



# Etude des systèmes MIMO associés à des modulations multiporteuses

16/11/2004

Vincent LE NIR



# Plan de l'exposé

- Introduction
- Techniques MIMO (Multiple Input Multiple Output)
- Association des techniques MIMO à l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) et au LP-OFDM
- Association des techniques MIMO au MC-CDMA (Multi-carrier Code Division Multiple Access)
- Conclusion



# Introduction

- Canal de propagation
  - IES : sélectivité fréquentielle
  - Doppler : sélectivité temporelle
  - Espacement entre antennes : sélectivité spatiale
- Exploitation de la diversité
  - Diversité spatiale exploitée par techniques MIMO
  - Diversités temporelles et fréquentielles exploitées par un codage de canal (ex: C-OFDM), précodage linéaire, CDMA, MC-CDMA...



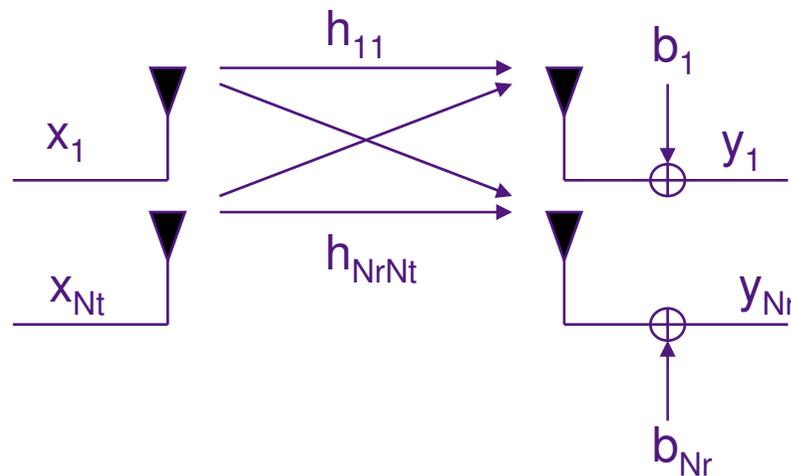
# Techniques MIMO

- Etat de l'art
  - CSI à l'émission et à la réception : water-filling (SVD), beamforming
  - CSI seulement à la réception : codes espace-temps (STBC, STTC, LD), multiplexage spatial
  - CSI ni à l'émission ni à la réception : codes espace-temps différentiels (-3 dB due à la non cohérence)
- Articles de référence
  - Tlatar (1995) : water-filling
  - Foschini (1996) : multiplexage spatial (BLAST)
  - Alamouti, Tarokh (1998) : STBC, STTC, codes espace-temps différentiels

# Techniques MIMO : Multiplexage spatial

## ➤ Multiplexage spatial :

### ➤ Hypothèse : $h_{ij}$ canaux non sélectifs en fréquence



$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r 1} & \cdots & h_{N_r N_t} \end{bmatrix}$$

### ➤ $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{b}$

### ➤ Rendement du multiplexage spatial : $R=N/T=N_t$

# Techniques MIMO : Multiplexage spatial

- Critères MAP, ML
- Techniques de détection non linéaires SIC ZF ou MMSE (D-BLAST ou V-BLAST) ou PIC ZF ou MMSE
- Techniques de détection par inversion de matrice avec critères ZF ou MMSE ( $\gamma$  SNR par antenne de réception)
  - Ex: MMSE  $\mathbf{G} = \left( \mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{1}{\gamma} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{H}^H$
  - Symboles estimés  $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{G} \mathbf{y}$
- Capacité du multiplexage spatial :

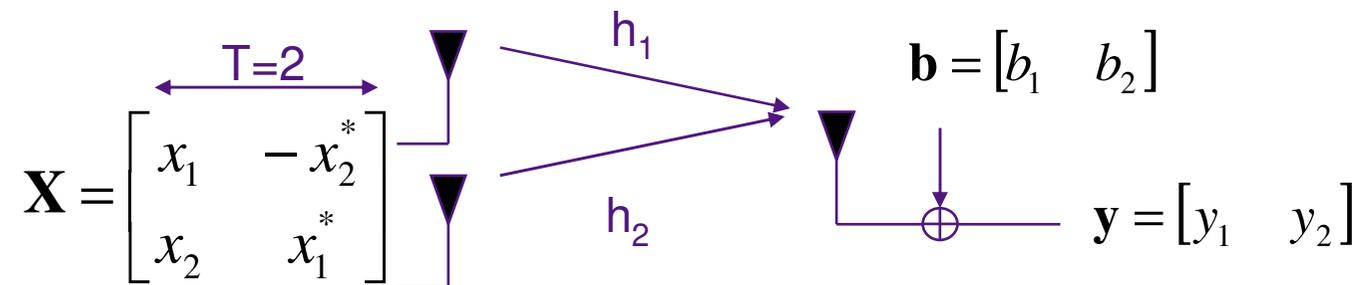
$$C = E \left\{ \log_2 \det \left( I_{N_r} + \frac{\gamma}{N_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right\} \quad C = \sum_{i=1}^{N_t} E \left\{ \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma}{N_t} \lambda_i \right) \right\}$$



# Techniques MIMO : STBC

## ➤ STBC Alamouti :

- Hypothèse :  $\mathbf{h} = [h_1 \quad h_2]$  canaux non sélectifs en fréquence constants sur  $T=2$  durées symboles



- Signal reçu  $\mathbf{y} = \mathbf{hX} + \mathbf{b}$
- Rendement du STBC d'Alamouti :  $R=N/T=1$



# Techniques MIMO : STBC

- Reformulation  $\mathbf{y}' = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{b}'$

avec  $\mathbf{y}' = \begin{bmatrix} y_1 \\ -y_2^* \end{bmatrix}$  et  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ -h_2^* & h_1^* \end{bmatrix}$

- Détection linéaire MRC équivalente à une détection ML car

$$\mathbf{H}^H \mathbf{H} = (|h_1|^2 + |h_2|^2) \mathbf{I}_2$$

- Détection linéaire MMSE  $\mathbf{G} = \left( \mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{1}{\gamma} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{H}^H$

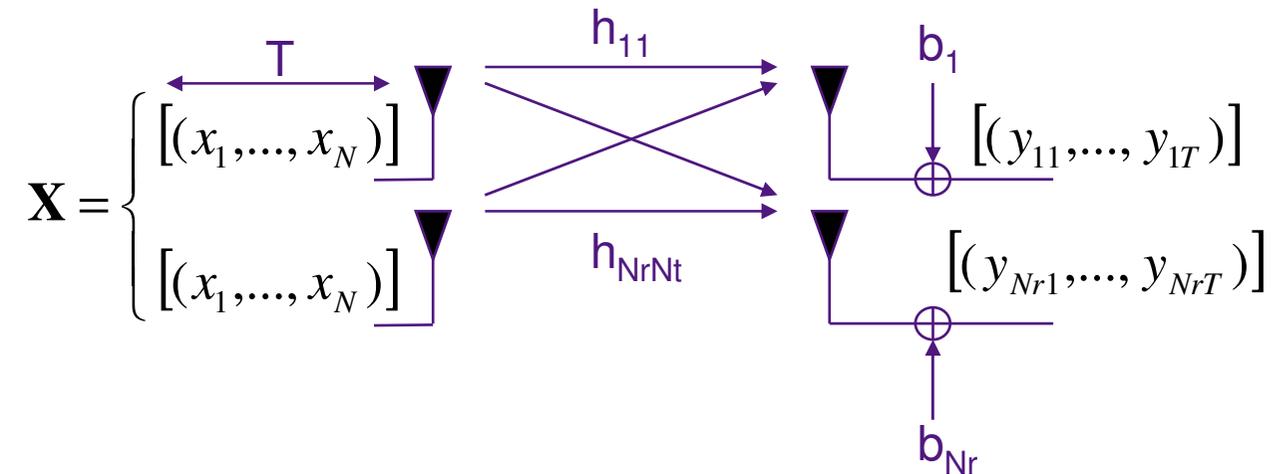
- Symboles estimés  $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{G}\mathbf{y}'$

- Capacité d'un STBC orthogonal  $C = R.E \left\{ \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t N_r} \|h_i\|^2 \right) \right\}$



# Techniques MIMO

## ➤ Généralisation



➤ Codes orthogonaux: Alamouti ( $N_t=2$ , diversité 2,  $R=1$ ),

Tarokh ( $N_t > 2$ , diversité 3 ou 4,  $R < 1$ )  $\mathbf{X}\mathbf{X}^H = \alpha \mathbf{I} \quad \alpha > 0$

➤ Codes non orthogonaux: Jafarkhani ou Tirkkonen

( $N_t=4$ , diversité  $< 4$ ,  $R=1$ )  $\mathbf{X}\mathbf{X}^H \neq \alpha \mathbf{I}$

➤ Codes à dispersion linéaire ( $R > 1$ )

➤ Multiplexage spatial ( $R=N_t$ )



# Techniques MIMO

- Généralisation (suite)
  - Pour tout système :
    - STBC orthogonaux
    - STBC non orthogonaux
    - LD
    - Multiplexage spatial
  - $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{b}$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11}^1 & \dots & h_{1N}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{11}^T & \dots & h_{1N}^T \\ & \vdots & \\ & \vdots & \\ h_{Nr1}^1 & \dots & h_{NrN}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{Nr1}^T & \dots & h_{NrN}^T \end{bmatrix}$$

avec H matrice de canal équivalente de taille  $TN_r \times N$



# Techniques MIMO

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11}^1 & \dots & h_{1N}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{11}^T & \dots & h_{1N}^T \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{Nr1}^1 & \dots & h_{NrN}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{Nr1}^T & \dots & h_{NrN}^T \end{bmatrix}$$

Alamouti 2x1

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ -h_2^* & h_1^* \end{bmatrix}$$

Multiplexage spatial 4x4

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{41} & \dots & h_{44} \end{bmatrix}$$

➤ Techniques de détection ML, non linéaires ou linéaires

– MMSE  $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{G}\mathbf{y}$  avec  $\mathbf{G} = \left( \mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{1}{\gamma} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{H}^H$

# MIMO OFDM



## ➤ MIMO

- Hypothèse : Canaux non sélectifs en fréquence

## ➤ Application aux canaux sélectifs en fréquence

### ➤ Egalisation

- Multiplexage spatial : complexité variant avec le nombre de trajets du canal et le nombre d'antennes
- STBC : Nouveau schéma d'émission (TR-STBC)

### ➤ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)

- Complexité faible (FFT+intervalle de garde)  $\forall$  nombre de trajets
- Transforme un canal sélectif en fréquence en de multiples canaux non sélectifs en fréquence



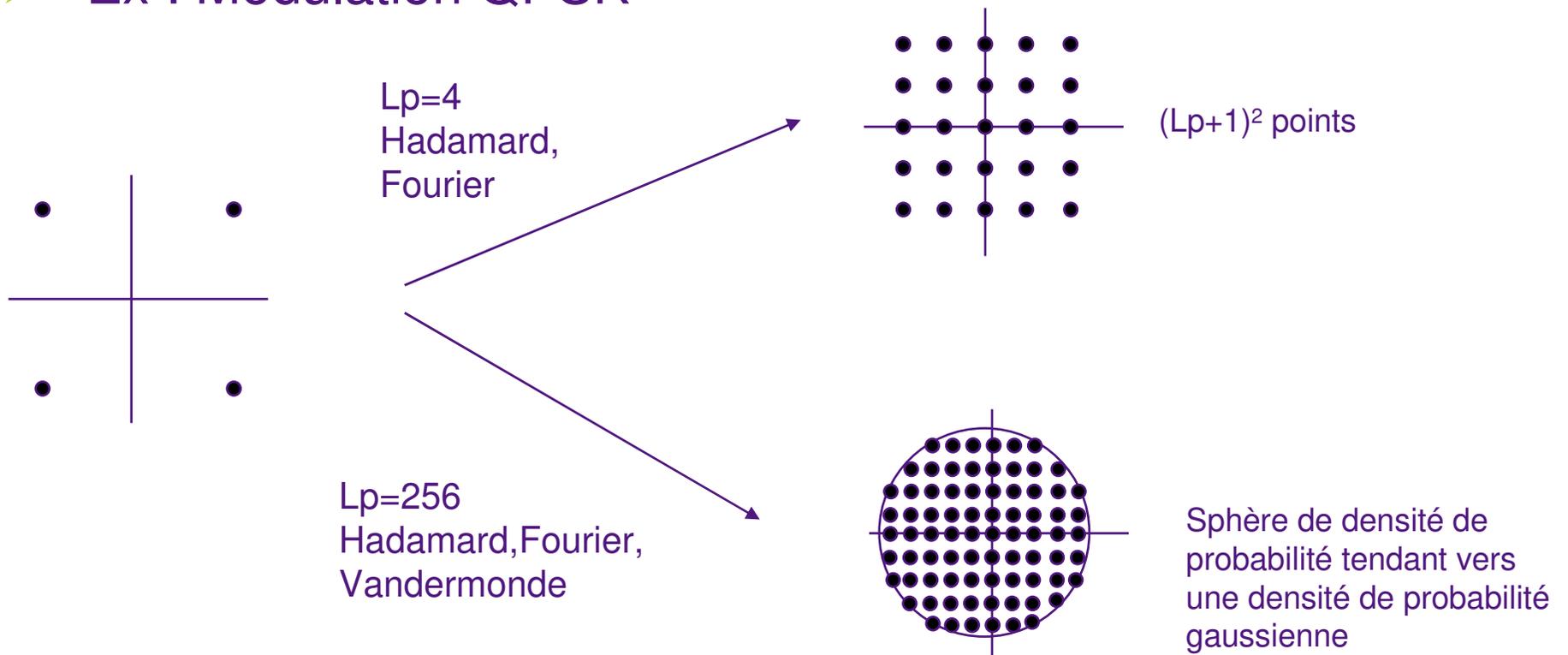
# Précodage linéaire

- But : exploiter la diversité temporelle et/ou fréquentielle (OFDM) du canal
- Comment : combinaisons linéaires de symboles complexes issus de modulation PSK ou QAM
  - $\mathbf{s} = \mathbf{\Theta}\mathbf{x}$  avec  $\mathbf{\Theta}$  matrice unitaire (Vandermonde, Fourier, *Hadamard complexe*) de taille  $L_p \times L_p$
- Articles de référence ≠ Paulraj (2000): Linear Precoding
  - Giraud et Belfiore (1995) : « Lattices » SISO, ML
  - Boutros (1998) : « Signal Space Diversity » SISO, ML
  - Stamoulis et Giannakis (2000): « Linear Precoding » SISO, STBC, ML
  - Xin (2001) : « Constellation Rotation » STBC, ML
  - Thèse Debbah (2002) : Précodage linéaire SISO, MMSE



# Précodage linéaire

## ➤ Ex : Modulation QPSK



# MIMO LP-OFDM

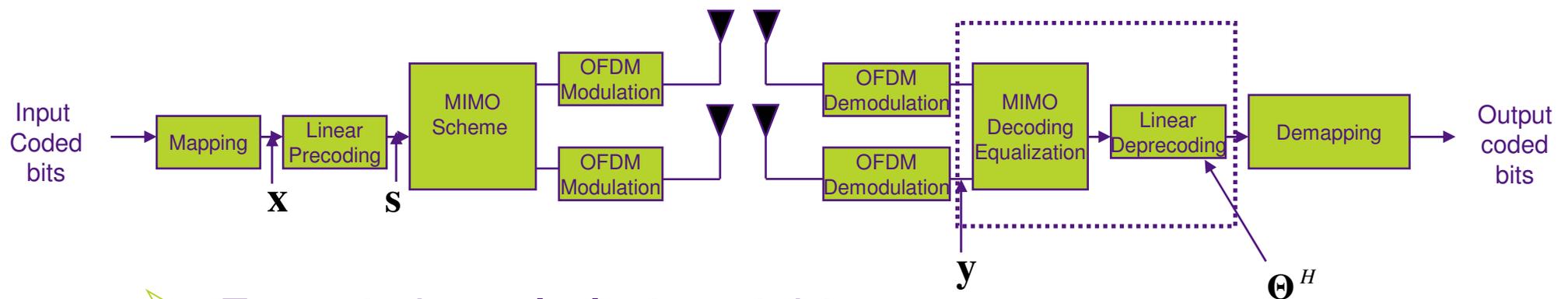


- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)
  - Transforme un canal sélectif en fréquence en de multiples canaux non sélectifs en fréquence
- Association avec le précodage linéaire
  - Collecte de la diversité fréquentielle et temporelle du canal (précodage effectué sur 2 dimensions)
- Association avec MIMO
  - Collecte de la diversité spatiale
  - Augmentation de la capacité

# MIMO LP-OFDM



## ➤ Schéma d'émission et de réception



## ➤ Formulation générale valable

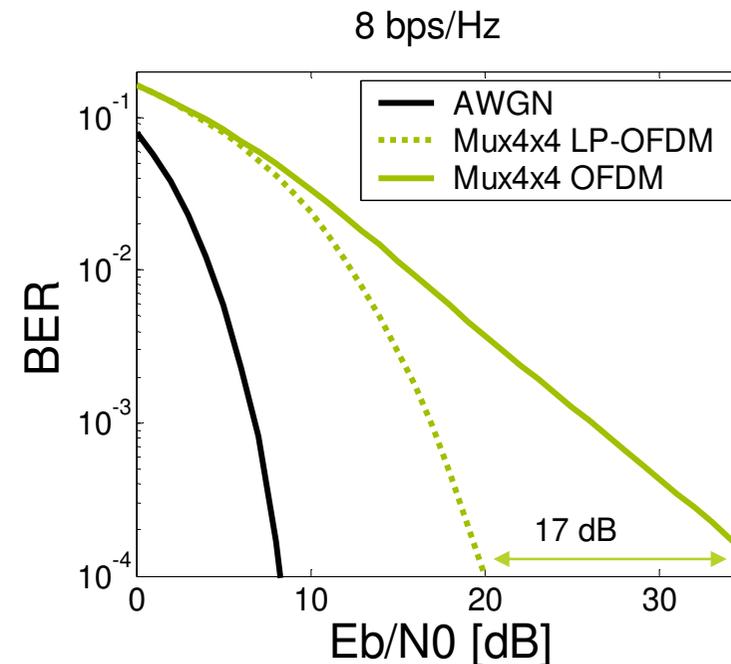
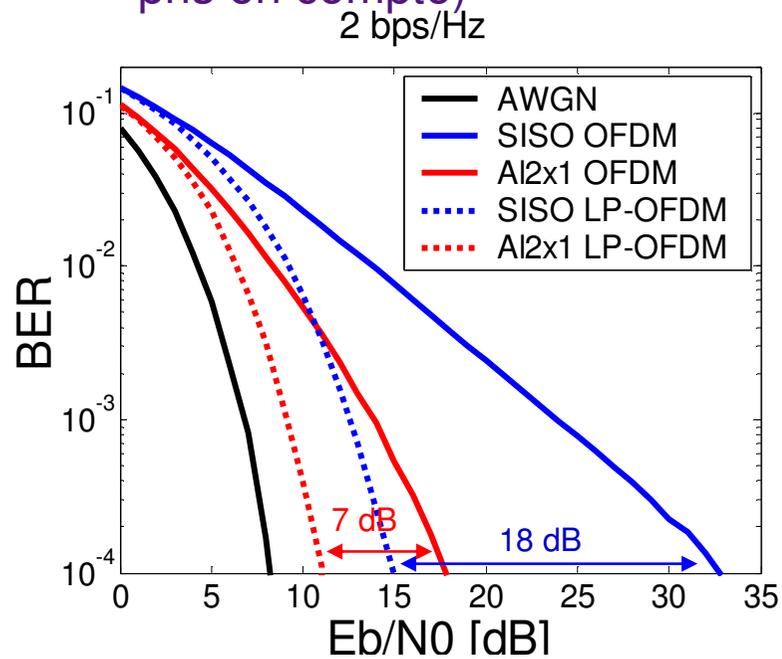
- $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{b}$  avec  $\mathbf{s} = \Theta\mathbf{x}$
- Pour tout système (STBC, Multiplexage spatial, LD)
- Techniques de détection ML, linéaires ou non linéaires

– MMSE  $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{G}\mathbf{y}$  avec  $\mathbf{G} = \left( \mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{1}{\gamma} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{H}^H$



# MIMO LP-OFDM

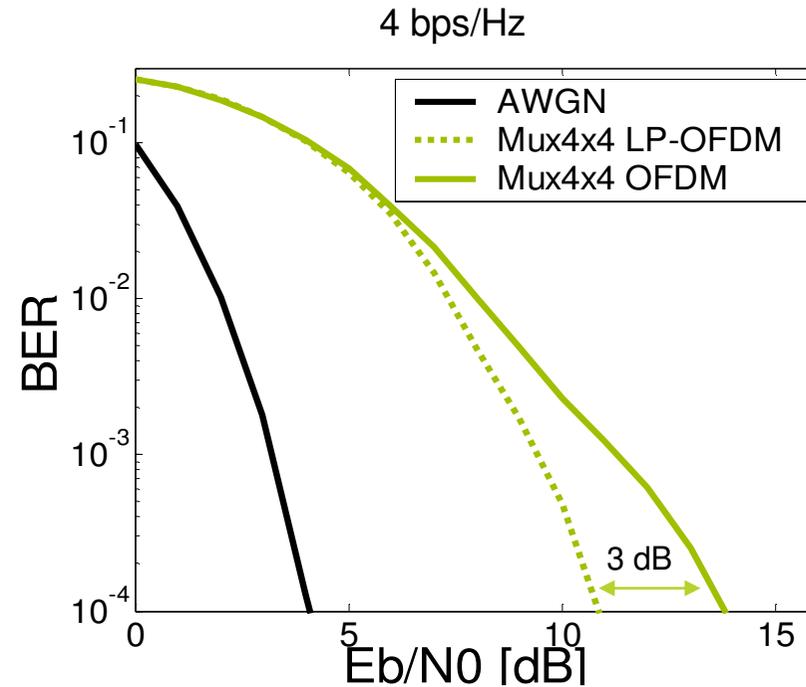
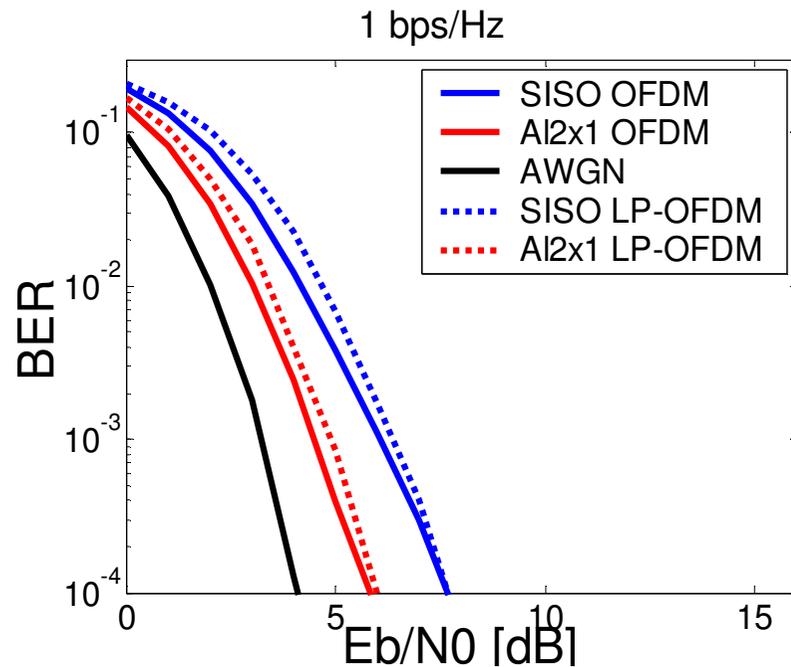
- Résultats sans codage de canal
  - Canaux théoriques de Rayleigh indépendants par sous-porteuse constants sur T durées symboles (canaux OFDM parfaitement entrelacés), 64 sous-porteuses,  $L_p=64$
  - Puissance de réception normalisée  $\forall N_t, N_r$  (gain d'antennes non pris en compte)





# MIMO LP-OFDM

- Résultats avec codage de canal
  - Canaux théoriques, 64 sous-porteuses,  $L_p=64$
  - Convolutif  $(23,35)_o$   $K=5$   $R_c=1/2$

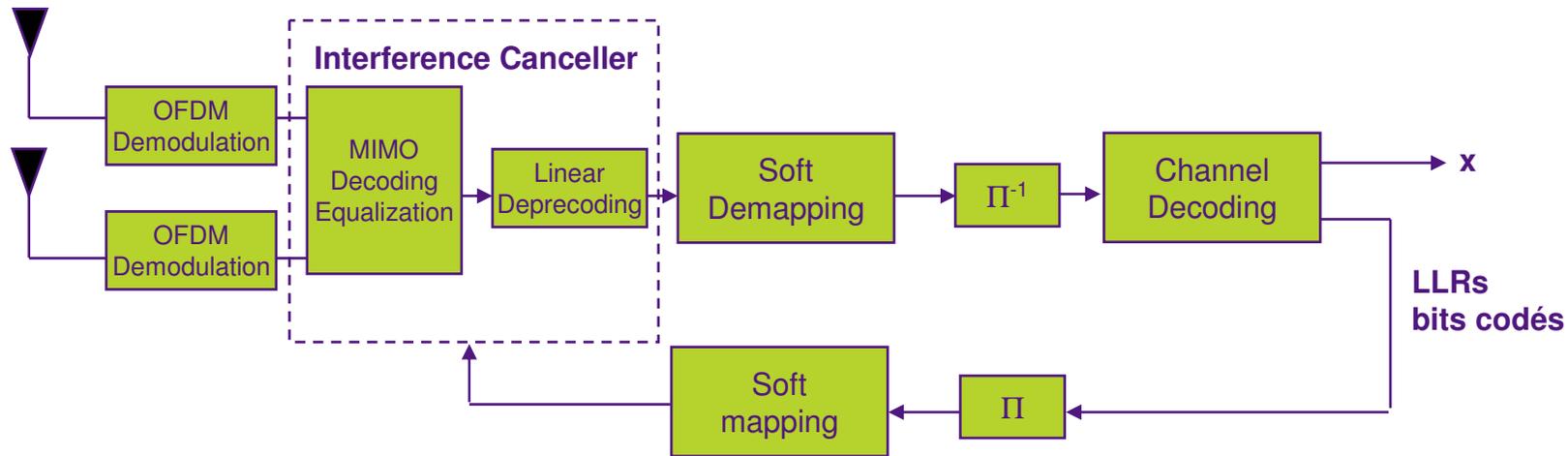


Point de croisement entre OFDM et LP-OFDM  
dépendant de  $R_c$  (Debbah) et du canal



# MIMO LP-OFDM

## ➤ Récepteur itératif avec codage de canal



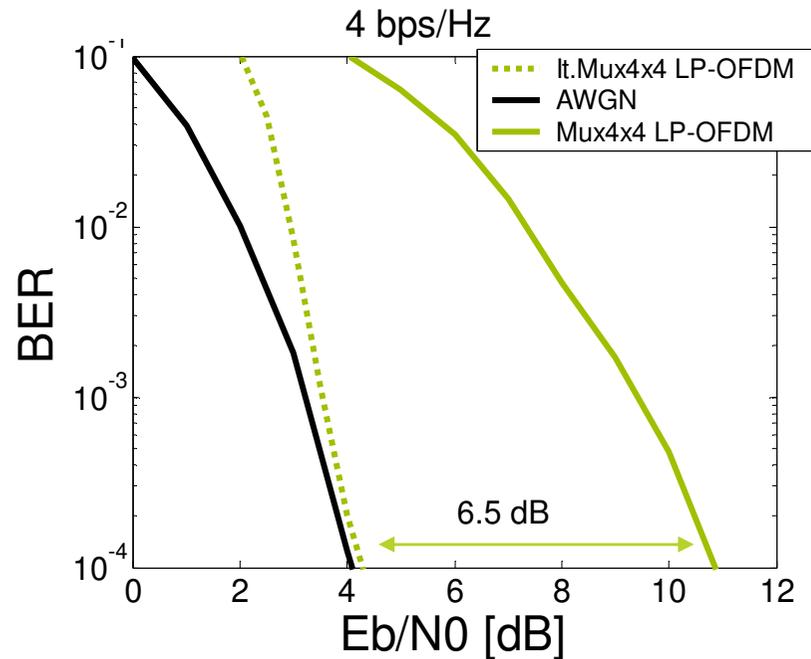
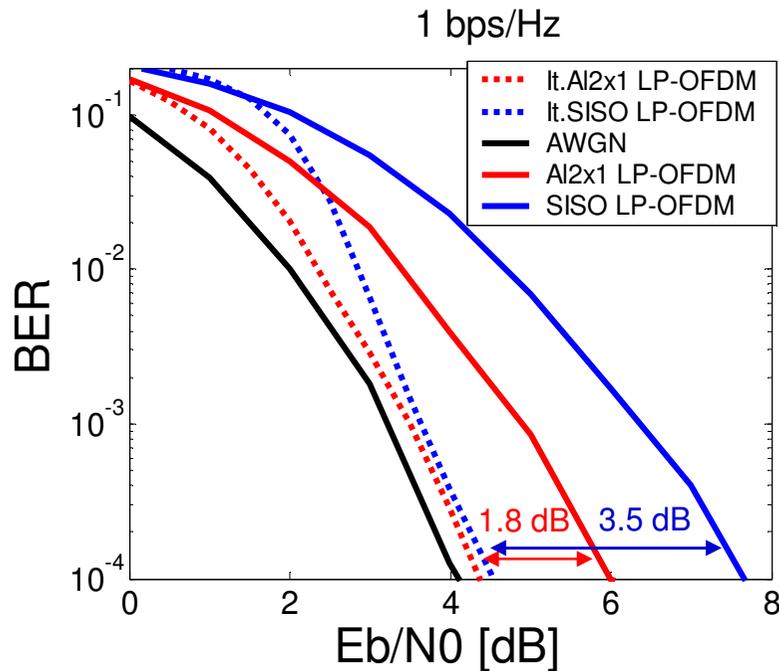
- Première itération : égaliseur MMSE+déprécodage linéaire
- Autres itérations : annuleur d'interférences conjoint

$$\mathbf{x}^p = \left( \text{diag}(\mathbf{\Theta}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{\Theta}) + \frac{1}{\gamma} \mathbf{I} \right)^{-1} \left( \mathbf{\Theta}^H \mathbf{H}^H \mathbf{y} - \left( \mathbf{\Theta}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{\Theta} - \text{diag}(\mathbf{\Theta}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{\Theta}) \right) \mathbf{x}^{p-1} \right)$$

# MIMO LP-OFDM



- Résultats récepteur itératif
  - Canaux théoriques, 64 sous-porteuses,  $L_p=64$
  - Convolutif  $(23,35)_0$   $K=5$   $R_c=1/2$

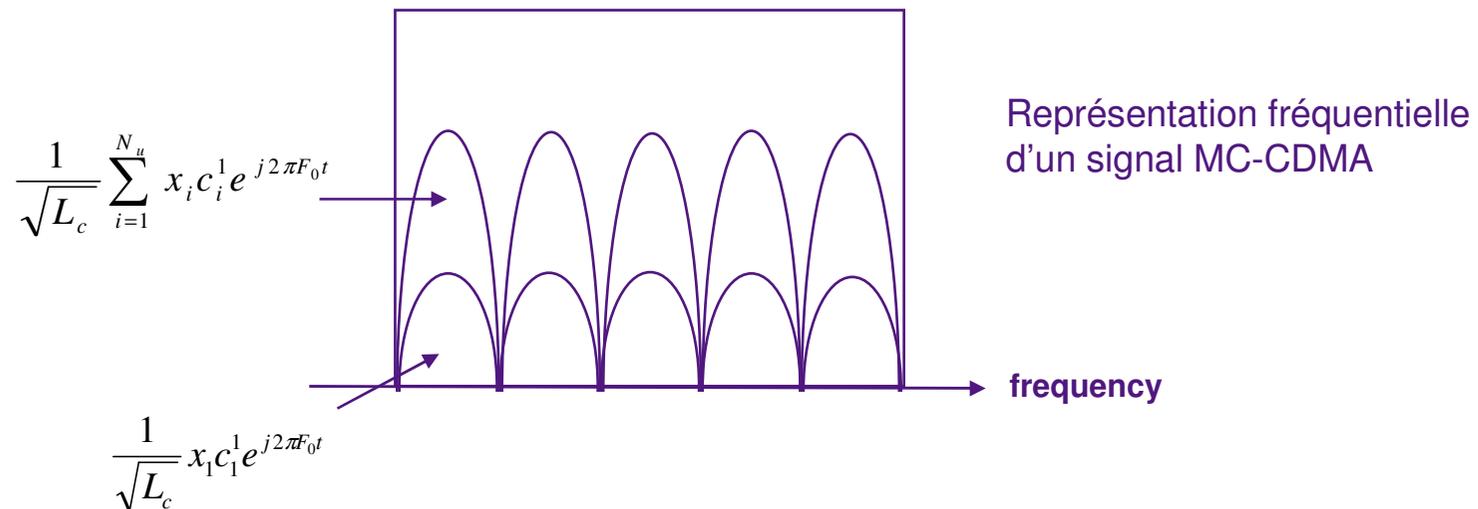


Mêmes performances entre AI2x1 LP-OFDM itératif (1 bps/Hz)  
et Mux4x4 LP-OFDM itératif (4 bps/Hz)



# MIMO MC-CDMA

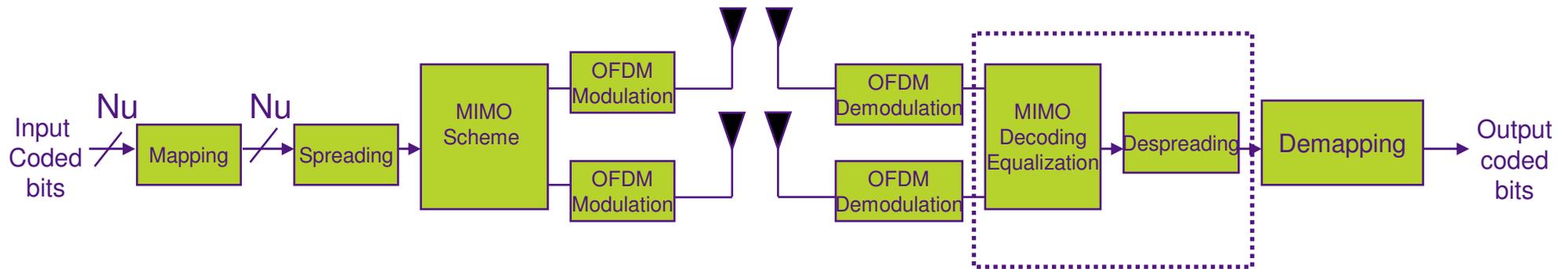
- LP-OFDM : associé avec technique d'accès TDMA ou FDMA (SS-MC-MA ou 2D-SS-MC-MA)
- MC-CDMA : Technique d'accès CDMA en fréquence (usagers étalés en fréquence par le spectre OFDM)



# MIMO MC-CMDA



- Schéma d'émission et de réception
  - Voie descendante

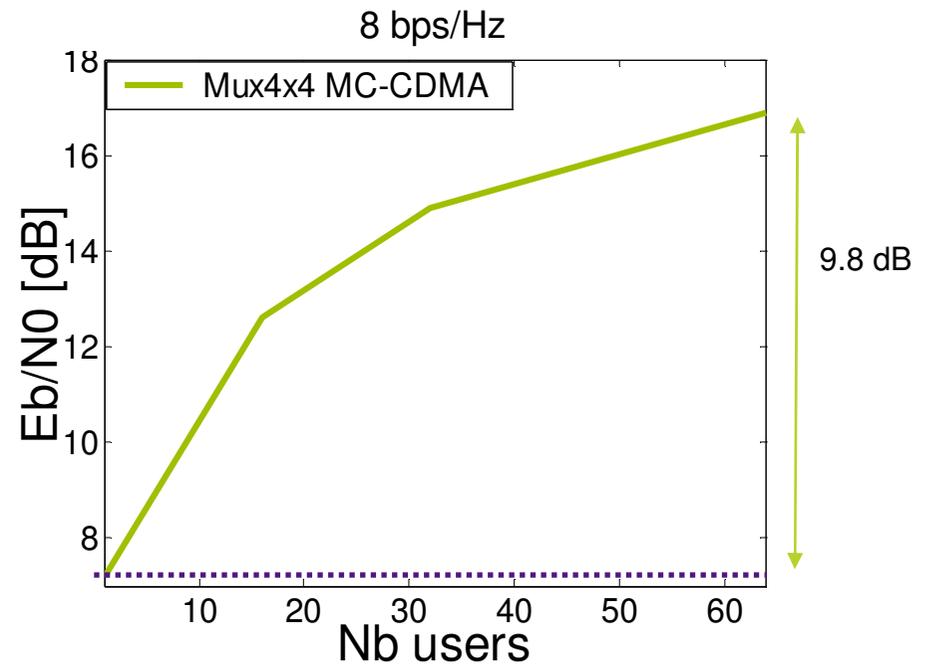
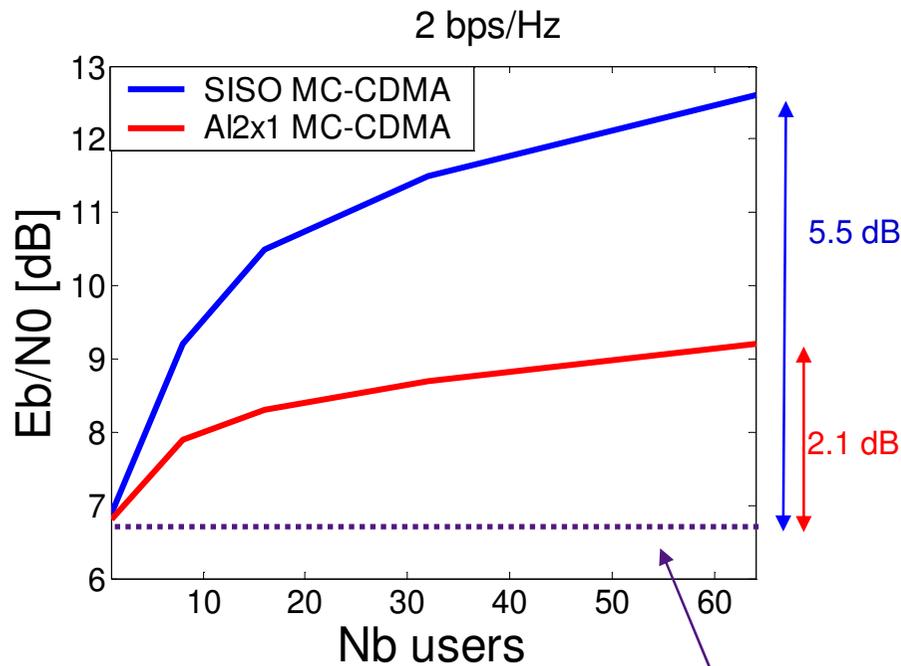


- Meilleur rapport performance/complexité
  - Récepteur mono-utilisateur MMSE avec codage de canal



# MIMO MC-CDMA

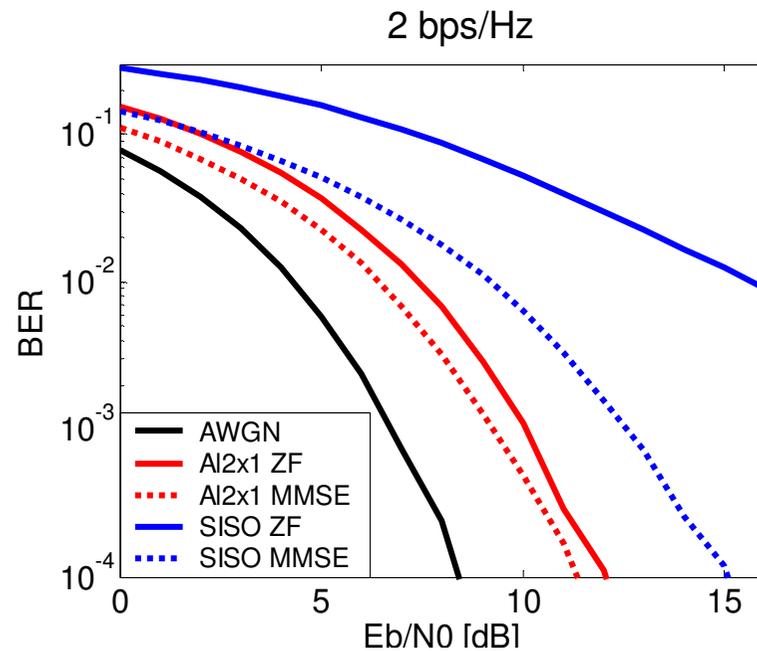
- Résultats sans codage de canal
  - Canaux théoriques, 64 sous-porteuses,  $L_c=64$
  - Pleine charge: mêmes résultats que LP-OFDM
  - En fonction de la charge :  $10^{-3}$



# MIMO MC-CDMA



- Pour STBC orthogonaux :
  - Canaux théoriques, 64 sous-porteuses,  $L_c=64$
  - Détecteur mono-utilisateur ZF envisageable
  - Sans codage de canal



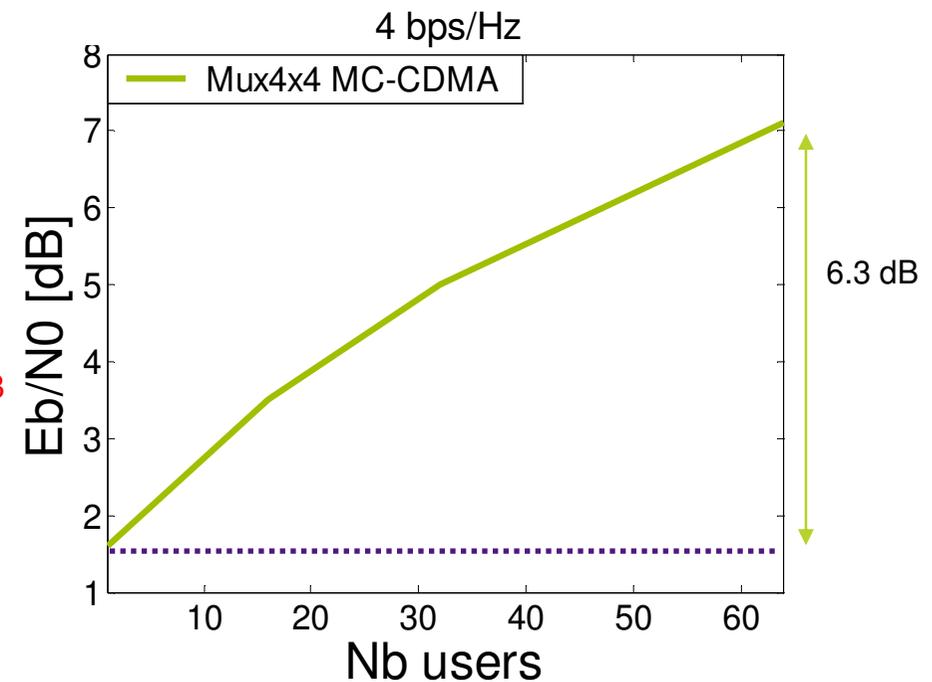
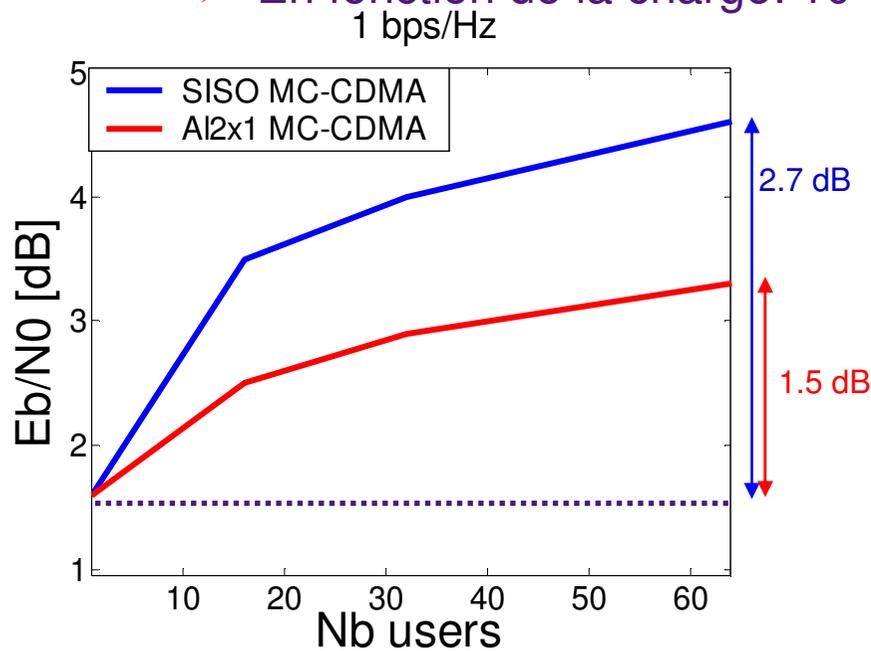
SISO MC-CDMA ZF :  
réhaussement du niveau de bruit

AI2x1 MC-CDMA ZF :  
moyennage du niveau de bruit

# MIMO MC-CDMA



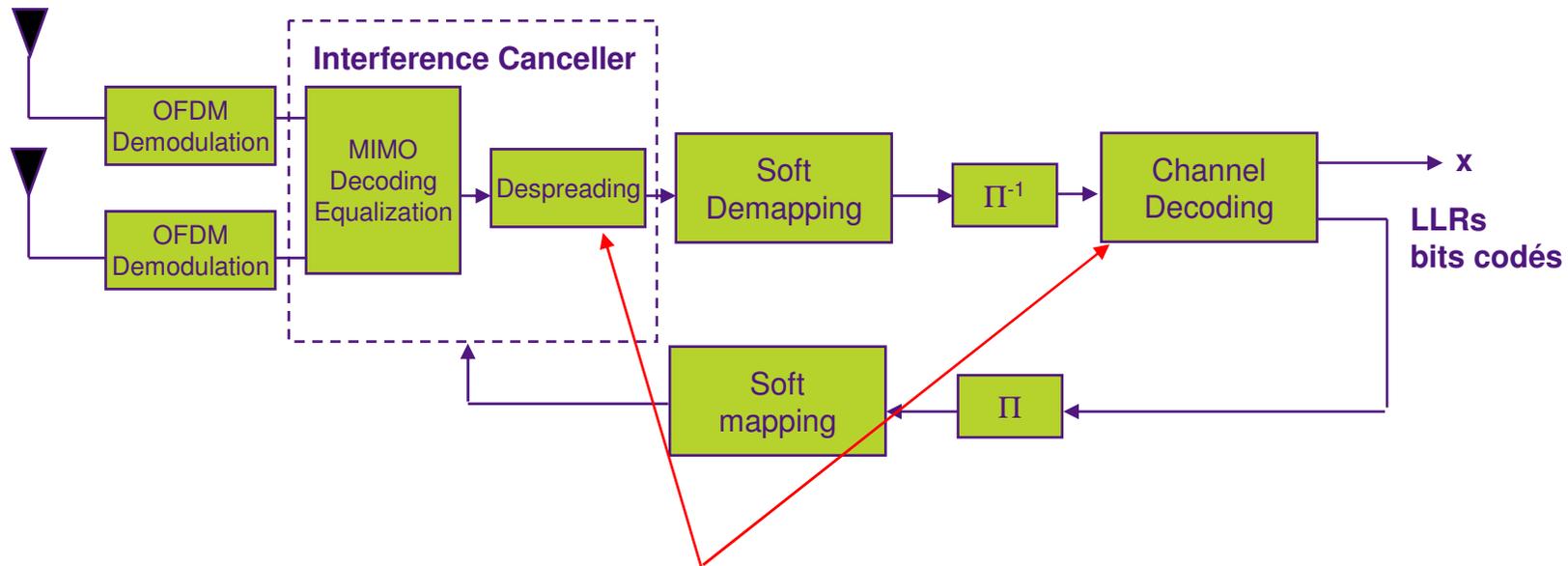
- Résultats avec codage de canal
  - Canaux théoriques, 64 sous-porteuses,  $L_c=64$
  - Turbo code duobinaire ( $R_c=1/2$ )
  - Mêmes résultats que LP-OFDM à pleine charge
  - En fonction de la charge:  $10^{-3}$



# MIMO MC-CDMA



## ➤ Récepteur itératif avec codage de canal

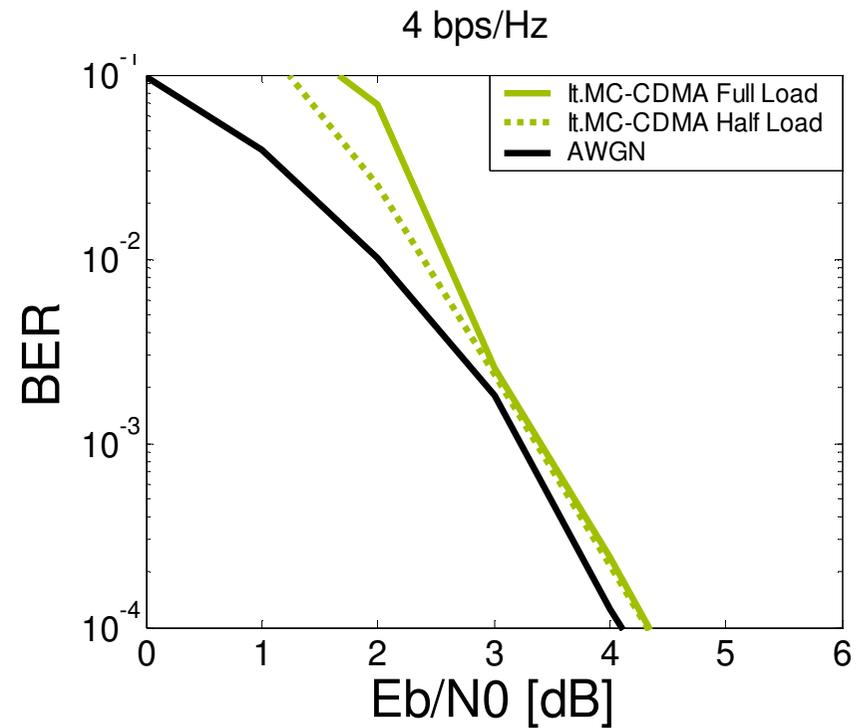
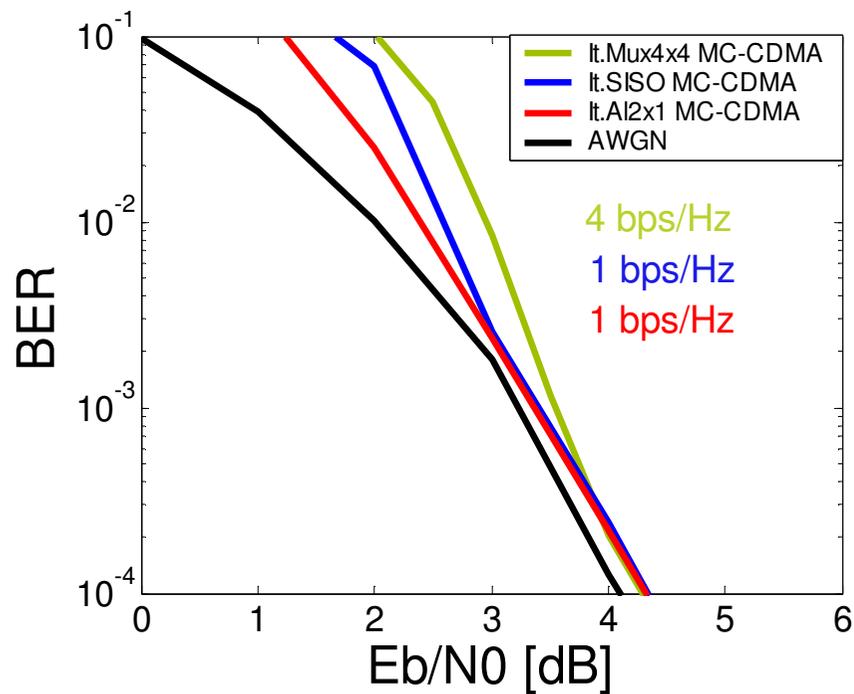


Nécessité de désétaier et de décoder les données de tous les usagers



# MIMO MC-CDMA

- Résultats avec récepteur itératif
  - Canaux théoriques, 64 sous-porteuses,  $L_c=64$
  - Convolutif  $(23,35)_o$   $K=5$   $R_c=1/2$
  - Mêmes résultats que LP-OFDM à pleine charge

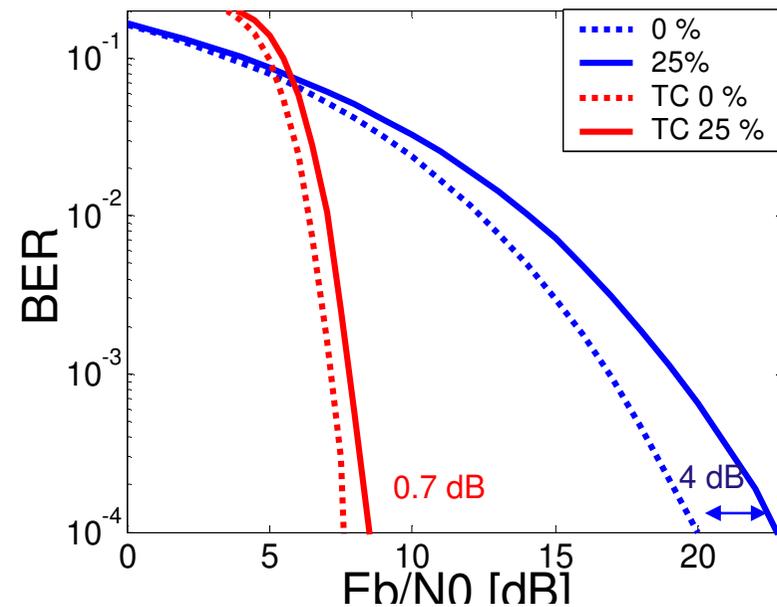
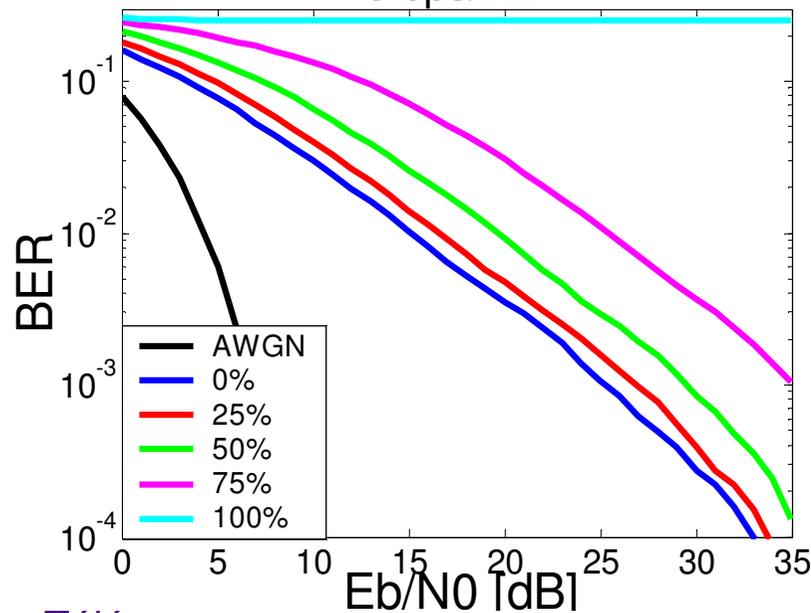


# MIMO MC-CDMA



- Cas non idéal : Corrélation entre antennes
  - Canaux théoriques, 64 sous-porteuses,  $L_c=64$
  - Impact sur STBC: Faible (SISO au pire)
  - Impact sur multiplexage spatial :

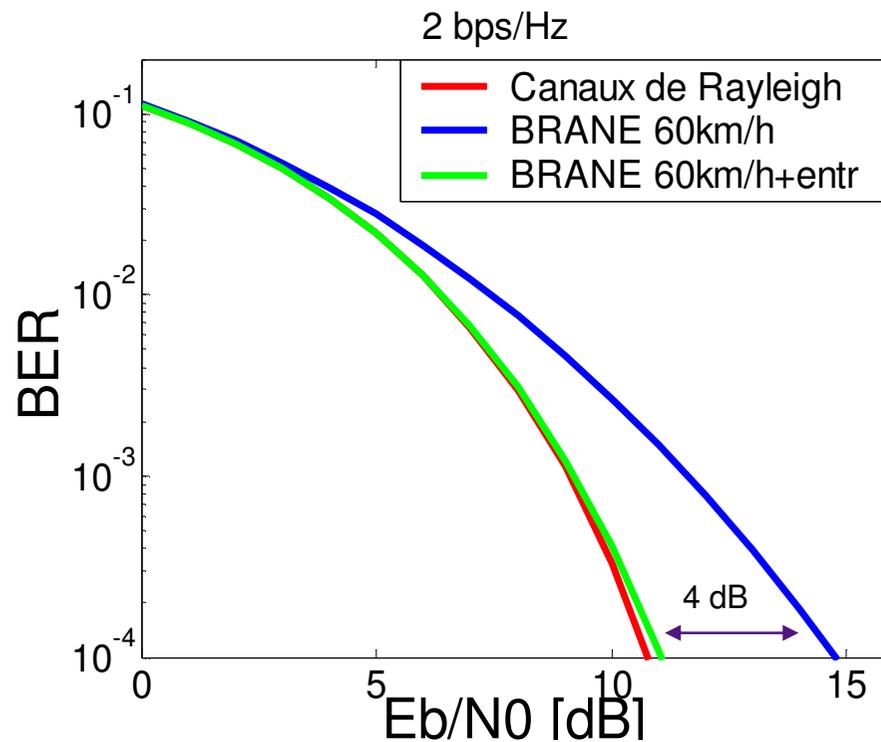
Sans codage de canal (Mux4x4) OFDM MC-CDMA (Mux4x4) avec turbo code  $R_c=1/2$   
8 bps/Hz 4 bps/Hz



# MIMO MC-CDMA



- Cas non idéal : Corrélation temporelle et fréquentielle
  - Exemple : A12x1 avec 2 canaux BRAN E à 60 km/h décorrés, 64 sous-porteuses,  $L_c=64$
  - Entrelacement (selon latence acceptée)





# Conclusion

- STBC orthogonaux LP-OFDM ou MC-CDMA
  - Récepteurs simples (linéaires)
  - Pas d'augmentation de l'efficacité spectrale comparé au SISO
  - Peu sensible à la corrélation spatiale
  - Récepteur itératif annule les interférences du précodage linéaire ou multi-utilisateurs
  
- Multiplexage spatial LP-OFDM ou MC-CDMA
  - Récepteurs plus complexes (MMSE avec inversion de matrice) que STBC
  - Augmentation de l'efficacité spectrale
  - Sensible à la corrélation spatiale
  - Récepteur itératif annule les interférences multi-antennes et les interférences du précodage linéaire ou multi-utilisateurs



# Perspectives

- Estimation de canal
  - Perte de performances suivant le nombre d'antennes utilisées
- Synchronisation
  - Rythme
  - Fréquentielle si Doppler élevé
- Nouvelles matrices de précodage (codes complémentaires)
- Publications et brevets
  - 1 article de revue (Electronic Letters)
  - 9 articles de conférences (VTC, ISSSTA ...)
  - 6 brevets