

Systèmes multi-porteuses à accès multiple

Philippe Ciblat

École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France

Plan

- Rappel sur les systèmes multi-utilisateurs
- Rappel sur les systèmes multi-porteuses
- Systèmes hybrides
 - ↪ OFDMA, FH-OFDMA
 - ↪ MC-CDMA
 - ↪ SC-FDMA
 - ★ Canal connu à l'émetteur
 - ★ Canal inconnu à l'émetteur

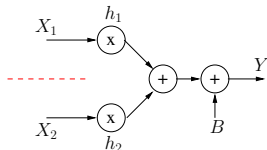
Systèmes multi-utilisateurs

Contexte mono-porteuse, canal plat et gaussien (*flat fading*)

- Canal à accès multiple/*Multi Access Channel* (lien montant)

$$Y = h_1 X_1 + h_2 X_2 + B$$

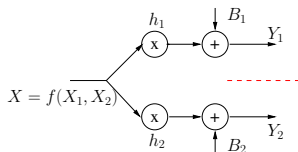
↪ Décodage de X_1 et de X_2
à partir de Y



- Canal à diffusion/*Broadcast channel* (lien descendant)

$$\begin{cases} Y_1 = h_1 X + B_1 \\ Y_2 = h_2 X + B_2 \end{cases}$$

↪ Décodage de X_1 (resp. X_2)
à partir de Y_1 (resp. Y_2)



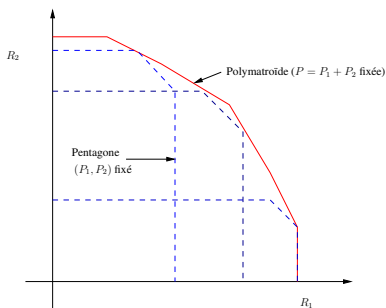
Question

Trouver les débits maximums possibles

Théorie de l'information

- Notion de région de capacité (MAC [Cover 1974, Tse 1998], BC [Shamai 2004])

$$\begin{aligned}
 R_1 &\leq \log \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_1}{\sigma_B^2} \right) \\
 R_2 &\leq \log \left(1 + \frac{|h_2|^2 P_2}{\sigma_B^2} \right) \\
 R_1 + R_2 &\leq \log \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_1 + |h_2|^2 P_2}{\sigma_B^2} \right)
 \end{aligned}$$

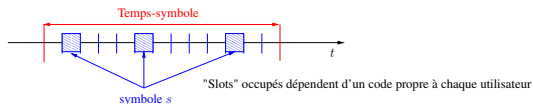


- Notion de somme-capacité $R = R_1 + R_2$

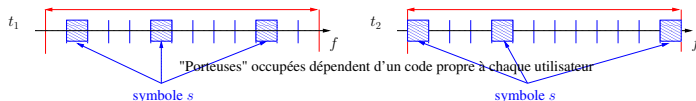
Techniques d'accès multiple

En pratique, solutions sous-optimales :

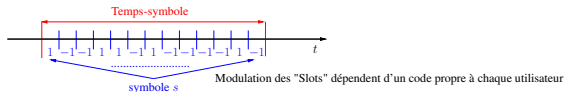
- TDMA : séparation dans le temps
- FDMA : séparation en fréquence
- CDMA : séparation par des codes
 - ★ Saut temporel (*Time Hopping - TH*)



- ★ Saut fréquentiel (*Frequency Hopping - FH*)



- ★ Séquence directe (*Direct Sequence - DS*)



Systèmes multi-porteuses

Contexte mono-utilisateur

- Canal connu de l'émetteur
 - ★ Augmentation de la capacité en allouant la puissance aux bonnes porteuses
 - ★ Approcher la capacité par le biais de modulation et de codage adaptatifs

- Canal inconnu de l'émetteur
 - ★ Etalement
 - ★ OFDM avec "entrelacement et codage" : COFDM

Systèmes hybrides

Contexte multi-utilisateurs et multi-porteuses

Questions :

1. Canal connu :
 - 1.1. Quelle technique d'accès multiple : OFDMA
 - 1.2. Comment allouer intelligemment les porteuses aux utilisateurs ?

2. Canal inconnu :
 - 2.1. Gestion de la diversité par étalement direct : MC-CDMA
 - 2.2. Gestion de la diversité par saut fréquentiel : FH-OFDMA

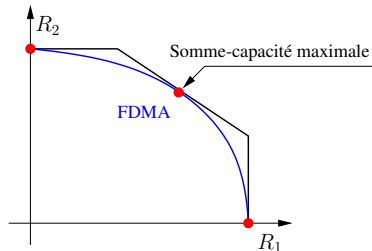
3. Comment faire de l'OFDM "sans" PAPR : SC-FDMA

Canal connu

Canal plat et gaussien

$$C_{\text{FDMA}} = \alpha \log \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_1}{\alpha \sigma_B^2} \right) + (1 - \alpha) \log \left(1 + \frac{|h_2|^2 P_2}{(1 - \alpha) \sigma_B^2} \right)$$

avec $\alpha \in [0, 1]$



- C_{FDMA} atteint la somme-capacité ssi $\alpha = \frac{|h_1|^2 P_1}{|h_1|^2 P_1 + |h_2|^2 P_2}$
- Optimalité du FDMA pour la somme-capacité à P_1 et P_2 fixées [Cover 1974, Cioffi 2002]
- Un utilisateur par porteuse \Rightarrow OFDMA

Allocation pour OFDMA

Extension au cas d'un canal sélectif en fréquence et gaussien

Si séparation orthogonale des utilisateurs (sur chaque porteuse via, par exemple, du CDMA), alors

$$\max \sum_{k=1}^K R_k$$

conduit à ne pas partager les porteuses ([Cioffi 2002, Goldsmith 2002, Cipriano 2005] selon les contraintes)

- Par porteuse, système mono-utilisateur avec allocation dynamique classique
- Problème d'équité

Allocation "équitable" pour OFDMA

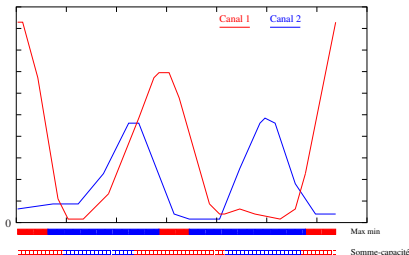
Soient $H_k(n)$ et $P_k(n)$ la réponse fréquentielle du filtre et la puissance de l'utilisateur k pour la porteuse n

$$\max_{\text{allocation OFDMA}} \sum_{k=1}^K \omega_k R_k$$

$$\max_{\text{allocation OFDMA}} \min_k R_k$$

↪ Utilisateur k a la porteuse n si $\omega_k \log(1 + |H_k(n)|^2 P_k(n) / \sigma_B^2)$ max.

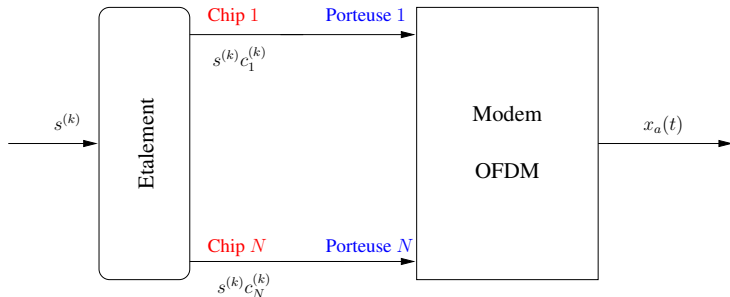
↪ Utilisateurs ont le même débit au détriment du débit cumulé



Canal inconnu

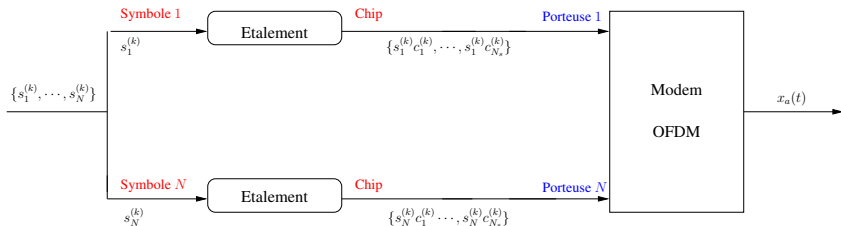
- Allocation impossible
- Eviter brouilleurs et/ou mauvais canaux : technique de diversité
 - ★ Etalement nécessaire
 - ★ Technique d'accès multiple : le CDMA
 - ★ Lien entre le CDMA et les différentes porteuses : MultiCarrier-CDMA
 - Etalement fréquentiel : MC-CDMA (strict) [Fazel 1993]
 - Etalement temporel : MC-DS-CDMA [Kondo 1993]
 - ★ Possibilité de mettre en œuvre le FH-OFDMA

Emetteur MC-CDMA



- Espacement porteuse $1/T_s$ et Bande occupée : N/T_s
- Tire parti de la diversité fréquentielle

Emetteur MC-DS-CDMA



- Système DS-CDMA par porteuse avec facteur d'étalement de N_s
- Espacement porteuse N_s/NT_s et Bande occupée N_s/T_s
- Tire parti de la diversité temporelle

Problème du PAPR

Soit $\{x(n)\}$ un signal numérique, on définit le facteur de crête par

$$F = \frac{\max_n |x(n)|^2}{\mathbb{E}[|x(n)|^2]}$$

- PAPR : *Peak to Average Power Ratio*
- **Si F grand, on sort de la plage linéaire des amplificateurs**

$$\text{Signal OFDM} \Rightarrow x(m) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} s_n e^{2i\pi mn/N}$$

$\Rightarrow F = N$ (en mono-porteuse : $F = 1$)

$\Rightarrow x(m)$ tend vers un signal gaussien (si $N \rightarrow \infty$)

Rq : Seules quelques séquences de s produisent un fort F

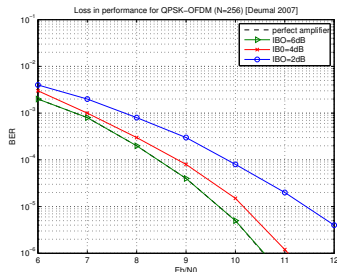
$$\text{Prob}(F > f_0) = 1 - (1 - e^{-f_0})^N, \quad \mathbb{E}[F] = N \left(\sum_{n=0}^{N-1} C_{N-1}^n \frac{(-1)^n}{(n+1)^2} \right)$$

Evaluation du PAPR

Défaut de saturation de l'amplificateur : input back-off (IBO)

$$\text{IBO} = 10 \log_{10} (P_{\max}/P_x)$$

- P_{\max} la puissance maximale admise par l'amplificateur
- P_x la puissance moyenne du signal entrant dans l'amplificateur

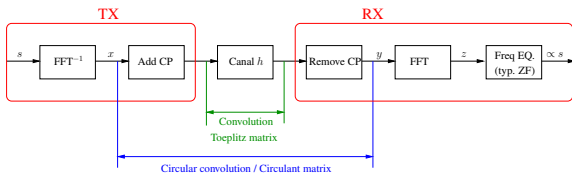


Solutions

- "Clipping" : modification intelligente de quelques porteuses
- Choix pertinent du codage correcteur d'erreur
- Approche alternative : **SC-FDMA**

Le mono-porteuse avec préfixe cyclique !

OFDM



$$Y = CX$$

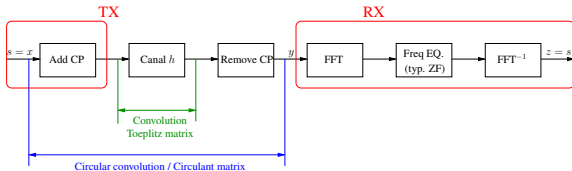
$$Y = F^{-1}DFX$$

$$Z = FY = DFX$$

$$Z = DFF^{-1}S = DS$$

$$D^{-1}Z = S$$

SC : single-carrier (with cyclic prefix)



$$Y = CX$$

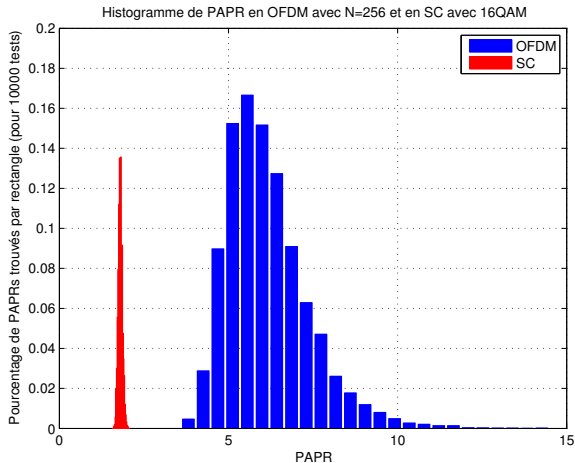
$$Y = F^{-1}DFX$$

$$Z = F^{-1}D^{-1}FY$$

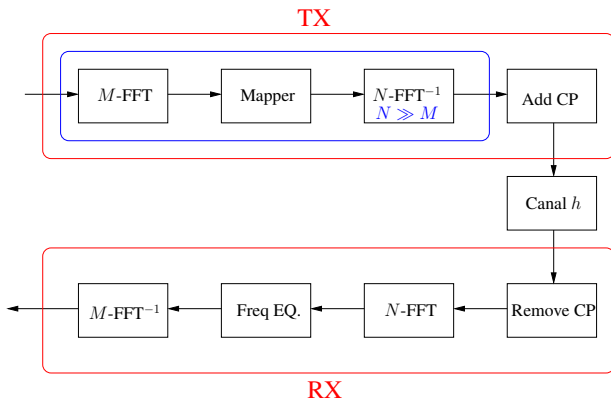
$$Z = X = S$$

Amélioration du PAPR

Pas de FFT à l'émission donc PAPR plus faible en SC qu'en OFDM



SC avec accès multiple FDMA



- Moins de PAPR (amplificateur de l'émetteur simple)
- Récepteur plus complexe (BTS plutôt que terminal mobile)
- Gestion inhérente de la diversité fréquentielle

Bibliographie

- S. Hara et R. Prasad, « Design and performance of multicarrier CDMA systems in frequency-selective Rayleigh fading channels », *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Sep. 1999.
- S. Kaiser, « OFDM code division multiplexing in fading channels », *IEEE Trans. on Communications*, Août 2002.
- R. Prasad et S. Hara, « An overview of multicarrier CDMA », *IEEE Int. Symp. Spread Spectrum Techniques and Applications*, 1996.
- S. Kaiser, K. Fazel, « Multicarrier and Spread spectrum systems », Wiley, 2003.
- M. Ergen, "Mobile Broadband", Springer, 2009.
- H. Homa et A. Toskala, "LTE for UMTS, OFDMA and SC-FDMA based radio access", Wiley, 2009.