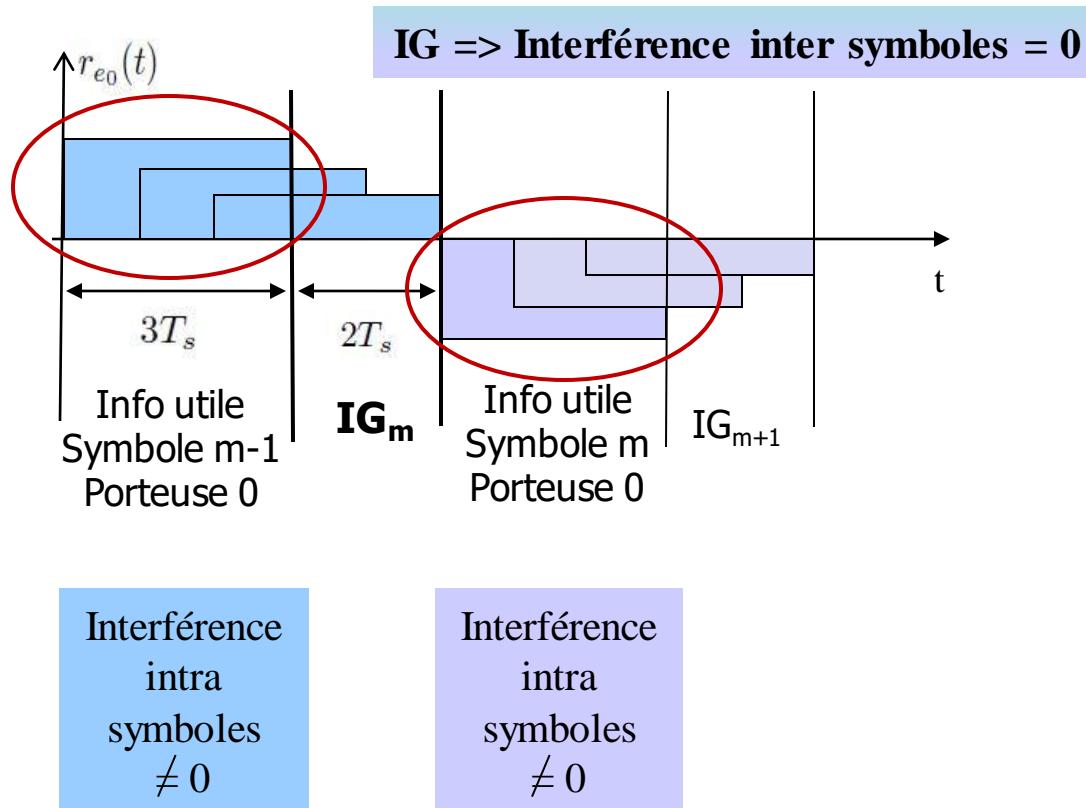
??

Remarque : pas d'entrelacement

OFDM : génération du signal

- Effet du canal de transmission : génération d'ICI

Exemple : $h_c(t) = \delta(t) + 0,5 \delta(t - T_s) + 0,2 \delta(t - 2T_s)$, 3 porteuses, visualisation porteuse 0



Interférence intra symbole

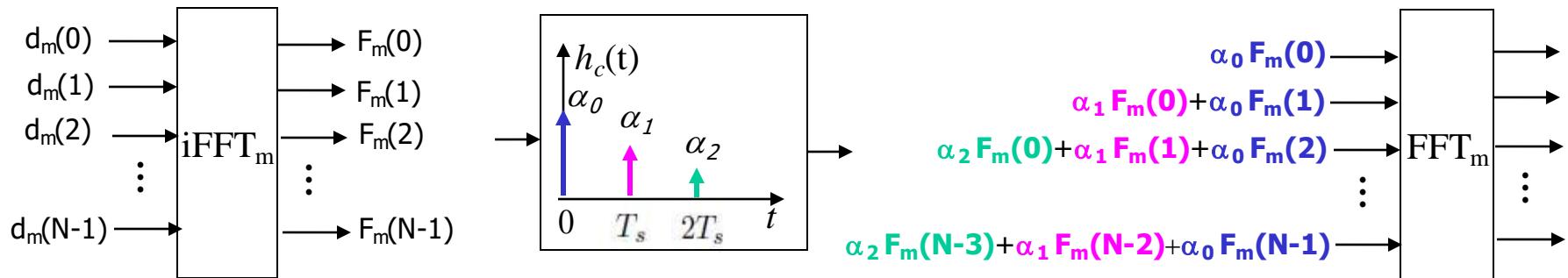


Rupture de l'orthogonalité des porteuse => ICI

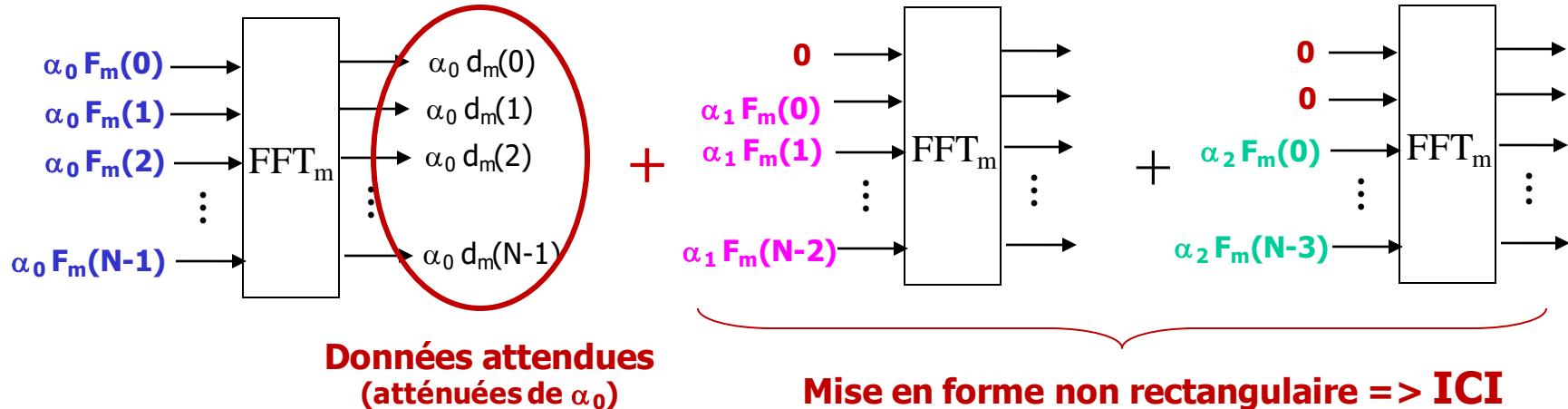
OFDM : génération du signal

- Effet du canal de transmission : génération d'ICI

Exemple : $h_c(t) = \delta(t) + 0,5 \delta(t - T_s) + 0,2 \delta(t - 2T_s)$



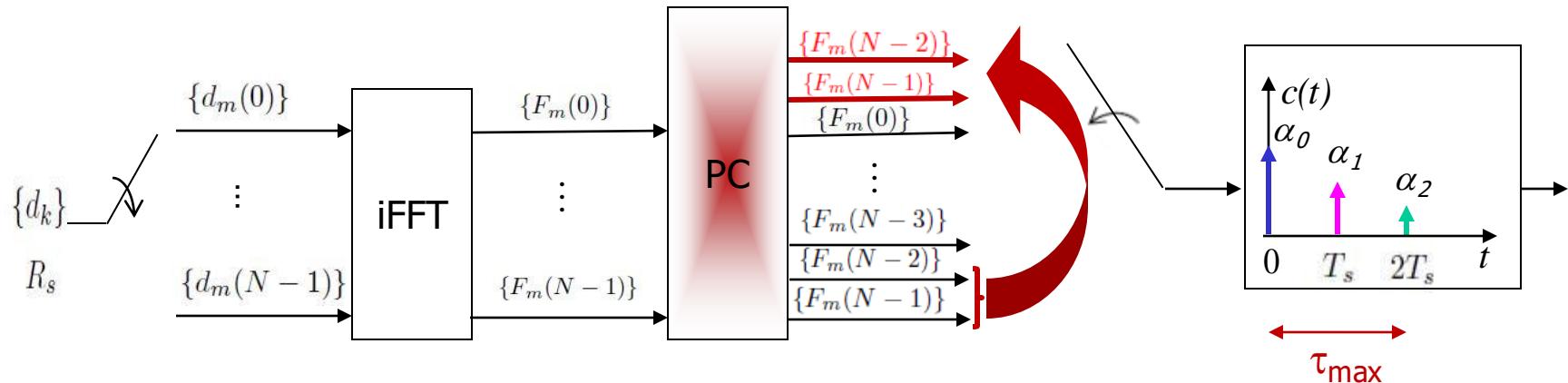
$<=>$



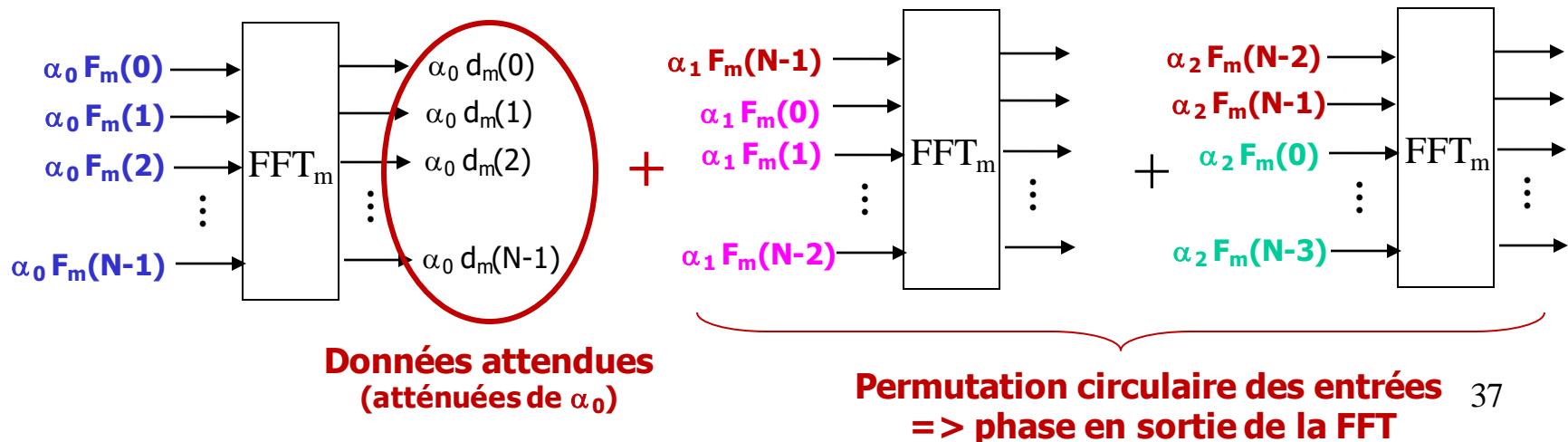
OFDM : génération du signal

- Effet du canal de transmission : génération d'ICI => Préfixe cyclique

Exemple: $h_c(t) = \delta(t) + 0,5 \delta(t - T_s) + 0,2 \delta(t - 2T_s)$



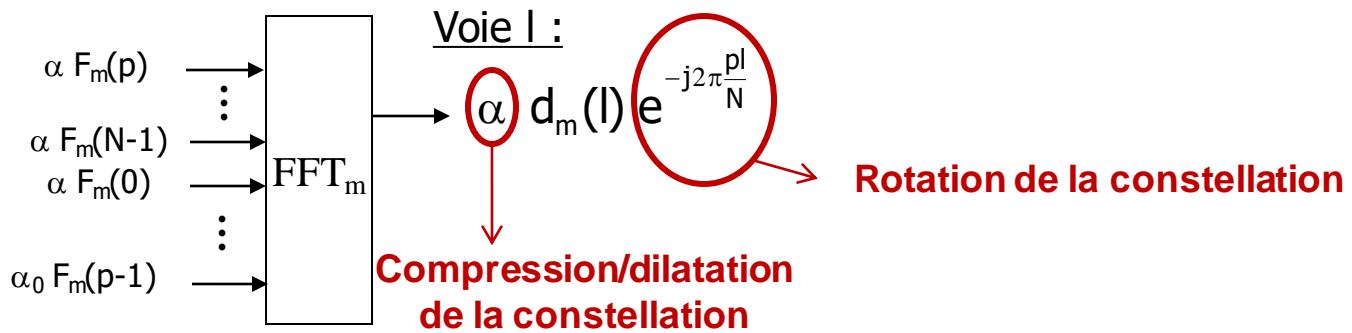
Durée PC $\geq \tau_{\max}$
Perte acceptée : 20 à 25 % du débit utile => dimensionnement de N



OFDM : génération du signal

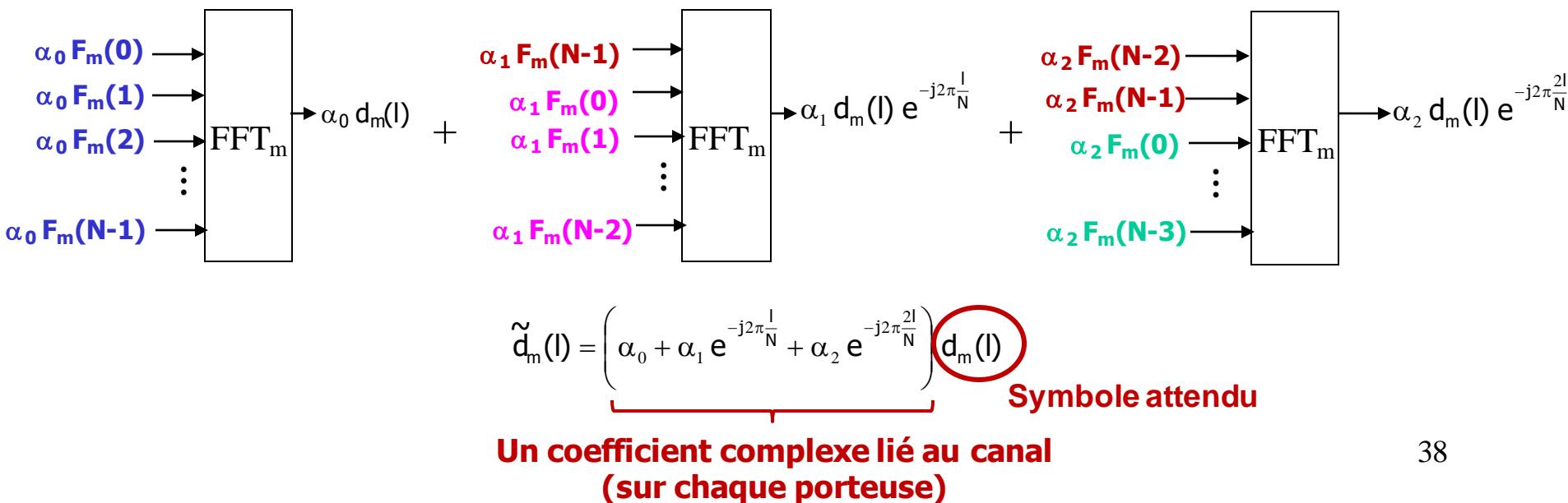
- Effet du canal de transmission : génération d'ICI => Préfixe cyclique

Décalage de p échantillons avec permutation circulaire



$$\tilde{d}_m(l) = \alpha \left(\sum_{i=p}^{N-1} F_m(i) e^{j2\pi \frac{(i-p)l}{N}} + \sum_{i=0}^{p-1} F_m(i) e^{j2\pi \frac{(i+N-p)l}{N}} \right) = \alpha \left(\sum_{i=p}^{N-1} F_m(i) e^{j2\pi \frac{il}{N}} e^{-j2\pi \frac{pl}{N}} + \sum_{i=0}^{p-1} F_m(i) e^{j2\pi \frac{il}{N}} e^{j2\pi \frac{nl}{N}} e^{-j2\pi \frac{pl}{N}} \right) = \alpha \sum_{i=0}^{N-1} F_m(i) e^{j2\pi \frac{il}{N}} e^{-j2\pi \frac{pl}{N}} = \alpha d_m(l) e^{-j2\pi \frac{pl}{N}}$$

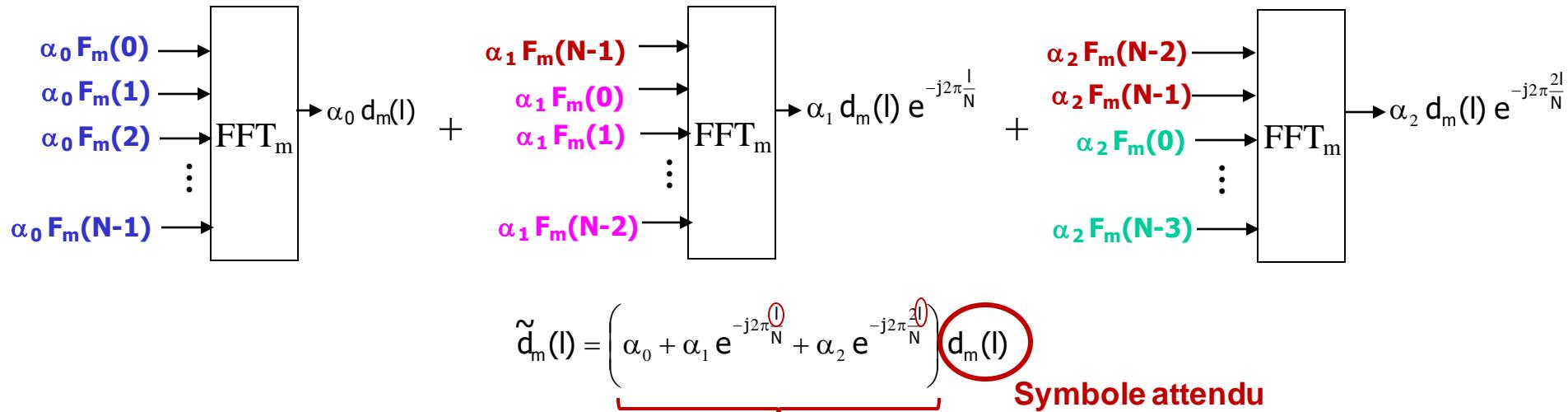
Exemple: $h_c(t) = \delta(t) + 0,5 \delta(t - T_s) + 0,2 \delta(t - 2T_s)$, visualisation **voie l en sortie**



OFDM : génération du signal

- Effet du canal de transmission : génération d'ICI => Préfixe cyclique

Exemple : $h_c(t) = \delta(t) + 0,5 \delta(t - T_s) + 0,2 \delta(t - 2T_s)$, visualisation **voie l en sortie**



Coefficient complexe lié au canal

Sur la porteuse l : $H_c(l) = [H_c(f)]_{f=f_p l}$

Remarque :

$$\begin{aligned} \alpha_0 F_m(n) + \alpha_1 F_m([n-1]_{mod N}) + \alpha_2 F_m([n-2]_{mod N}) &= \{\alpha_0 \delta(n) + \alpha_1 \delta(n-1) + \alpha_2 \delta(n-2)\} * F_m([n]_{mod N}) \\ &= h_c(n) \otimes F_m(n) \quad \text{Convolution circulaire} \end{aligned}$$

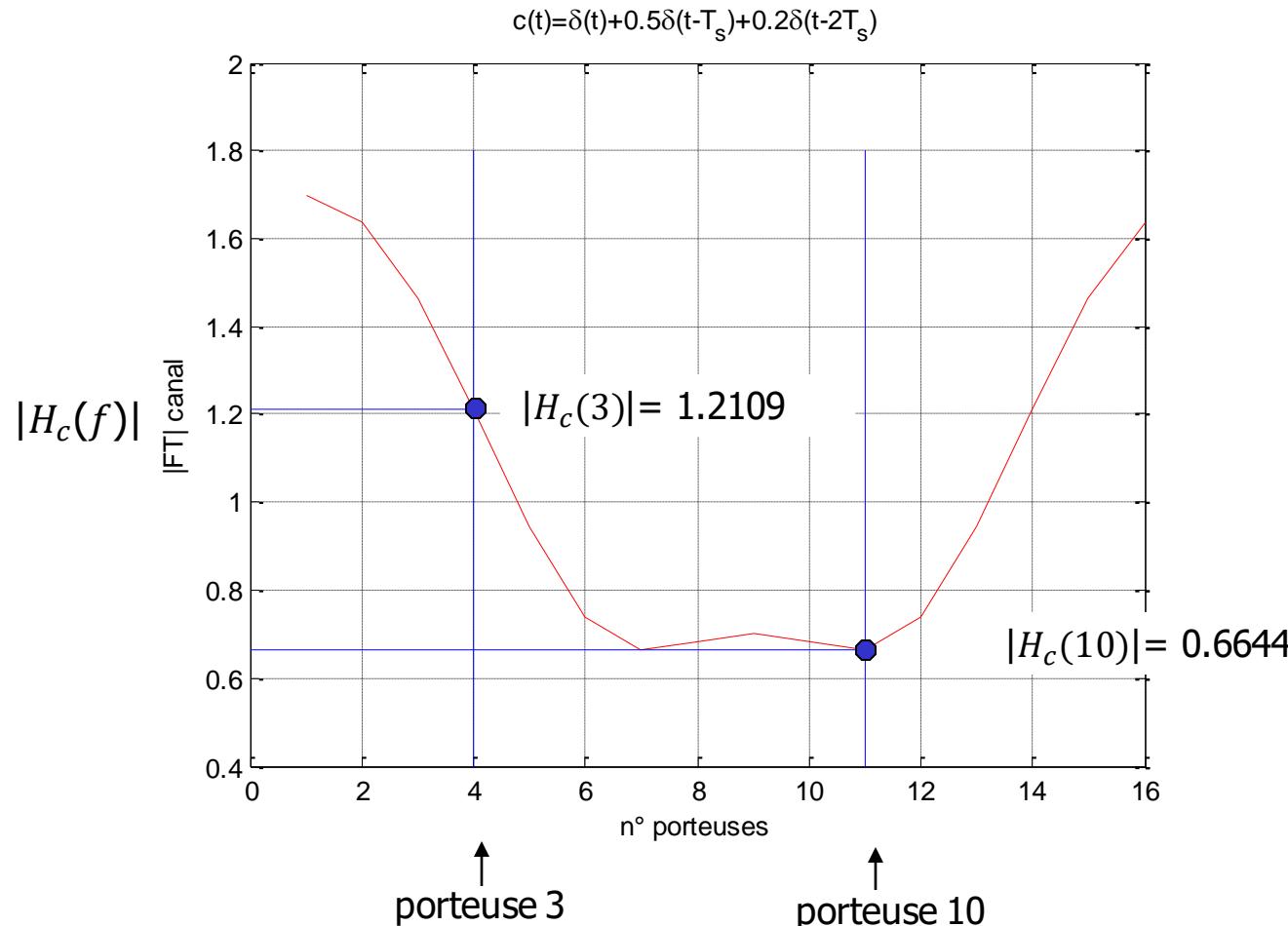
$$h_c(n) \otimes F_m(n) \xrightarrow{\text{TFD}} H_c(l) \times d_m(l)$$

OFDM : génération du signal

- Intervalle de garde, Préfixe cyclique : exemple

→ Canal sans bruit, BPSK émise sur 16 porteuses

$$h_c(t) = \delta(t) + 0,5 \delta(t - T_s) + 0,2 \delta(t - 2T_s)$$

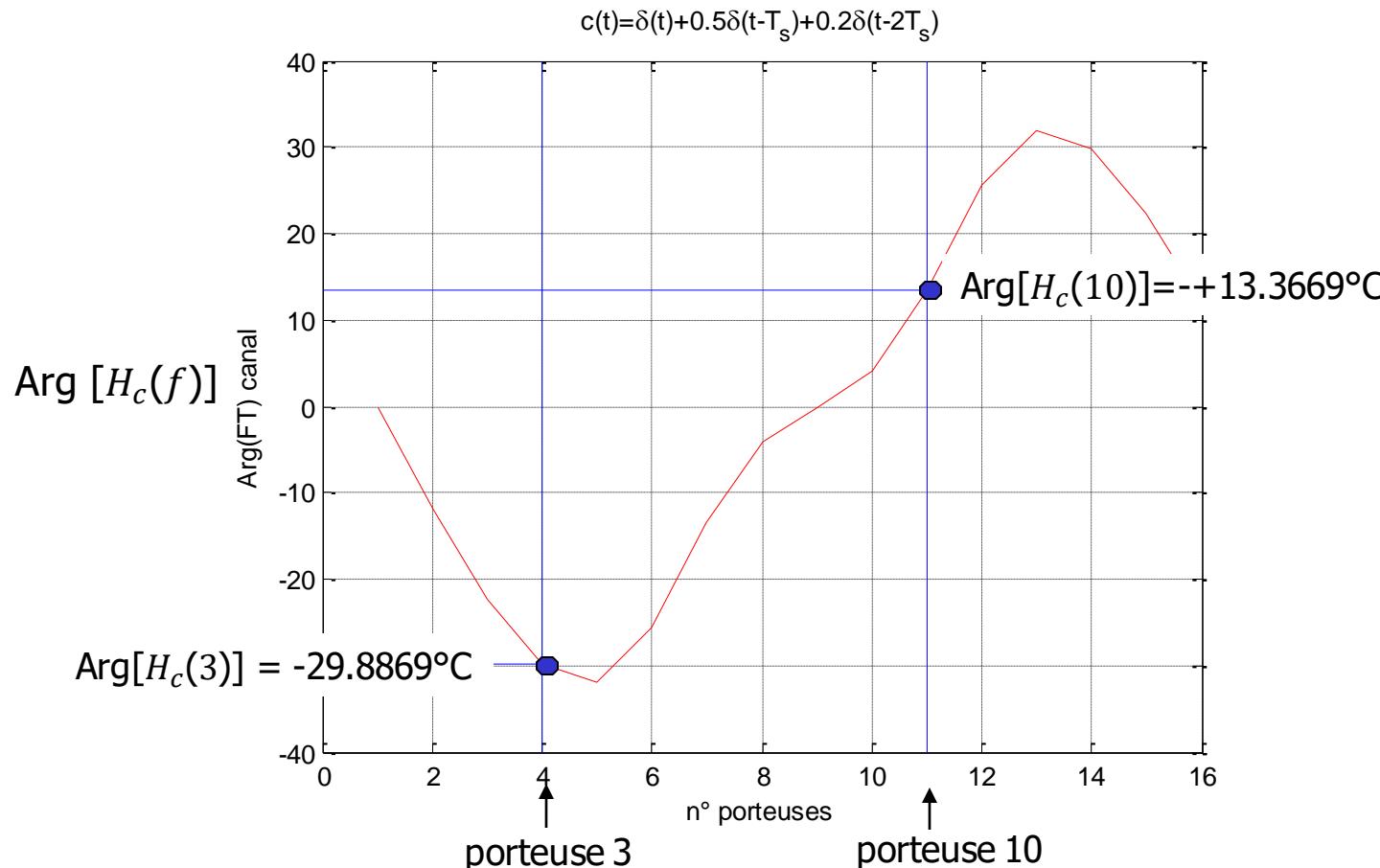


OFDM : génération du signal

- Intervalle de garde, Préfixe cyclique : exemple

→ Canal sans bruit, BPSK émise sur 16 porteuses

$$h_c(t) = \delta(t) + 0,5 \delta(t - T_s) + 0,2 \delta(t - 2T_s)$$



OFDM : génération du signal

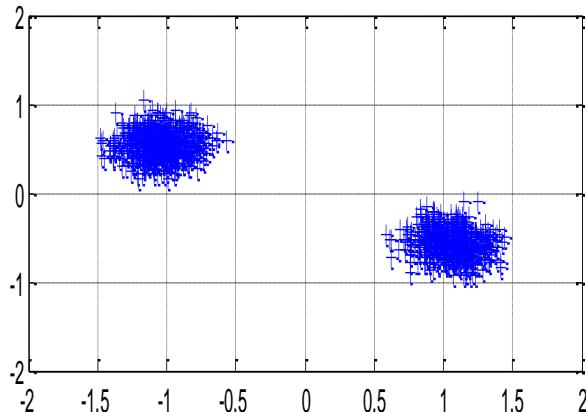
- Intervalle de garde, Préfixe cyclique : exemple

→ Canal sans bruit, BPSK émise sur 16 porteuses

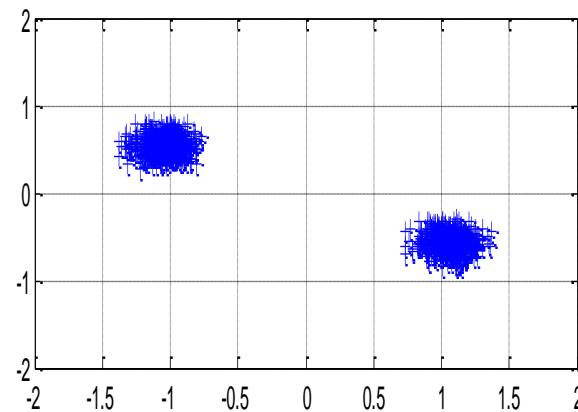
$$h_c(t) = \delta(t) + 0,5 \delta(t - T_s) + 0,2 \delta(t - 2T_s)$$

Constellations reçues porteuses n° 3 et 10

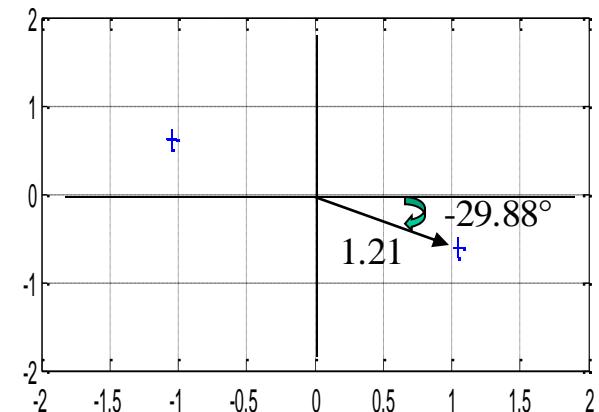
Sans intervalle de garde



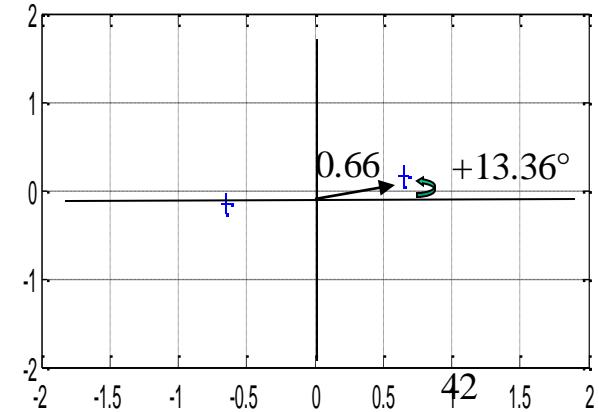
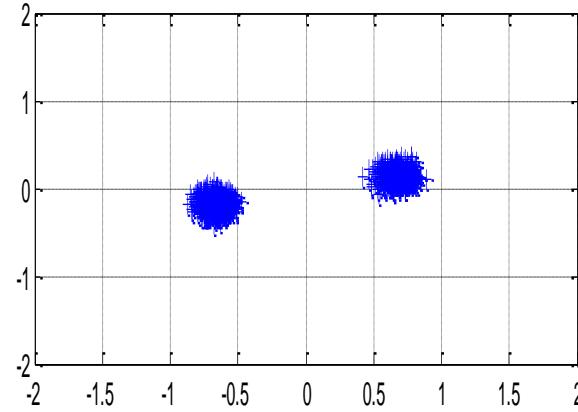
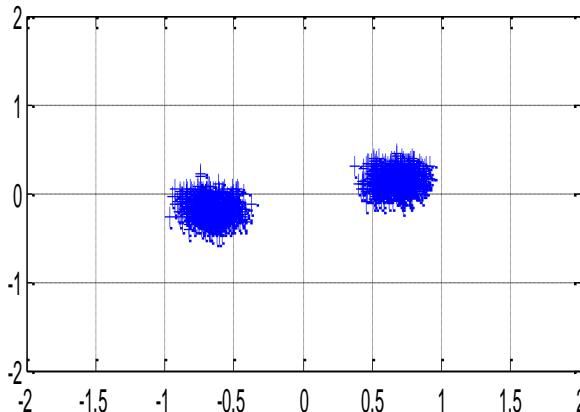
Avec intervalle de garde



Avec préfixe cyclique



$$c(3) = 1 + 0.5e^{-j2\pi \frac{1\pi_3}{16}} + e^{-j2\pi \frac{2\pi_3}{16}}$$



$$c(10) = 1 + 0.5e^{-j2\pi \frac{1\pi_{10}}{16}} + e^{-j2\pi \frac{2\pi_{10}}{16}}$$

OFDM : génération du signal

- Intervalle de garde, Préfixe cyclique : exemple

→ Canal sans bruit, $h_c(t)=0,407\delta(t) + 0,815 \delta(t - T_s) + 0,407 \delta(t - 2T_s)$, 16 porteuses

Image émise

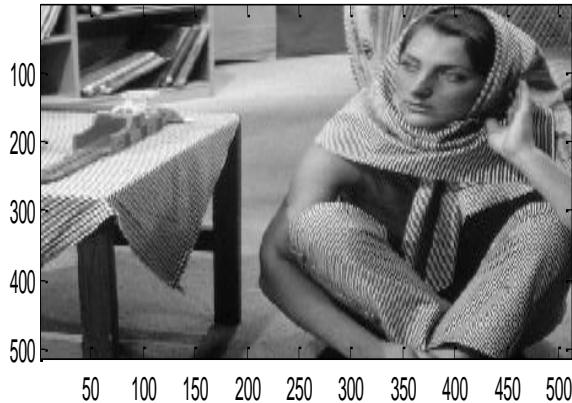


Image reçue
avec intervalle de garde

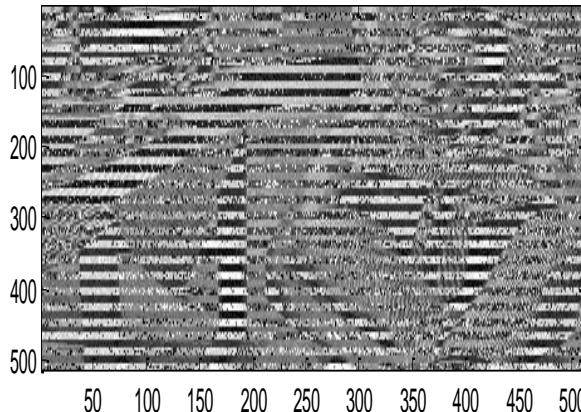


Image reçue
sans ajout d'intervalle de garde

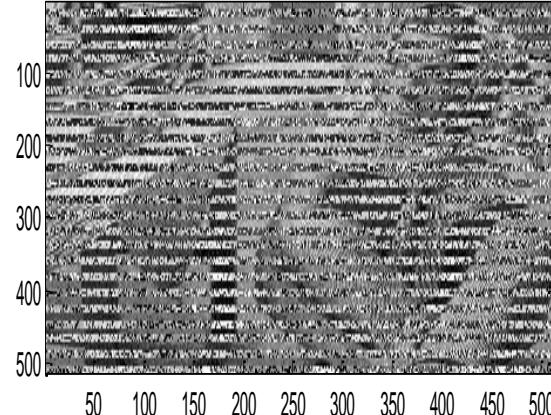
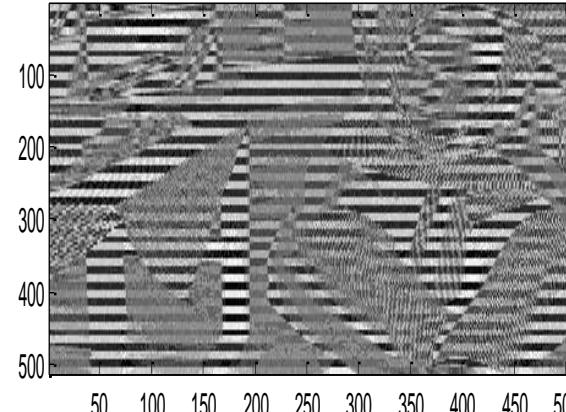


Image reçue
avec préfixe cyclique



??

OFDM : génération du signal

- Intervalle de garde, Préfixe cyclique : exemple

→ Canal sans bruit, $h_c(t) = 0,407\delta(t) + 0,815\delta(t - T_s) + 0,407\delta(t - 2T_s)$, 16 porteuses

Image émise

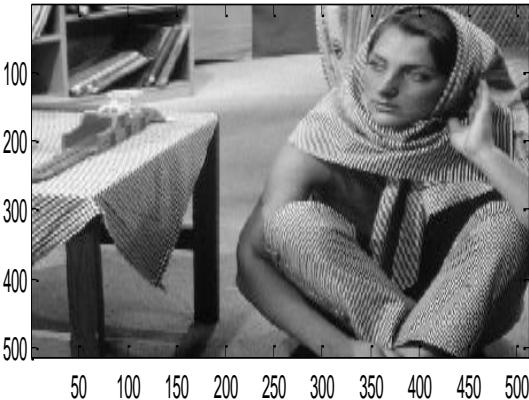


Image reçue
sans ajout d'intervalle de garde avec égalisation

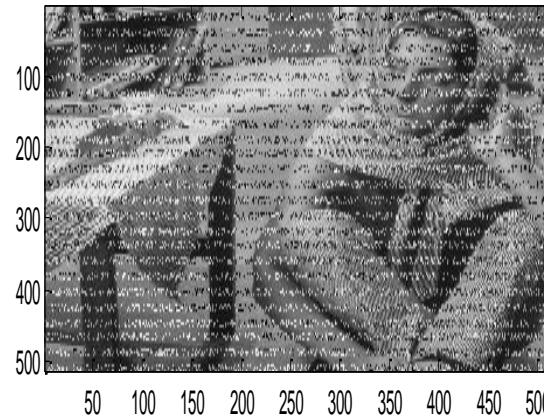


Image reçue
avec intervalle de garde et égalisation

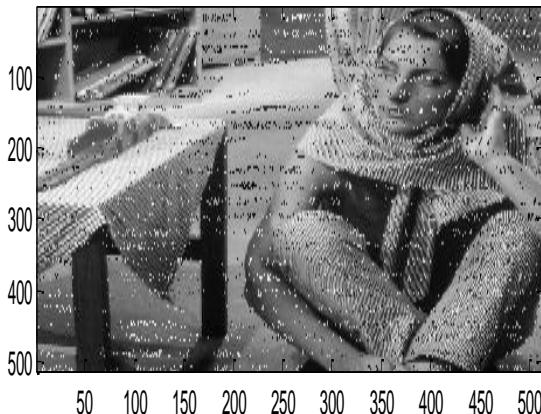


Image reçue
avec préfixe cyclique et égalisation



OFDM : génération du signal

- Intérêt du préfixe cyclique

→ **Egalisation très simple** : filtre à un coefficient (ZFE, MMSE)

=> Estimation de canal : pilotes, voie retour

→ Aide à la synchronisation:

– Introduction de redondance par le CP

– Surdimensionnement du CP => tolère de la gigue de phase horloge

- Si voie retour + canal variant lentement dans le temps

→ Possibilité de « bit loading » :

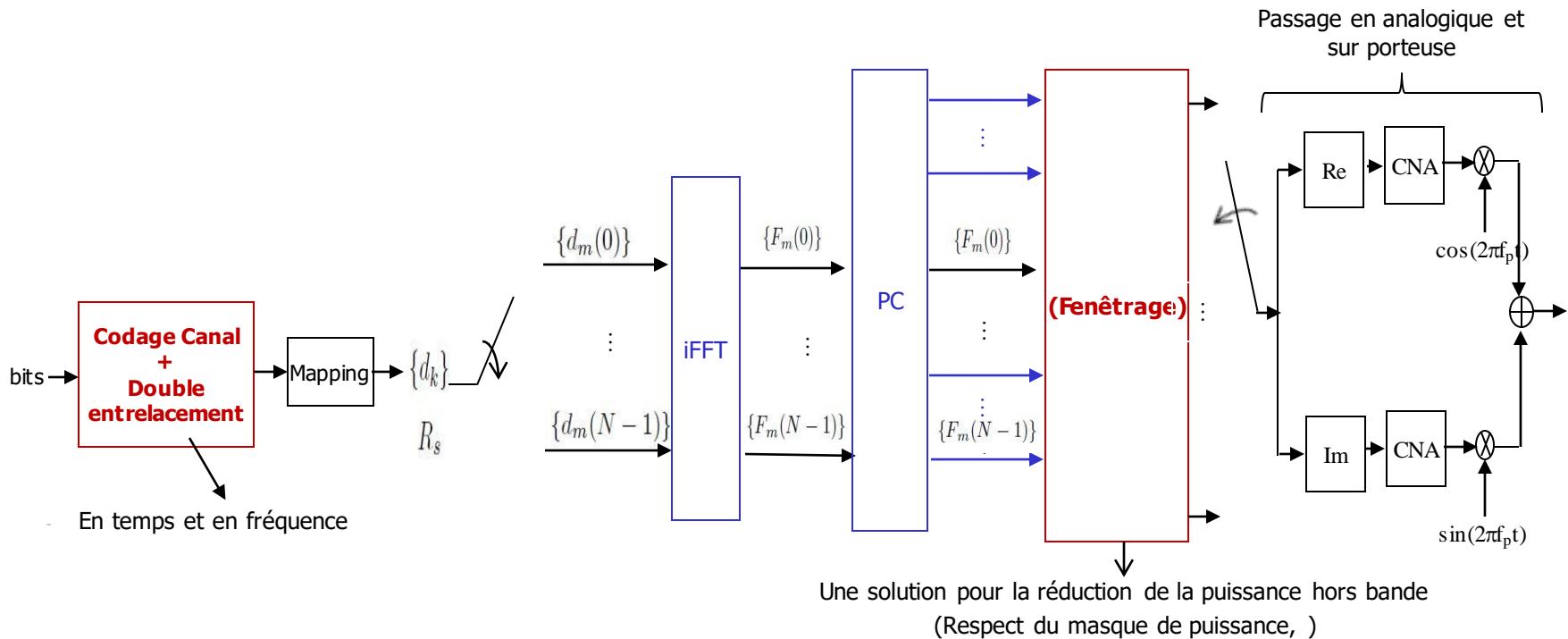
Maximiser le débit à probabilité d'erreur identique sur chaque porteuse

→ Possibilité de « Waterfilling » :

A puissance totale constante, augmentation de la capacité par allocation intelligente de la puissance par porteuse,

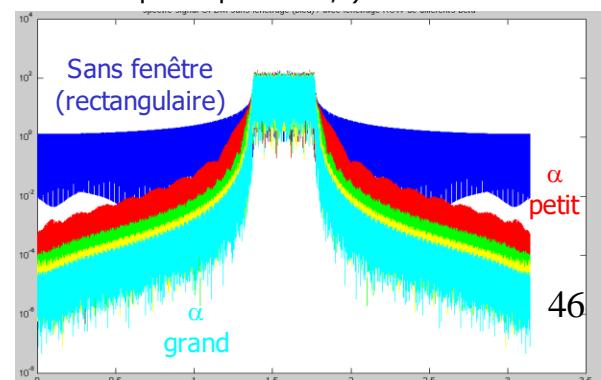
OFDM : génération du signal

- Chaîne d'émission complète « C » OFDM



Exemple :

RCW (roll off α) proposée
Dans l'IEEE802.11 a



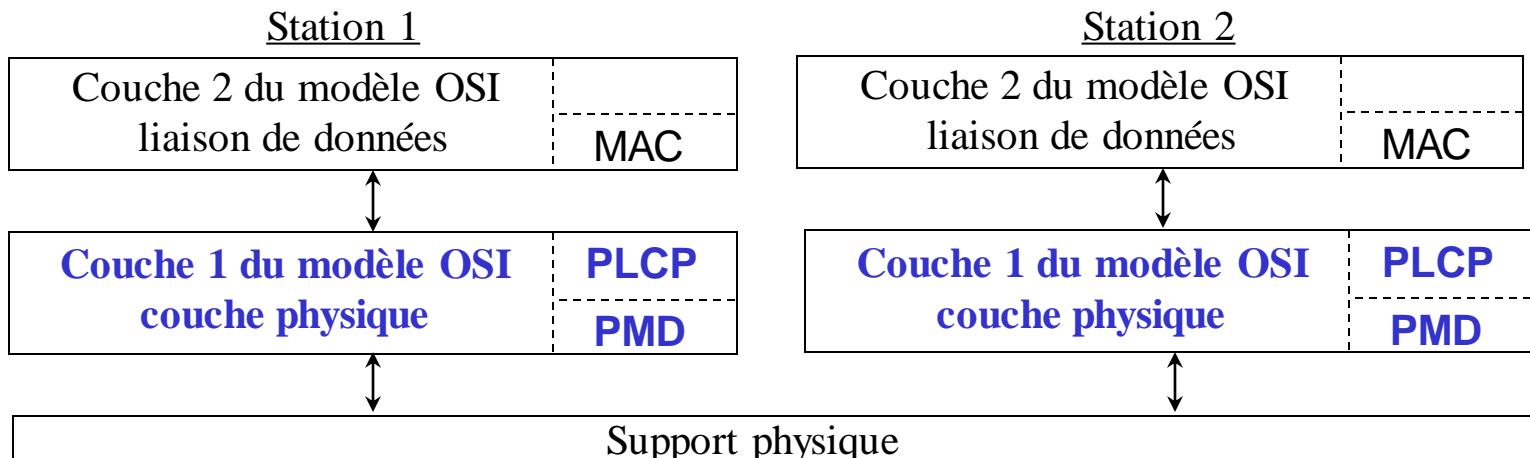
OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Exemples de couches physiques utilisant l'OFDM
IEEE802.11 (WiFi), DVB-T (TNT)

OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple 1 : le WiFi « haut débit »

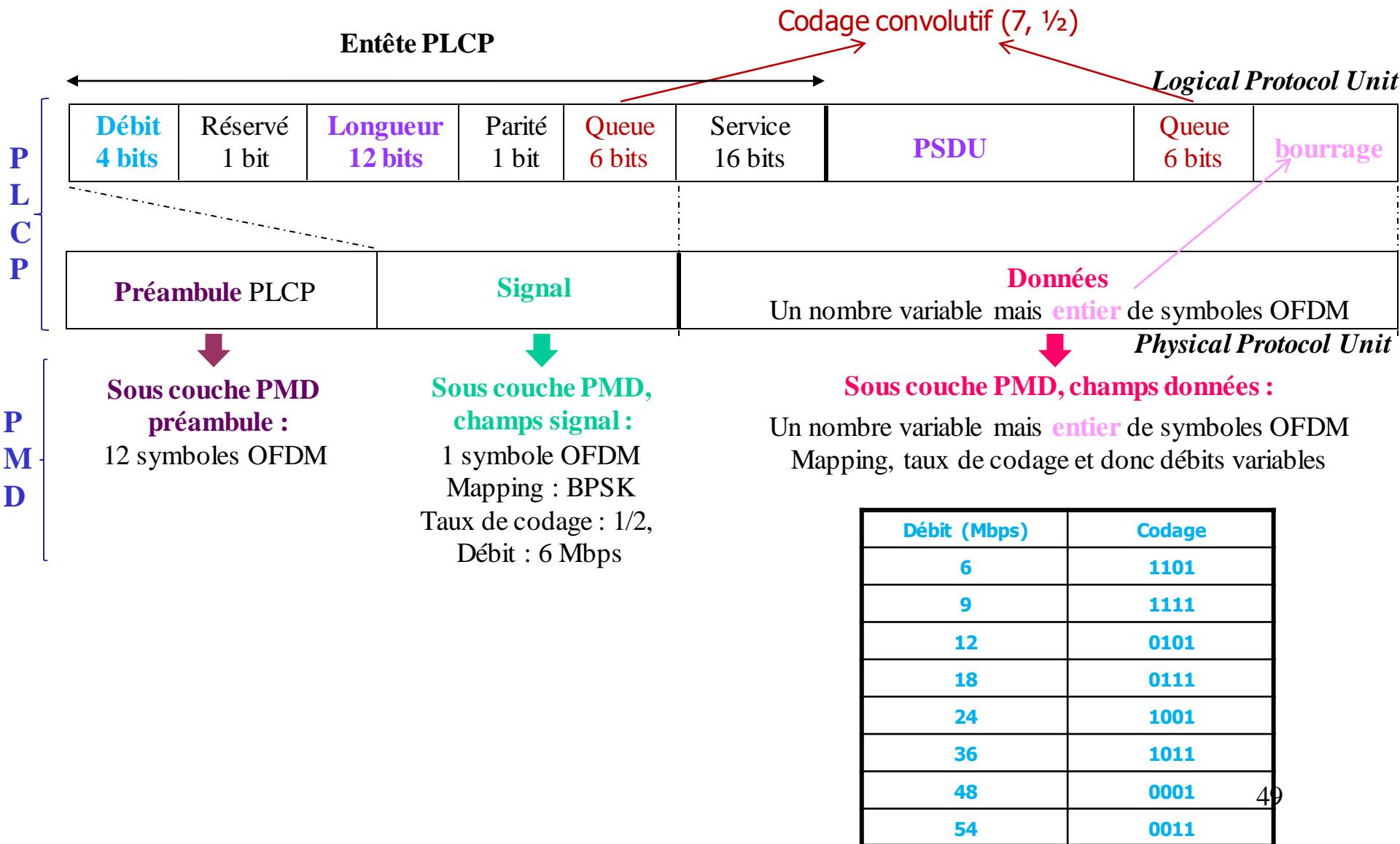
Standard	Normalisation	Bande	Débit PHY max	Portée max (ind./out.)
IEEE 802.11 (legacy)	1997	2.4 GHz	2 Mbit/s	20/100 m
IEEE 802.11a (WiFi 5)	1999	5 GHz	54 Mbit/s	25/75 m
IEEE 802.11b (WiFi)	1999	2.4 GHz	11 Mbits/s	35/100 m
IEEE 802.11g	2003	2.4 GHz	54 Mbits/s	25/75 m
IEEE 802.11n	2009	2.4/5 GHz	540 Mbits/s	50/125 m
IEEE 802.11ac	2014	5 GHz	1300 Mbits/s	20/50 m
IEEE 802.11ax (WiFi 6)	2021	1-7.125GHz	10 Gbits/s	35/100 m



(PLCP : Physical Layer Convergence Procedure, PMD : Physical Medium Dependent)

OFDM : exemple de couches physiques

- Standards IEEE802.11a, g (OFDM sans MIMO, sans agrégation de canaux)



OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple IEEE802.11a, g : bandes ISM et UNII

Bande ISM 2.400-2.4835 GHz : 3 canaux sans recouvrement

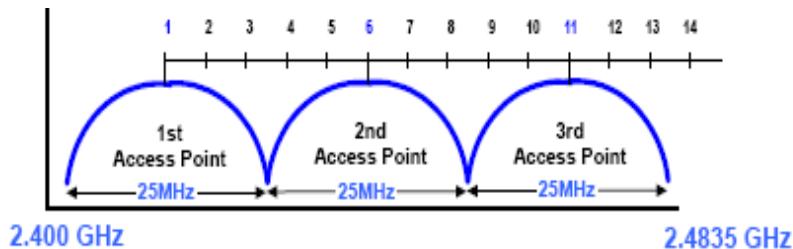
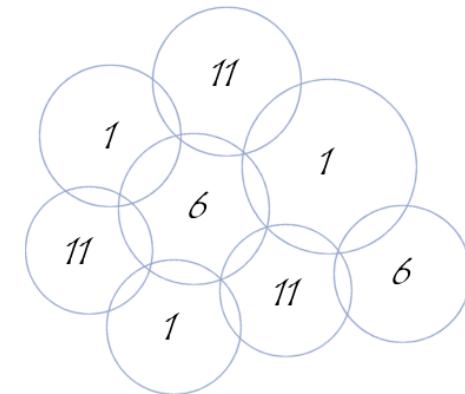
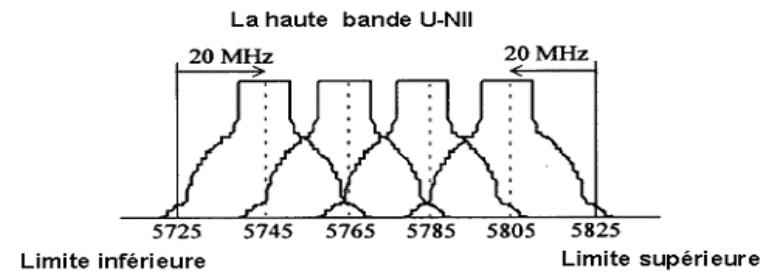
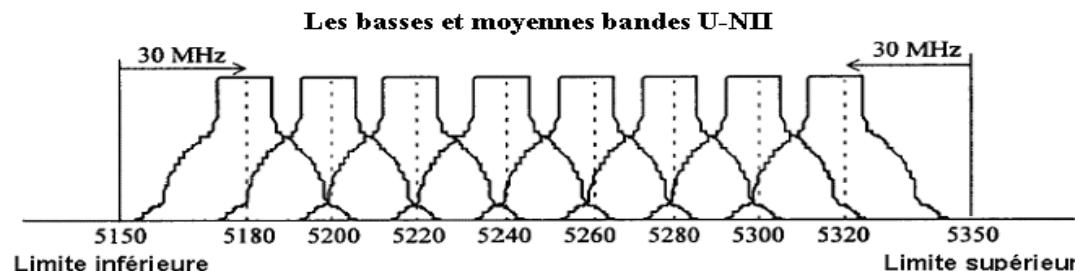


Figure 1-6. Typically, channels 1, 6, and 11 are used as the three non-overlapping channels in the 2.4 GHz band



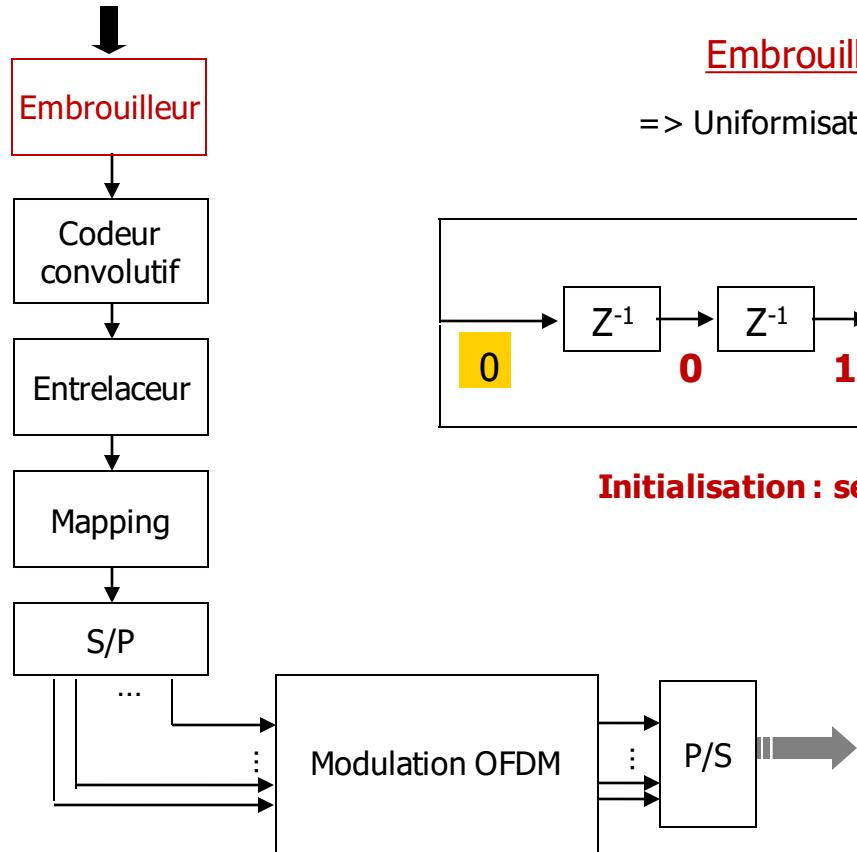
Bande UNII 5.15-5.25 GHz, 5.25-5.35 GHz, 5.725-5.850 GHz : 8/4 canaux sans recouvrement



OFDM : exemple de couches physiques

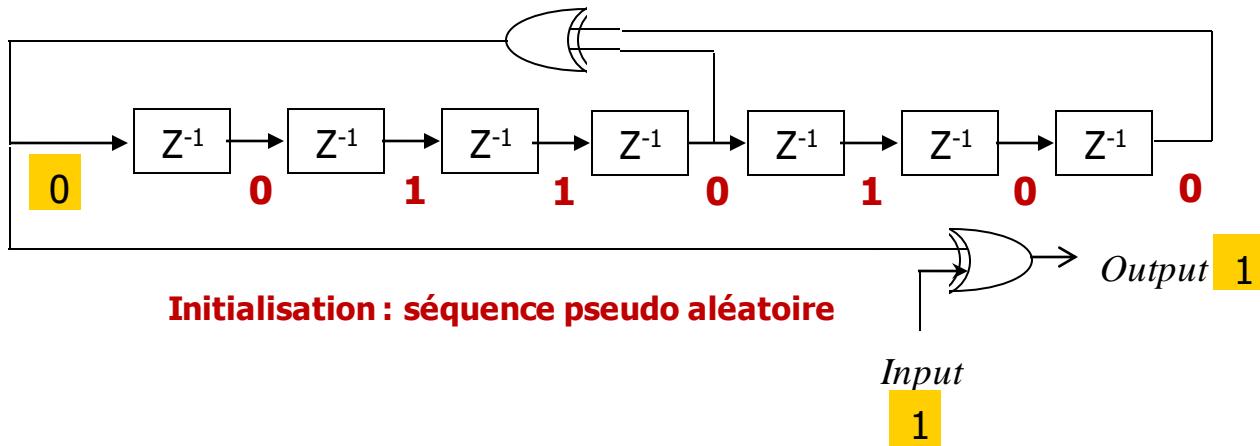
- Exemple IEEE802.11a, g : sous couche PMD, champs données

« Données »



Embrouilleur / désembrouilleur : $1 + x^4 + x^7$

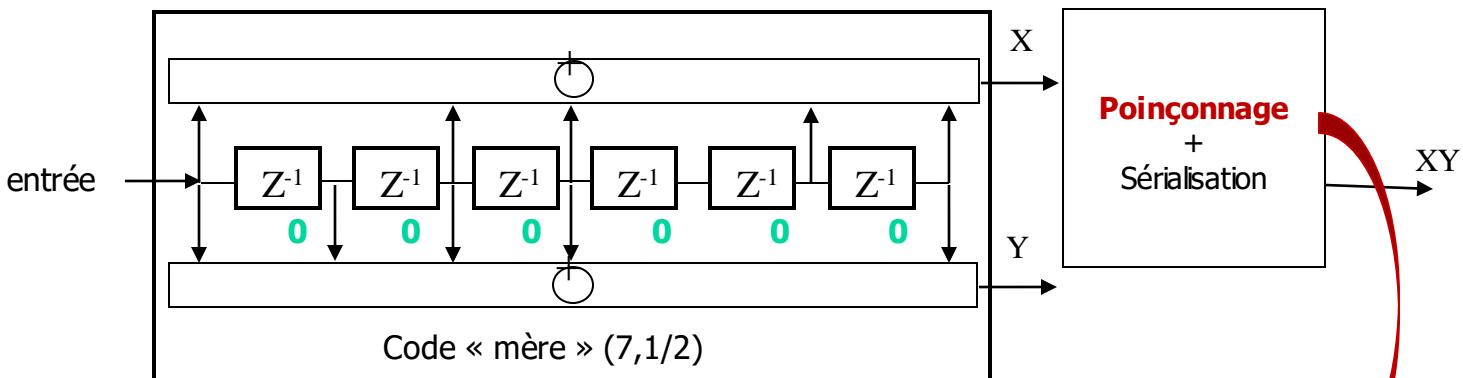
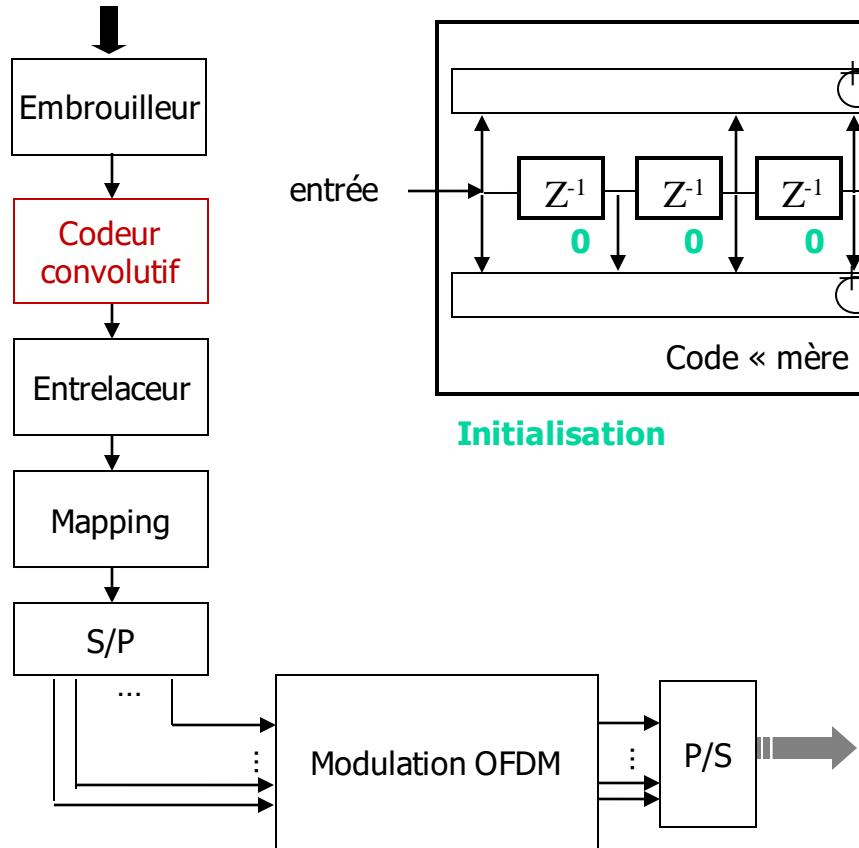
=> Uniformisation de l'énergie dans le domaine fréquentiel



OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple IEEE802.11a, g : sous couche PMD, champs données

« Données »



Taux de codage : 1/2, 2/3, 3/4

E0	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
----	----	----	----	----	----	----	----	----

X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8

Taux de codage 3/4

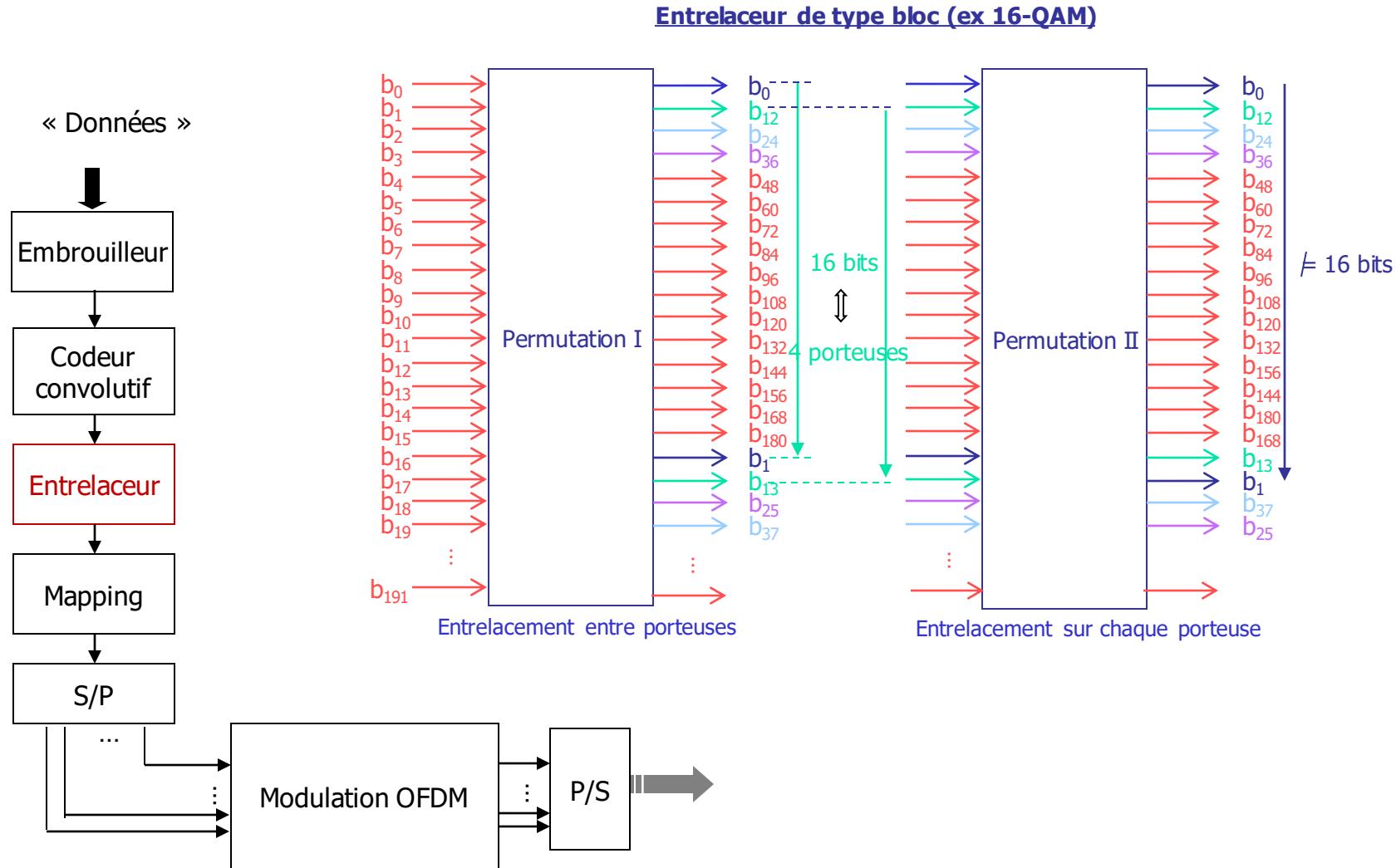
E0	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
----	----	----	----	----	----	----	----	----

X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8

Taux de codage 2/3

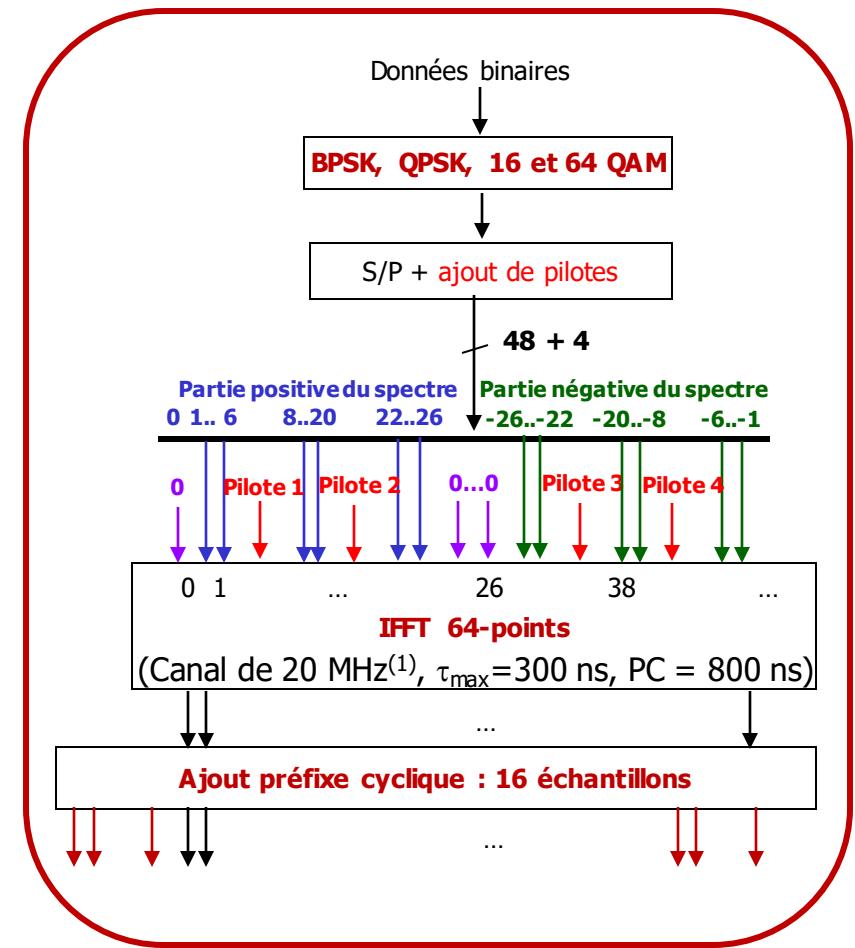
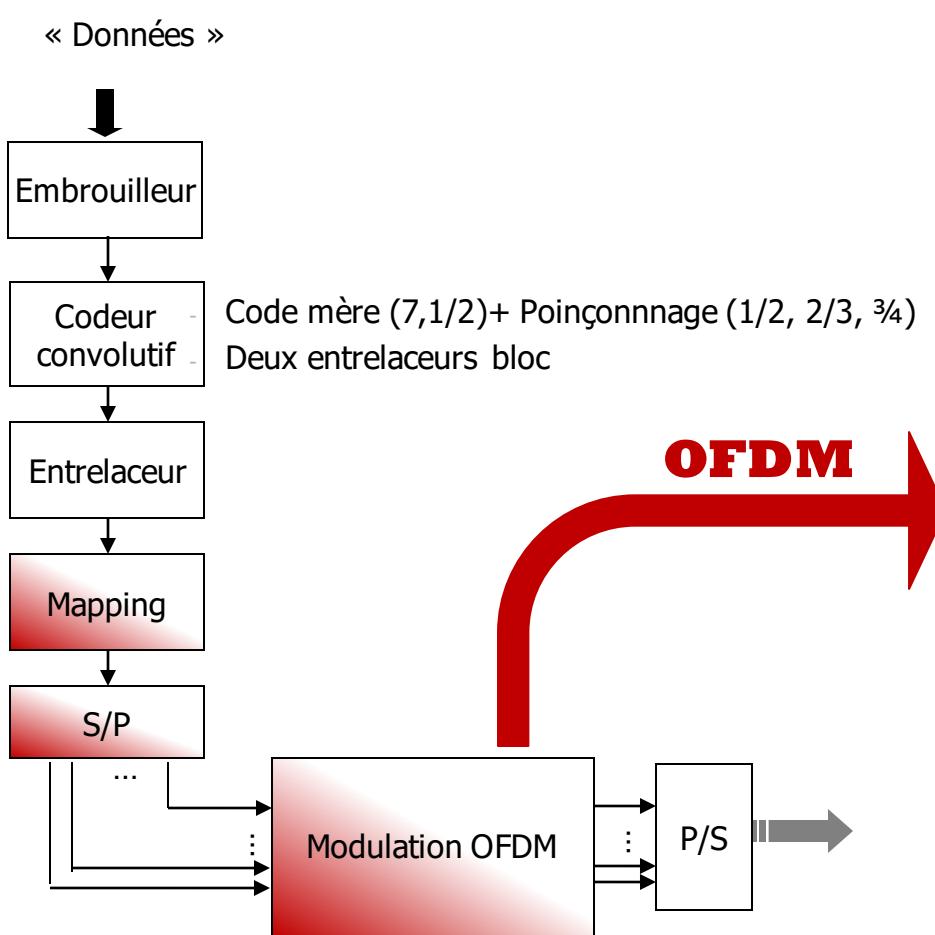
OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple IEEE802.11a, g : sous couche PMD, champs données



OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple IEEE802.11a, g : sous couche PMD, champs données



⁽¹⁾Canal de 20 MHz => 3 canaux sans recouvrement en bande ISM (2.400-2.4835 GHz), 8/4 canaux sans recouvrement en bande UNII (5 .15-5.25 GHz, 5 .25-5.35 GHz, 5.725-5.850 GHz)

OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple IEEE802.11a, g : sous couche PMD, champs données

Paramètres OFDM

Parameter :	Value :
N_{SD} : Number of data subcarriers	48
N_{SP} : Number of pilot subcarriers	4
N_{ST} : Number of subcarriers, total	52
Δ_f : Subcarrier frequency spacing	0.3125 MHz
T_{FFT} : IFFT/FFT period	3.2 μs
$T_{PREAMBLE}$: PLCP preamble duration	16 μs
T_{SIGNAL} : Duration of SIGNAL BPSK- OFDM symbol	4 μs
T_{GI} : GI duration	0.8 μs
T_{GI2} : Training symbol GI duration	1.6 μs
T_{SYM} : Symbol interval	4 μs
T_{SHORT} : Short training sequence duration	8 μs
T_{LONG} : Long training sequence duration	8 μs

OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple IEEE802.11a, g (OFDM sans MIMO, sans agrégation de canaux)

Performances

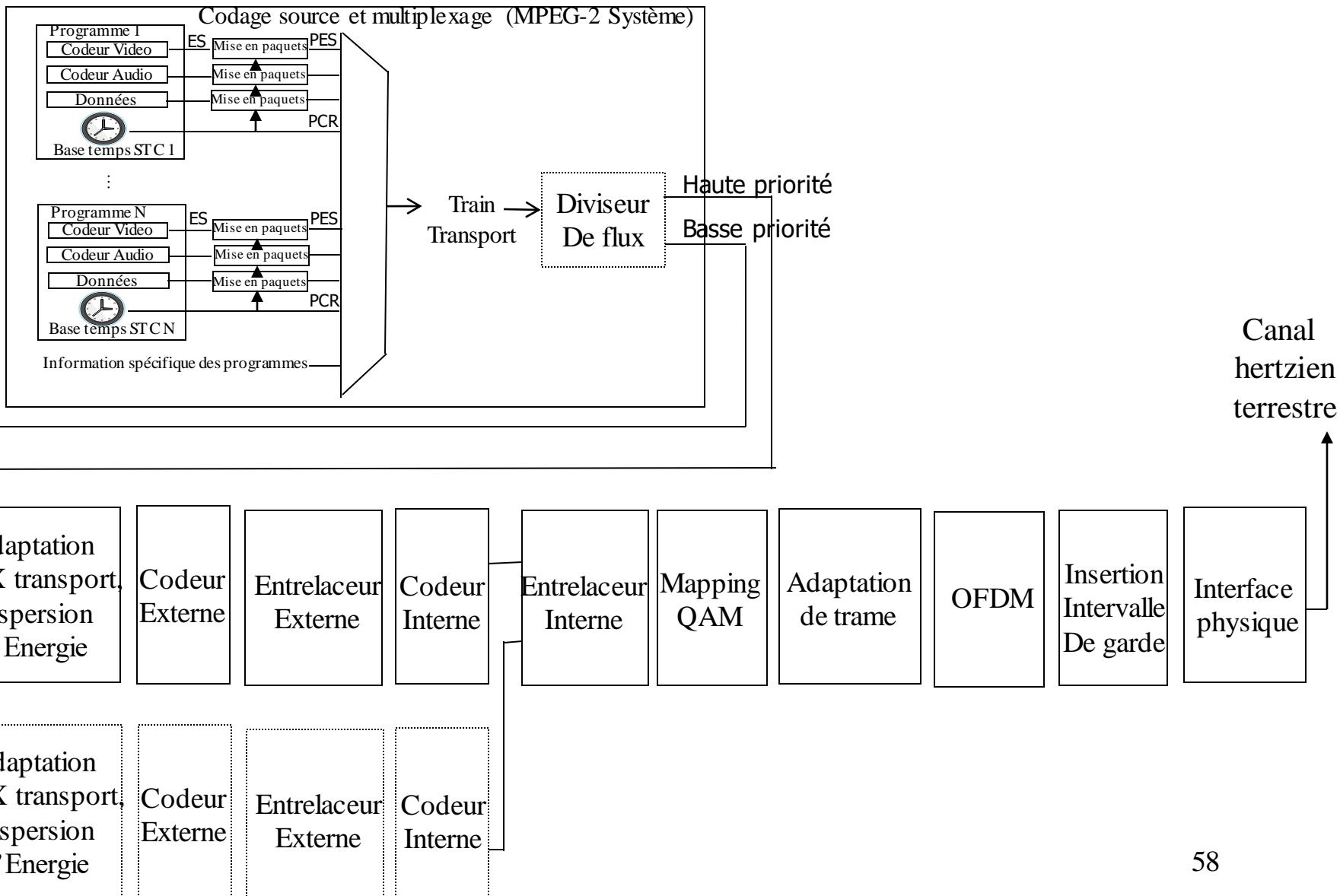
Data rate (Mbps)	Modulation	Coding Rate	Coded bits per subcarrier	Coded bit per OFDM symbol	Data bits per OFDM symbol
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

Evolutions des standards IEEE802.11

Standard	Bande de fréquence utilisée (GHz)	Largeur de bande (MHz)	Intervalle de garde (ns)	Débit utile (Mbps) par flux MIMO	Mapping	Taux de codage	Nombre max de flux MIMO	Mod.	Portée (m)						
									Intérieur	Extérieur					
802.11 (1997)	2,4	22	-	1,2			-	FHSS, DSSS	20	100					
802.11b (1999)	2,4	22	-	1; 2; 5,5; 11			-	DSSS	35	140					
802.11a (1999)	5	20	800	6; 9; 12; 18; 24; 36; 48 ; 54	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	Convolutif $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$	1	OFDM	35	120					
802.11g (2003)	2,4							DSSS OFDM	38	140					
802.11n (2009)	2,4 / 5	20	400 / 800	6,5 à 72,2	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	Convolutif $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{5}{6}$	4x4	OFDM	70 (2,4 GHz) 35 (5 GHz)	250 250					
		40		15 à 150				LDPC (option)	8x8						
802.11ac (2014)	5	20	400 / 800	6,5 à 96	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	MU-MIMO	35	OFDMA	35	100					
		40		13,5 à 200											
		80		29,2 à 433	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM (option)										
		160 (option)		58,5 à 866											
802.11ax (2021) WiFi 6	1-> 7,1	20 -> 160		-> 10500	-> 1024 QAM		8x8 MU-MIMO	OFDMA	35	100					

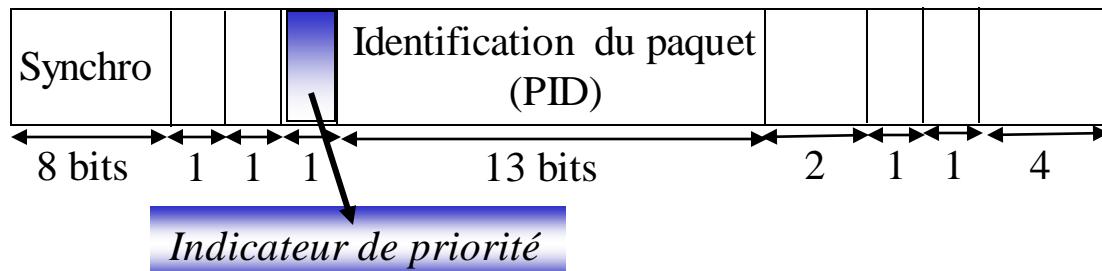
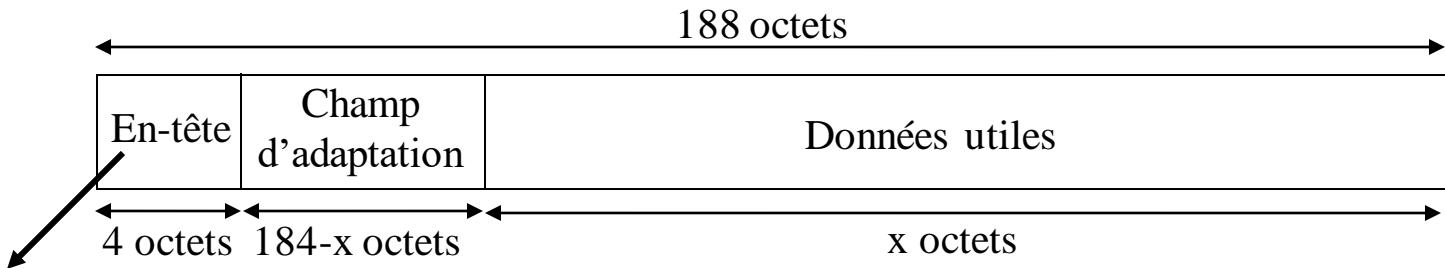
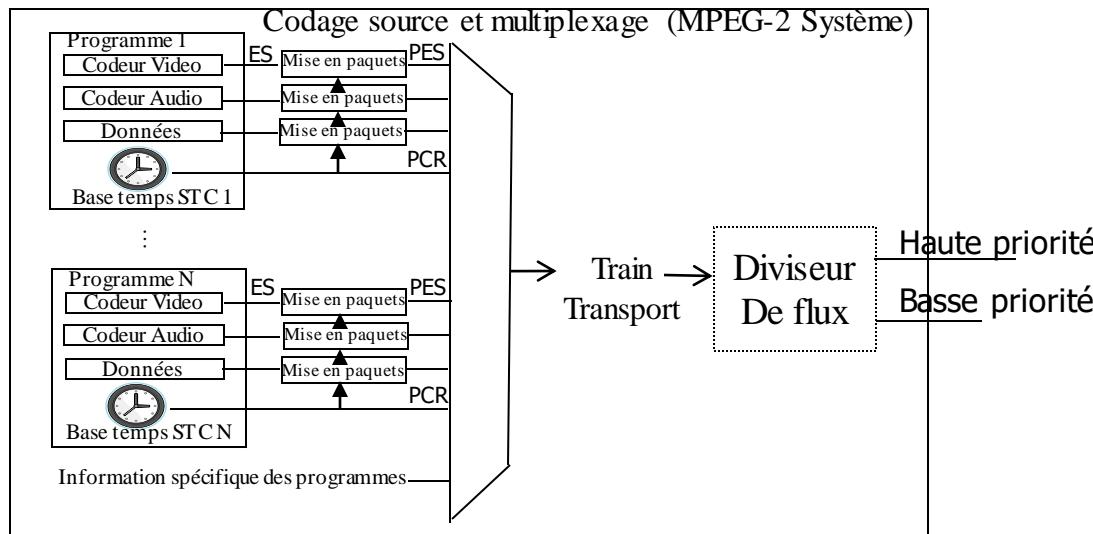
OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple 2 : le DVB-T (TNT)



OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple 2 : le DVB-T (TNT)

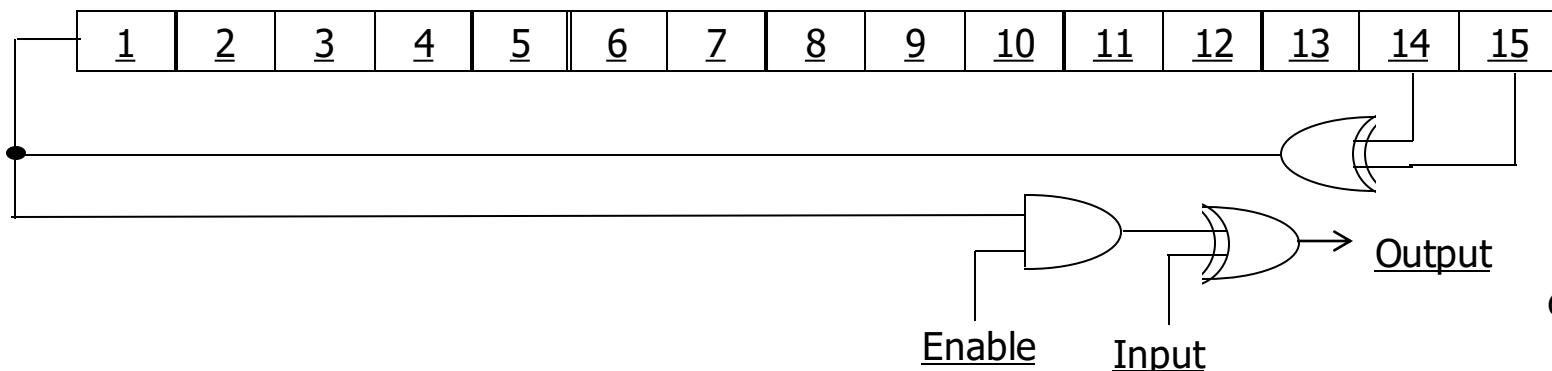
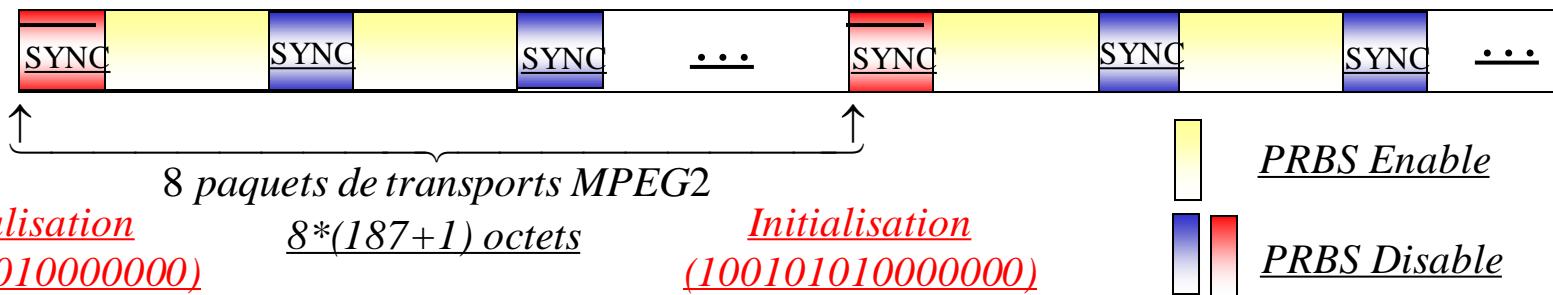
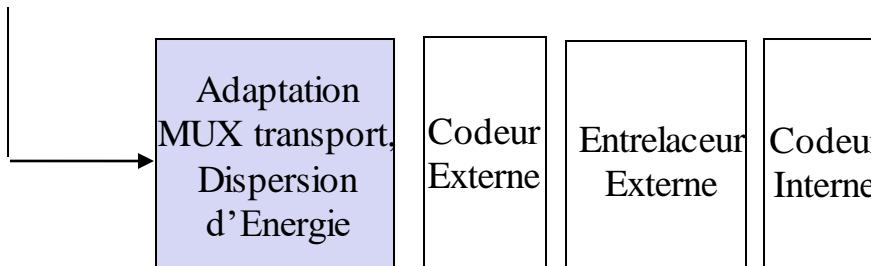


Paquet transport MPEG-2

OFDM : exemple de couches physiques

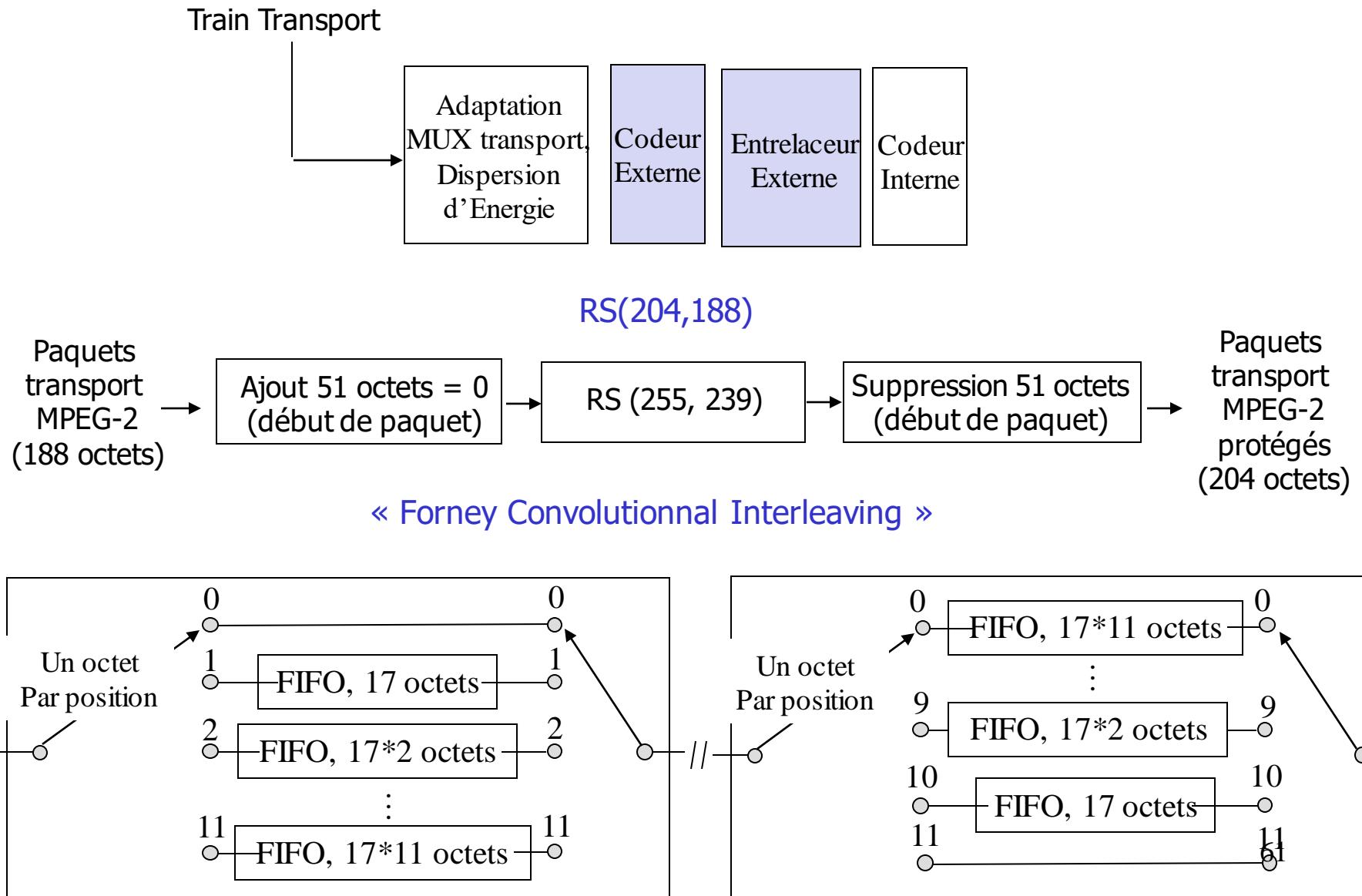
- Exemple 2 : le DVB-T (TNT)

Train Transport



OFDM : exemple de couches physiques

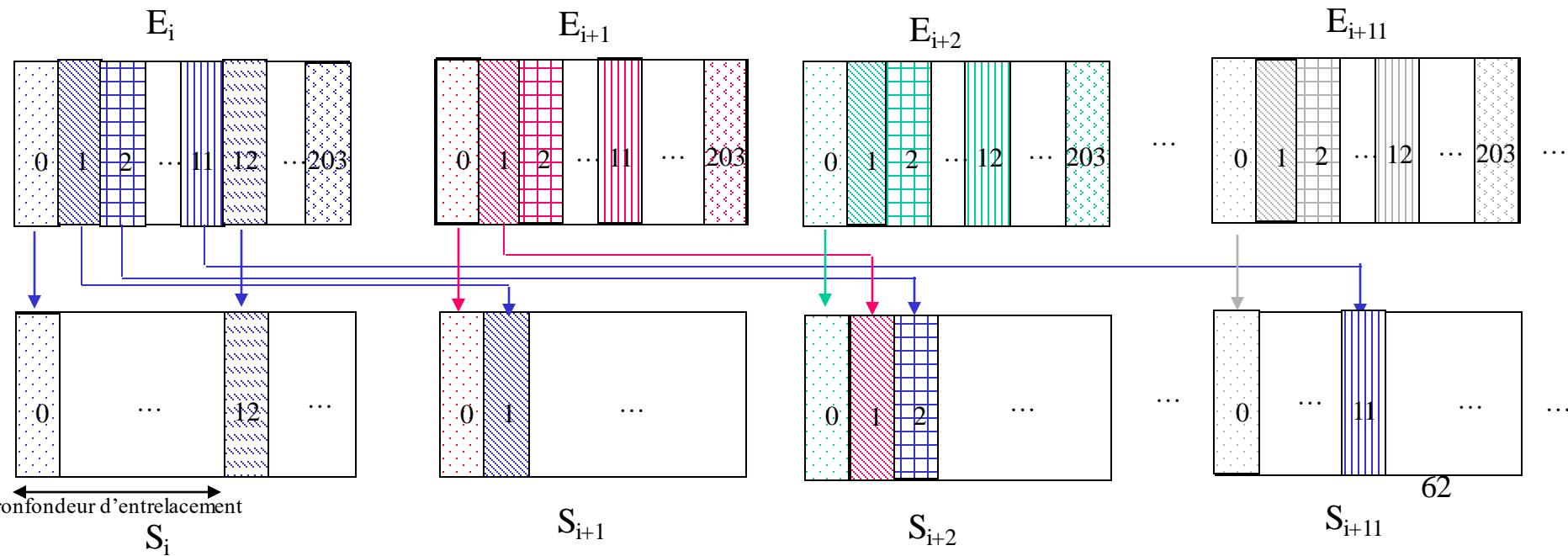
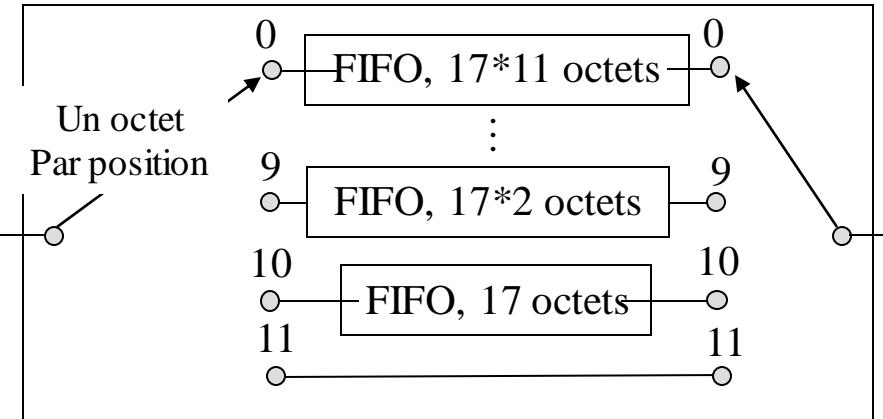
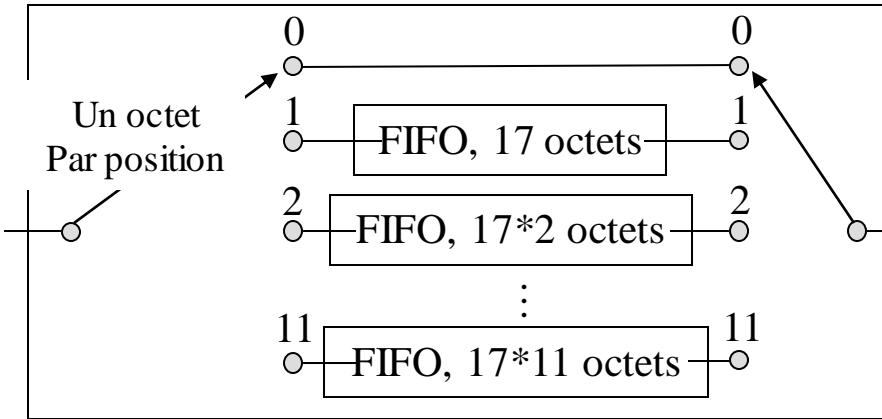
- Exemple 2 : le DVB-T (TNT)



OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple 2 : le DVB-T (TNT)

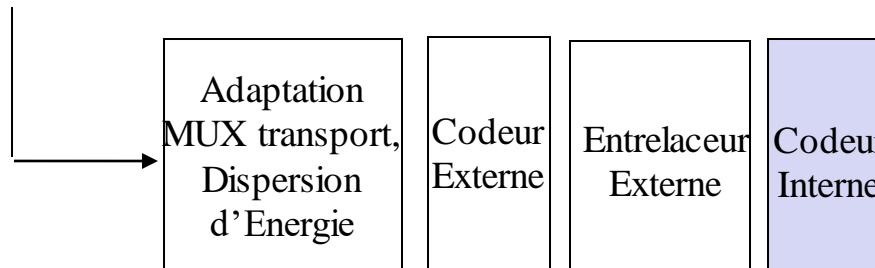
FORNEY CONVOLUTIONNAL INTERLEAVING



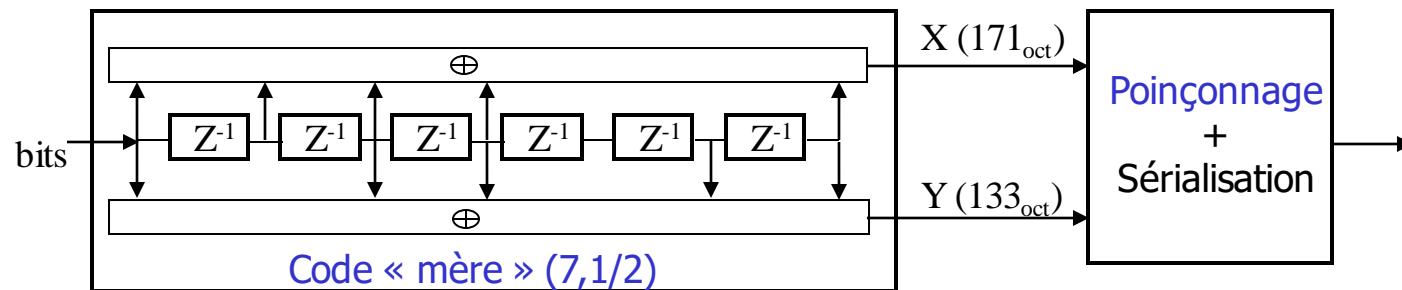
OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple 2 : le DVB-T (TNT)

Train Transport



Code convolutif ($7, \frac{1}{2}$) poinçonné



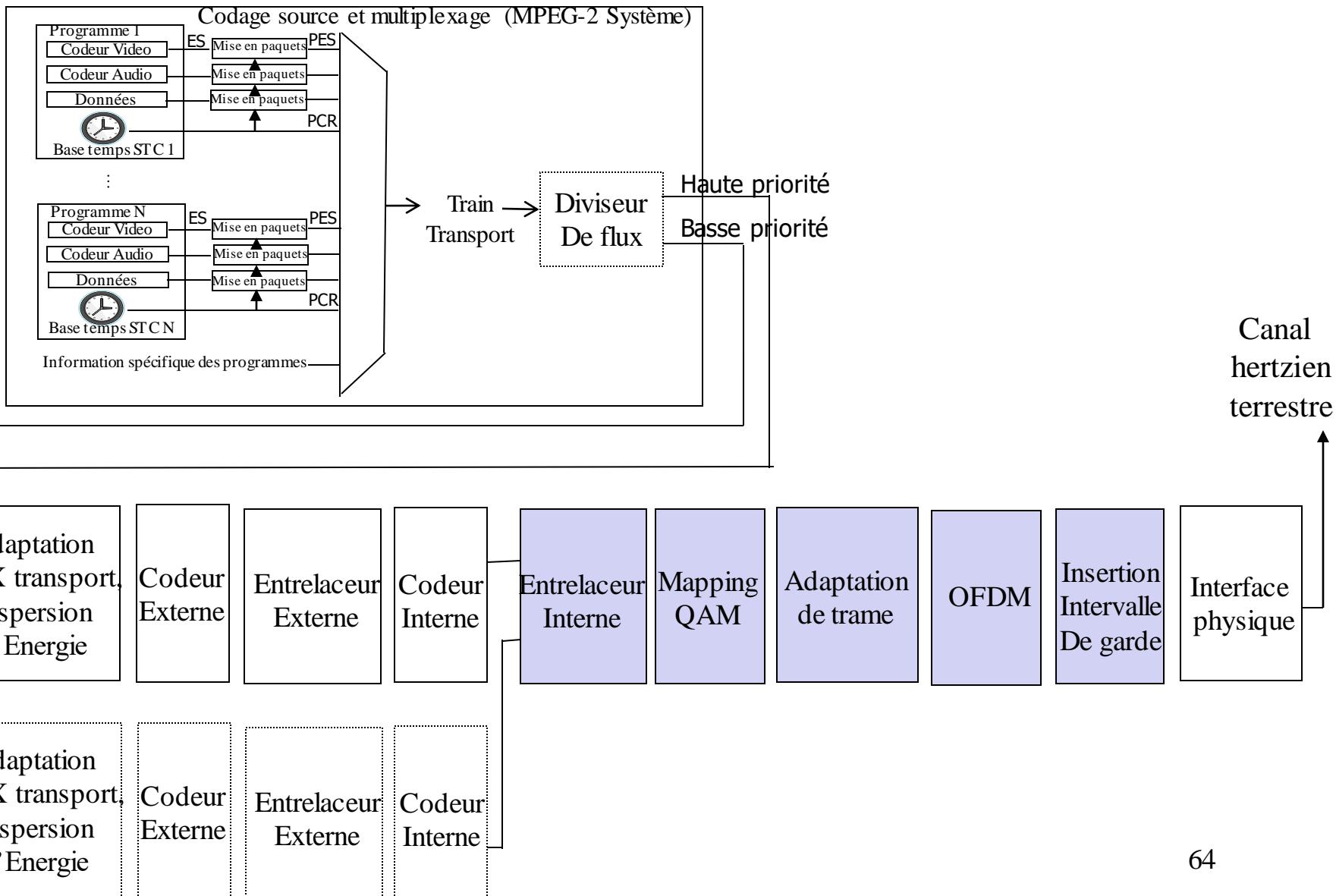
Original code			Code rates										
K	G_1 (X)	G_2 (Y)	1/2		2/3		3/4		5/6		7/8		
			P	d_{free}	P	d_{free}	P	d_{free}	P	d_{free}	P	d_{free}	
7	171_{oct}	133_{oct}	X: 1 Y: 1 $I=X_1$ $Q=Y_1$	10	X: 10 Y: 11 $I=X_1 Y_2 Y_3$ $Q=Y_1 X_3 Y_4$	6	X: 101 Y: 110 $I=X_1 Y_2$ $Q=Y_1 X_3$	5	X: 10101 Y: 11010 $I=X_1 Y_2 Y_4$ $Q=Y_1 X_3 X_5$	4	X: 1000101 Y: 1111010 $I=X_1 Y_2 Y_4 Y_6$ $Q=Y_1 Y_3 X_5 X_7$	3	
NOTE: 1 = transmitted bit 0 = non transmitted bit													



Taux de codage : $\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{5}{6}, \frac{7}{8}$

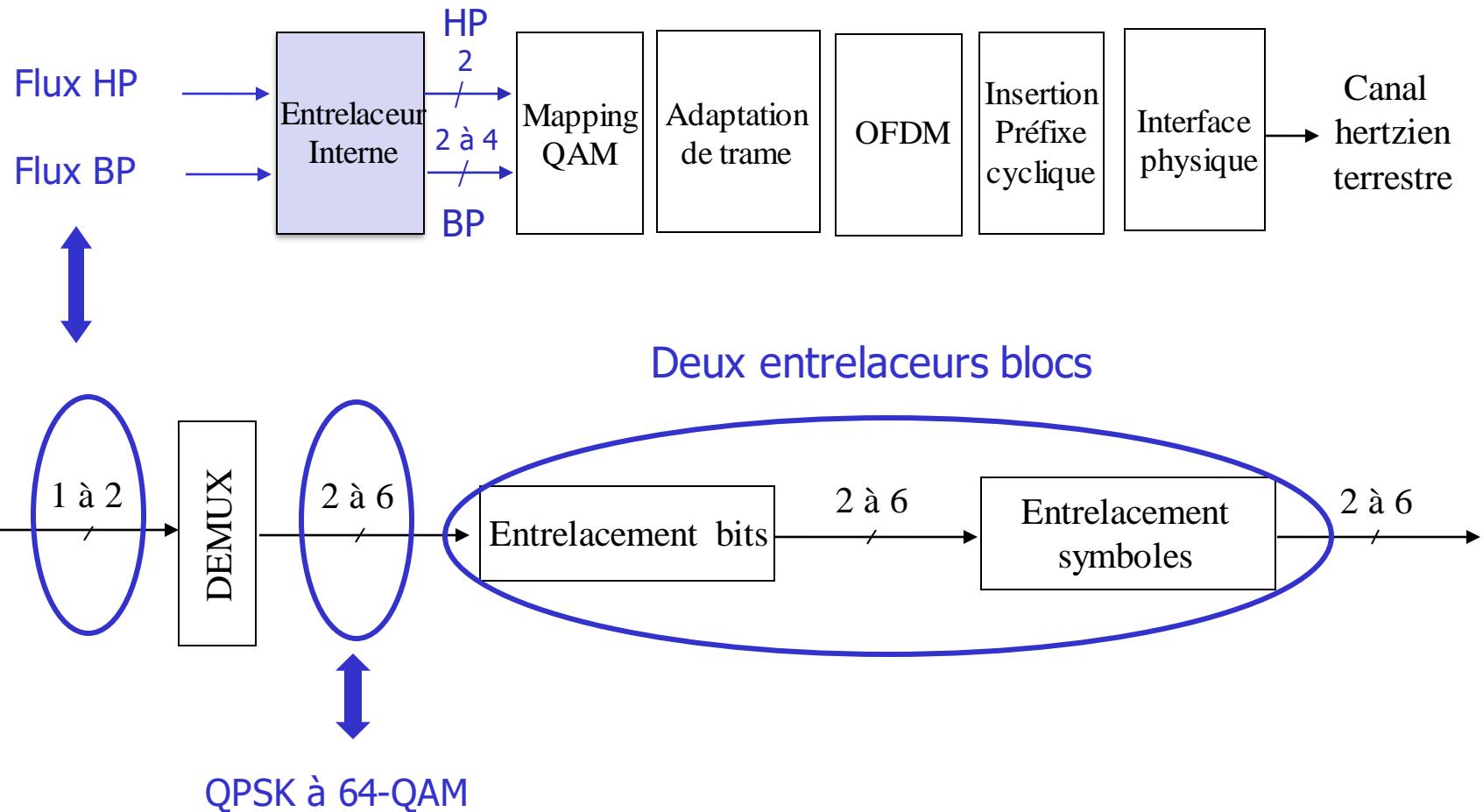
OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple 2 : le DVB-T (TNT)



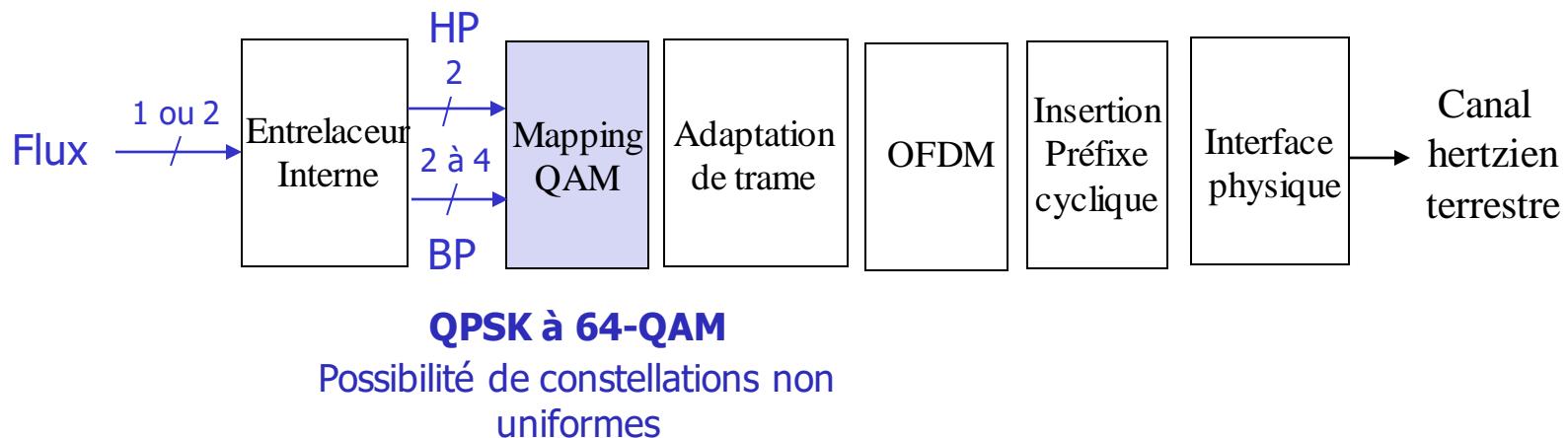
OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple 2 : le DVB-T (TNT)

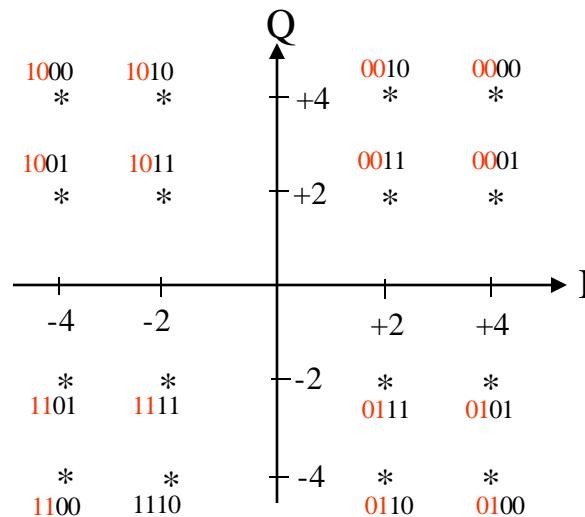


OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple 2 : le DVB-T (TNT)

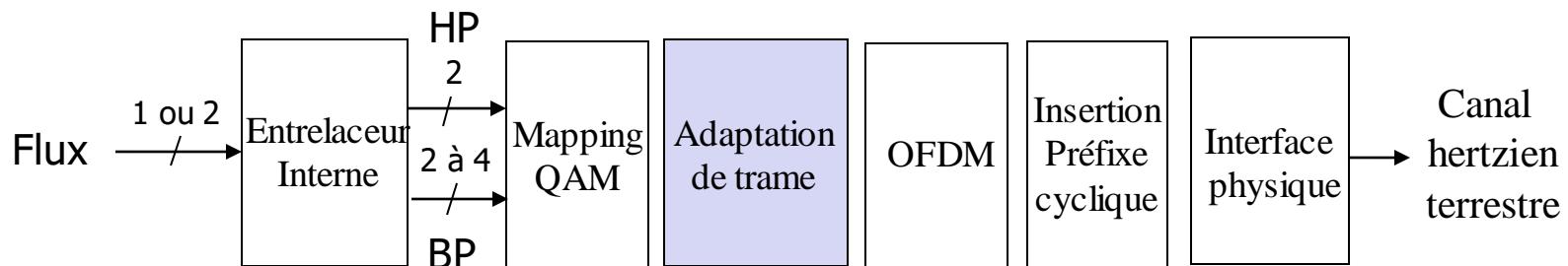


Exemple 16-QAM non uniforme :

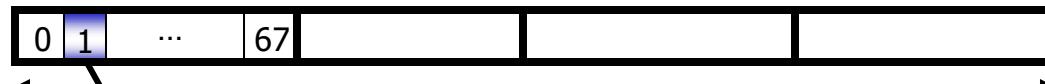


OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple 2 : le DVB-T (TNT)

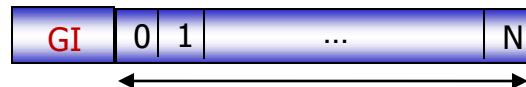


Une **trame** => 68 symboles OFDM



Une **super trame** = 4 trames => nombre entier de paquets RS par super trame

Un **symbole ofdm** = N sous-porteuses + un intervalle de garde (GI)

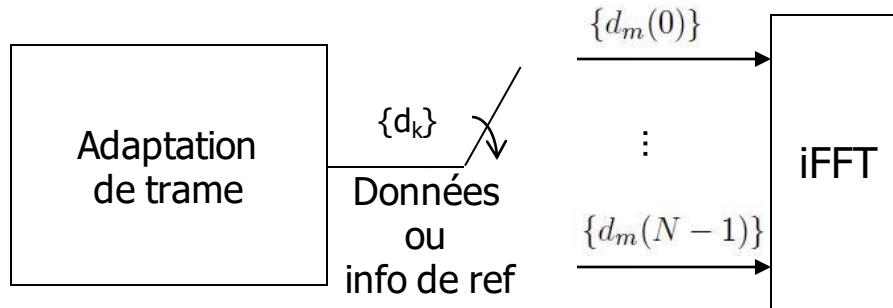
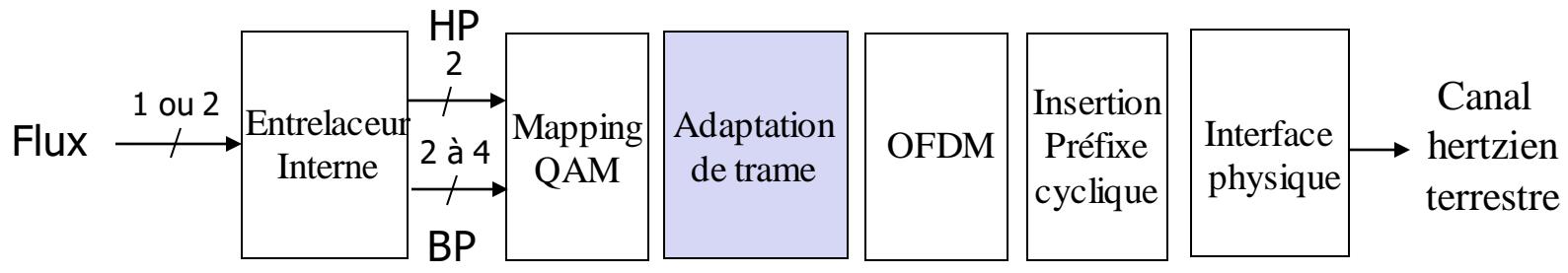


N cellules :

- Données (symboles QAM)
- Informations de référence

OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple 2 : le DVB-T (TNT)



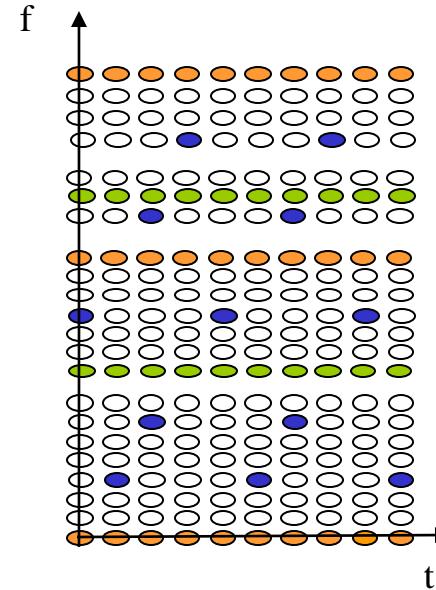
Un symbole ofdm

N sous-porteuses + un intervalle de garde (GI)

- Données (symboles QAM)
- Informations de référence

Pilotes dispersés
Sous-porteuses pilotes }
synchronisation,
estimation de canal

- Modulation DBPSK
- Puissance >1

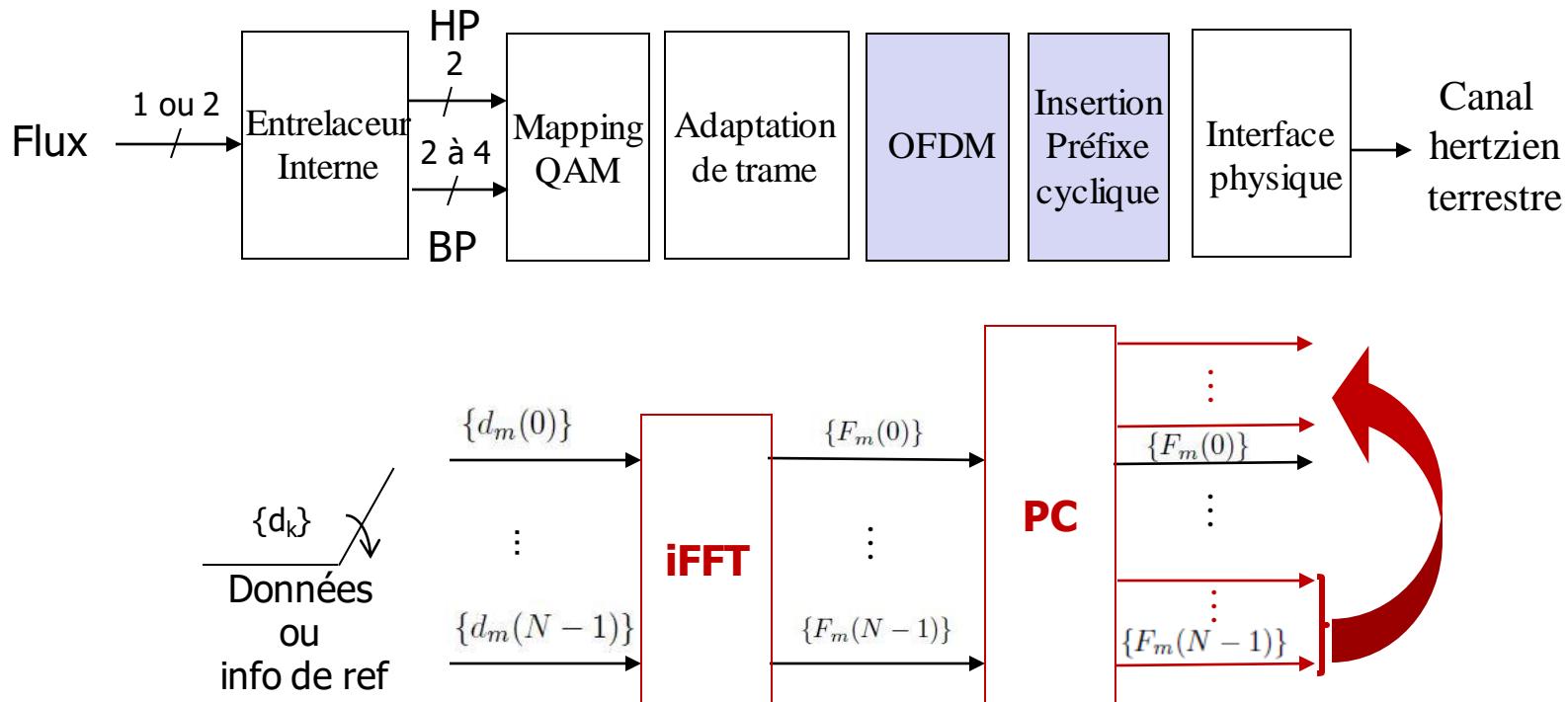


Transmitting Parameter Signaling (TPS)

- 68 bits
- un bit TPS par trame sur plusieurs porteuses
- Modulation DBPSK

OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple 2 : le DVB-T (TNT)



Deux modes OFDM :

- Mode **2K** = 2048 porteuses dont 1705 utiles ($T'_s = 224\mu s$)
- Mode **8K** (réseau SFN)= 8192 porteuses dont 6817 utiles ($T'_s = 896\mu s$)

Quatre longueurs de préfixe cyclique possibles :

PC/T's : 1/4, 1/8, 1/16, 1/32

OFDM : exemple de couches physiques

- Exemple 2 : le DVB-T (TNT)

Performances

Modulation	Code rate	C/N for BER=2*10 ⁻⁴ after Viterbi i.e. QEF after RS			Bit rate (Mbit/s)			
		Gaussian channel	Rice channel	Rayleigh channel	Δ/T _U =1/4	Δ/T _U =1/8	Δ/T _U =1/16	Δ/T _U =1/32
QPSK	1/2	3.1	3.6	5.4	4.98	5.53	5.85	6.03
QPSK	2/3	4.9	5.7	8.4	6.64	7.37	7.81	8.04
QPSK	3/4	5.9	6.8	10.7	7.46	8.29	8.78	9.05
QPSK	5/6	6.9	8.0	13.1	8.29	9.22	9.76	10.05
QPSK	7/8	7.7	8.7	16.3	8.71	9.68	10.25	10.56
16-QAM	1/2	8.8	9.6	11.2	9.95	11.06	11.71	12.06
16-QAM	2/3	11.1	11.6	14.2	13.27	14.75	15.61	16.09
16-QAM	3/4	12.5	13.0	16.7	14.93	16.59	17.56	18.10
16-QAM	5/6	13.5	14.4	19.3	16.59	18.43	19.52	20.11
16-QAM	7/8	13.9	15.0	22.8	17.42	19.35	20.49	21.11
64-QAM	1/2	14.4	14.7	16.0	14.93	16.59	17.56	18.10
64-QAM	2/3	16.5	17.1	19.3	19.91	22.12	23.42	24.13
64-QAM	3/4	18.0	18.6	21.7	22.39	24.88	26.35	27.14
64-QAM	5/6	19.3	20.0	25.3	24.88	27.65	29.27	30.16
64-QAM	7/8	20.1	21.0	27.9	26.13	29.03	30.74	31.67

Evolution du DVB-T : le DVB-T2

	DVB-T	DVB-T2
Codage canal	Convolutif 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8 + RS(204,188)	LDPC + BCH 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6
Modulations	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
Intervalle de garde	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 19/256 , 1/8, 19/128 , 1/16, 1/32, 1/128
Modes OFDM	2k, 8k	1k, 2k, 4k , 8k, 16k , 32k Gestion du PAPR, possibilité MISO
Largeur de bande	6, 7 ou 8 MHz	1.7 , 5 , 6, 7, 8, 10 MHz
Pilotes dispersés	8% of total	1% , 2% , 4% , 8%
Pilotes continus	2.6% of total	0.35%

Exemples de comparaison :

- UK MFN DVB-T (64-QAM, 2k, 2/3, IG=1/32) / DVB-T2 (256-QAM, 32k, 3/5, IG=1/128) :
24.13 Mbit/s -> 35.4 Mbit/s (+46.5%).
- Italian SFN DVB-T (64-QAM, 8k, 2/3, IG=1/4) / DVB-T2 (256-QAM, 32k, 3/5, GI=1/16) :
19.91 Mbit/s -> 33.3 Mbit/s (+67%).

OFDM : exemple de couches physiques

- Références

- **Standards IEEE802.11**

- Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification, IEEE Std. 802.11, 1999.
- High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band, IEEE Std. 802.11a, 2000.
- Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band, IEEE Std. 802.11g, 2003.
- IEEE 802.11n-2009—Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput. IES-SA. 29 October 2009
- The IEEE 802.11g standard for High Data Rate WLANs, D. Vassis, G Kormentzas, A. Rouskas and I. Maglogiannis, IEEE Network, Vol. 19, May-June 2005, p.21-26
- B. Crow, “IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks,” IEEE Commun. Mag., vol. 35, no. 9, pp. 116-126, Sept. 1997.
- Capacity, Coverage and Deployment Considerations for IEEE802.11g, White paper, Cisco Systems.

- **Normes DVB terrestres**

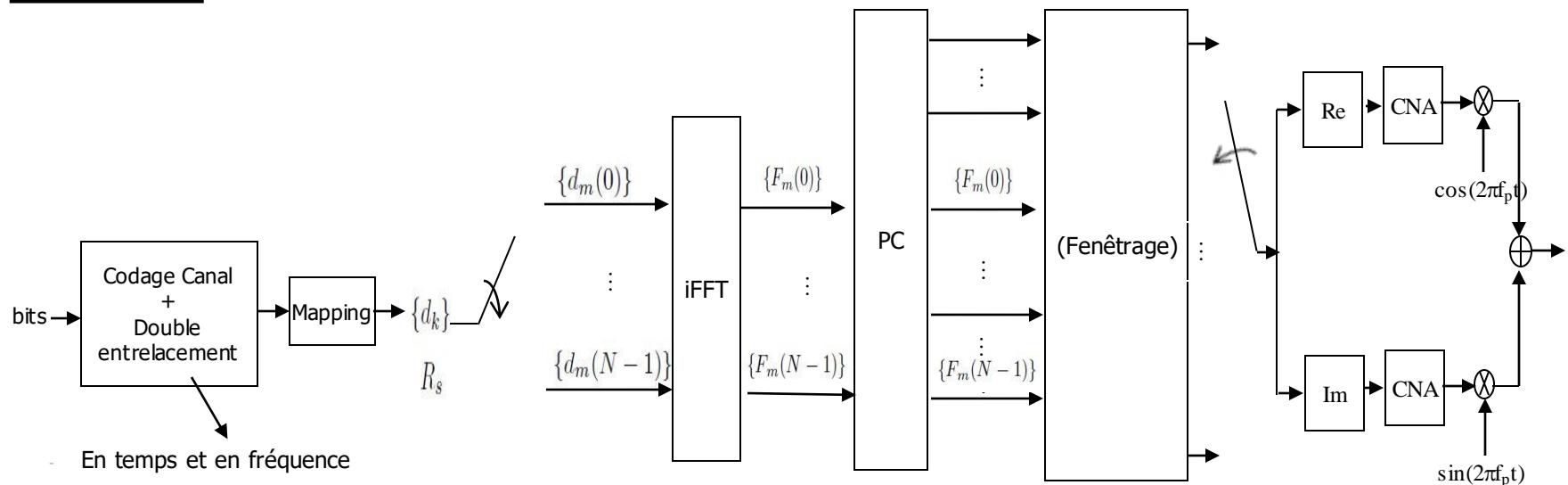
- « La télévision numérique, satellite, câble, TNT, ADSL », Hervé Benoît, Dunod
- Digital Video Broadcasting (DVB) : Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, norme ETSI EN 300 744.
- Digital Video Broadcasting (DVB);Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2), ETSI EN 302 755 V1.3.1 (2011-11)
- ETSI EN 302 755 V1.1.1 (2009-09), *European Standard (Telecommunications series)*, Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

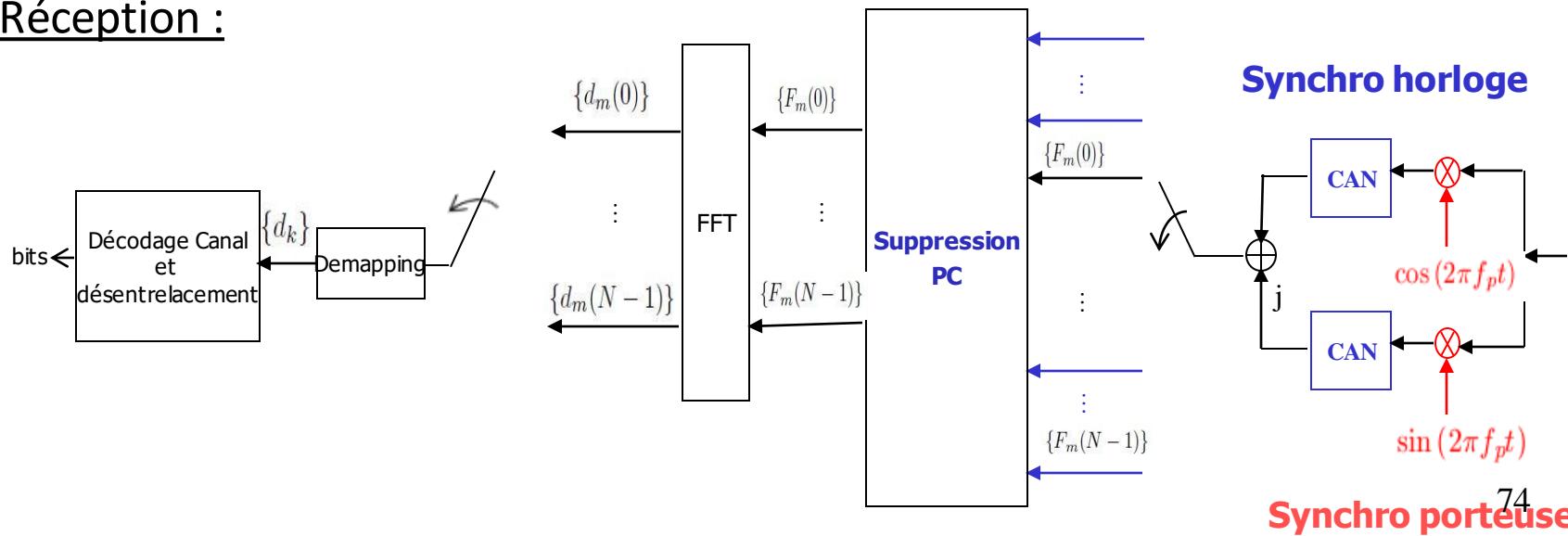
Problèmes de synchronisation et de facteur de crête élevé

OFDM : Synchronisation

→ Emission :

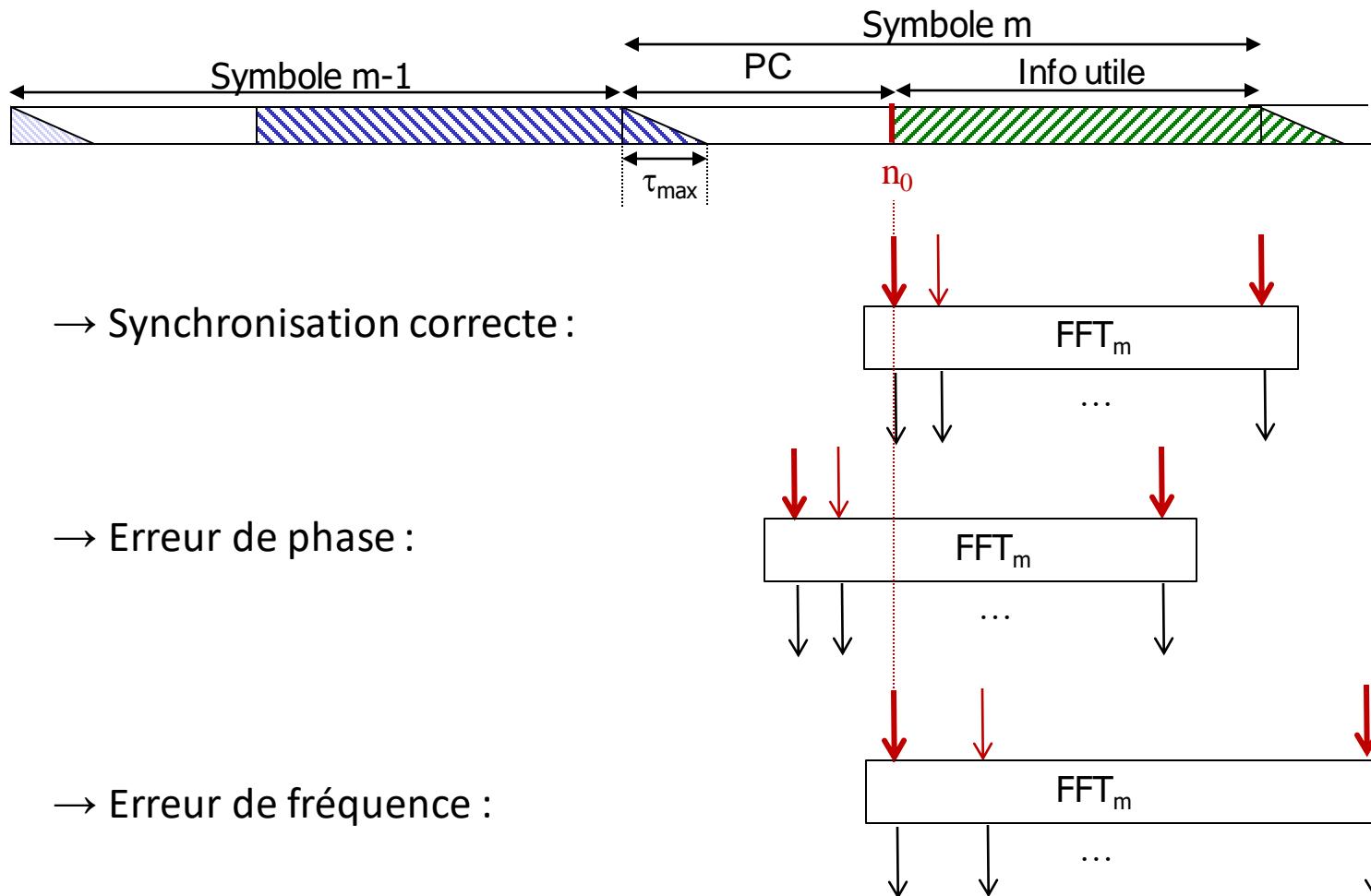


→ Réception :



OFDM : Synchronisation

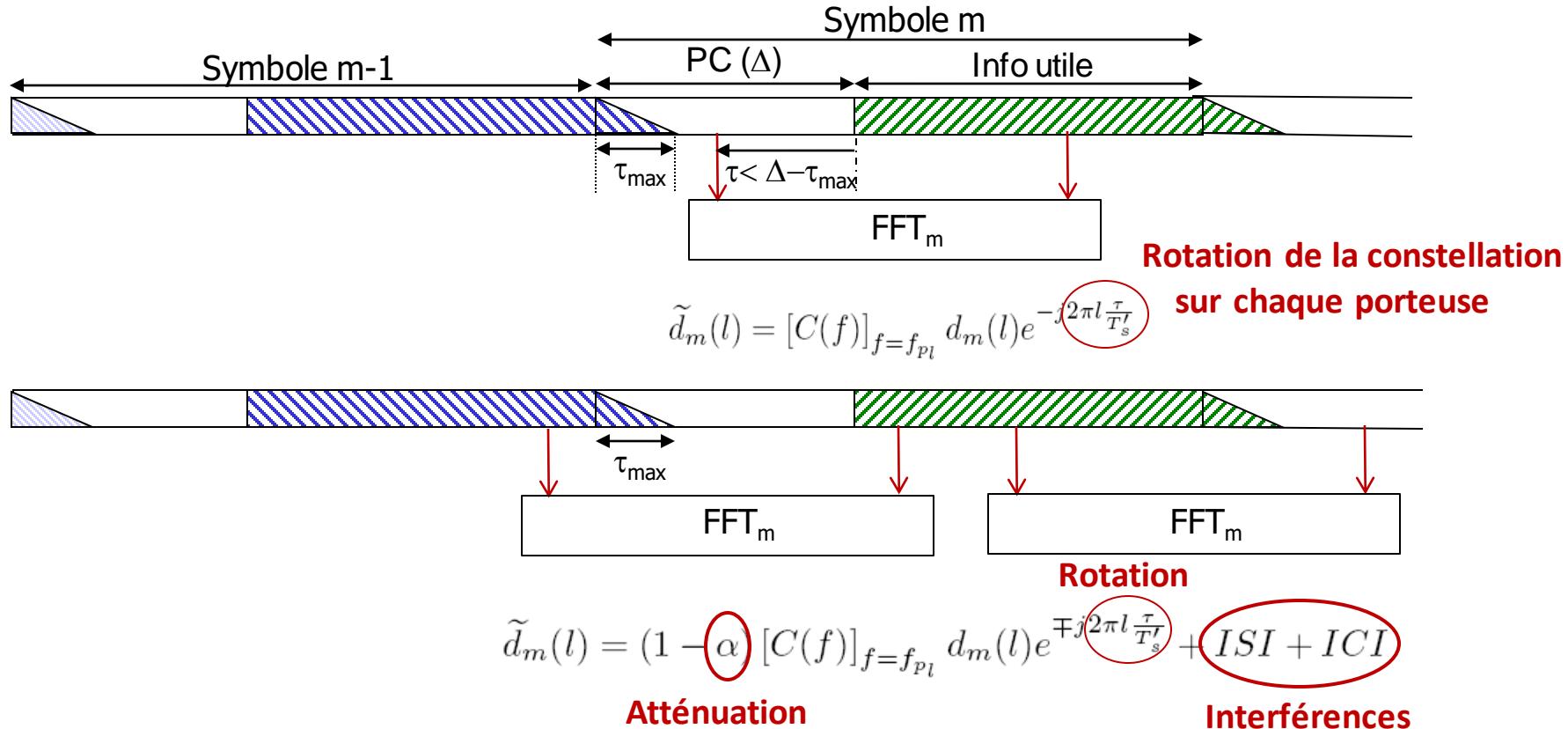
- Synchronisation horloge (« temporelle »)



OFDM : Synchronisation

- Synchronisation horloge (« temporelle »)

→ Impact d'une erreur de phase horloge



Exemple de dégradation du TEB sur la porteuse l modulée en BPSK (après égalisation) :

$$TEB_{BPSK} = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0} (1 - \alpha)^2 \cos^2 \left(2\pi \frac{l\tau}{T'_s} \right)} \frac{1}{1 + SNR_{ICI+ISI}} \right) \quad 76$$

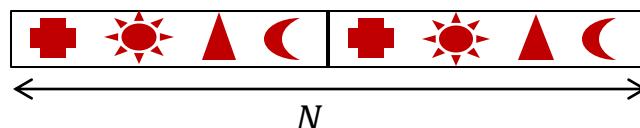
OFDM : Synchronisation

- Synchronisation horloge (« temporelle »)

- Estimation de l'**erreur de phase horloge** par mesure de corrélation
 - Estimateurs à base de **symboles pilotes**

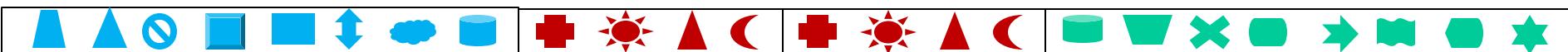
Exemple :

Symbol pilote :



$$s\left(k + \frac{N}{2}\right) = s(k), k = 0, \dots, N/2 - 1$$

Signal reçu échantillonné $r(n)$:



n_0

$$R(n) = \sum_{k=0}^{N/2-1} r^*(n+k)r(n+k + \frac{N}{2})$$

$$n_0 = \operatorname{argmax}_n R(n)$$

P.H.Moose, « A technique for OFDM frequency offset correction », IEEE Trans. On Comm., Vol 42, n°10, oct. 94

T.M.Schmidl and D.C.Cox, « Robust frequency and timing synchronization for OFDM », IEEE Trans. On Comm.⁷⁷, Vol 45, n°12, dec.97

OFDM : Synchronisation

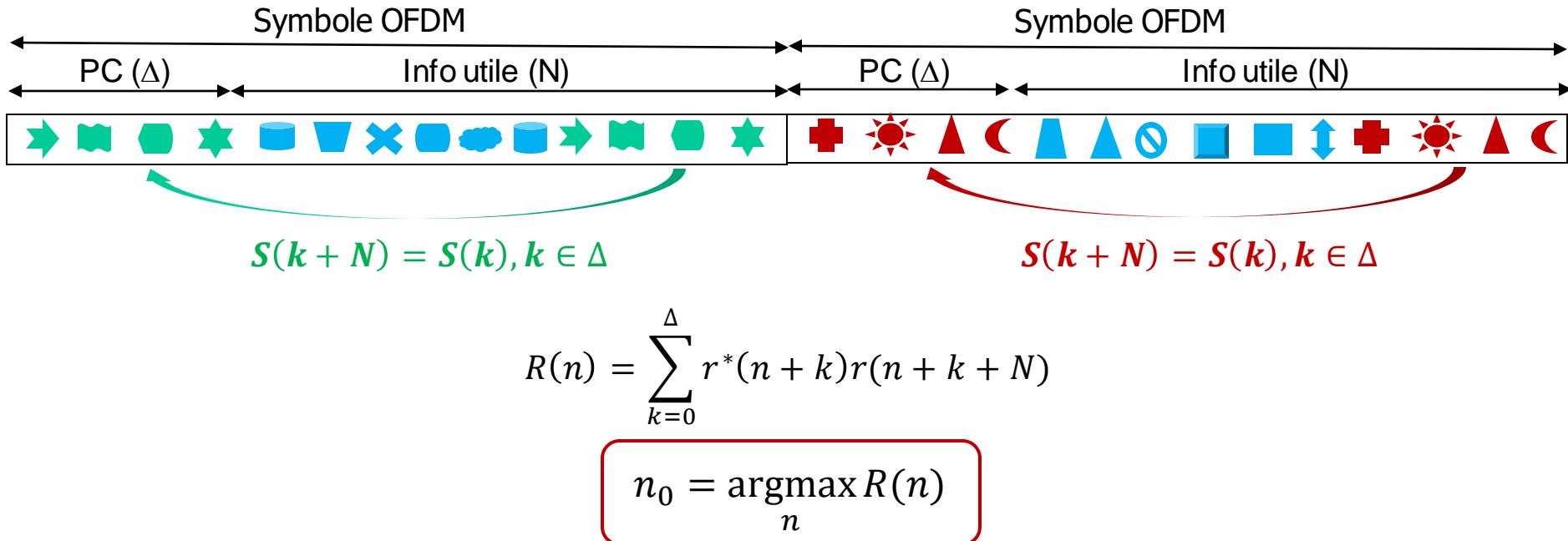
- Synchronisation horloge (« temporelle »)

→ Estimation de l'**erreur de phase horloge** par mesure de corrélation

→ Utilisation du **préfixe cyclique** : Van de Beek (Ref 4)

Exemple :

Signal reçu échantillonné $r(n)$:



J.H.Van de Beek, M.Sandell, P.O.Börjesson, « ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems », IEEE Trans. On Signal Proc., Vol 45, n°7, july 97

OFDM : Synchronisation

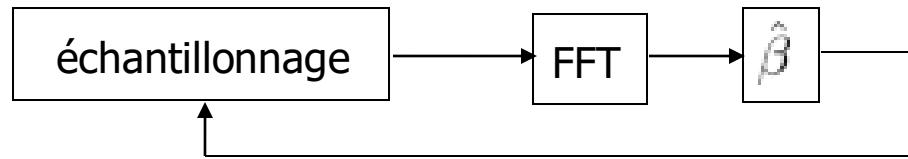
- Synchronisation horloge (« temporelle »)

→ Impact d'une **erreur de fréquence horloge** β

$$\tilde{d}_m(l) = d_m(l) \text{sinc}(l\beta) e^{j2\pi lm\beta} + \text{ISI}$$

Atténuation + rotation + ISI

→ Estimation de l'erreur de fréquence horloge



$$2\pi l m \beta_l = \text{Arg} \left(\frac{\tilde{d}_m(l)}{d_m(l)} \right)$$

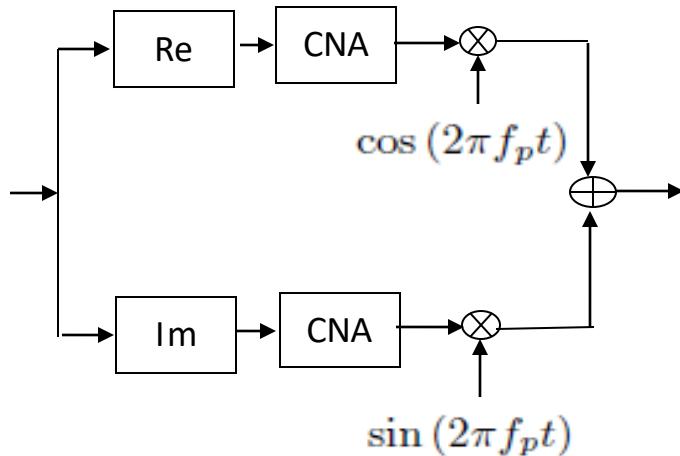
$$2\pi M l \beta_l = \text{Arg} \left(\frac{\tilde{d}_{m+M}(l)}{d_{m+M}(l)} \right) - \text{Arg} \left(\frac{\tilde{d}_m(l)}{d_m(l)} \right) = \Delta \Phi_l$$

$$\widehat{\beta} = \frac{1}{2\pi M} \frac{\sum_{l=0}^{N-1} l \Delta \Phi_l}{\sum_{l=0}^{N-1} l^2}$$

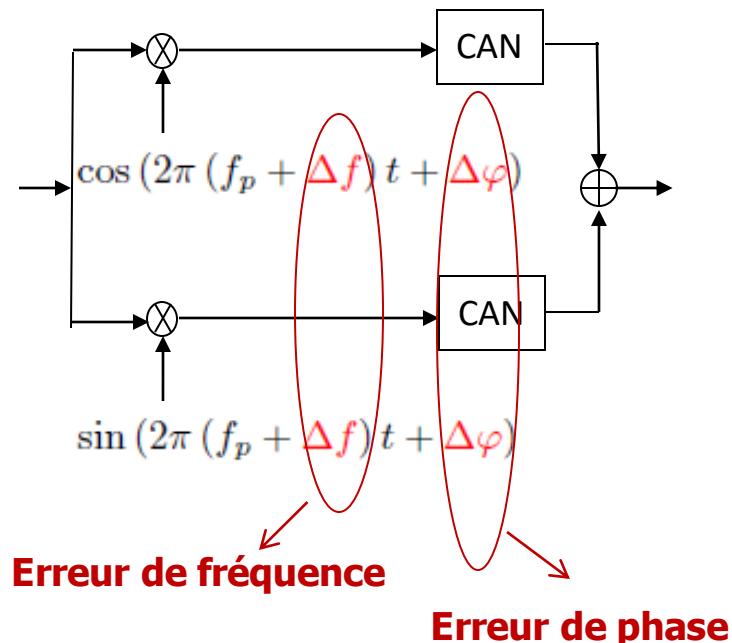
OFDM : Synchronisation

- Synchronisation porteuse (« fréquentielle »)

Emission : passage en bande transposée



Réception : retour en bande de base

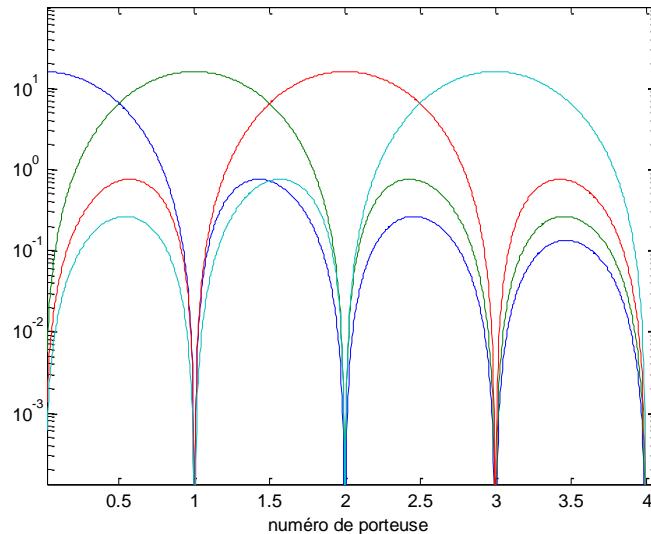


Remarque : tous les écarts (fréquence, phase) sont positionnés ici au niveau du récepteur mais on aurait pu mettre deux fréquences/phases différentes.

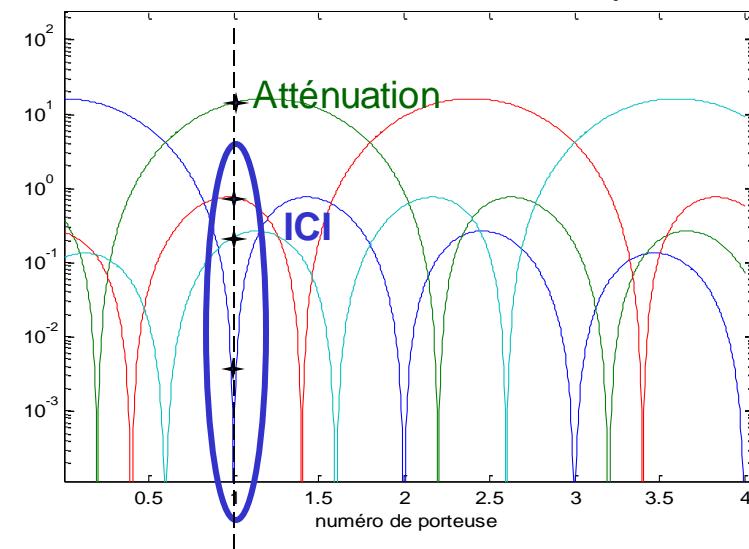
- Synchronisation porteuse (« fréquentielle »)

→ Impact d'une erreur de fréquence porteuse

Spectres sur les différentes porteuses
Correctement ramenés en bande de base :



Spectres sur les différentes porteuses
Ramenés avec une erreur de fréquence :



$$\tilde{d}_m(l) = d_m(l) T'_s e^{j2\pi \Delta f(m+\frac{1}{2})T'_s} \text{sinc}(\pi \Delta f T'_s) + ISI + ICI$$

→ Dégradation sur le TEB

$$D_{dB} \approx \frac{10}{3\ln(10)} \left[\pi \frac{\Delta f}{R_s} \right]^2 \quad (\text{Monoporteuse})$$

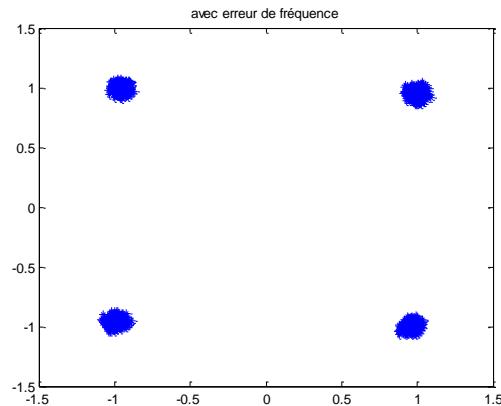
$$D_{dB} \approx \frac{10}{3\ln(10)} \left[\pi N \frac{\Delta f}{R_s} \right]^2 \frac{E_s}{N_0} \quad (\text{OFDM})$$

OFDM : Synchronisation

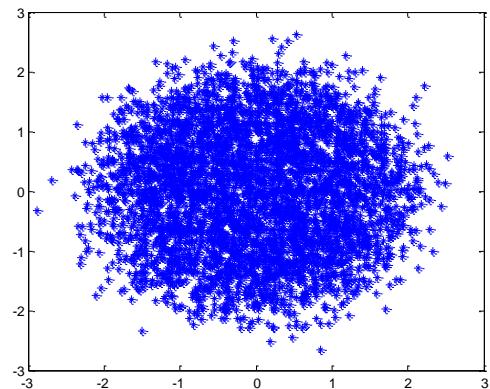
- Synchronisation porteuse (« fréquentielle »)

→ Impact d'une erreur de fréquence porteuse

$$\Delta f/R_s = 0.018$$

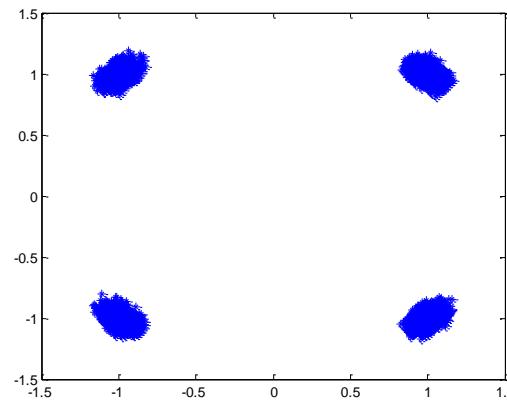


Monoporteuse SRRCF

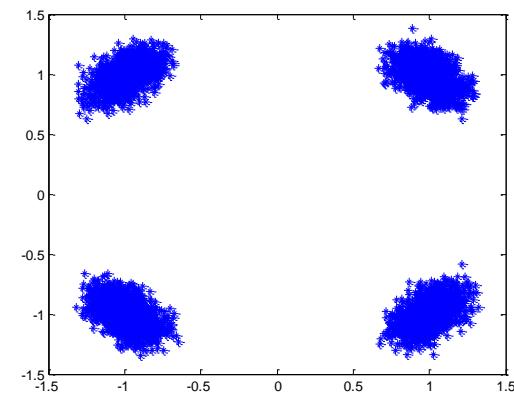


OFDM, 128 sous-porteuses, QPSK

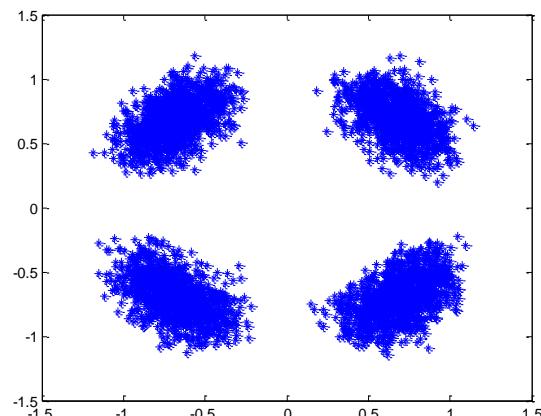
$$\text{OFDM, } \Delta f/R_s = 0.00018$$



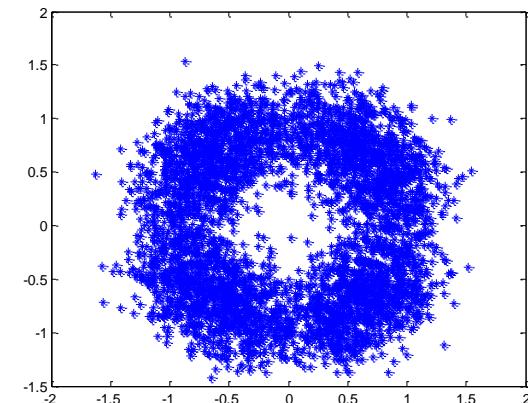
128 porteuses, QPSK



256 porteuses, QPSK



512 porteuses, QPSK



1024 porteuses, QPSK

- Synchronisation porteuse (« fréquentielle »)

→ Estimation de l'**erreur de fréquence porteuse** par mesure de rotation

- Etape préalable : synchronisation de phase horloge

$$n_0 = \operatorname{argmax}_n R(n)$$

- Mesure de la rotation entre échantillons du symbole pilote

$$\widehat{\Delta f} = \frac{1}{\pi N} \operatorname{Arg}[R(n_0)]$$

- Attention à l'ambiguïté à lever sur la mesure
- Correction devant la FFT

- Synchronisation porteuse (« fréquentielle »)

→ Erreur de phase porteuse

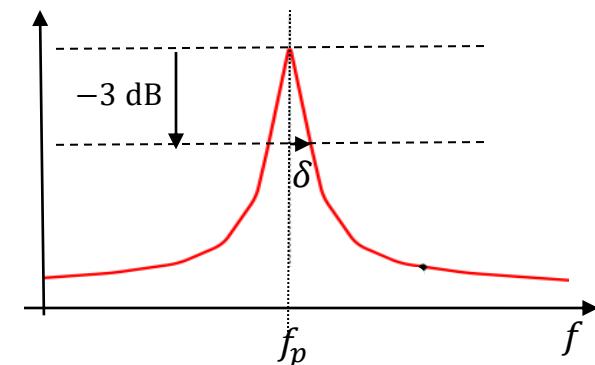
- Impact : Rotation de la constellation sur chaque porteuse
- Estimation et correction derrière la FFT avec le canal

→ Bruit de phase ⇒ Dégradation sur le TEB

$$D_{dB} \approx \frac{1}{60} \frac{10}{\ln(10)} \left[4\pi \frac{\delta}{R_s} \right] \frac{E_s}{N_0} \quad (\text{Monoporteuse})$$

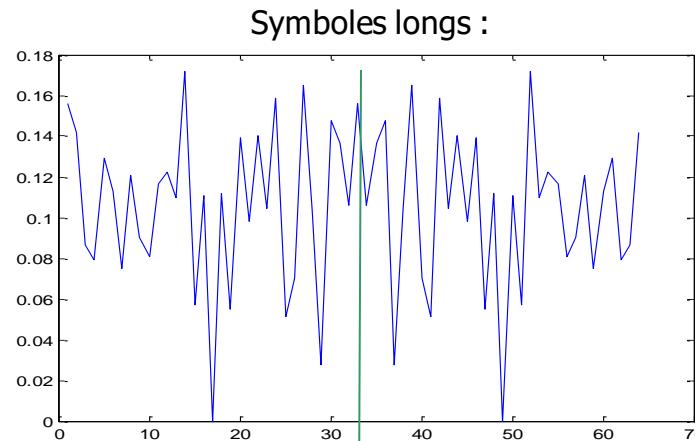
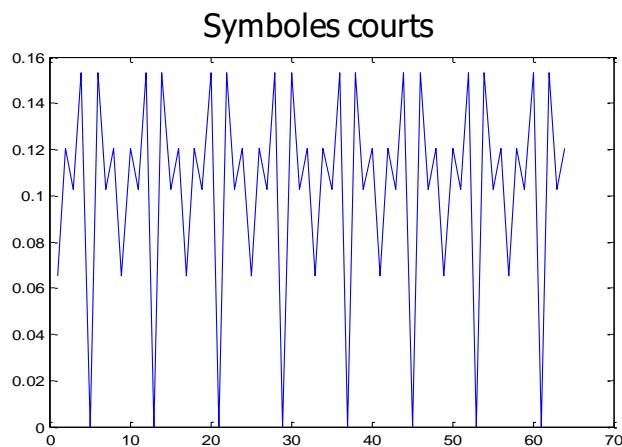
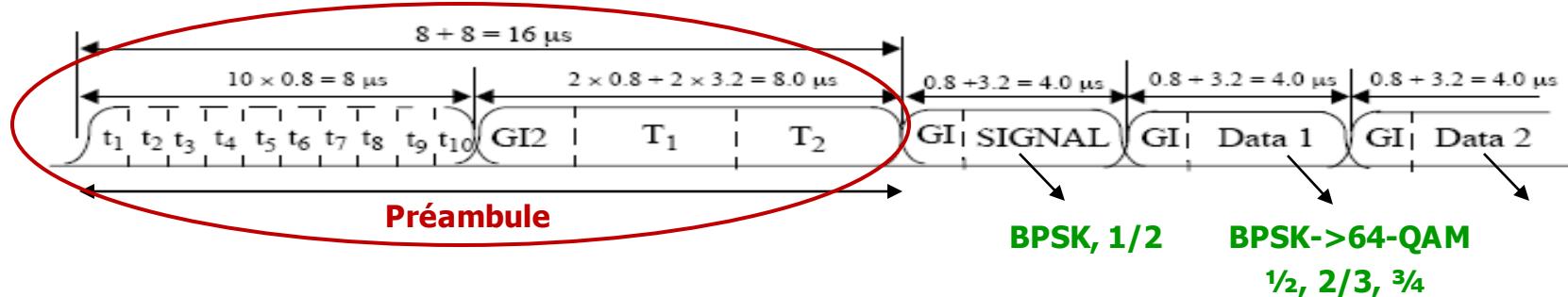
$$D_{dB} \approx \frac{11}{60} \frac{10}{\ln(10)} \left[4\pi N \frac{\delta}{R_s} \right] \frac{E_s}{N_0} \quad (\text{OFDM})$$

δ : paramètre définissant la pureté de l'oscillateur



OFDM : Synchronisation

- Exemple du IEEE802.11 : génération de redondance dans un préambule

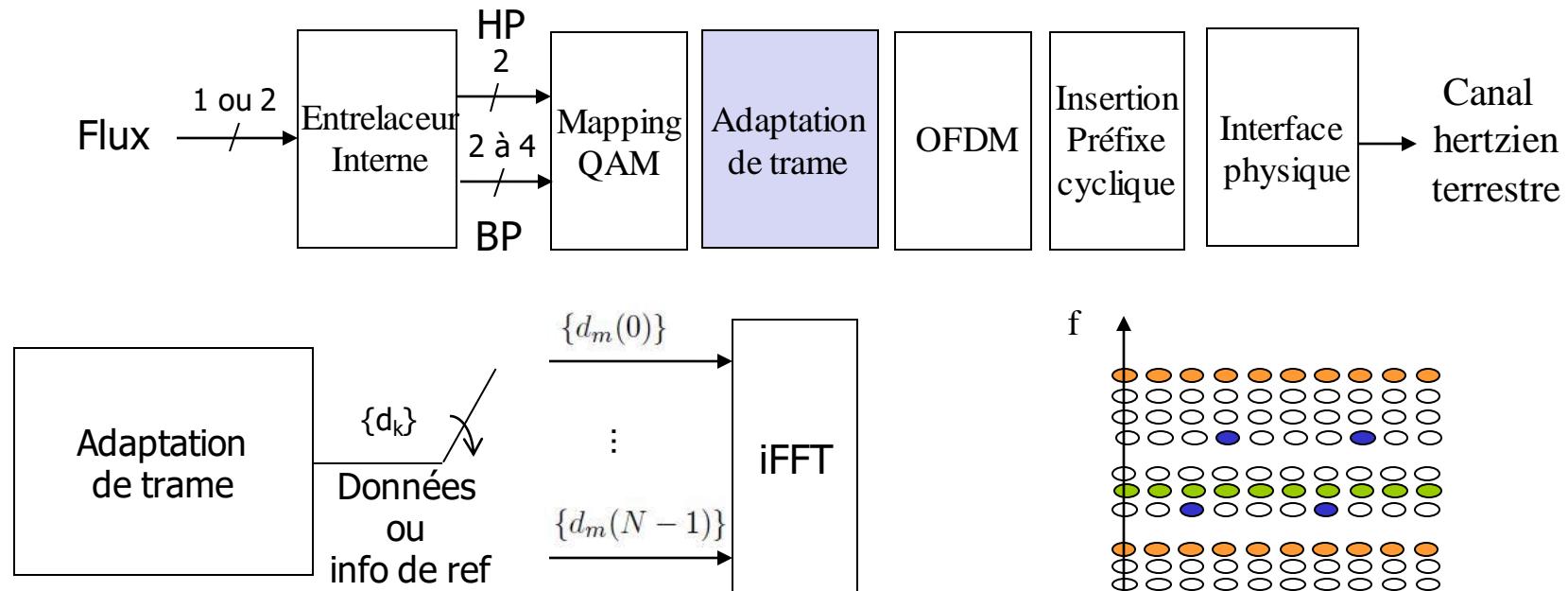


$$S(N - 1 - k) = S(k), k = 0, \dots, N/2 - 1$$

$$R(n) = \sum_{k=0}^{N/2-1} r^*(n+k)r(N-(n+k))$$

OFDM : Synchronisation

- Exemple du DVB-T : pilotes dans la trame

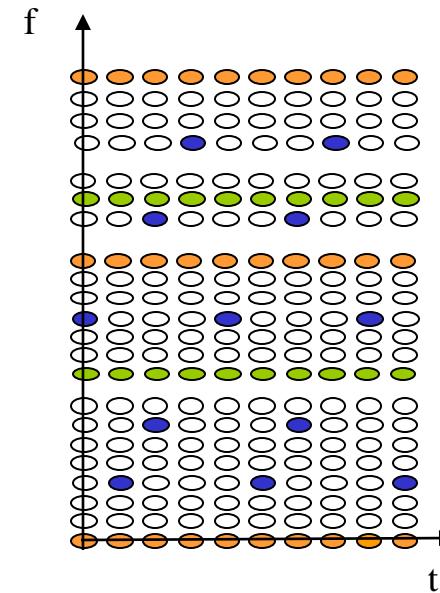


Un symbole ofdm

N sous-porteuses + un intervalle de garde (GI)

- Données (symboles QAM) ○
- Informations de référence ● ○ ● ○

- Pilotes dispersés
Sous-porteuses pilotes } synchronisation,
estimation de canal
- Modulation DBPSK
 - Puissance >1



Transmitting Parameter Signaling (TPS)

- 68 bits
- un bit TPS par trame sur plusieurs sous-porteuses
- Modulation DBPSK

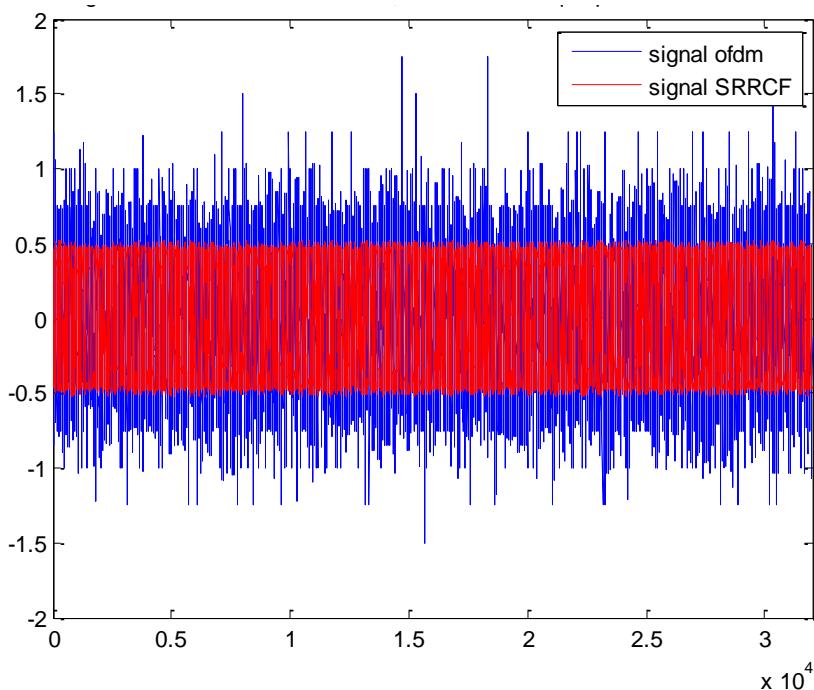
- Problème posé

→ Vers une distribution Gaussienne pour les échantillons des symboles OFDM

⇒ Fluctuations d'enveloppe

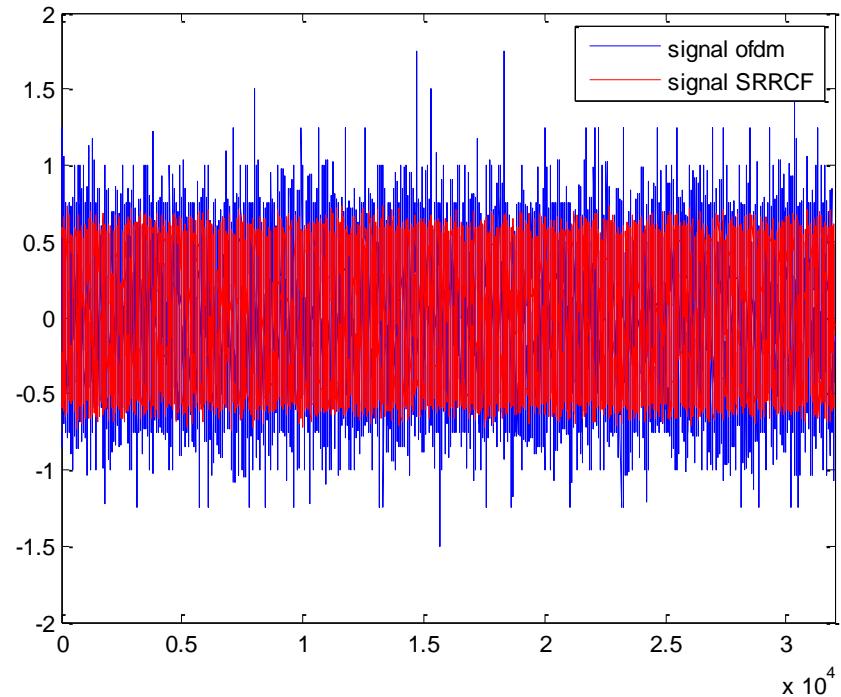
Signal BPSK, mise en forme en racine de cosinus surélevé

Signal OFDM, BPSK sur chaque porteuse



Signal 16-QAM, mise en forme en racine de cosinus surélevé

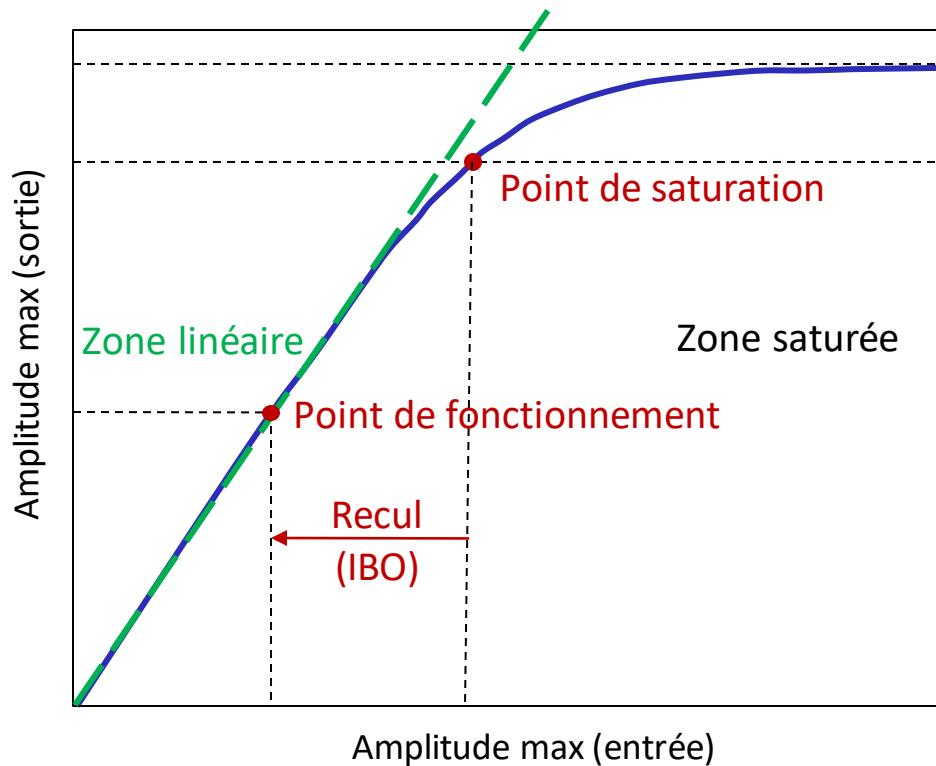
Signal OFDM, BPSK sur chaque porteuse



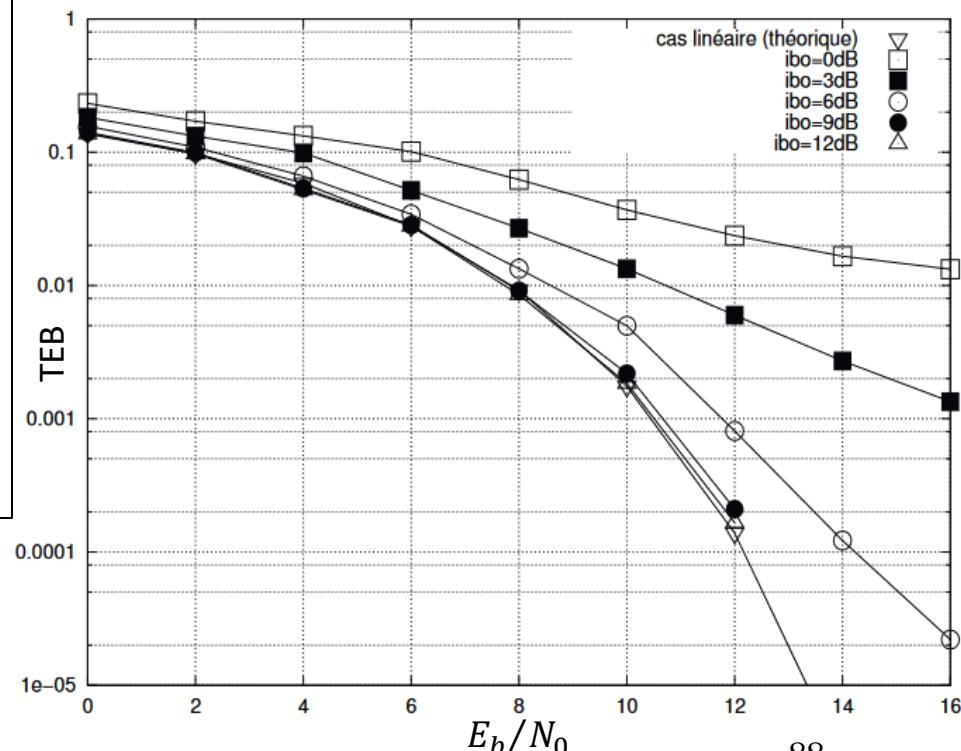
- Problème posé

→ En présence de non linéarités :

intermodulations \Leftrightarrow ISI dans le symbole OFDM



16 porteuses modulées en 16-QAM,
amplificateur SSPA (Solid-State Power Amplifier)



OFDM : Facteur de crête

- Mesure

→ PAPR (Peak to Average Power Ratio) ou PMEPR (Peak to Mean Envelope Power Ratio)

$$PAPR_x = \frac{\text{Max}(|x(t)|^2)}{E[|x(t)|^2]} \leq N \frac{\max_{i,m} d_m(i)}{\min_{i,m} d_m(i)}$$

$x(t)$: signal OFDM

Yves Louët, « Mise en œuvre et performances des codes de Reed-Muller pour la réduction du facteur de crête dans la modulation OFDM », Thèse présentée devant l’Université de Rennes 1. 2000.

→ Facteur de crête

$$CF_x = \sqrt{PAPR}$$

→ Calcul sur chaque symbole OFDM

$$PAPR_m = \frac{\text{Max}(|F_m(n)|^2)}{E[|F_m(n)|^2]}, n = 0, \dots, N - 1$$

- Diminution du facteur de crête

→ Linéarisation ou pré-distorsion des amplificateurs

→ **Techniques de traitement du signal**

→ **Avec distorsion du signal** : Limitation des amplitudes (Clipping, Peak windowing)

→ **En générant plusieurs versions du symbole OFDM :**

→ Codage

→ Embrouillage (Selective mapping, Partial transmit sequence)

→ **En ajoutant du signal** : réservation de sous porteuses pour réduire le facteur de crête (Peak cancelation, Tone reservation, Tone injection)

→ **En modifiant la constellation** : ACE (Active Constellation Extension)

- Références

→ **Limitation des amplitudes (Clipping, Peak windowing)**

N. Dinur, D. Wulich, « Peak to average power ratio in amplitude clipped high order OFDM », MILCOM'98

D. Wulich, L. Goldfeld, « Reduction of peak factor in orthogonal multicarrier modulation by amplitude limiting and coding », Vol.47, n°1, pp.18-21, 1999

→ **Génération de plusieurs versions du symbole OFDM**

→ **Codage**

J.A. Davis, J. Jedwab, « Peak-to-Mean Power Control in OFDM, Golay complementary sequences and Reed-Muller Codes », IEEE Trans. On Information Theory, Vol 45, n°7, nov.99

B. Pavan and Kumar.M “Comparitive Study Of PAPR Of DHT-Precoded OFDM System With DFT & WHT,” International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 3, pp.527-532, Jan-Feb 2013.

→ **Embrouillage : Selective mapping, Partial transmit sequence**

R. Bauml, R. Fisher, J. Huber, « Reducing the peak to average power of multicarrier modulation by selective mapping », Electronics letters, Vol. 32, n° 22, pp. 2056-2057, 1996

L.J. Cimini, N. Sollenberger, « Peak-to-Average Power Ratio reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences », IEEE Comm. Letters, Vol 4, n°3, pp. 86-88, march 2000

S. H. Muller, J. B. Huber, « A comparison of peak power reduction schemes for OFDM », GLOBECOM'97

- Références

→ Ajout de signal

H. Rohling, « Reducing the peak to average power ratio in OFDM radio transmission systems », IEEE conf proc. of VTC, pp, 2474-2478, 1998

J.Tellado, J.M. Cioffi,« Peak Power Reduction for multicarrier transmission », GLOBECOM'99

J.Tellado, J.M. Cioffi,« Peak Power Reduction for multicarrier transmission », GLOBECOM'98

→ Modification de la constellation

Y. Liu and Y. Wang, "Novel ACE Scheme for PAPR Reduction of High Broadband OFDM Systems," 2019 *IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, Xi'an, China, 2019, pp. 1-5.

ETSI TS 302 755 (V1.4.1): "Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)

→ Review

D. Declercq, G. Giannakis, « Peak to average power ratio reduction for multicarrier transmissions : a review », Available online:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.8.1489&rep=rep1&type=pdf>

- Exemple de réduction : le selective mapping

