

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Nathalie Thomas

IRIT/ENSEEIHT

Nathalie.Thomas@enseeiht.fr

2022 - 2023

Plan du cours

- La modulation OFDM

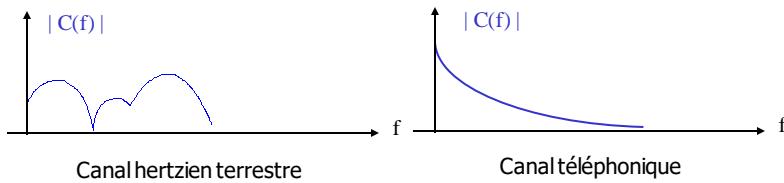
- Contexte
- Génération et réception d'un signal OFDM
- Principaux problèmes : synchronisation, facteur de crête élevé

- Des exemples d'application dans :

- Les réseaux locaux sans fil ([IEEE802.11a, g, n, ac, ah](#))
- 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 : Contexte

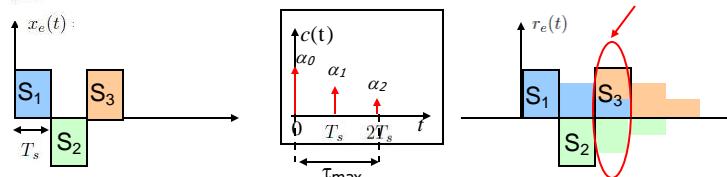
- Canaux de transmissions sélectifs en fréquences



- Interférence entre symboles

Exemple :

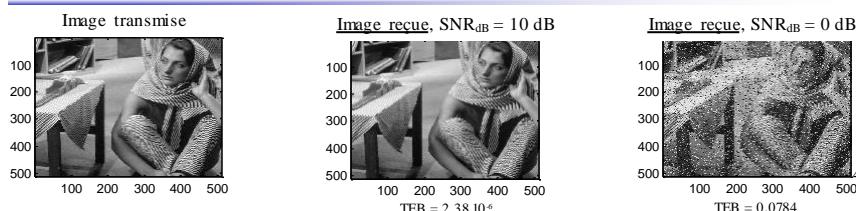
$$x_e(t) = \sum d_k h(t - kT_s), \quad d_k \in \{\pm 1\}, \quad h(t) = \Pi_{T_s}(t - kT_s)$$



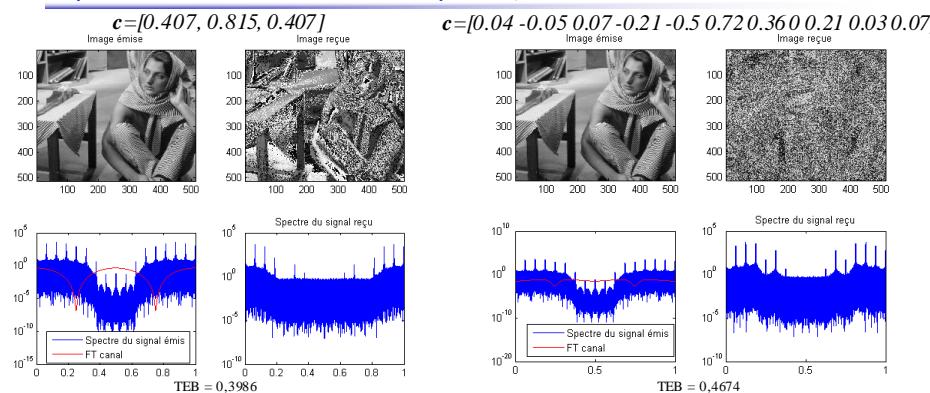
→ Paramètre : Étalement maximal des retards

OFDM : Contexte

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



- Impact d'un canal sélectif en fréquence, SNR = 10 dB



Solutions couches physiques

- Canal « idéal » (AWGN) à bande limité

- Filtres de mise en forme $h(t)$ et de réception $h_r(t)$ respectant le critère de Nyquist
- Filtrage adapté en réception
- Limitation du débit pour une transmission sans ISI : $B_{H(f)H_r(f)} < B_{\text{canal}}$

- Canal sélectif en fréquences

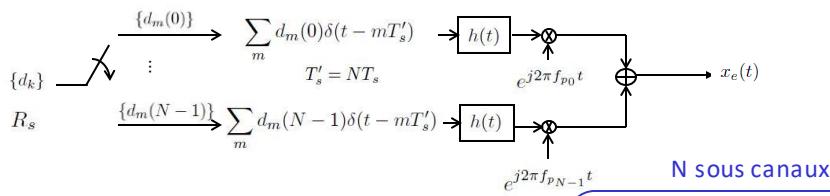
- Egalisation
- Techniques multi porteuses

OFDM : forme particulière de multi porteuses

Techniques multi porteuses

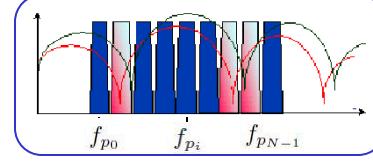
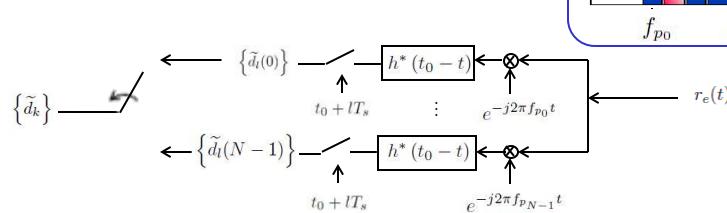
- Principe : transmissions simultanées sur N porteuses

→ Emission :



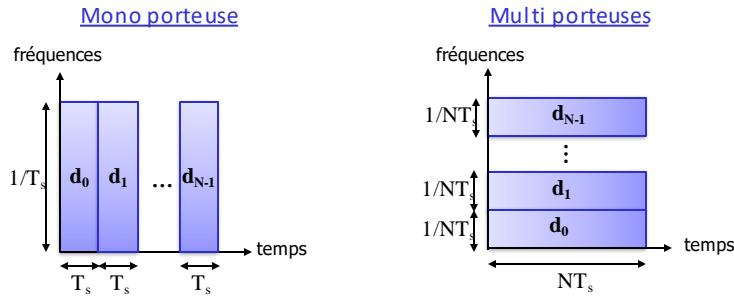
N sous canaux

→ Réception :



Techniques multi porteuses

- Transmissions simultanées sur N porteuses

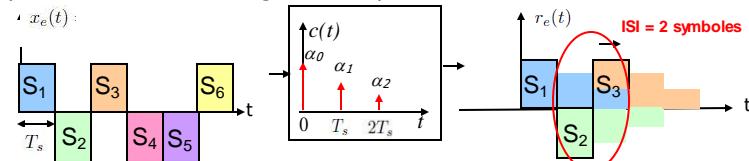


→ N sous canaux de largeurs réduites
=> Réduction de la sélectivité sur chaque sous canal

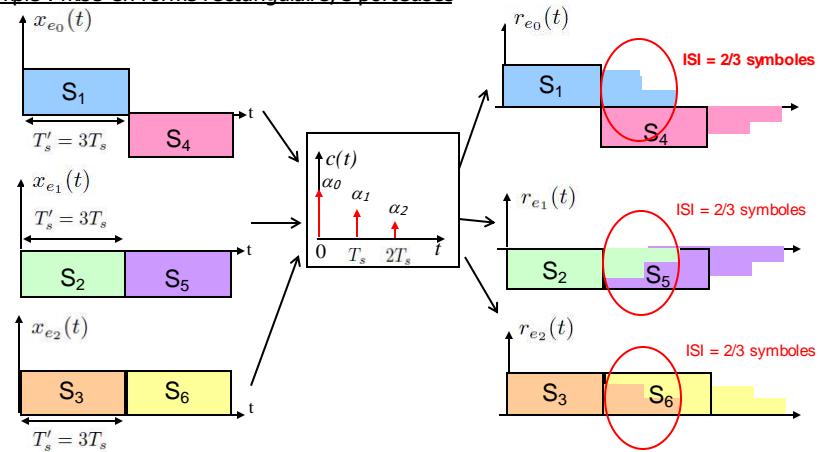
→ N sous porteuses à débits réduits
=> Réduction de l'ISI sur chaque porteuse : $ISI' = \frac{ISI}{N}$

Techniques multi porteuses

Exemple : mise en forme rectangulaire, une porteuse

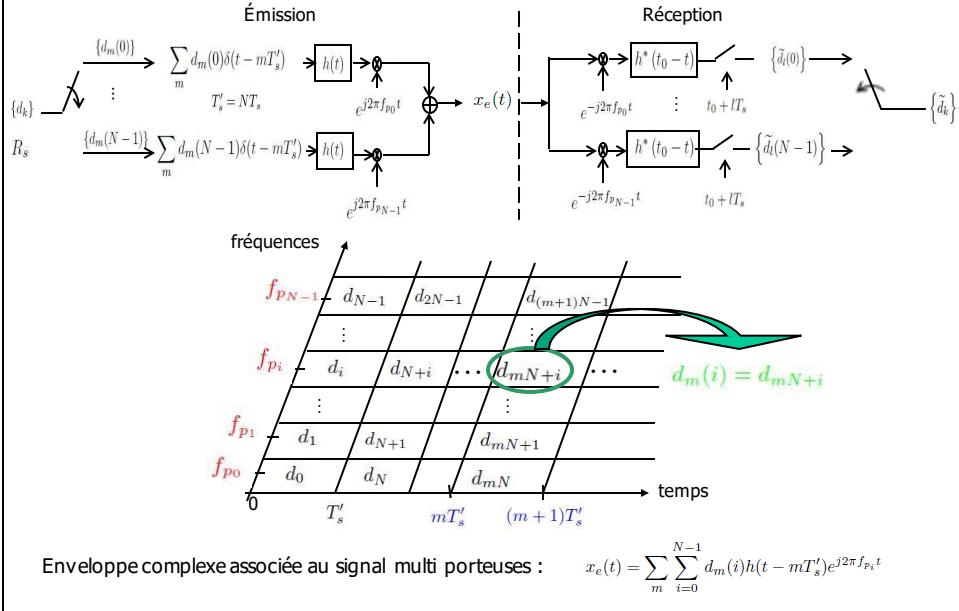


Exemple : mise en forme rectangulaire, 3 porteuses



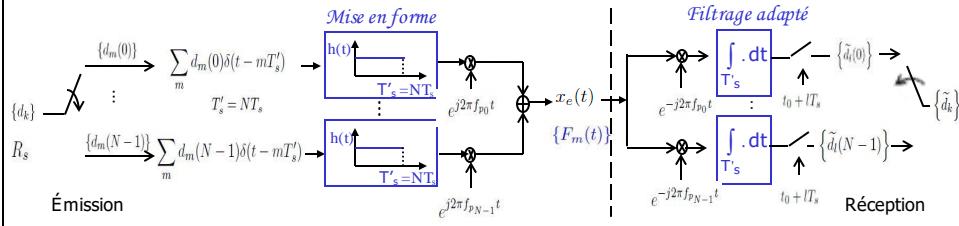
Techniques multi porteuses

- Transmissions simultanées sur N porteuses (sans canal)



OFDM : génération du signal

- Forme particulière de multi porteuse : mise en forme rectangulaire



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

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

OFDM : génération du signal

- Orthogonalité des porteuses

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

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

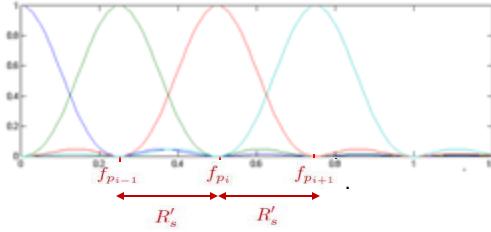
Annulation de l'interférence entre porteuses :

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

Condition d'orthogonalité des porteuses



Utilisation optimale de la bande allouée :



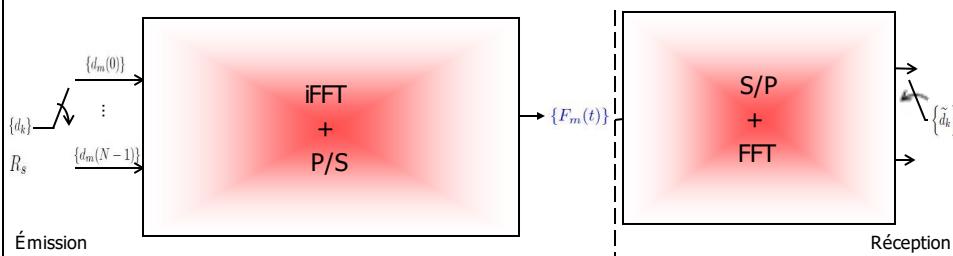
OFDM : génération du signal

- Implantation numérique pariFFT/FFT

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

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

Simplicité d'implantation



OFDM : historique

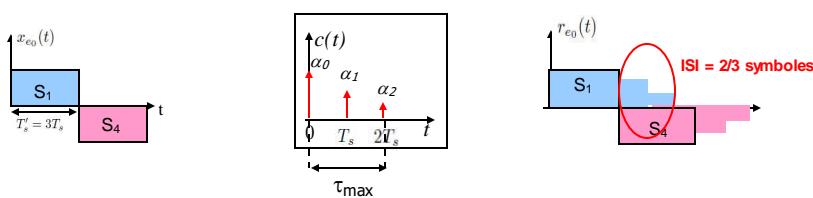
- Historique

- 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
- Années 80 : projet européen Eureka pour le DAB avec utilisation de la FFT
- Début 90 : normalisation du DAB
- 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

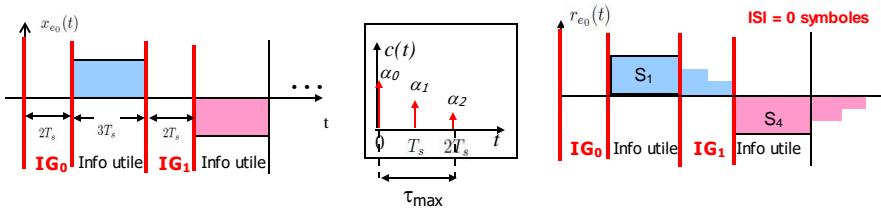
- Effet du canal de transmission sur chaque porteuse

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)

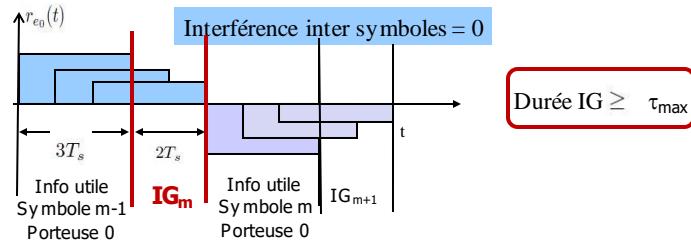
⇨ Mise en place d'un intervalle de garde (IG) :



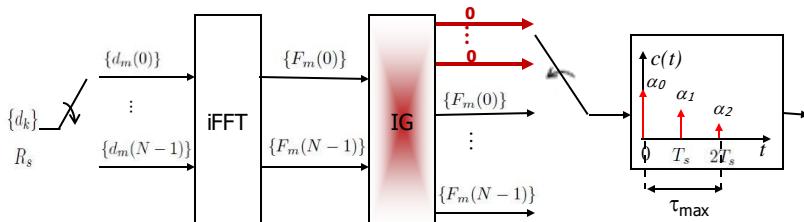
OFDM : génération du signal

▪ Intervalle de garde (IG)

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



→ Introduit à l'émission derrière la iFFT :



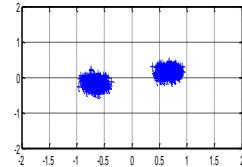
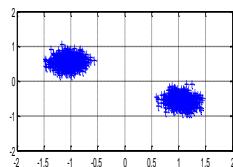
OFDM : génération du signal

- Effet du canal de transmission, ajout d'un intervalle de garde

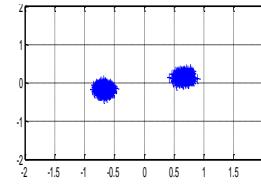
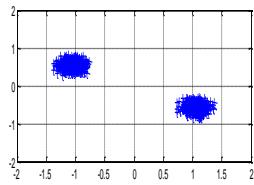
Exemple : Canal sans bruit, BPSK émise sur 16 porteuses

$$c(t) = \delta(t) + 0.5 \delta(t-T_s) + 0.2 \delta(t-2T_s)$$

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



??

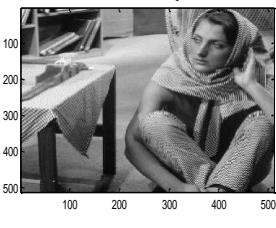
OFDM : génération du signal

- Effet du canal de transmission, ajout d'un intervalle de garde

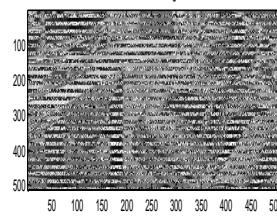
$$c(t) = 0,407 \delta(t) + 0,815 \delta(t-T_s) + 0,407 \delta(t-2T_s)$$

Image émise

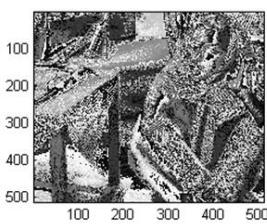
Transmitted image



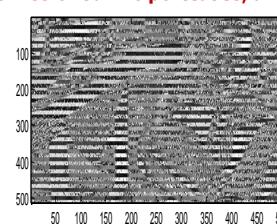
**Image reçue,
Transmission sur 16 porteuses, sans IG**



**Image reçue
transmission monoporteuse**



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



??

OFDM : génération du signal

- Effet du canal de transmission, ajout d'un intervalle de garde

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

Image émise

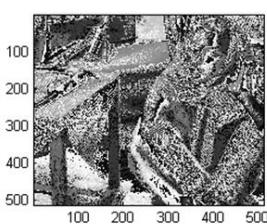
Transmitted image



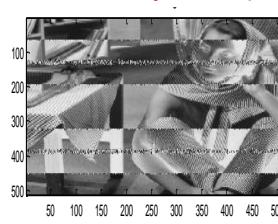
**Image reçue,
Transmission sur 2048 porteuses, sans IG**



**Image reçue
transmission monoporteuse**



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



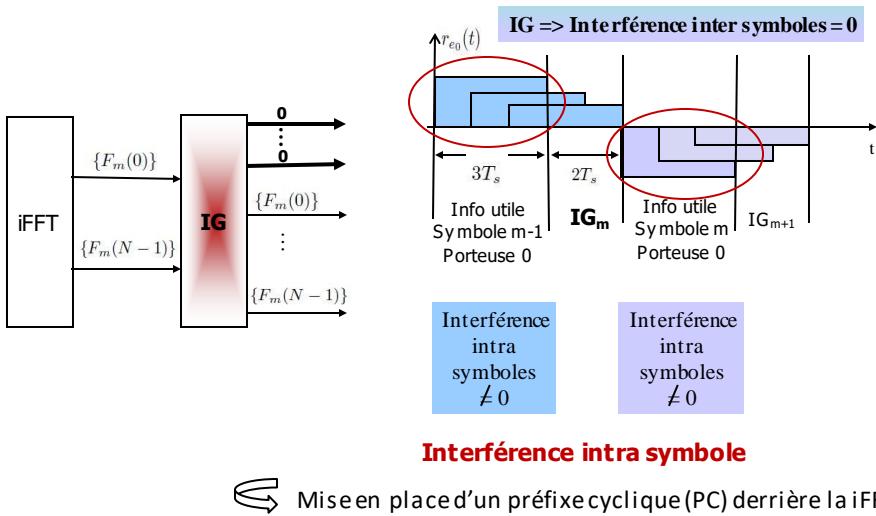
??

Remarque : pas d'entrelacement

OFDM : génération du signal

- Effet du canal de transmission sur chaque porteuse

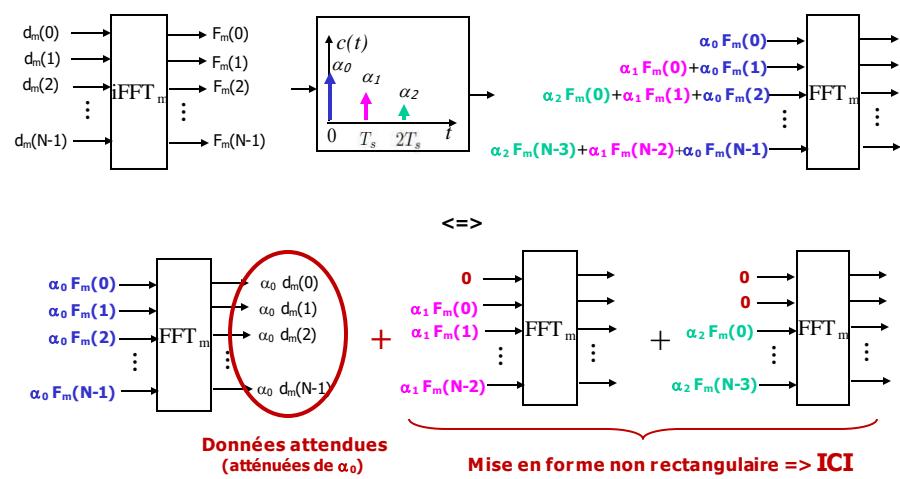
Exemple : mise en forme rectangulaire, $c(t) = \alpha_0\delta(t) + \alpha_1\delta(t-Ts) + \alpha_2\delta(t-2Ts)$, 3 porteuses, visualisation porteuse 0



OFDM : génération du signal

- Effet du canal de transmission sur l'ensemble des porteuses

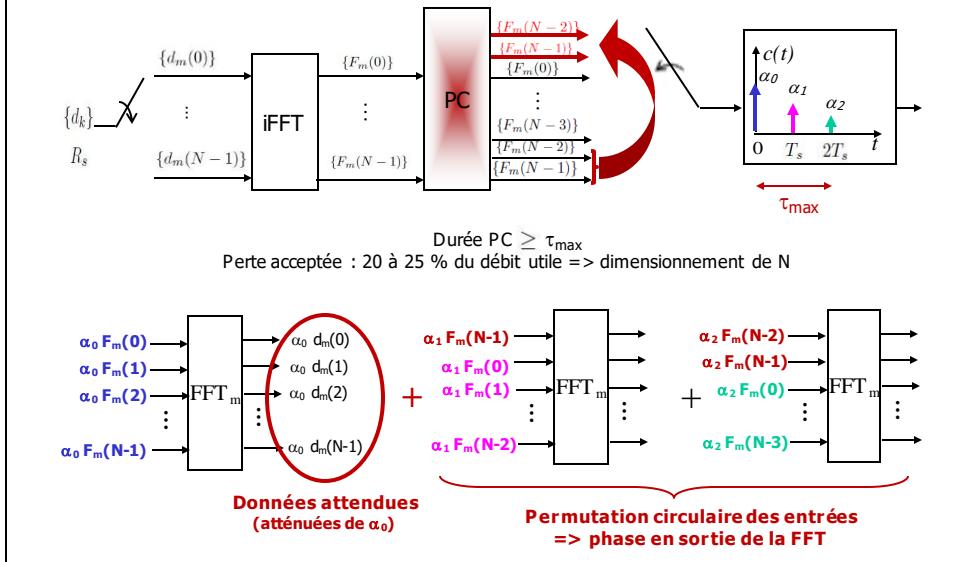
Exemple : mise en forme rectangulaire, $c(t) = \alpha_0\delta(t) + \alpha_1\delta(t-T_s) + \alpha_2\delta(t-2T_s)$



OFDM : génération du signal

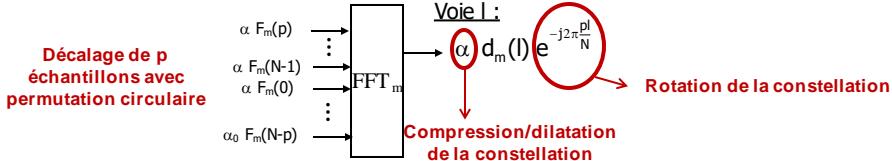
- Préfixe cyclique

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



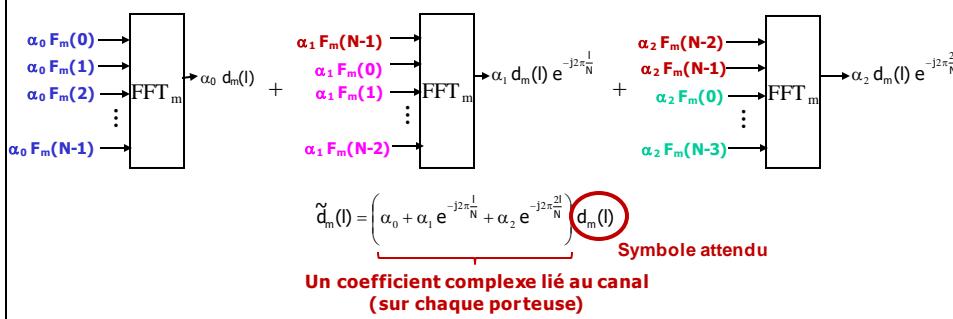
OFDM : génération du signal

- Préfixe cyclique



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

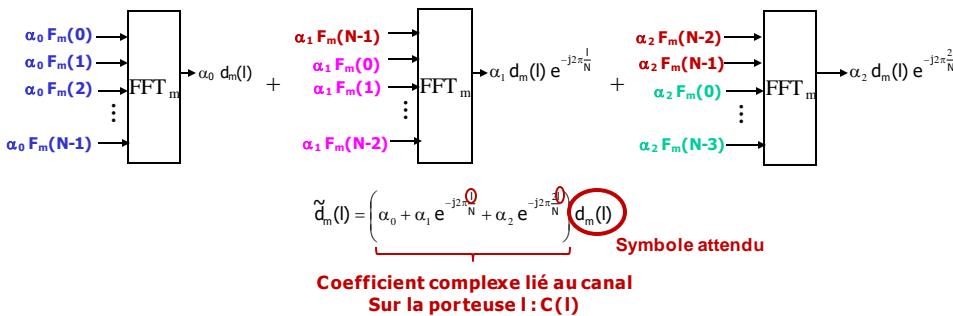
Exemple : mise en forme rectangulaire, $c(t) = \alpha_0 \delta(t) + \alpha_1 \delta(t-T_s) + \alpha_2 \delta(t-2T_s)$, sortie voie l



OFDM : génération du signal

- Préfixe cyclique

Exemple : mise en forme rectangulaire, $c(t) = \alpha_0\delta(t) + \alpha_1\delta(t-T_s) + \alpha_2\delta(t-2T_s)$, **sorte voie 1**



Remarque :

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

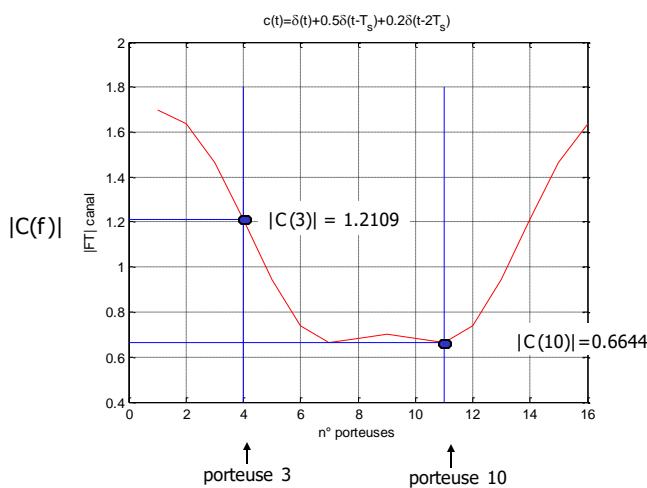
$$c(n) \otimes F_m(n) \xrightarrow{\text{TDF}} C(l) \times d_m(l)$$

OFDM : génération du signal

- Intervalle de garde, Préfixe cyclique : exemple

→ Canal sans bruit, BPSK émise sur 16 porteuses

$$c(t) = \delta(t) + 0.5\delta(t-T_s) + 0.2\delta(t-2T_s)$$

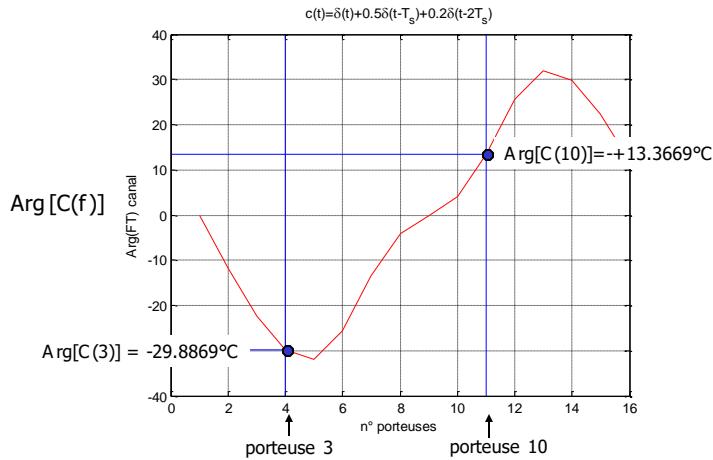


OFDM : génération du signal

- Intervalle de garde, Préfixe cyclique : exemple

→ Canals sans bruit, BPSK émise sur 16 porteuses

$$c(t) = \delta(t) + 0.5 \delta(t-T_s) + 0.2 \delta(t-2T_s)$$



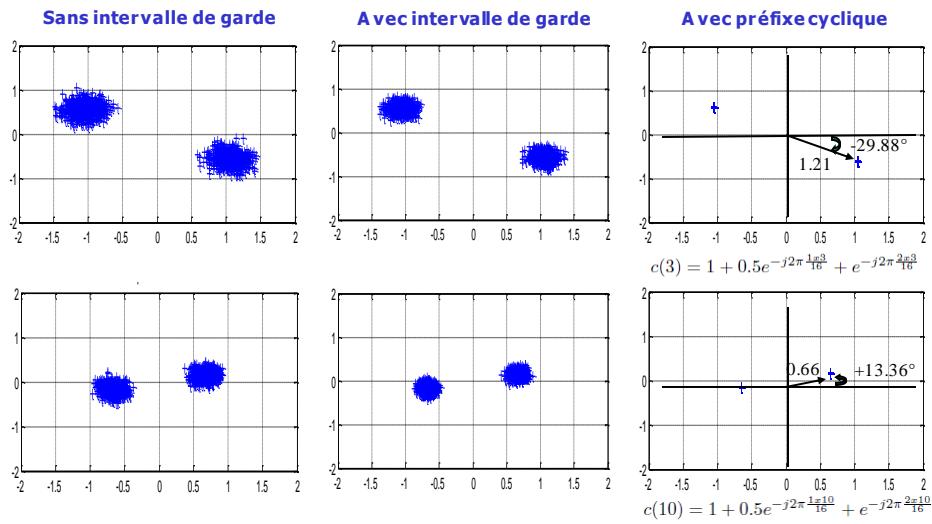
OFDM : génération du signal

- Intervalle de garde, Préfixe cyclique : exemple

→ Canals sans bruit, BPSK émise sur 16 porteuses

$$c(t) = \delta(t) + 0.5 \delta(t-T_s) + 0.2 \delta(t-2T_s)$$

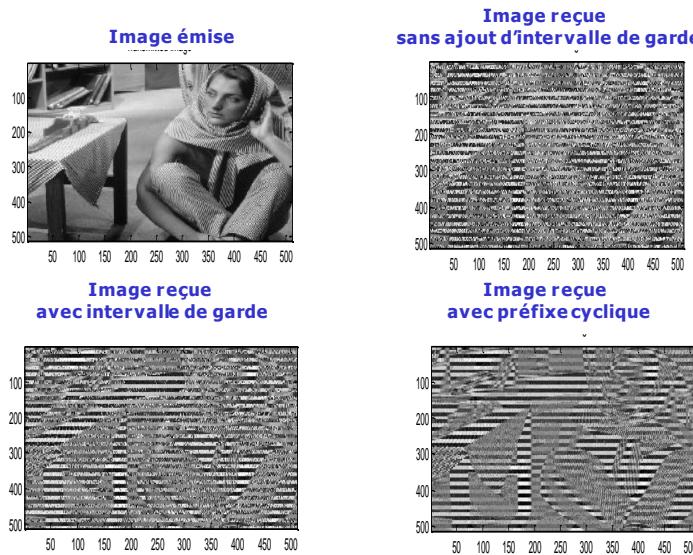
Constellations reçues porteuses n° 3 et 10



OFDM : génération du signal

- Intervalle de garde, Préfixe cyclique : exemple

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



??

OFDM : génération du signal

- Intervalle de garde, Préfixe cyclique : exemple

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



Remarque : pas d'entrelacement

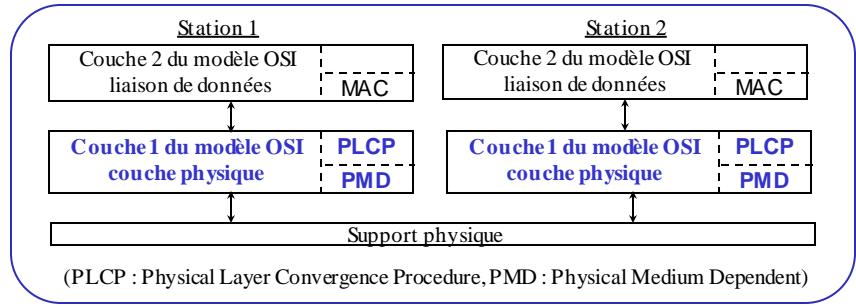
OFDM : génération du signal

- 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 => tolérance 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

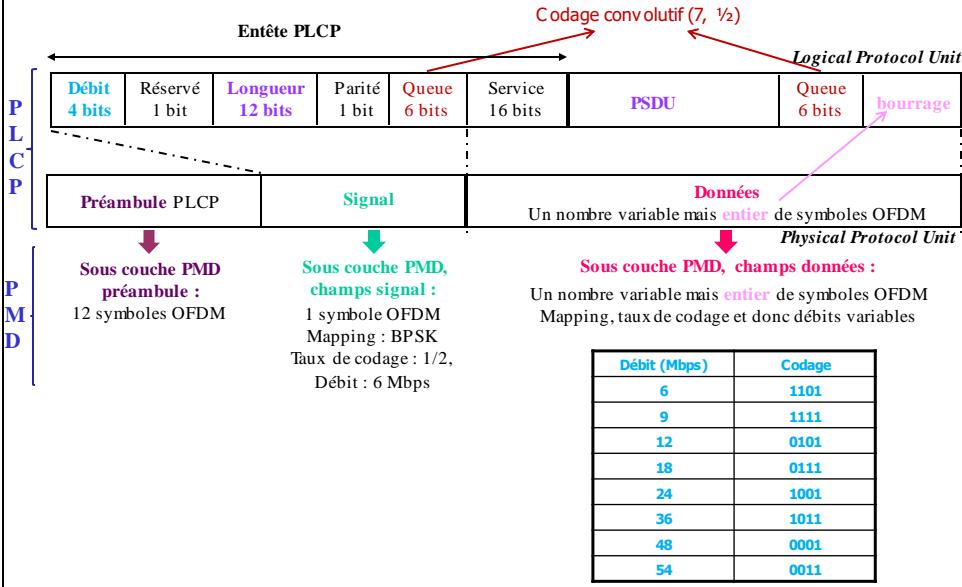
- Exemple 1 d'application de l'OFDM: le WiFi « haut débit »

Standard	Normalisation	Bandé	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 Mbit/s	35/100 m
IEEE 802.11g	2003	2.4 GHz	54 Mbit/s	25/75 m
IEEE 802.11n	2009	2.4/5 GHz	540 Mbit/s	50/125 m
IEEE 802.11ac	2014	5 GHz	1300 Mbit/s	20/50 m
IEEE 802.11ax	2019 ?	2.4/5 GHz	10 Gbit/s	



OFDM : génération du signal

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



OFDM : génération du signal

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

Bandes ISM 2.400-2.4835 GHz : 3 canaux sans recouvrement

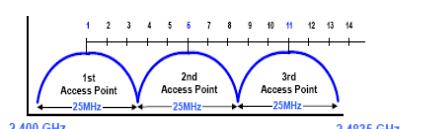
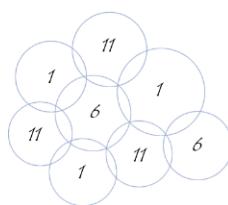
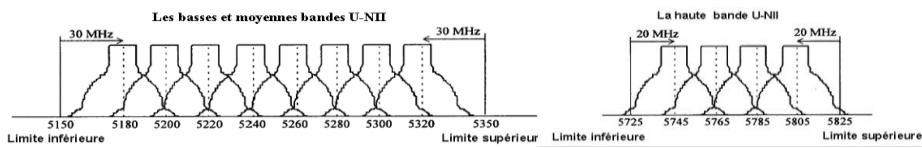


Figure 1-6. Typically, channels 1, 6, and 11 are used as the three non-overlapping channels in the 2.4 GHz band

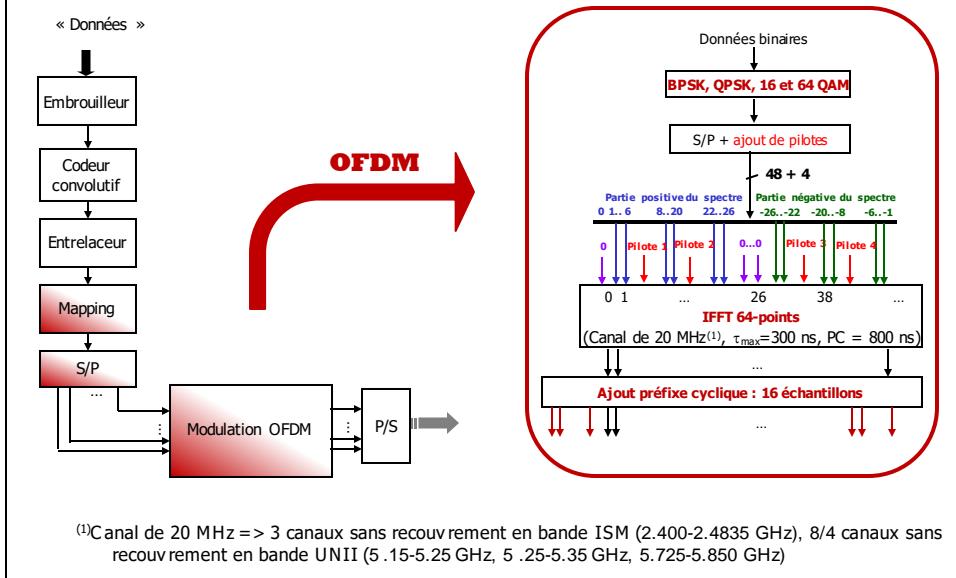


Bandes UNII 5.15-5.25 GHz, 5.25-5.35 GHz, 5.725-5.850 GHz : 8/4 canaux sans recouvrement



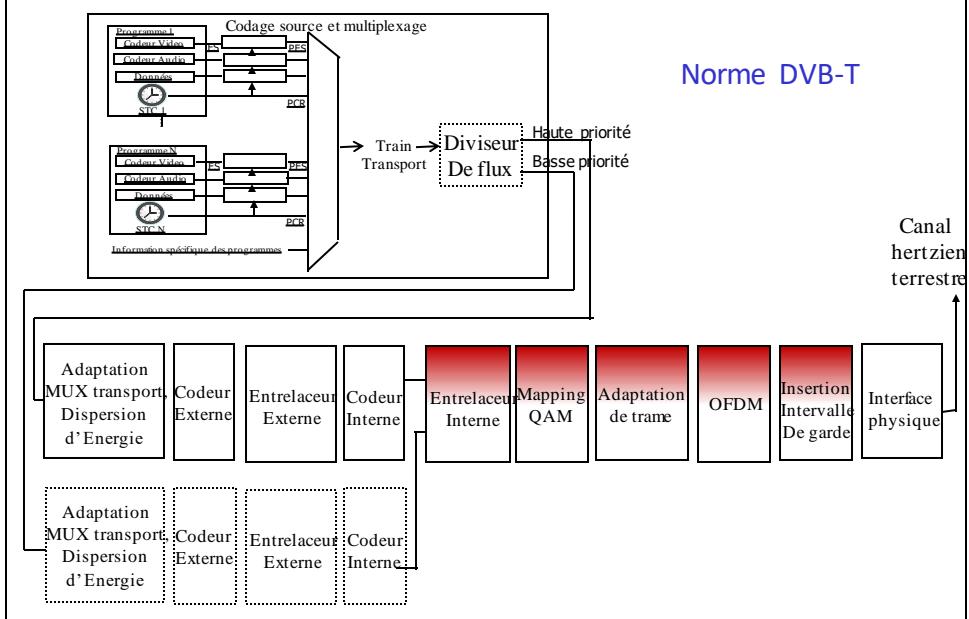
OFDM : génération du signal

- Standards IEEE802.11a, g : sous couche PMD champs « données »



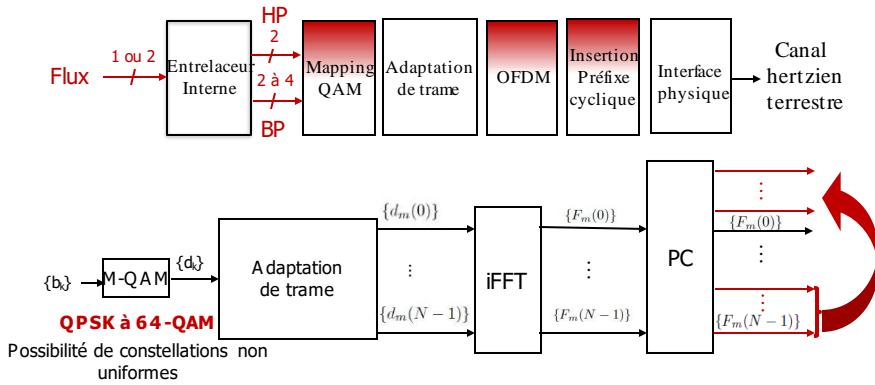
OFDM : génération du signal

- Exemple 2 d’application de l’OFDM : la télévision numérique terrestre (TNT)



OFDM : génération du signal

- Partie OFDM du DVB-T



Deux modes OFDM :

- Mode **2K** = 2048 porteuses dont 1705 utiles ($T_s' = 224\mu s$)
- Mode **8K** (réseau SFN)= 8192 porteuses dont 6817 utiles ($T_s' = 896\mu s$)

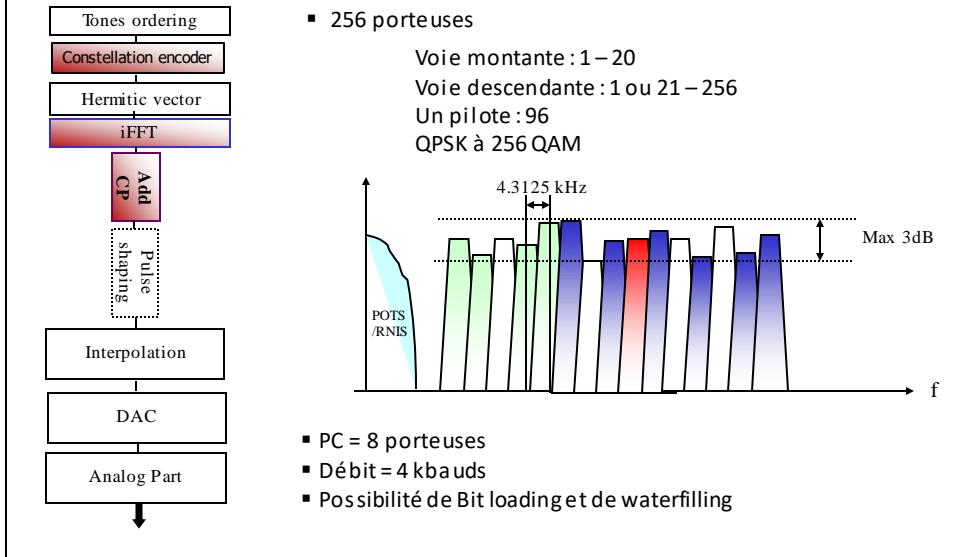
Quatre longueurs de préfixe cyclique possibles :

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

P E R F O R M A N C E S	Data rate (Mbps)	Modulation	Coding Rate	Coded bits per subcarrier	Coded bit per OFDM symbol	Data bits per OFDM symbol			
	6	BPSK	$\frac{1}{2}$	1	48	24			
	9	BPSK	$\frac{3}{4}$	1	48	36			
	12	QPSK	$\frac{1}{2}$	2	96	48			
	18	QPSK	$\frac{3}{4}$	2	96	72			
	24	16-QAM	$\frac{1}{2}$	4	192	96			
	36	16-QAM	$\frac{3}{4}$	4	192	144			
	48	64-QAM	$\frac{2}{3}$	6	288	192			
	54	64-QAM	$\frac{3}{4}$	6	288	216			
a,g		C/N for BER=2*10 ⁻⁴ after Viterbi i.e. QEF after RS			Bit rate (Mbit/s)				
D V B -	Modulation	Code rate	Gaussian channel	Rice channl	Rayleigh channl	$\Delta/T_0=1/4$	$\Delta/T_0=1/8$	$\Delta/T_0=1/16$	$\Delta/T_0=1/32$
	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

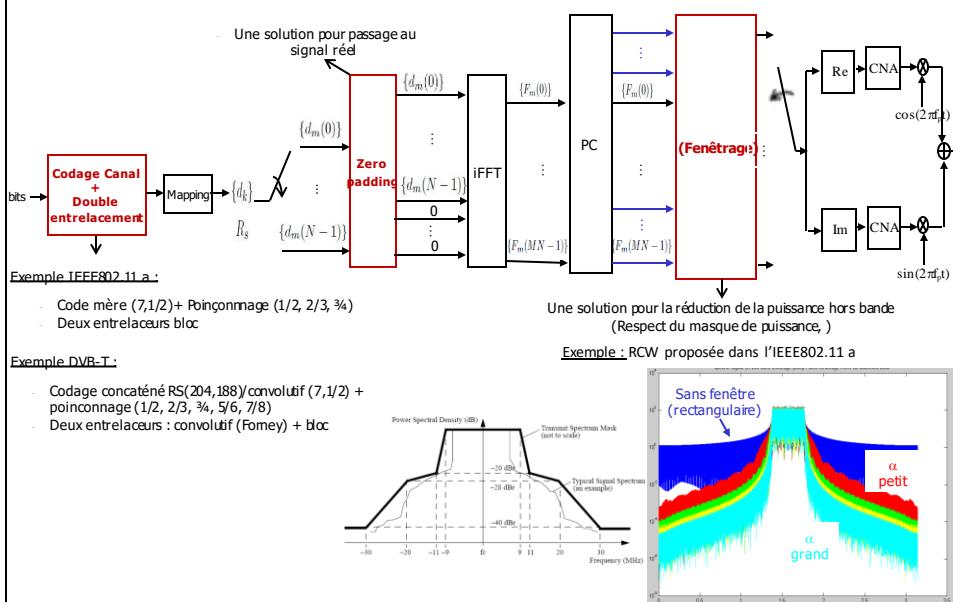
OFDM : génération du signal

- Exemple 3 d'application de l'OFDM (DMT) : les modems xDSL
- Couche physique - Recommandation G992.1 (G.DMT) de l'UIT**



OFDM : génération du signal

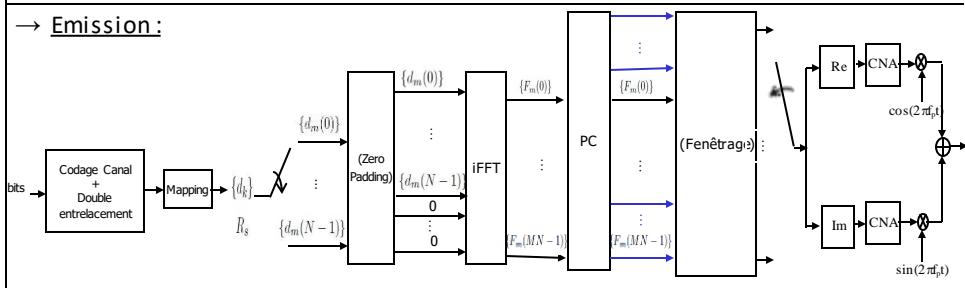
- Chaîne d'émission complète « C » OFDM



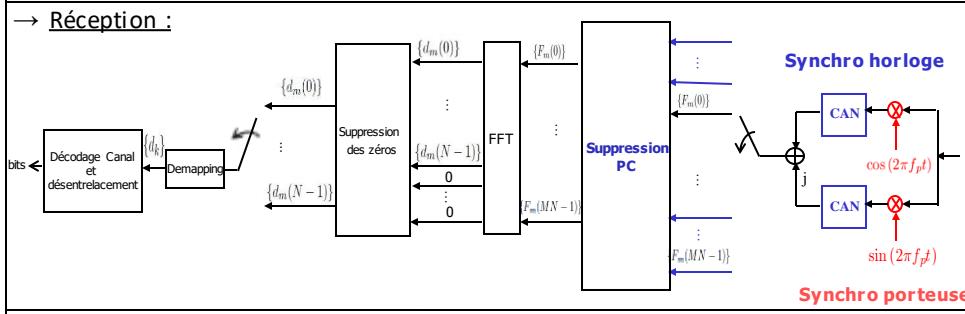
OFDM : réception du signal

- Problèmes de synchronisation

→ Emission :



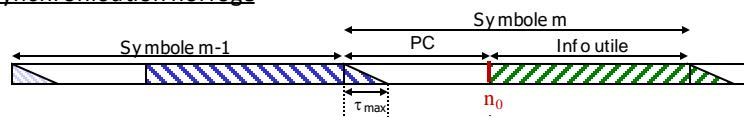
→ Réception :



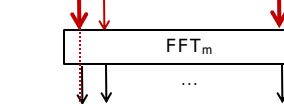
OFDM : réception du signal

- Problèmes de synchronisation

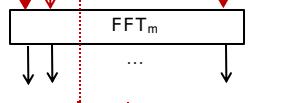
→ Synchronisation horloge



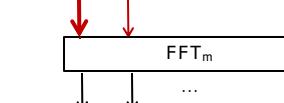
→ Synchronisation correcte :



→ Erreur de phase :



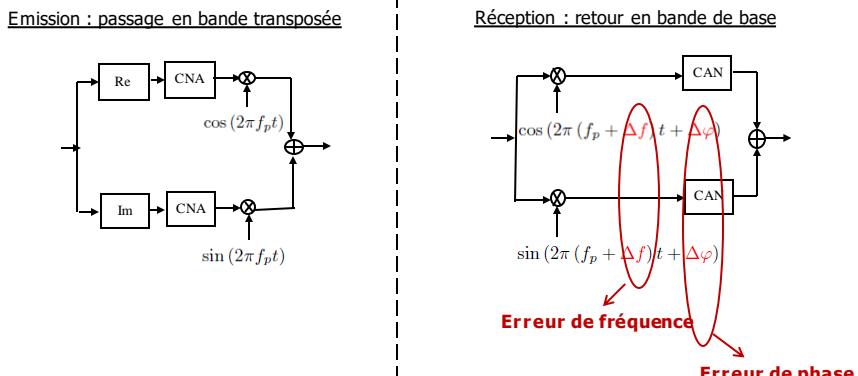
→ Erreur de fréquence :



OFDM : réception du signal

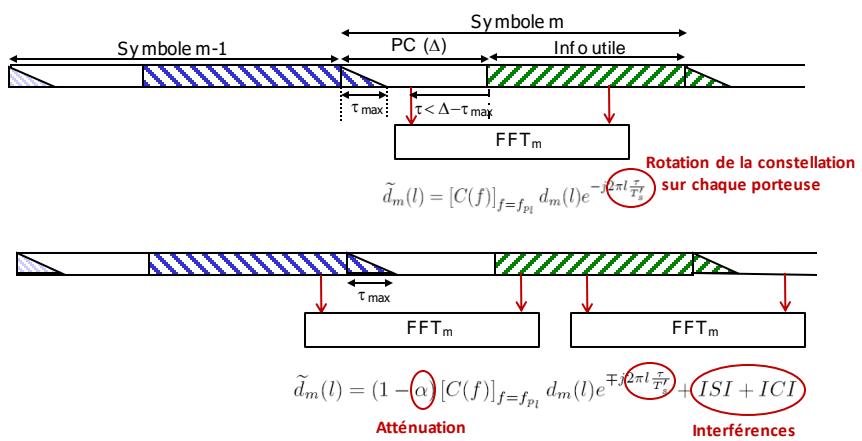
- Problèmes de synchronisation

→ Synchronisation porteuse



OFDM : synchronisation

- Synchronisation de phase horloge : impact d'une erreur



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

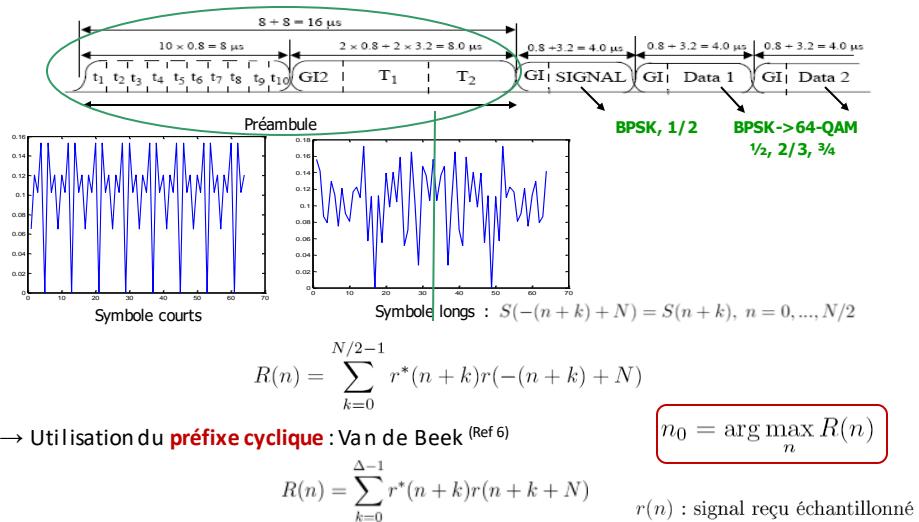
$$TEB_{BPSK} = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0} (1-\alpha)^2 \cos^2 \left(2\pi \frac{l\tau}{T_s'} \right) \frac{1}{1 + SNR_{ICI+ISI}}} \right)$$

OFDM : synchronisation

- Synchronisation de phase horloge par mesure de corrélation

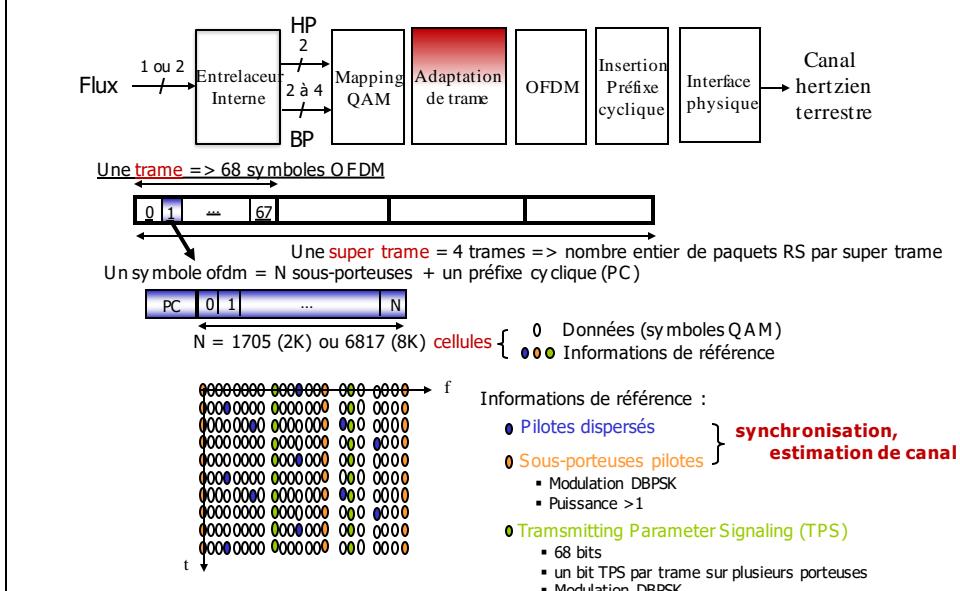
→ Estimateurs à base de **symboles pilotes** : Moose^(Ref 4), Schmidl & Cox^(Ref 5)

Exemple sur le IEEE802.11a : génération de redondance dans un préambule



OFDM : synchronisation

- Exemple du DVB-T: porteuses pilotes



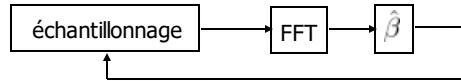
OFDM : synchronisation

- Synchronisation de fréquence horloge

→ Conséquence d'une erreur de fréquence horloge β :

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

→ Estimation :



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

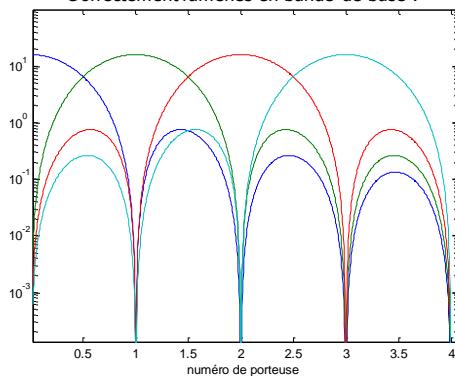
$$2\pi Ml\beta_l = \text{Arg} \left(\frac{\tilde{d}_{m+M}(l)}{d_{m+M}(l)} \right) - \text{Arg} \left(\frac{\tilde{d}_m(l)}{d_m(l)} \right) = \Delta\Phi_l$$

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

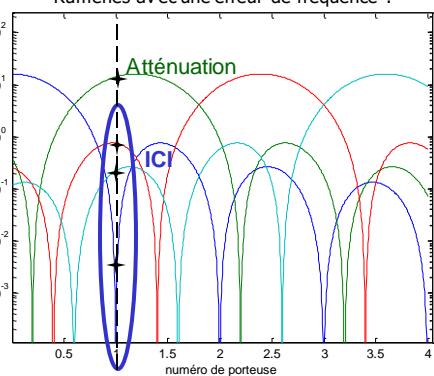
OFDM : synchronisation

- Synchronisation de fréquence porteuse : impact d'une erreur

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



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



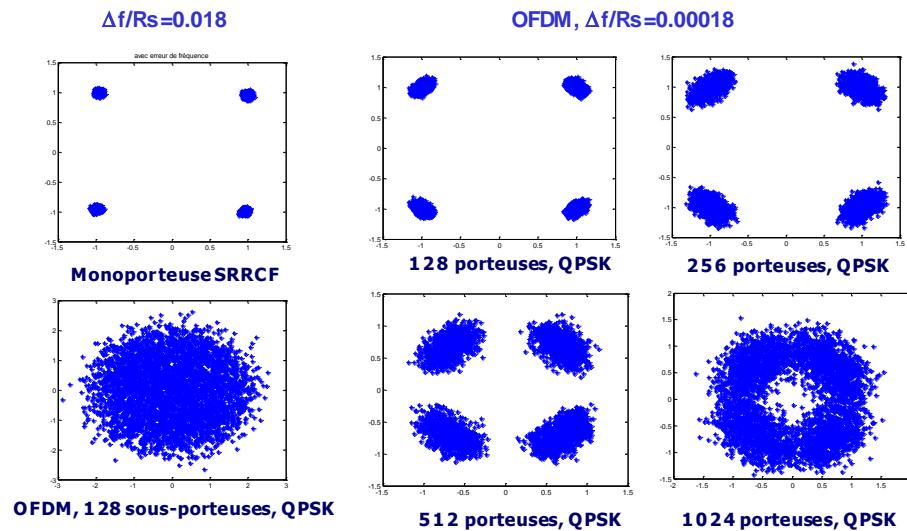
$$\tilde{d}_m(l) = d_m(l) T'_s e^{j2\pi \Delta f(m+\frac{1}{2})T'_s} \text{sinc}(\pi \Delta f T'_s) + \text{ISI} + \text{ICI}$$

→ Dégradation sur le TEB (Ref 3):

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

OFDM : synchronisation

- Synchronisation de fréquence porteuse : impact d'une erreur



OFDM : synchronisation

- Synchronisation de fréquence porteuse par mesure de rotation

→ Étape préalable : synchronisation de phase horloge $n_0 = \arg \max_n R(n)$

→ Mesure de la rotation entre échantillons du symbole pilote

$$\Rightarrow \widehat{\Delta f} = \frac{1}{2\pi N} \operatorname{Arg}[R(n_0)]$$

→ Attention ambiguïté à lever sur la mesure

→ Correction devant la FFT

- Synchronisation de phase porteuse

→ Rotation de la constellation sur chaque porteuse

→ Estimation et correction derrière la FFT (avec estimation canal)

- Jitter de phase

→ Dégradation sur le TEB

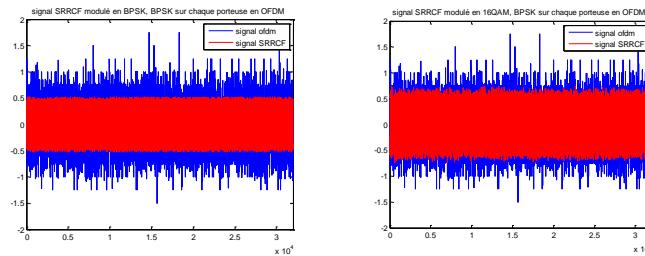
$$D_{dB} \approx \frac{1}{60} \frac{10}{\ln(10)} \left[4\pi \frac{\delta}{R_s} \right] \frac{E_s}{N_0} \quad (\textbf{Monoporteuse}) \quad D_{dB} \approx \frac{11}{60} \frac{10}{\ln(10)} \left[4\pi N \frac{\delta}{R_s} \right] \frac{E_s}{N_0} \quad (\textbf{OFDM})$$

δ : paramètre définissant la pureté de l'oscillateur

OFDM : facteur de crête

- Problème posé, mesure (PAPR : Peak to Average Power Ratio)

→ Vers une distribution Gaussienne pour les échantillons des symboles OFDM



→ Fluctuations d'enveloppe => Problème en présence de non linéarités

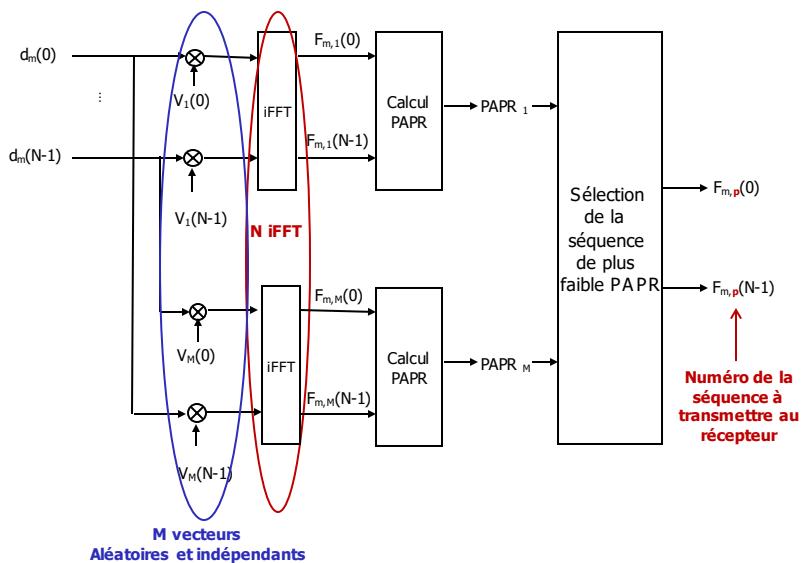
→ Mesure pour correction sur chaque symbole :

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

→ Correction : linéarisation ou prédistorsion des amplificateurs ; techniques de traitement de signal⁽⁷⁻¹¹⁾ (écrétage, codage/embrouillage, ajout de signal : Tone reservation, modification de la constellation : ACE)

OFDM : réduction du facteur de crête

- Exemple d'embrouillage : Selected Mapping



Couches physiques des standards IEEE802.11

Standard	Bandé 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 ½, 2/3, ¾	1	OFDM	35	120
802.11g (2003)	2,4								DSSS OFDM	38
802.11n (2009)	2,4 / 5	20	400 / 800	6,5 à 72,2	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	Convolutif ½, 2/3, ¾, 5/6	4	OFDM	70 (2,4 GHz)	250
		40		15 à 150					35 (5 GHz)	250
802.11ac (2014) avec Beamforming	5	20	400 / 800	6,5 à 96	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	LDPC (option)	8	OFDM	35	
		40		13,5 à 200						
		80		29,2 à 433						
		160 (option)		58,5 à 866						
					256QAM (option)					

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%).

La famille xDSL : modulation DMT

- ADSL (G.DMT : Recommandation ITU G992.1, 1999)

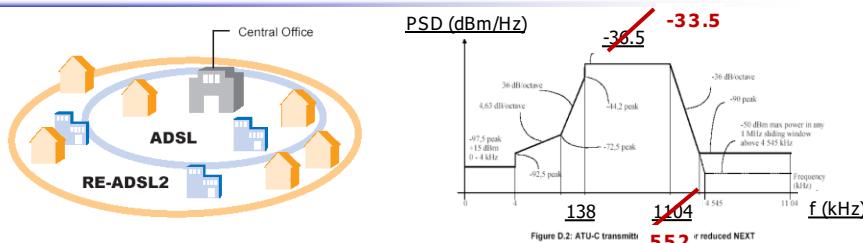
Solution asymétrique (VoD)
 Sélectivité en fréquences => DMT
 Flux MPEG2 => codage canal
 16 à 640 kbps

Distance	Débits
5.5 km	1.544 Mbps
4.9 km	2.048 Mbps
3.7 km	6.312 Mbps
2.7 km	8.448 Mbps

- Version modifiée : ADSL Lite (G.Lite : Rec. ITU G992.2, 1999)

Version « allégée » : splitterless, 128 porteuses
 Recouvrement + annulateur d'écho
 512 kbps montant, 1.5 Mbps descendant

- Evolutions : ReADSL (2003, G993.3 Annex L)

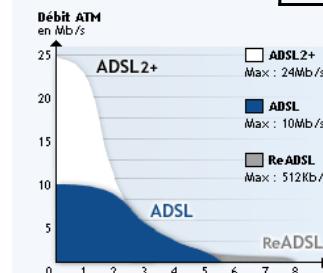


La famille xDSL : modulation DMT

- Evolutions : ADSL2 (G993.3, 2002) puis 2+ (G993.5, 2003)

- Doublement de la bande
- Portée réduite
- Optionnel : utilisation bande POTS

Distance	Débits
1400 m	16 Mbps
2000 m	10 Mbps
3000 m	4 Mbps



- VDSL

Solution symétrique ou asymétrique
 Contexte FTTN ou FTTCab
 1,544 à 2,3 Mbps /en mode FDM
 DMT à 256.2^n sous porteuses, n=2, 3 ou 4

Distance	Débits
300 m	51.84 Mbps
1000 m	25.92 Mbps
1500 m	12.96 Mbps

Quelques références

• Générales sur l'OFDM

- (1) « Data transmission by frequency division multiplexing using discrete Fourier transform », S. B. Weinstein, P. M. Ebert, IEEE Trans. On Comm.Tech. , Vol COM-19, n°5, oct. 71
- (2) « OFDM: Concepts for Future Communication Systems (Signals and Communication Technology) », H. Rohling, Signals and communication technology, Springer, avril 2013.

• Synchronisation OFDM

- (3) « BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise », T.Pollet, P.Spruyt, M. Moeneclaey, IEEE Trans. On Comm., Vol 43, n°2/3/4, 95
- (4) « A technique for OFDM frequency offset correction », P.H.Moose, IEEE Trans. On Comm., Vol 42, n°10, oct. 94
- (5) « Robust frequency and timing synchronization for OFDM », T.M.Schmidl and D.C.Cox, IEEE Trans. On Comm., Vol 45, n°12, dec.97
- (6) « ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems », J.H.Van de Beek, M.Sandell, P.O.Börjesson, IEEE Trans. On Signal Proc., Vol 45, n°7, july 97

• Facteur de crête OFDM

- (7) « A comparison of peak power reduction schemes for OFDM », S. H. Müller, J.B. Huber, Proc. GLOBECOM'97
- (8) « Peak-to-Average Power Ratio reduction of an OFDM signal using partial transmit sequence», L.J. Cimini, IEEE Comm. Letters, Vol 4, n°3, march 2000
- (9) « Peak-to-Mean Power Control in OFDM, Golay complementary sequences and Reed-Muller Codes», J.A. Davis, J. Jedwab, IEEE Trans. On Information Theory, Vol 45, n°7, nov.99
- (10) « Peak Power Reduction for multicarrier transmission », J.Tellado, J.M. Cioffi, Proc. GLOBECOM'99
- (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)

Quelques 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. Vassilis, 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)

• Modems xDSL

- « Transmission and Multiplexing (TM) ;Access transmission systems on metallic access cables ; Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) -coexistence of ADSL and ISDN-BA on the same pair », ANSI T1.413 - 1998 modified, norme ETSI TS 101 388 v1.1.1 (1998-11).
- « Transmission and Multiplexing (TM) ;Access transmission systems on metallic access cables ; Very High Speed Digital Subscriber Line (VDSL) – Part 2 :transceiver specifications, norme ETSI TS 101 270-2 v1.1.1 (2001-02).