

# Étude et Optimisation de Communications Haut-débit sur Lignes d'Énergie : Exploitation de la Combinaison OFDM/CDMA

**CRUSSIÈRE Matthieu**

*Thèse de Doctorat de l'INSA de Rennes*  
*Spécialité Électronique*

– 28 novembre 2005 –

## Cadre de la Thèse

- **Laboratoire d'accueil :**
  - Institut d'Électronique et de Télécommunications de Rennes (*IETR*)
- **Directeur de Thèse :**
  - *Jean-François Hélard, Professeur à l'INSA de Rennes*
- **Co-encadrant :**
  - *Jean-Yves Baudais, Chargé de Recherches CNRS à l'IETR*
- **Projet RNRT IDILE (Internet haut Débit sur Lignes d'Énergie),**  
labellisé en juin 2002
  - **Laboratoires de recherche :** *Supélec Paris, ENST Paris, CEA-LETI*
  - **Industriels :** *SAGEM, EDF, ELSYS DESIGN*
- **Réseau d'excellence NEWCOM**

# Plan de la présentation

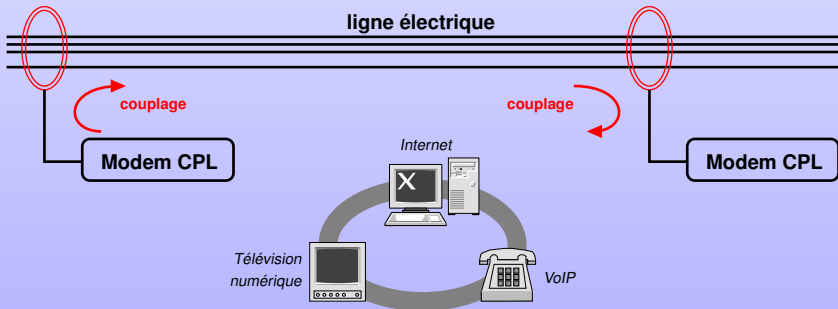
- 1 La technologie CPL (Courants Porteurs en Ligne)
- 2 Description du système étudié
- 3 Procédés de synchronisation et d'estimation de canal
- 4 Procédés d'allocation dynamique des ressources
- 5 Conclusion

# Partie I : La technologie CPL

# Généralités

## Principe des CPL

Faire cohabiter sur les lignes d'énergie des **signaux de communications** à haute fréquence avec les **signaux électriques** à 50 Hz ou 60 Hz.



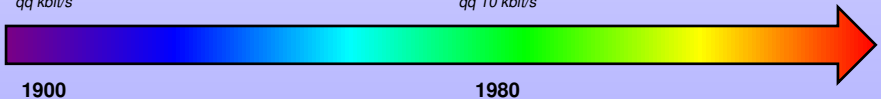
# Bref historique

## Applications bas-débit

- Télémétrie, télécontrôle
  - *relevés de compteurs, détections de coupures*
- Applications domotiques
  - *déclenchements et réglages d'appareils*

qq kbit/s

qq 10 kbit/s



# Bref historique

## Applications bas-débit

- Télémétrie, télécontrôle
  - *relevés de compteurs, détections de coupures*
- Applications domotiques
  - *déclenchements et réglages d'appareils*



## Applications haut-débit

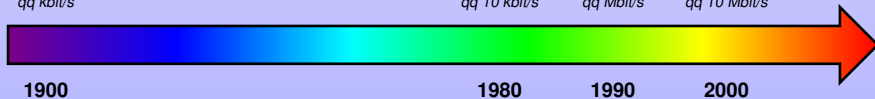
- Réseaux locaux CPL indoor
  - *communications multimedia entre PC, TV, etc.*
- Réseaux CPL outdoor
  - *accès à l'Internet domestique*

qq kbit/s

qq 10 kbit/s

qq Mbit/s

qq 10 Mbit/s



## Bref historique

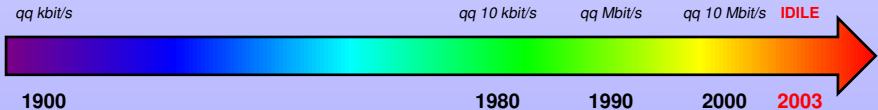
### Applications bas-débit

- Télémétrie, télécontrôle
  - *relevés de compteurs, détections de coupures*
- Applications domotiques
  - *déclenchements et réglages d'appareils*



### Applications haut-débit

- Réseaux locaux CPL indoor
  - *communications multimedia entre PC, TV, etc.*
- Réseaux CPL outdoor
  - *accès à l'Internet domestique*





# Positionnement de l'étude

## Systemes existants

### Applications bas-débit

- Grand nombre de systèmes et standards sur le marché (*X-10*, *CeBus*, ...)
- Techniques de transmissions : *modulations numériques monoporteuses*

### Applications haut-débit

- Émergence de nombreux acteurs depuis les années 2000 (*HomePlug*)
- Techniques de transmissions :
  - ▶ systèmes à *étalement de spectre* (SS)
  - ▶ systèmes à *porteuses multiples* (OFDM)

# Positionnement de l'étude

## Systemes existants

### Applications bas-débit

- Grand nombre de systèmes et standards sur le marché (*X-10*, *CeBus*, ...)
- Techniques de transmissions : *modulations numériques monoporteuses*

### Applications haut-débit

- Émergence de nombreux acteurs depuis les années 2000 (*HomePlug*)
- Techniques de transmissions :
  - ▶ systèmes à *étalement de spectre* (SS)
  - ▶ systèmes à *porteuses multiples* (OFDM)

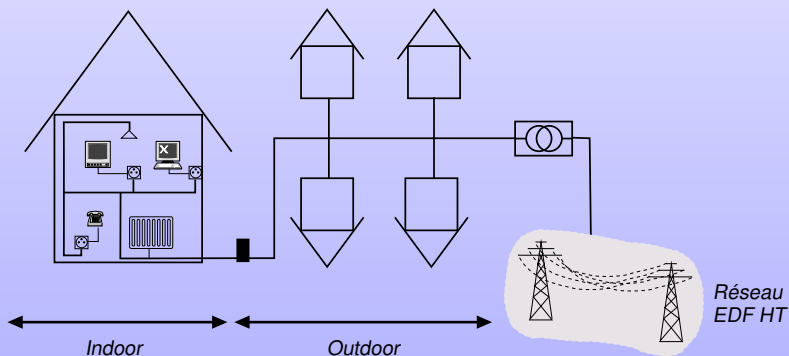
## Originalité de IDILE

Combinaison des techniques *multiporteuses* et d'*étalement de spectre* (MC-SS)

# Positionnement de l'étude

## Exploitation de la *boucle locale électrique*

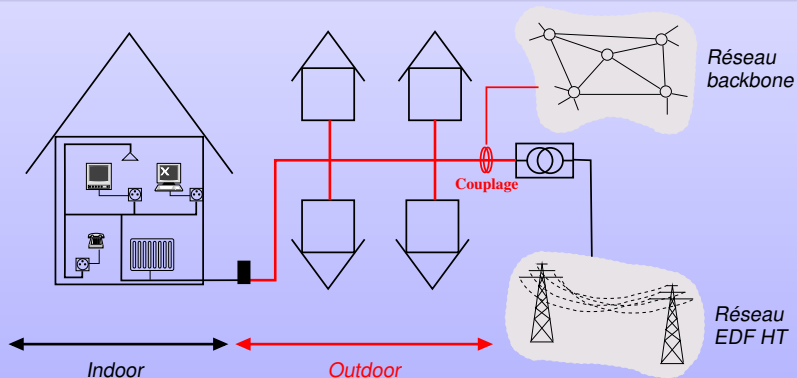
Réaliser l'**accès** à l'Internet domestique à haut-débit en mettant à profit les lignes électriques du **réseau EDF basse tension**



# Positionnement de l'étude

## Exploitation de la *boucle locale électrique*

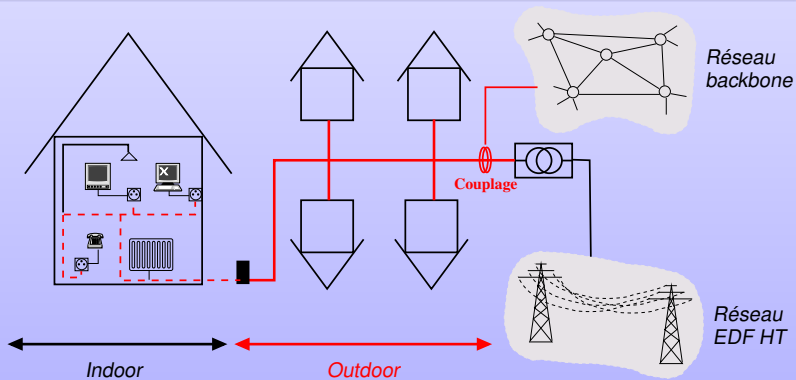
Réaliser l'**accès** à l'Internet domestique à haut-débit en mettant à profit les lignes électriques du **réseau EDF basse tension**



# Positionnement de l'étude

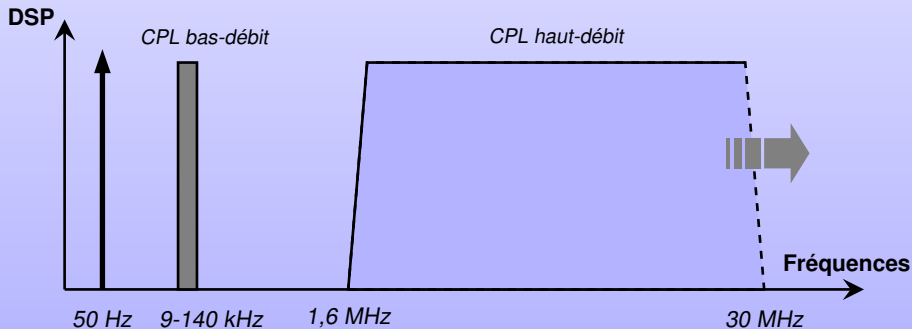
## Exploitation de la *boucle locale électrique*

Réaliser l'**accès** à l'Internet domestique à haut-débit en mettant à profit les lignes électriques du **réseau EDF basse tension**



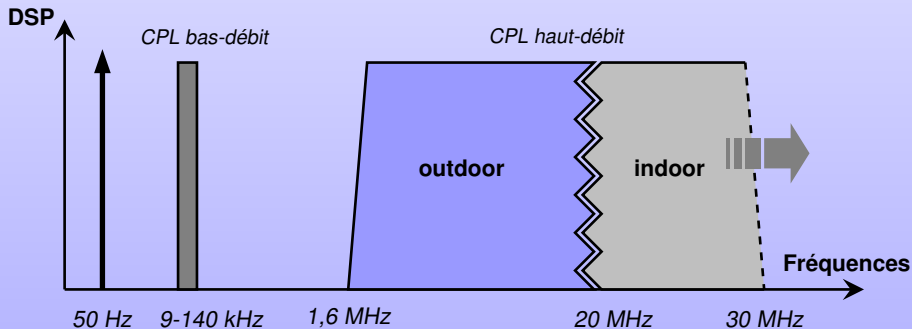
# Occupation spectrale des applications CPL

- Applications bas-débit : [9 – 140] kHz
- Applications haut-débit : [1,6 – 30] MHz



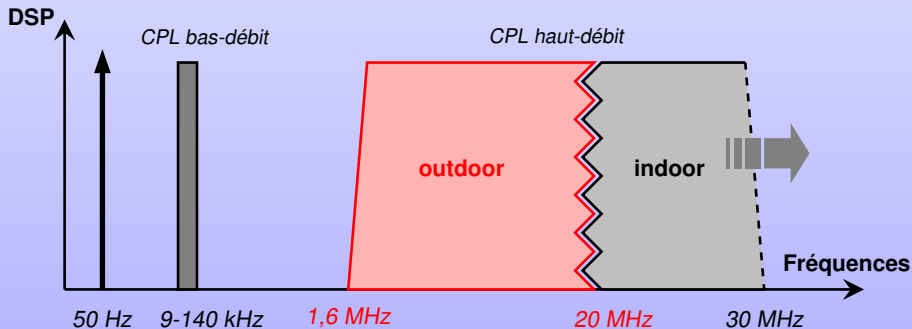
# Occupation spectrale des applications CPL

- **Applications bas-débit** : [9 – 140] kHz
- **Applications haut-débit** : [1,6 – 30] MHz
  - *outdoor* [1,6 – 20] MHz
  - *indoor* [20 – 30] MHz



# Occupation spectrale des applications CPL

- Applications bas-débit : [9 – 140] kHz
- Applications haut-débit : [1,6 – 30] MHz
  - outdoor [1,6 – 20] MHz
  - indoor [20 – 30] MHz

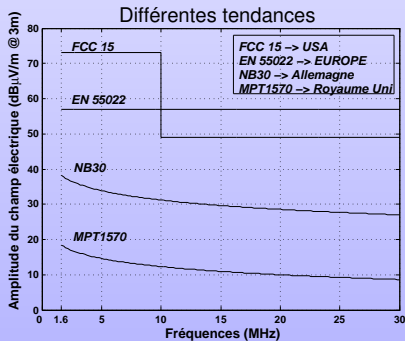




# État d'avancement de la normalisation

**Aucune norme** en vigueur pour les applications CPL haut-débit

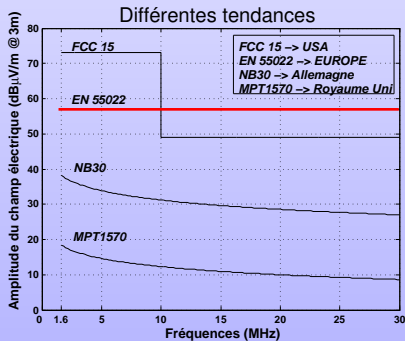
- Délibérations en cours au sein de l'ETSI



# État d'avancement de la normalisation

**Aucune norme** en vigueur pour les applications CPL haut-débit

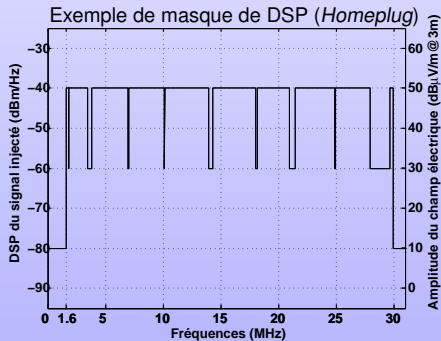
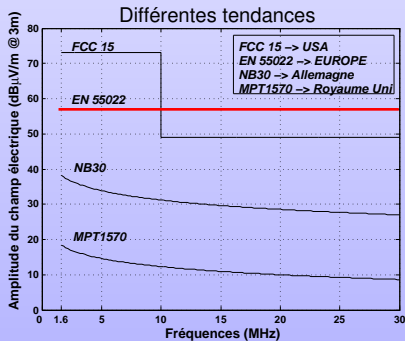
- ▶ Délibérations en cours au sein de l'ETSI



# État d'avancement de la normalisation

**Aucune norme** en vigueur pour les applications CPL haut-débit

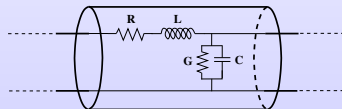
- Délibérations en cours au sein de l'ETSI



# Caractéristiques du canal de propagation

## Atténuation dans les câbles

- Atténuation linéique
- Atténuation en fréquence



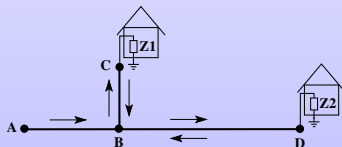
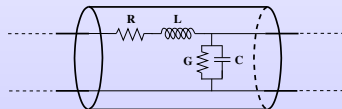
# Caractéristiques du canal de propagation

## Atténuation dans les câbles

- Atténuation linéique
- Atténuation en fréquence

## Trajets multiples

- Désadaptations d'impédances



# Caractéristiques du canal de propagation

## Atténuation dans les câbles

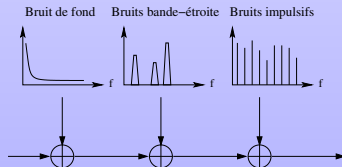
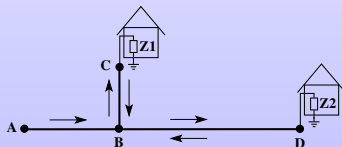
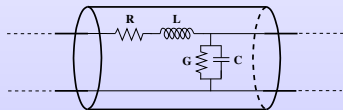
- Atténuation linéique
- Atténuation en fréquence

## Trajets multiples

- Désadaptations d'impédances

## Bruits

- Bruit de fond à  $-110$  dBm/Hz
- Brouilleurs à bande étroite
- Bruits impulsifs divers



# Caractéristiques du canal de propagation

## Atténuation dans les câbles

- Atténuation linéique
- Atténuation en fréquence

▶ Invariante

## Trajets multiples

- Désadaptations d'impédances

▶ Évolution temporelle lente

## Bruits

- Bruit de fond à  $-110$  dBm/Hz
- Brouilleurs à bande étroite
- Bruits impulsifs divers

▶ Bruit de fond et brouilleurs stationnaires

## Partie II : Description du système étudié



# Choix de la technique de transmission

## Exigences du système

- Robustesse
  - Sélectivité fréquentielle
  - Bruits et brouilleurs
- Adaptabilité
  - Accès multiple
  - Occupation spectrale
  - Gestion dynamique des ressources  
(hypothèse de connaissance du canal à l'émission)

# Choix de la technique de transmission

## Exigences du système

- Robustesse
  - Sélectivité fréquentielle
  - bruits et brouilleurs
- Adaptabilité
  - Accès multiple
  - Occupation spectrale
  - Gestion dynamique des ressources  
(hypothèse de connaissance du canal à l'émission)

OFDM

+

SS

Combinaisons étudiées en  
contexte radiomobile  
cellulaire

# Choix de la technique de transmission

## Exigences du système

- Robustesse
  - Sélectivité fréquentielle
  - bruits et brouilleurs
- Adaptabilité
  - Accès multiple
  - Occupation spectrale
  - **Gestion dynamique des ressources**  
(hypothèse de connaissance du canal à l'émission)

OFDM

+

SS

+

Modulations  
Adaptatives

Combinaisons étudiées en  
contexte radiomobile  
cellulaire

Principes  
utilisés en  
xDSL (DMT)

# Choix de la technique de transmission

## Exigences du système

- Robustesse
  - Sélectivité fréquentielle
  - bruits et brouilleurs
- Adaptabilité
  - Accès multiple
  - Occupation spectrale
  - Gestion dynamique des ressources  
(hypothèse de connaissance du canal à l'émission)

OFDM

+

SS

+

Modulations  
Adaptatives

=

MC-SS  
adaptatif

Combinaisons étudiées en  
contexte radiomobile  
cellulaire

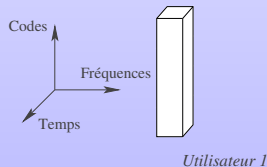
Principes  
utilisés en  
xDSL (DMT)

Nouvelle  
approche

# Choix de la technique de transmission

## Chip mapping retenu

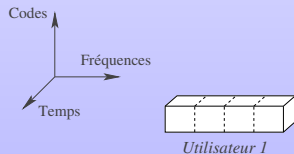
- Spread-Spectrum Multi-Carrier Multiple Access (SS-MC-MA)
  - ▶ Mode d'accès multiple : FDMA
  - ▶ Mode de multiplexage des données : CDMA selon l'axe fréquentiel



# Choix de la technique de transmission

## Chip mapping retenu

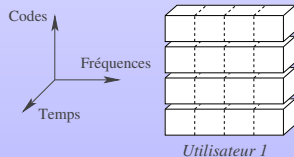
- Spread-Spectrum Multi-Carrier Multiple Access (SS-MC-MA)
  - ▶ Mode d'accès multiple : FDMA
  - ▶ Mode de multiplexage des données : CDMA selon l'axe fréquentiel



# Choix de la technique de transmission

## Chip mapping retenu

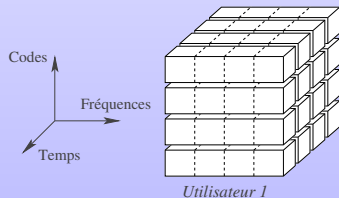
- Spread-Spectrum Multi-Carrier Multiple Access (SS-MC-MA)
  - ▶ Mode d'accès multiple : FDMA
  - ▶ Mode de multiplexage des données : CDMA selon l'axe fréquentiel



# Choix de la technique de transmission

## Chip mapping retenu

- Spread-Spectrum Multi-Carrier Multiple Access (SS-MC-MA)
  - ▶ Mode d'accès multiple : FDMA
  - ▶ Mode de multiplexage des données : CDMA selon l'axe fréquentiel

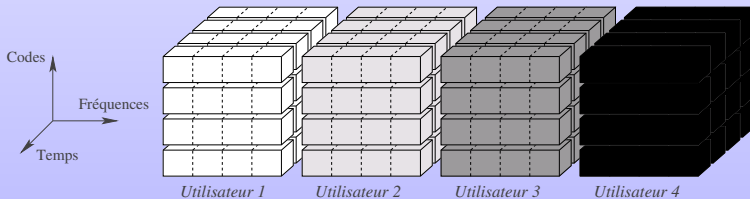




# Choix de la technique de transmission

## Chip mapping retenu

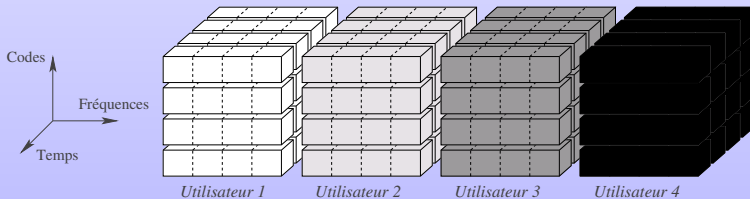
- Spread-Spectrum Multi-Carrier Multiple Access (SS-MC-MA)
  - ▶ Mode d'accès multiple : FDMA
  - ▶ Mode de multiplexage des données : CDMA selon l'axe fréquentiel



# Choix de la technique de transmission

## Chip mapping retenu

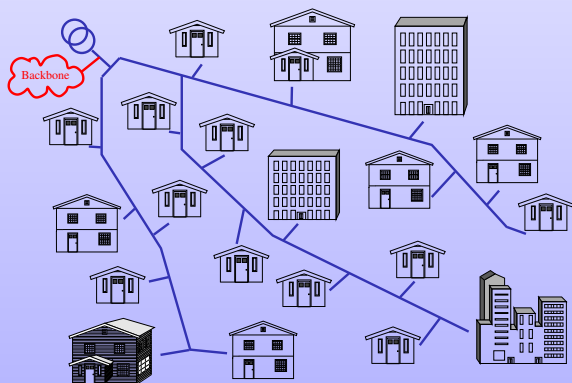
- Spread-Spectrum Multi-Carrier Multiple Access (SS-MC-MA)
  - ▶ Mode d'accès multiple : FDMA
  - ▶ Mode de multiplexage des données : CDMA selon l'axe fréquentiel



**Attention** : sous-porteuses d'un bloc non-nécessairement adjacentes !

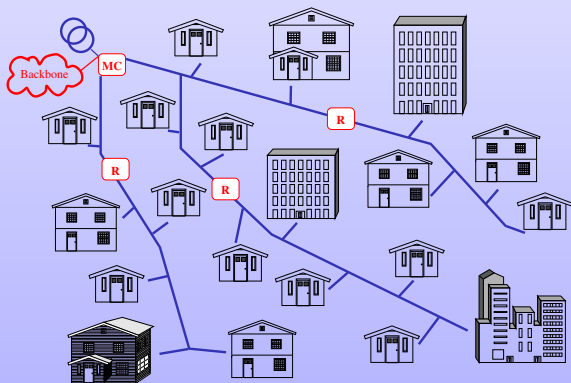
# Structure du réseau

- Utilisation d'un **modem central** (MC)
- Utilisation de **répéteurs** (R)



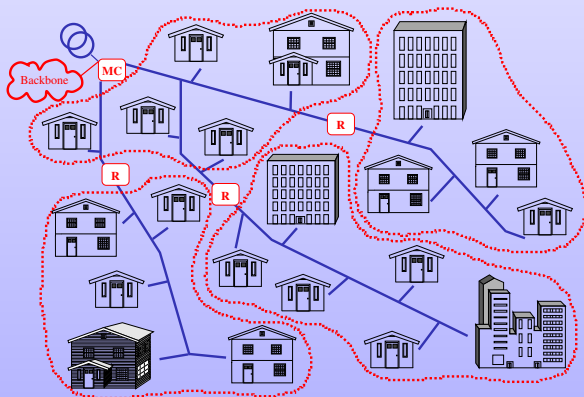
# Structure du réseau

- Utilisation d'un **modem central** (MC)
- Utilisation de **répéteurs** (R)



# Structure du réseau

- Utilisation d'un **modem central** (MC)
- Utilisation de **répéteurs** (R)

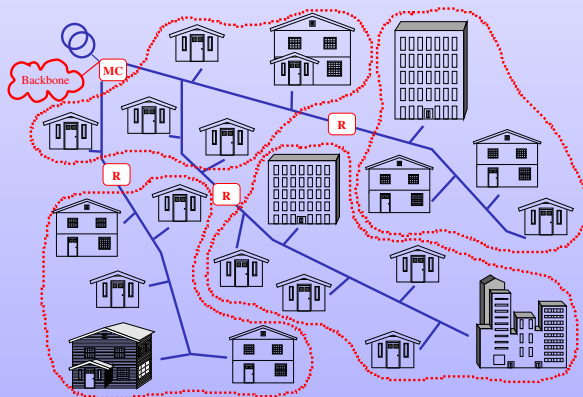


## Contexte multi-cellulaire

- ▶ Cellule MC
- ▶ Cellules R

# Structure du réseau

- Utilisation d'un **modem central** (MC)
- Utilisation de **répéteurs** (R)



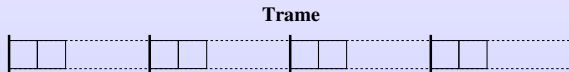
## Contexte multi-cellulaire

- ▶ Cellule MC
- ▶ Cellules R

## MC = maître

- ▶ **Impose le rythme**
- ▶ **Organise l'allocation des ressources**

# Proposition d'une trame d'échanges



- Mode de duplexage et de séparation des cellules : **TDD**

# Proposition d'une trame d'échanges

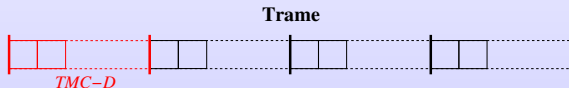
MC



R



M



- Mode de duplexage et de séparation des cellules : **TDD**



## Proposition d'une trame d'échanges

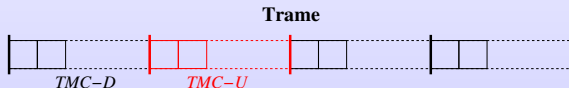
MC



R



M



- Mode de duplexage et de séparation des cellules : **TDD**

# Proposition d'une trame d'échanges

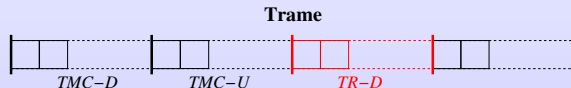
MC



R



M



- Mode de duplexage et de séparation des cellules : **TDD**

# Proposition d'une trame d'échanges

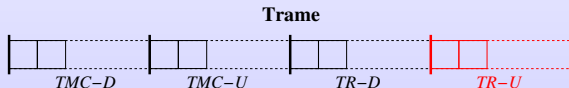
MC



R

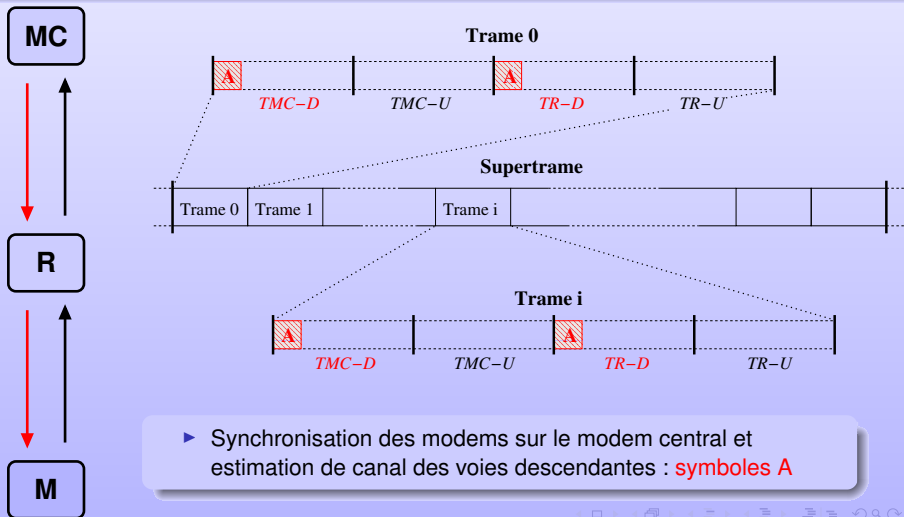


M

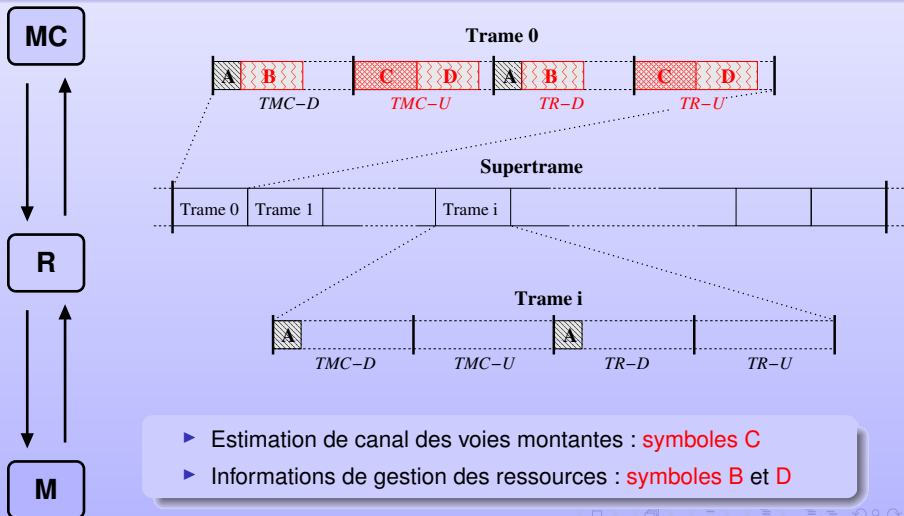


- Mode de duplexage et de séparation des cellules : **TDD**

## Proposition d'une trame d'échanges



## Proposition d'une trame d'échanges



# Paramètres du système

Bande occupée — $B$	20 MHz
Nombre de sous-porteuses — $N$	2048
Durée de l'intervalle de garde — $T_g$	15 $\mu$ s
Durée utile d'un symbole — $T_s$	102,4 $\mu$ s
Facteur d'étalement — $L$	variable $\leq 64$
Taille des trames — $M$	4 $\times$ 64 symboles
Taille des supertrames	variable

# Paramètres du système

Bande occupée — $B$	20 MHz
Nombre de sous-porteuses — $N$	2048
Durée de l'intervalle de garde — $T_g$	15 $\mu$ s
Durée utile d'un symbole — $T_s$	102,4 $\mu$ s
Facteur d'étalement — $L$	variable $\leq 64$
Taille des trames — $M$	4 $\times$ 64 symboles
Taille des supertrames	variable

- Partage du spectre entre les utilisateurs actifs (**SS-MC-MA**)

# Paramètres du système

Bande occupée — $B$	20 MHz
Nombre de sous-porteuses — $N$	2048
Durée de l'intervalle de garde — $T_g$	15 $\mu$ s
Durée utile d'un symbole — $T_s$	102,4 $\mu$ s
Facteur d'étalement — $L$	variable $\leq 64$
Taille des trames — $M$	4 $\times$ 64 symboles
Taille des supertrames	variable

- Partage du spectre entre les utilisateurs actifs (**SS-MC-MA**)
- Intervalle de garde : **perte de 12,8 %**
  - Absorption des échos du canal ( $\leq 5 \mu$ s)
  - Absorption des temps de propagation ( $\leq 6 \mu$ s)



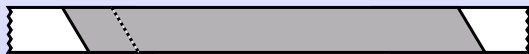
# Paramètres du système

Bande occupée — $B$	20 MHz
Nombre de sous-porteuses — $N$	2048
Durée de l'intervalle de garde — $T_g$	15 $\mu$ s
Durée utile d'un symbole — $T_s$	102,4 $\mu$ s
Facteur d'étalement — $L$	variable $\leq 64$
Taille des trames — $M$	4 $\times$ 64 symboles
Taille des supertrames	variable

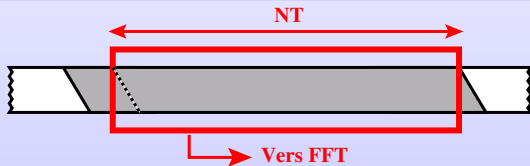
- Partage du spectre entre les utilisateurs actifs (**SS-MC-MA**)
- Intervalle de garde : **perte de 12,8 %**
  - Absorption des échos du canal ( $\leq 5 \mu$ s)
  - Absorption des temps de propagation ( $\leq 6 \mu$ s)
- Canal supposé constant pendant une supertrame

## Partie III : Procédés de synchronisation et d'estimation de canal

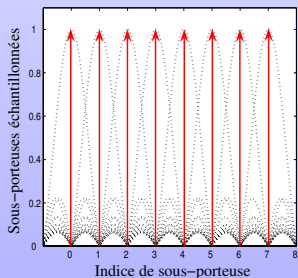
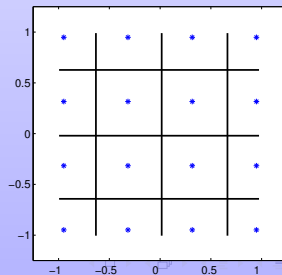
# Principe de la synchronisation en OFDM



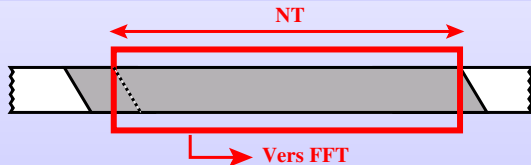
# Principe de la synchronisation en OFDM



$$\Rightarrow \mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{b}$$


 $\Rightarrow$ 


# Principe de la synchronisation en OFDM

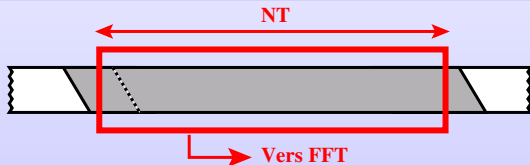


$$\Rightarrow \mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{b}$$

## Mauvaise acquisition du *timing*

- Décalage de fenêtre FFT :  $\epsilon_t$
- Décalage d'horloge :  $T' = (1 + \epsilon_t)T$

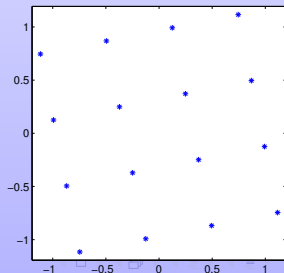
# Principe de la synchronisation en OFDM



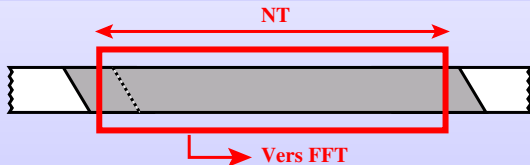
$$\Rightarrow \mathbf{y} = \Theta(\epsilon_t) \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{b}$$

## Mauvaise acquisition du *timing*

- Décalage de fenêtre FFT :  $\epsilon_t$ 
  - ▶ rotation des constellations
- Décalage d'horloge :  $T' = (1 + \epsilon_f)T$



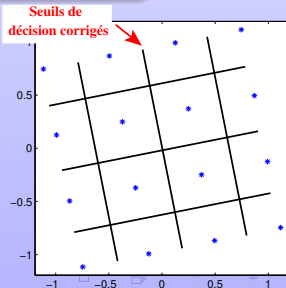
# Principe de la synchronisation en OFDM



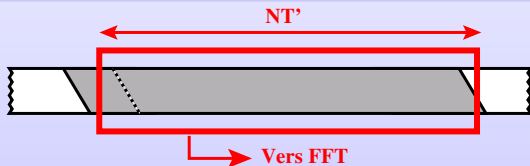
$$\Rightarrow \mathbf{y} = \Theta(\epsilon_t) \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{b}$$

## Mauvaise acquisition du *timing*

- Décalage de fenêtre FFT :  $\epsilon_t$ 
  - ▶ rotation des constellations
- Décalage d'horloge :  $T' = (1 + \epsilon_f)T$



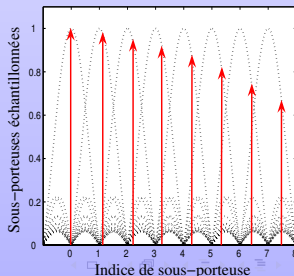
# Principe de la synchronisation en OFDM



$$\Rightarrow \mathbf{y} = \sum(\epsilon_f) \Theta(\epsilon_t) \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{b}$$

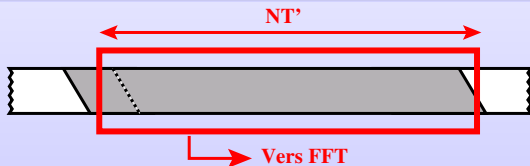
## Mauvaise acquisition du *timing*

- Décalage de fenêtre FFT :  $\epsilon_t$ 
  - ▶ rotation des constellations
- Décalage d'horloge :  $T' = (1 + \epsilon_f)T$ 
  - ▶ Interférence inter-porteuse (ICI)





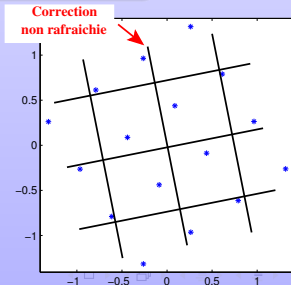
# Principe de la synchronisation en OFDM



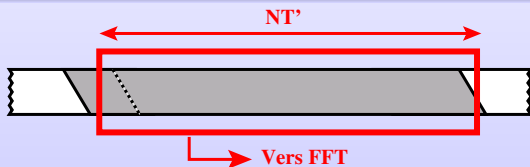
$$\Rightarrow \mathbf{y} = \mathbf{\Sigma}(\epsilon_f) \mathbf{\Theta}(m\epsilon_f) \mathbf{\Theta}(\epsilon_t) \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{b}$$

## Mauvaise acquisition du *timing*

- Décalage de fenêtre FFT :  $\epsilon_t$ 
  - ▶ rotation des constellations
- Décalage d'horloge :  $T' = (1 + \epsilon_f)T$ 
  - ▶ Interférence inter-porteuse (ICI)
  - ▶ **Dérive de fenêtre FFT**



# Principe de la synchronisation en OFDM



$$\Rightarrow \mathbf{y} = \mathbf{\Sigma}(\epsilon_f) \mathbf{\Theta}(m\epsilon_f) \mathbf{\Theta}(\epsilon_t) \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{b}$$

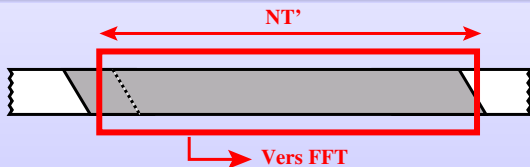
## Mauvaise acquisition du *timing*

- Décalage de fenêtre FFT :  $\epsilon_t$ 
  - ▶ rotation des constellations
- Décalage d'horloge :  $T' = (1 + \epsilon_f)T$ 
  - ▶ Interférence inter-porteuse (ICI)
  - ▶ Dérive de fenêtre FFT

## Objectifs

- Fenêtrage FFT :
  - ▶ contraintes faibles
- Réduction de l'ICI :
  - ▶  $\epsilon_f < qq$  ppm
- Limitation de la dérive :
  - $\epsilon_f \ll 1$  ppm

# Principe de la synchronisation en OFDM



$$\Rightarrow \mathbf{y} = \mathbf{\Sigma}(\epsilon_f) \mathbf{\Theta}(m\epsilon_f) \mathbf{\Theta}(\epsilon_t) \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{b}$$

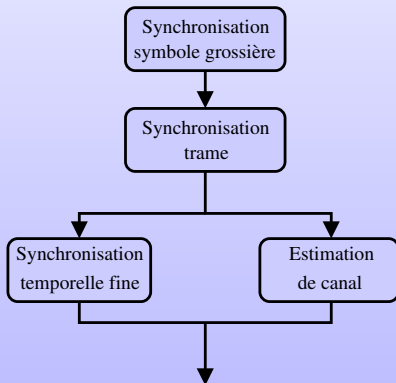
## Mauvaise acquisition du *timing*

- Décalage de fenêtre FFT :  $\epsilon_t$ 
  - ▶ rotation des constellations
- Décalage d'horloge :  $T' = (1 + \epsilon_f)T$ 
  - ▶ Interférence inter-porteuse (ICI)
  - ▶ Dérive de fenêtre FFT

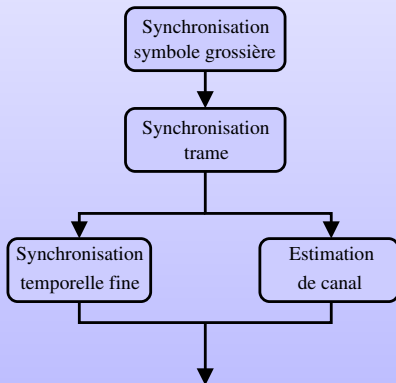
## Objectifs

- Fenêtrage FFT :
  - ▶ contraintes faibles
- Réduction de l'ICI :
  - ▶  $\epsilon_f < qq$  ppm
- Limitation de la dérive :
  - $\epsilon_f \ll 1$  ppm

# Procédure générale en voie descendante

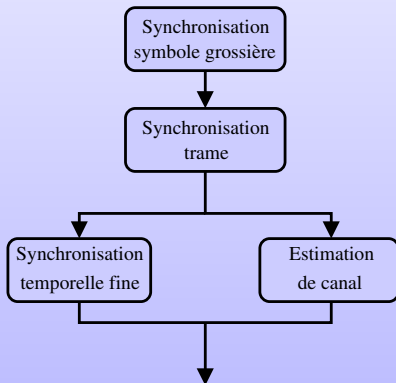


# Procédure générale en voie descendante



► Corrélation de l'intervalle de garde

# Procédure générale en voie descendante

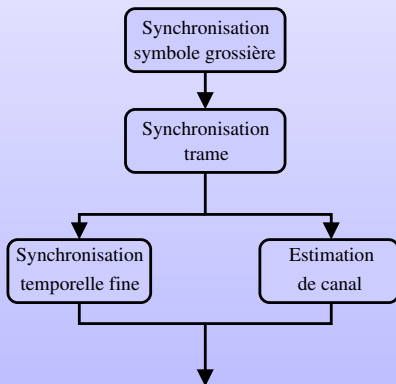


► Corrélation de l'intervalle de garde



► Repérage symbole A particulier

# Procédure générale en voie descendante



► Corrélation de l'intervalle de garde

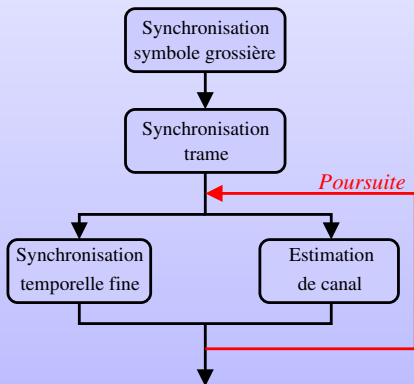


► Repérage symbole A particulier



► Exploitation du symbole A

# Procédure générale en voie descendante



► Corrélation de l'intervalle de garde



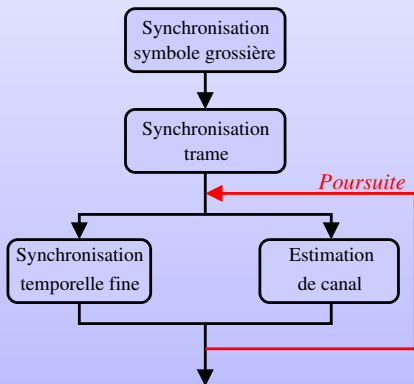
► Repérage symbole A particulier



► Exploitation du symbole A



# Procédure générale en voie descendante



► Corrélation de l'intervalle de garde



► Repérage symbole A particulier



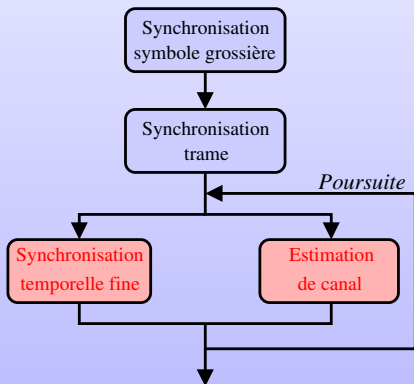
► Exploitation du symbole A



Approche temporelle

Approche fréquentielle

# Procédure générale en voie descendante



► Corrélation de l'intervalle de garde



► Repérage symbole A particulier



► Exploitation du symbole A



Approche temporelle

Approche fréquentielle

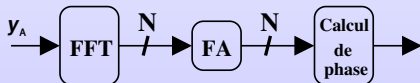
# Principes généraux des algorithmes développés

**Approche fréquentielle** : observation de la phase du symbole pilote

**Approche temporelle** : observation de la réponse impulsionnelle estimée

# Principes généraux des algorithmes développés

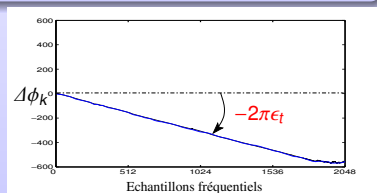
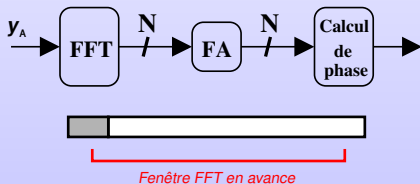
**Approche fréquentielle** : observation de la phase du symbole pilote



**Approche temporelle** : observation de la réponse impulsionnelle estimée

# Principes généraux des algorithmes développés

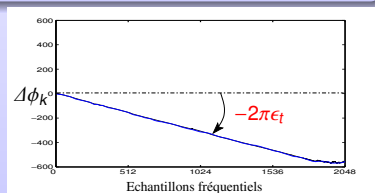
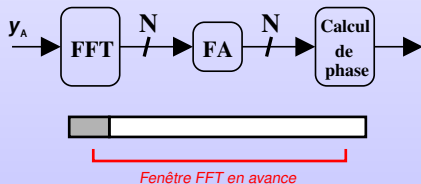
**Approche fréquentielle** : observation de la phase du symbole pilote



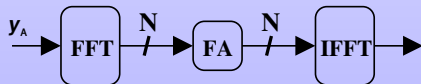
**Approche temporelle** : observation de la réponse impulsionnelle estimée

# Principes généraux des algorithmes développés

**Approche fréquentielle** : observation de la phase du symbole pilote

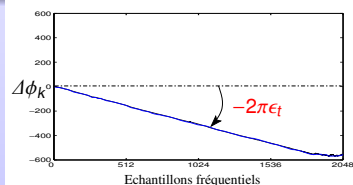
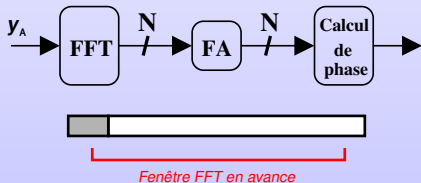


**Approche temporelle** : observation de la réponse impulsionnelle estimée

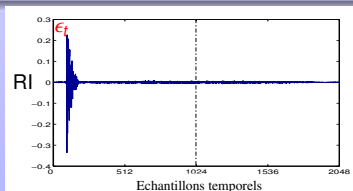
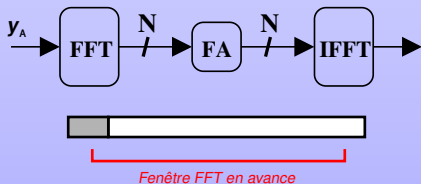


# Principes généraux des algorithmes développés

**Approche fréquentielle** : observation de la phase du symbole pilote

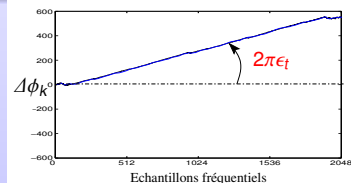
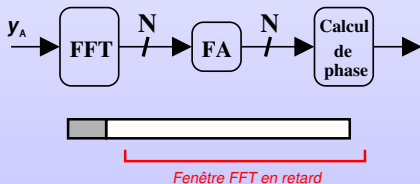


**Approche temporelle** : observation de la réponse impulsionnelle estimée

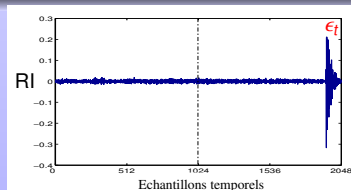
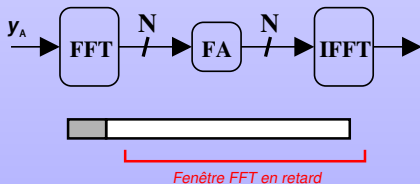


# Principes généraux des algorithmes développés

**Approche fréquentielle** : observation de la phase du symbole pilote



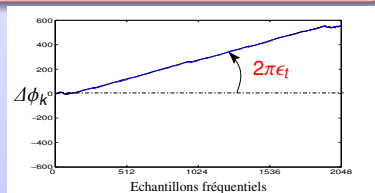
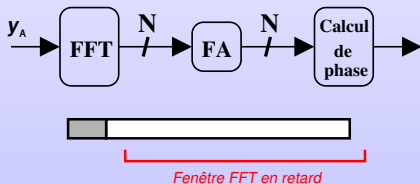
**Approche temporelle** : observation de la réponse impulsionnelle estimée



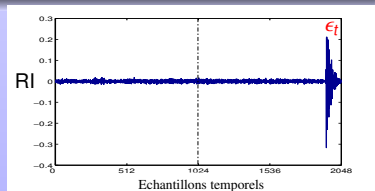
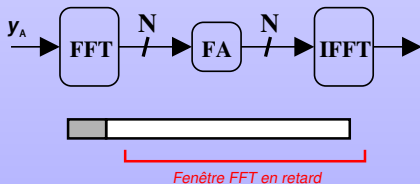


# Principes généraux des algorithmes développés

**Approche fréquentielle** : observation de la phase du symbole pilote



**Approche temporelle** : observation de la réponse impulsionnelle estimée



# Estimateur de décalage de fenêtre FFT

## Principe

Comparaison de phase entre les symboles pilotes **émis** et **reçus**

# Estimateur de décalage de fenêtre FFT

## Principe

Comparaison de phase entre les symboles pilotes **émis** et **reçus**

Application du critère  
ML sur l'observation de  
la phase



$$\hat{\epsilon}_t^{\text{LLS}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sum_{k=0}^{N-1} k \Delta\phi_k}{\sum_{k=0}^{N-1} k^2}, \quad \Delta\phi_k = \angle(y_k \bar{x}_k^A)$$

# Estimateur de décalage de fenêtre FFT

## Principe

Comparaison de phase entre les symboles pilotes **émis** et **reçus**

Application du critère  
ML sur l'observation de  
la phase



$$\hat{\epsilon}_t^{\text{LLS}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sum_{k=0}^{N-1} k \Delta\phi_k}{\sum_{k=0}^{N-1} k^2}, \quad \Delta\phi_k = \angle(y_k \bar{x}_k^A)$$



Estimateur des moindres carrés

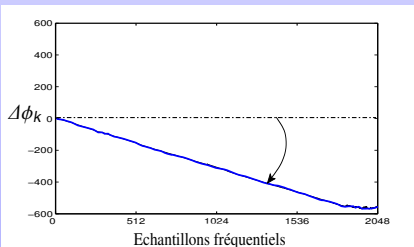
- ▶ Opération de régression linéaire

# Estimateur de décalage de fenêtre FFT

## Principe

Comparaison de phase entre les symboles pilotes **émis** et **reçus**

Application du critère  
ML sur l'observation de  
la phase  $\Rightarrow$



$$\hat{\epsilon}_t^{\text{LLS}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sum_{k=0}^{N-1} k \Delta\phi_k}{\sum_{k=0}^{N-1} k^2}, \quad \Delta\phi_k = \angle(y_k \bar{x}_k^A)$$



Estimateur des moindres carrés

- ▶ Opération de régression linéaire

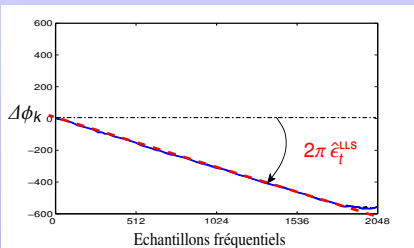


# Estimateur de décalage de fenêtre FFT

## Principe

Comparaison de phase entre les symboles pilotes **émis** et **reçus**

Application du critère  
ML sur l'observation de  
la phase  $\Rightarrow$



$$\hat{\epsilon}_t^{\text{LLS}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sum_{k=0}^{N-1} k \Delta\phi_k}{\sum_{k=0}^{N-1} k^2}, \quad \Delta\phi_k = \angle(y_k \bar{x}_k^A)$$



Estimateur des moindres carrés

- ▶ Opération de régression linéaire



# Estimateur de décalage de fréquence d'échantillonnage

## Principe

Comparaison de phase entre deux symboles pilotes **successifs reçus**

# Estimateur de décalage de fréquence d'échantillonnage

## Principe

Comparaison de phase entre deux symboles pilotes **successifs reçus**

Application du critère  
ML sur l'observation de  
la phase



$$\hat{\epsilon}_f^{\text{MLS}} = \frac{1}{2\pi} \frac{N}{M(N+D)+D} \frac{\sum_{k=0}^{N-1} k \Delta\varphi_k}{\sum_{k=0}^{N-1} k^2},$$
$$\Delta\varphi_k = \angle(y_k(p) \bar{y}_k(p-1))$$



# Estimateur de décalage de fréquence d'échantillonnage

## Principe

Comparaison de phase entre deux symboles pilotes **successifs reçus**

Application du critère  
ML sur l'observation de  
la phase



$$\hat{\epsilon}_f^{\text{LLS}} = \frac{1}{2\pi} \frac{N}{M(N+D)+D} \frac{\sum_{k=0}^{N-1} k \Delta\varphi_k}{\sum_{k=0}^{N-1} k^2},$$
$$\Delta\varphi_k = \angle(y_k(p) \bar{y}_k(p-1))$$



Estimateur des moindres carrés

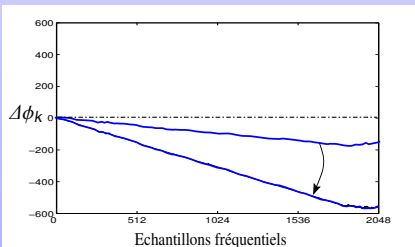
- ▶ **Opération de régression linéaire**

# Estimateur de décalage de fréquence d'échantillonnage

## Principe

Comparaison de phase entre deux symboles pilotes **successifs reçus**

Application du critère  
ML sur l'observation de  
la phase



$$\hat{\epsilon}_f^{\text{LLS}} = \frac{1}{2\pi} \frac{N}{M(N+D)+D} \frac{\sum_{k=0}^{N-1} k \Delta\varphi_k}{\sum_{k=0}^{N-1} k^2},$$

$$\Delta\varphi_k = \angle(y_k(p) \bar{y}_k(p-1))$$



Estimateur des moindres carrés

- ▶ Opération de régression linéaire

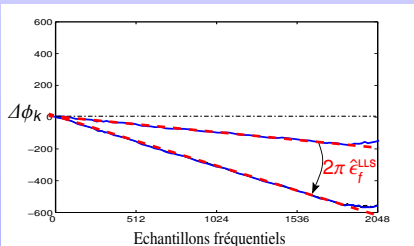


# Estimateur de décalage de fréquence d'échantillonnage

## Principe

Comparaison de phase entre deux symboles pilotes **successifs reçus**

Application du critère  
ML sur l'observation de  
la phase  $\Rightarrow$



$$\hat{\epsilon}_f^{\text{LLS}} = \frac{1}{2\pi} \frac{N}{M(N+D)+D} \frac{\sum_{k=0}^{N-1} k \Delta\varphi_k}{\sum_{k=0}^{N-1} k^2},$$

$$\Delta\varphi_k = \angle(y_k(p) \bar{y}_k(p-1))$$

Estimateur des moindres carrés

- ▶ Opération de régression linéaire

# Estimation de canal

## Principe

Estimation fréquentielle sous-porteuse par sous-porteuse

# Estimation de canal

## Principe

### Estimation fréquentielle sous-porteuse par sous-porteuse

Correction de la sortie du filtre  
adapté  $\Psi$



$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{h}}_f^{\text{LS}} &= \Theta^H(\hat{\epsilon}_t) \Sigma^{-1}(\hat{\epsilon}_f) \Psi \\ &\approx \Theta^H(\hat{\epsilon}_t) \Theta^H(\hat{\epsilon}_f) \Psi \quad \epsilon_f \ll 1\end{aligned}$$

# Estimation de canal

## Principe

Estimation fréquentielle sous-porteuse par sous-porteuse

Correction de la sortie du filtre  
adapté  $\Psi$



$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{h}}_f^{\text{LS}} &= \Theta^H(\hat{\epsilon}_t) \Sigma^{-1}(\hat{\epsilon}_f) \Psi \\ &\approx \Theta^H(\hat{\epsilon}_t) \Theta^H(\hat{\epsilon}_f) \Psi \quad \epsilon_f \ll 1\end{aligned}$$



## Remarque

- ▶ Solution sous-optimale  
mais peu coûteuse en  
terme de mise en œuvre

# Estimation de canal

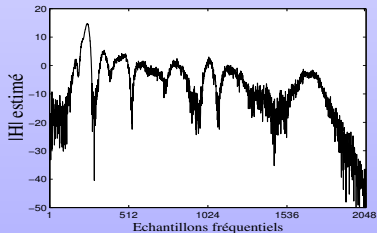
## Principe

Estimation fréquentielle sous-porteuse par sous-porteuse

Correction de la sortie du filtre  
adapté  $\Psi$



$$\begin{aligned}\hat{h}_f^{\text{LS}} &= \Theta^H(\hat{\epsilon}_t) \Sigma^{-1}(\hat{\epsilon}_f) \Psi \\ &\approx \Theta^H(\hat{\epsilon}_t) \Theta^H(\hat{\epsilon}_f) \Psi \quad \epsilon_f \ll 1\end{aligned}$$



## Remarque



- ▶ Solution sous-optimale  
mais peu coûteuse en  
terme de mise en œuvre

# Mise en œuvre du système bouclé

## Principe

Rafraîchissement des estimés à chaque nouveau symbole pilote  $p$  reçu



# Mise en œuvre du système bouclé

## Principe

Rafraîchissement des estimés à chaque nouveau symbole pilote  $p$  reçu

## Estimation conjointe

$$\begin{cases} \hat{\epsilon}_t(p) = \frac{1}{2\pi} \text{grad} [\angle \Psi_p] \\ \hat{\epsilon}_f(p) = \frac{1}{2\pi} \frac{N}{M(N+D)+D} \text{grad} \left[ \angle \left( \hat{\mathbf{H}}_{p-1}^H \Psi_p \right) \right] \\ \hat{\mathbf{H}}_p = \text{diag} \left[ \Theta^H(\hat{\epsilon}_t(p)) \Theta^H(\hat{\epsilon}_f(p)) \Psi_p \right] \end{cases}$$

# Mise en œuvre du système bouclé

## Principe

Rafraîchissement des estimés à chaque nouveau symbole pilote  $p$  reçu

## Estimation conjointe

$$\begin{cases} \hat{\epsilon}_t(p) = \frac{1}{2\pi} \text{grad} [\angle \Psi_p] \\ \hat{\epsilon}_f(p) = \frac{1}{2\pi} \frac{N}{M(N+D)+D} \text{grad} \left[ \angle \left( \hat{\mathbf{H}}_{p-1}^H \Psi_p \right) \right] \\ \hat{\mathbf{H}}_p = \text{diag} \left[ \Theta^H(\hat{\epsilon}_t(p)) \Theta^H(\hat{\epsilon}_f(p)) \Psi_p \right] \end{cases}$$

+

## Poursuite ( $\epsilon_f < 1$ ppm)

- ▶ Filtrage de la commande de l'oscillateur local (VCO)
- ▶ Moyennage de l'estimation de canal

# Mise en œuvre du système bouclé

## Principe

Rafraîchissement des estimés à chaque nouveau symbole pilote  $p$  reçu

## Estimation conjointe

$$\begin{cases} \hat{\epsilon}_t(p) = \frac{1}{2\pi} \text{grad} [\angle \Psi_p] \\ \hat{\epsilon}_f(p) = \frac{1}{2\pi} \frac{N}{M(N+D)+D} \text{grad} \left[ \angle \left( \hat{\mathbf{H}}_{p-1}^H \Psi_p \right) \right] \\ \hat{\mathbf{H}}_p = \text{diag} \left[ \Theta^H(\hat{\epsilon}_t(p)) \Theta^H(\hat{\epsilon}_f(p)) \Psi_p \right] \end{cases}$$

+

## Poursuite ( $\epsilon_f < 1$ ppm)

- ▶ Filtrage de la commande de l'oscillateur local (VCO)
- ▶ Moyennage de l'estimation de canal

⇒ Les trois estimateurs exploitent la sortie du filtre adapté

# Amélioration des estimateurs

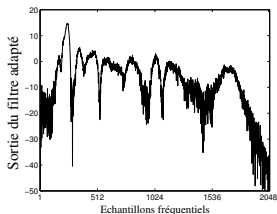
## Première amélioration

Filtrage de la sortie du filtre adapté

# Amélioration des estimateurs

## Première amélioration

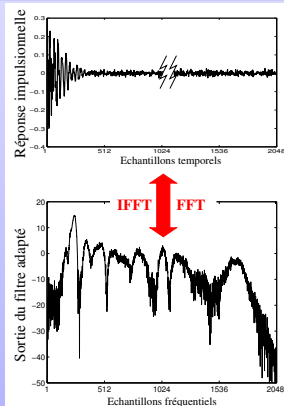
Filtrage de la sortie du filtre adapté



# Amélioration des estimateurs

## Première amélioration

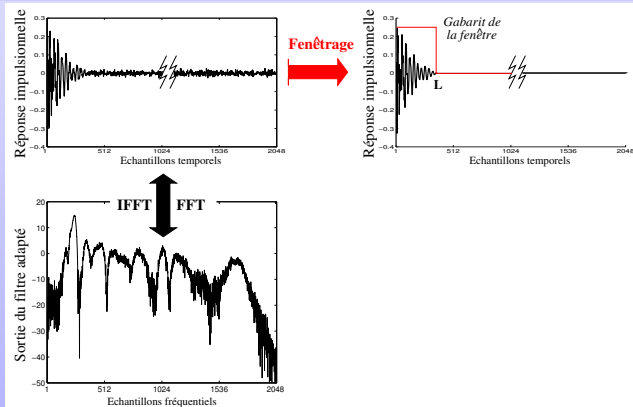
### Filtrage de la sortie du filtre adapté



# Amélioration des estimateurs

## Première amélioration

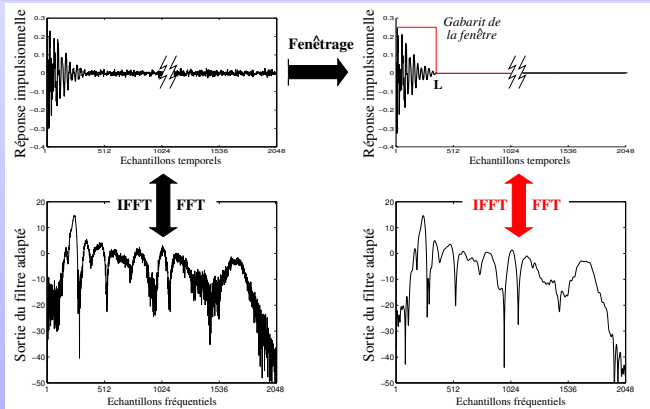
### Filtrage de la sortie du filtre adapté



# Amélioration des estimateurs

## Première amélioration

### Filtrage de la sortie du filtre adapté

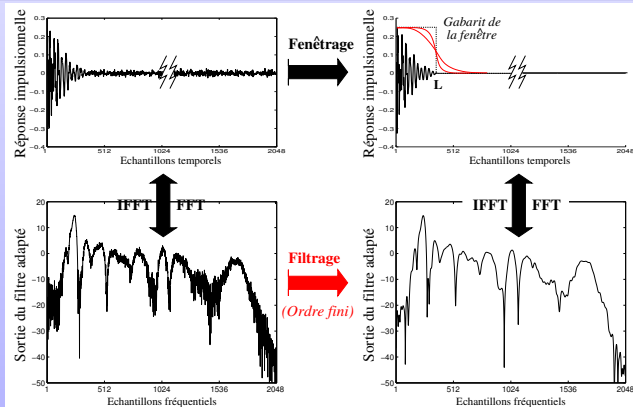




# Amélioration des estimateurs

## Première amélioration

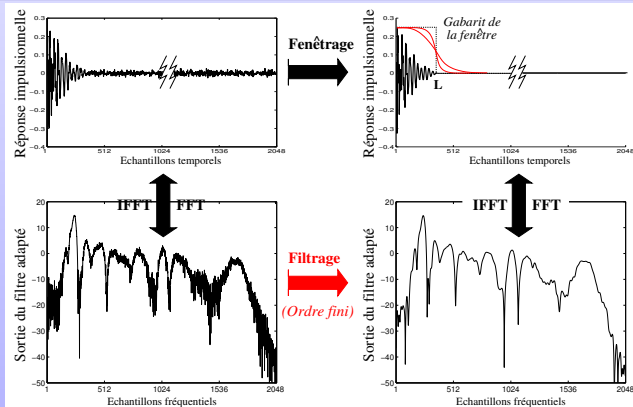
### Filtrage de la sortie du filtre adapté



# Amélioration des estimateurs

## Première amélioration

Filtrage de la sortie du filtre adapté  $\Rightarrow$  limitation des effets du bruit



# Amélioration des estimateurs

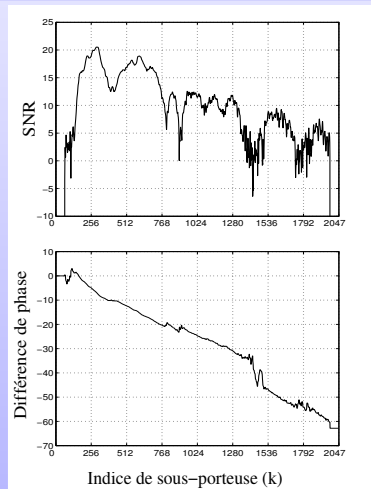
## Deuxième amélioration

Sélection des « meilleures » sous-porteuses

# Amélioration des estimateurs

## Deuxième amélioration

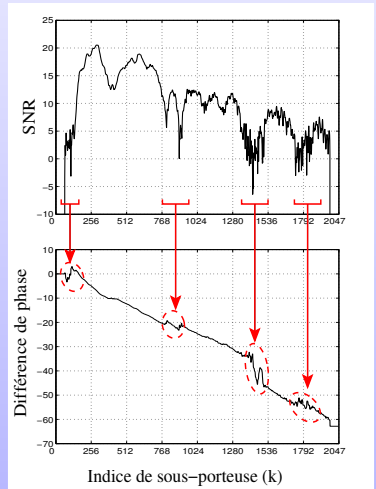
Sélection des « meilleures » sous-porteuses



# Amélioration des estimateurs

## Deuxième amélioration

Sélection des « meilleures » sous-porteuses



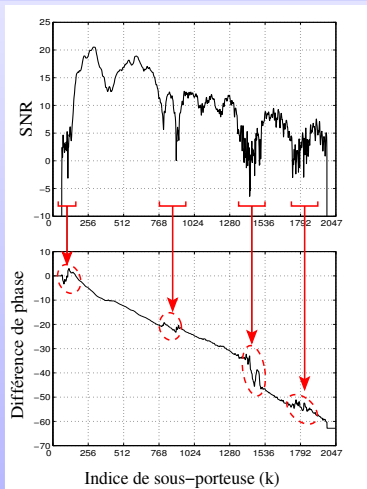
# Amélioration des estimateurs

## Deuxième amélioration

Sélection des « meilleures » sous-porteuses

$$\text{var} [\hat{\epsilon}_t] \propto \frac{9}{4\pi^2 N^6} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{k^2}{\text{SNR}_k}$$

$$\text{var} [\hat{\epsilon}_f] \propto \frac{9}{2\pi^2 N^6 M^2} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{k^2}{\text{SNR}_k}$$



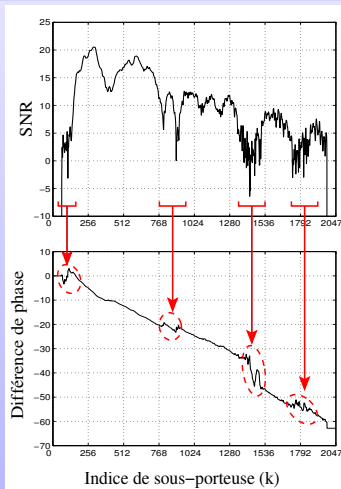
# Amélioration des estimateurs

## Deuxième amélioration

Sélection des « meilleures » sous-porteuses

$$\text{var} [\hat{\epsilon}_t] \propto \frac{9}{4\pi^2 N^6} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{k^2}{\text{SNR}_k}$$

$$\text{var} [\hat{\epsilon}_f] \propto \frac{9}{2\pi^2 N^6 M^2} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{k^2}{\text{SNR}_k}$$



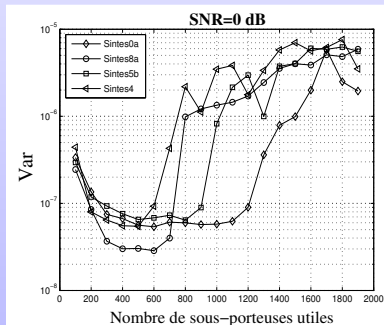
# Amélioration des estimateurs

## Deuxième amélioration

Sélection des « meilleures » sous-porteuses

$$\text{var} [\hat{\epsilon}_t] \propto \frac{9}{4\pi^2 N^6} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{k^2}{\text{SNR}_k}$$

$$\text{var} [\hat{\epsilon}_f] \propto \frac{9}{2\pi^2 N^6 M^2} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{k^2}{\text{SNR}_k}$$





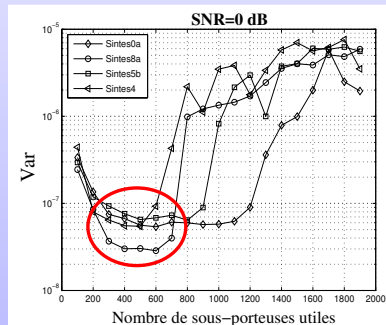
## Amélioration des estimateurs

### Deuxième amélioration

Sélection des « meilleures » sous-porteuses

$$\text{var} [\hat{\epsilon}_t] \propto \frac{9}{4\pi^2 N^6} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{k^2}{\text{SNR}_k}$$

$$\text{var} [\hat{\epsilon}_f] \propto \frac{9}{2\pi^2 N^6 M^2} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{k^2}{\text{SNR}_k}$$



# Amélioration des estimateurs

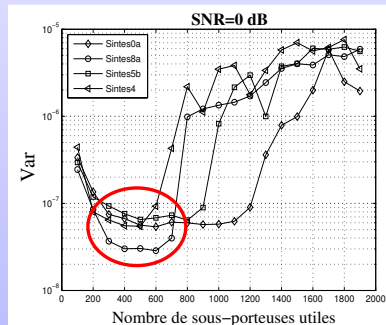
## Deuxième amélioration

Sélection des « meilleures » sous-porteuses

$$\text{var} [\hat{\epsilon}_t] \propto \frac{9}{4\pi^2 N^6} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{k^2}{\text{SNR}_k}$$

$$\text{var} [\hat{\epsilon}_f] \propto \frac{9}{2\pi^2 N^6 M^2} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{k^2}{\text{SNR}_k}$$

Compromis choisis dans notre cas :  
sélection des 500 meilleures sous-porteuses  
parmi 2048 disponibles



## Extension au cas multicellulaire

- **Rappel** : même symbole pilote A exploité par l'ensemble des cellules R
  - ▶ Problème pour l'estimation de canal

# Extension au cas multicellulaire

- **Rappel** : même symbole pilote A exploité par l'ensemble des cellules R
  - ▶ Problème pour l'estimation de canal

## Principe

Partager les sous-porteuses du symbole A entre les différentes cellules R

# Extension au cas multicellulaire

- **Rappel** : même symbole pilote A exploité par l'ensemble des cellules R
  - ▶ Problème pour l'estimation de canal

## Principe

Partager les sous-porteuses du symbole A entre les différentes cellules R

Sous-porteuses pilotes  
attribuées à la cellule  $q$  :

$$\boldsymbol{\gamma}^{(q)} = [\gamma_j^{(q)} \dots \gamma_J^{(q)}]$$

# Extension au cas multicellulaire

- **Rappel** : même symbole pilote A exploité par l'ensemble des cellules R
  - ▶ Problème pour l'estimation de canal

## Principe

Partager les sous-porteuses du symbole A entre les différentes cellules R

Sous-porteuses pilotes  
attribuées à la cellule  $q$  :

$$\mathbf{\Upsilon}^{(q)} = [\gamma_j^{(q)} \dots \gamma_J^{(q)}]$$

Calcul du filtre  
adapté sur  $\mathbf{\Upsilon}^{(q)}$

# Extension au cas multicellulaire

- **Rappel** : même symbole pilote A exploité par l'ensemble des cellules R
  - ▶ Problème pour l'estimation de canal

## Principe

Partager les sous-porteuses du symbole A entre les différentes cellules R

Sous-porteuses pilotes  
attribuées à la cellule  $q$  :

$$\mathbf{\Upsilon}^{(q)} = [\Upsilon_j^{(q)} \dots \Upsilon_J^{(q)}]$$

Calcul du filtre  
adapté sur  $\mathbf{\Upsilon}^{(q)}$



Interpolation  
(filtrage passe-bas)

# Extension au cas multicellulaire

- **Rappel** : même symbole pilote A exploité par l'ensemble des cellules R
  - ▶ Problème pour l'estimation de canal

## Principe

Partager les sous-porteuses du symbole A entre les différentes cellules R

Sous-porteuses pilotes  
attribuées à la cellule  $q$  :

$$\mathbf{\Upsilon}^{(q)} = [\gamma_j^{(q)} \dots \gamma_J^{(q)}]$$

Calcul du filtre  
adapté sur  $\mathbf{\Upsilon}^{(q)}$



Interpolation  
(filtrage passe-bas)

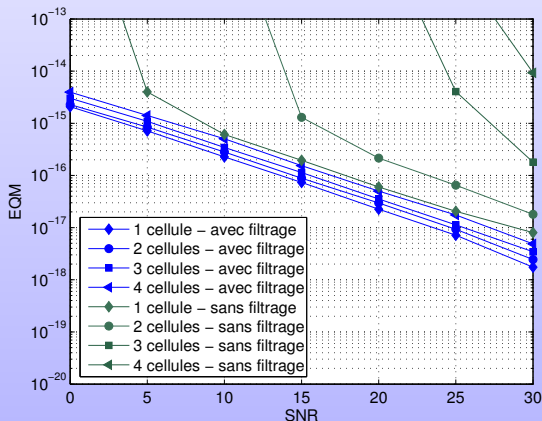


Mise en œuvre des  
algorithmes  
monocellulaires



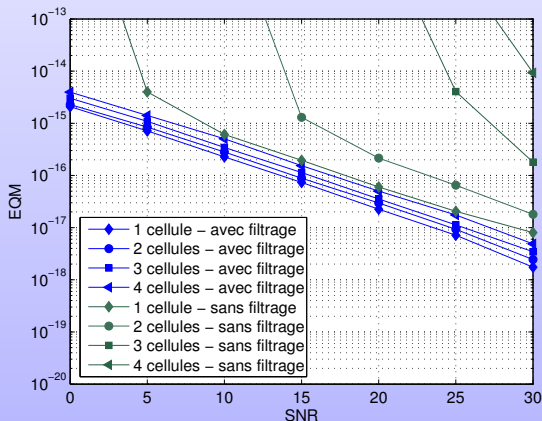
# Estimation de la fréquence d'échantillonnage

## Contexte multicellulaire



# Estimation de la fréquence d'échantillonnage

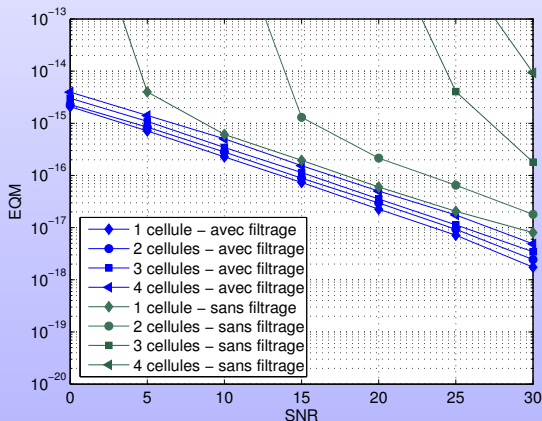
## Contexte multicellulaire



- Apport du filtrage
- Dégradation faible lorsque le nombre de cellules augmente

# Estimation de la fréquence d'échantillonnage

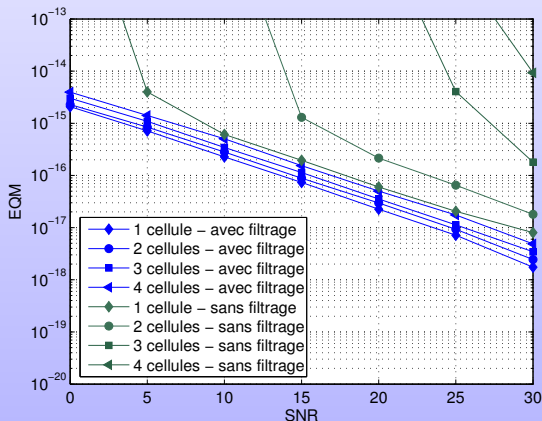
## Contexte multicellulaire



- ▶ Apport du filtrage
- ▶ Dégradation faible lorsque le nombre de cellules augmente
- ▶ Résultats pour  $[0 ; 30]$  dB :  $4 \cdot 10^{-15} \leq \epsilon_f \leq 5 \cdot 10^{-18}$

# Estimation de la fréquence d'échantillonnage

## Contexte multicellulaire

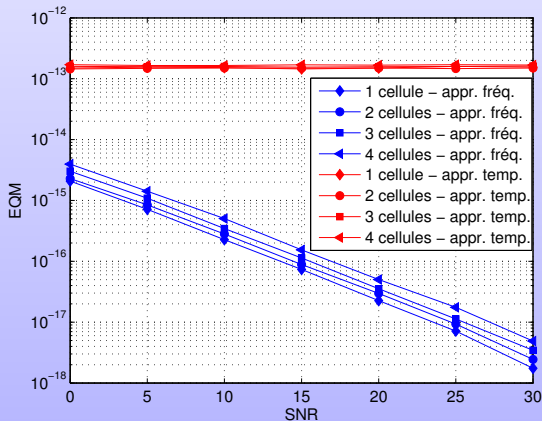


- ▶ Apport du filtrage
- ▶ Dégradation faible lorsque le nombre de cellules augmente
- ▶ Résultats pour  $[0 ; 30]$  dB :  $4 \cdot 10^{-15} \leq \epsilon_f \leq 5 \cdot 10^{-18}$

⇒ Dégradation du TES inférieure à 0,1 dB pour des MAQ d'ordres 2 à 10

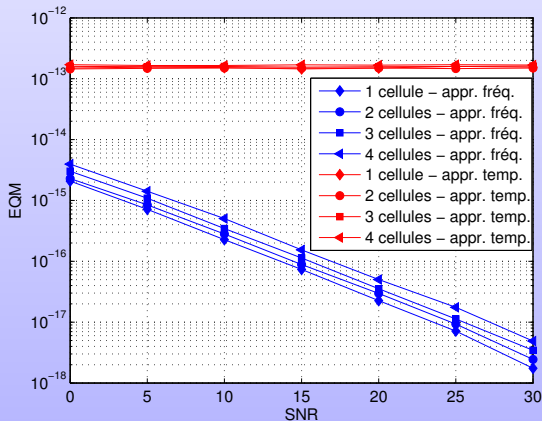
# Estimation de la fréquence d'échantillonnage

## ● Comparaison avec l'approche temporelle



# Estimation de la fréquence d'échantillonnage

## ● Comparaison avec l'approche temporelle



► Approche temporelle :

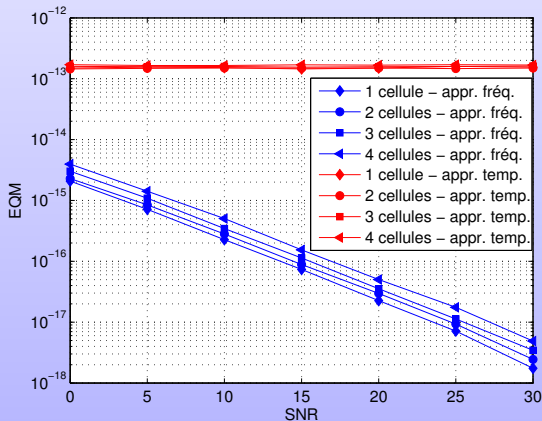
$$\epsilon_f \approx 1,5 \cdot 10^{-13} \quad \forall \text{SNR}$$

► Approche fréquentielle :

$$4 \cdot 10^{-15} \leq \epsilon_f \leq 5 \cdot 10^{-18}$$

# Estimation de la fréquence d'échantillonnage

## ● Comparaison avec l'approche temporelle



► Approche temporelle :

$$\epsilon_f \approx 1,5 \cdot 10^{-13} \quad \forall \text{SNR}$$

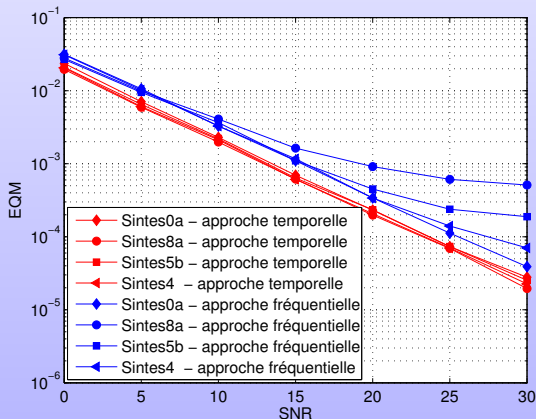
► Approche fréquentielle :

$$4 \cdot 10^{-15} \leq \epsilon_f \leq 5 \cdot 10^{-18}$$

Faible résolution de l'estimateur temporel basé sur la détection de la position du trajet principal de la RI (espace discret)

# Estimation de la fonction de transfert du canal

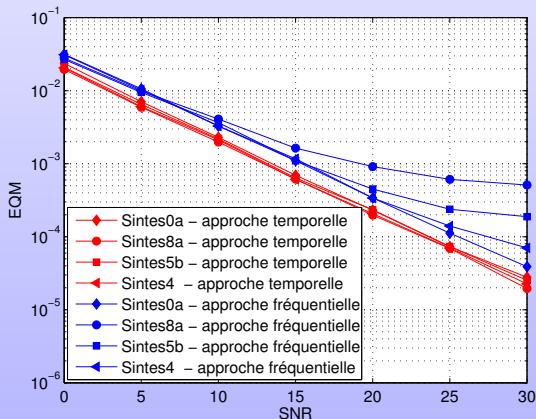
## Contexte monocellulaire





# Estimation de la fonction de transfert du canal

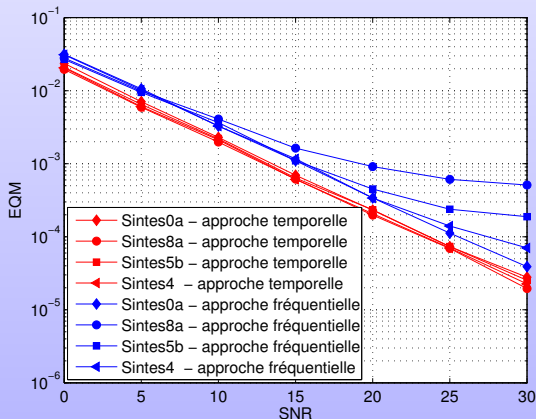
## Contexte monocellulaire



- Approche temporelle : décroissance en  $1/\text{SNR}$
- Approche fréquentielle : résultats différents selon canaux

# Estimation de la fonction de transfert du canal

## Contexte monocellulaire

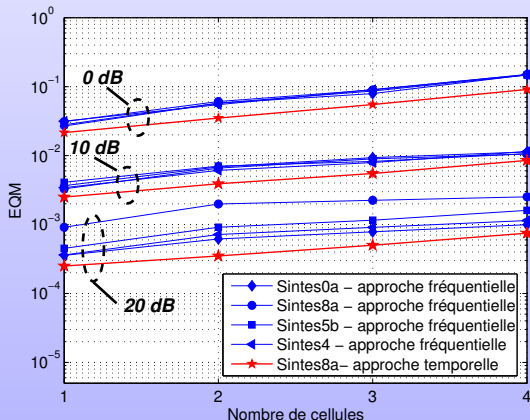


- Approche temporelle : **décroissance en  $1/\text{SNR}$**
- Approche fréquentielle : **résultats différents selon canaux**

Utilisation d'un filtre limité à 30 coefficients dans l'approche fréquentielle

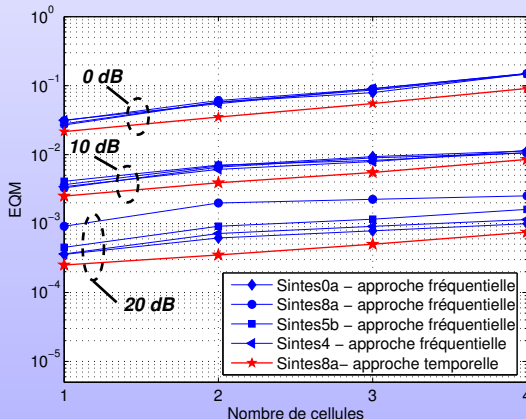
# Estimation de la fonction de transfert du canal

## Contexte multicellulaire



# Estimation de la fonction de transfert du canal

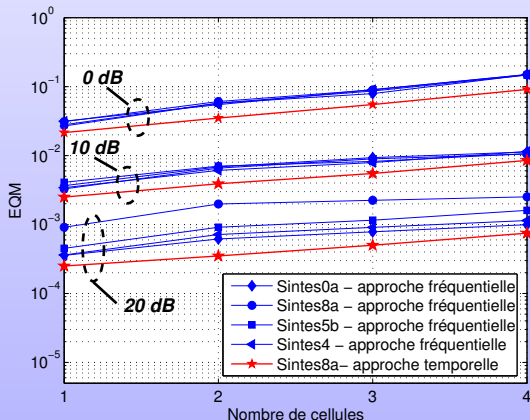
## Contexte multicellulaire



- ▶ Dégradation lorsque le nombre de cellules augmente
- ▶ Même comportement pour les deux approches

# Estimation de la fonction de transfert du canal

## Contexte multicellulaire



- ▶ Dégradation lorsque le nombre de cellules augmente
- ▶ Même comportement pour les deux approches

L'approche temporelle offre les meilleurs résultats au prix de deux FFT supplémentaires

# Bilan

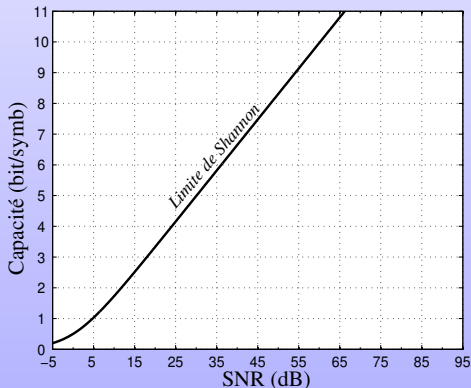
- Étude de deux approches, temporelle et fréquentielle, d'estimation conjointe
  - ▶ du décalage de fenêtre FFT
  - ▶ du décalage de fréquence d'horloge
  - ▶ de la fonction de transfert du canal
- Approche fréquentielle : proposition de nouveaux algorithmes conjoints basés sur l'observation d'un symbole pilote unique par trame
  - ▶ Optimisation des estimateurs
  - ▶ Adaptation au contexte multicellulaire
- Comparaisons des performances des deux approches
  - ▶ Atout de l'approche fréquentielle : très bon résultats en synchronisation d'horloge
  - ▶ Atout de l'approche temporelle : meilleurs résultats en estimation de canal

## Partie IV : Procédés d'allocation dynamique des ressources

# Le principe des modulations adaptatives

Pour un canal plat en fréquence :

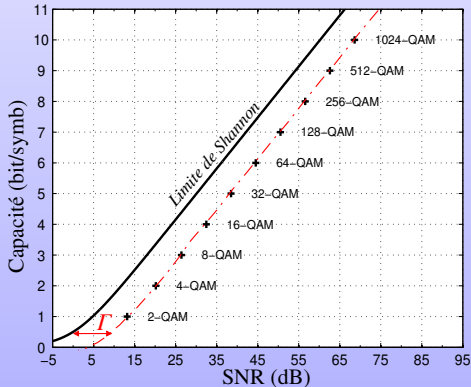
$$C = \log_2 (1 + \text{SNR})$$





# Le principe des modulations adaptatives

Pour un canal plat en fréquence :

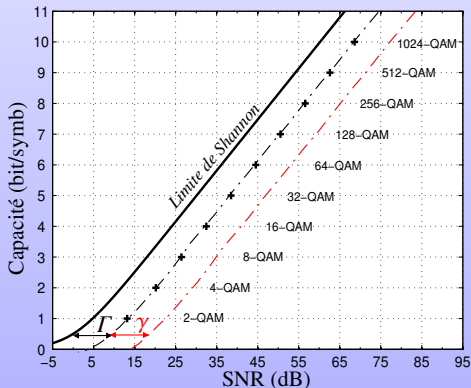


$$R = \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\Gamma} \text{SNR} \right)$$

- Modulation QAM à  $T_{es}$  fixé :
  - ▶ Marge de SNR :  $\Gamma$

# Le principe des modulations adaptatives

Pour un canal plat en fréquence :

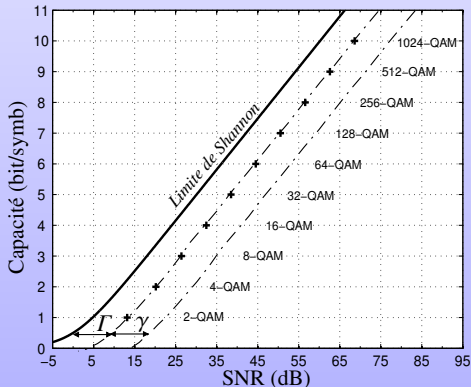


$$R = \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\Gamma \gamma} \text{SNR} \right)$$

- Modulation QAM à  $T_{es}$  fixé :
  - ▶ Marge de SNR :  $\Gamma$
- Marge supplémentaire :
  - ▶ Marge de bruit :  $\gamma$

# Le principe des modulations adaptatives

Pour un canal plat en fréquence :



$$R = \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\Gamma \gamma} \text{SNR} \right)$$

- Modulation QAM à  $T_{es}$  fixé :
  - ▶ Marge de SNR :  $\Gamma$
- Marge supplémentaire :
  - ▶ Marge de bruit :  $\gamma$

Choix de la modulation adéquate en fonction du SNR

## Applications à l'OFDM (ou DMT)

### Rappel sur l'OFDM

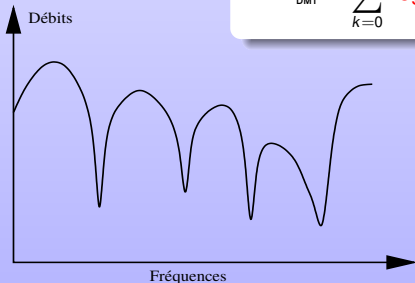
Partage du spectre en sous-bandes sur lesquelles le canal est localement plat en fréquence

## Applications à l'OFDM (ou DMT)

### Rappel sur l'OFDM

Partage du spectre en sous-bandes sur lesquelles le canal est localement plat en fréquence

$$R_{\text{DMT}} = \sum_{k=0}^{N-1} \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\Gamma \gamma} \text{SNR}_k \right)$$

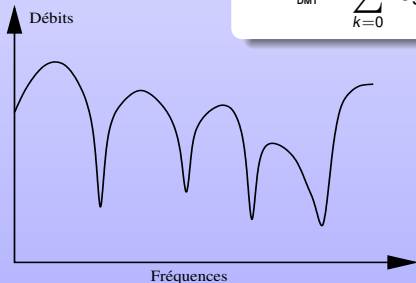


## Applications à l'OFDM (ou DMT)

### Rappel sur l'OFDM

Partage du spectre en sous-bandes sur lesquelles le canal est localement plat en fréquence

$$R_{\text{DMT}} = \sum_{k=0}^{N-1} \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\Gamma \gamma} \frac{h_k P_k}{P_{N_0}} \right)$$



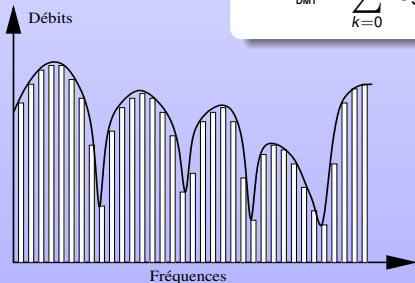
## Applications à l'OFDM (ou DMT)

### Rappel sur l'OFDM

Partage du spectre en sous-bandes sur lesquelles le canal est localement plat en fréquence

$$R_{\text{DMT}} = \sum_{k=0}^{N-1} \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\Gamma \gamma} \frac{h_k P_k}{P_{N_0}} \right)$$

- ▶ Maximisation du débit  $R$  pour  $\gamma$  fixée

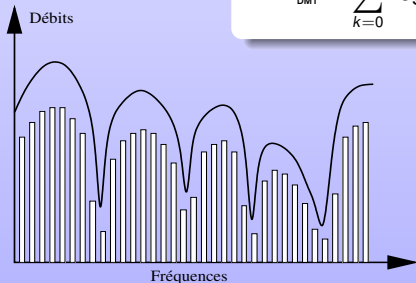


## Applications à l'OFDM (ou DMT)

### Rappel sur l'OFDM

Partage du spectre en sous-bandes sur lesquelles le canal est localement plat en fréquence

$$R_{\text{DMT}} = \sum_{k=0}^{N-1} \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\Gamma \gamma} \frac{h_k P_k}{P_{N_0}} \right)$$



- ▶ Maximisation du débit  $R$  pour  $\gamma$  fixée

ou

- ▶ Maximisation de la marge  $\gamma$  pour  $R$  fixé

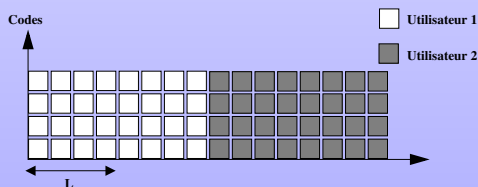


## Allocation dynamique en mode SS-MC-MA

**Exemple simple** : système SS-MC-MA à 2 utilisateurs auxquels on attribue deux blocs de  $L$  sous-porteuses chacun

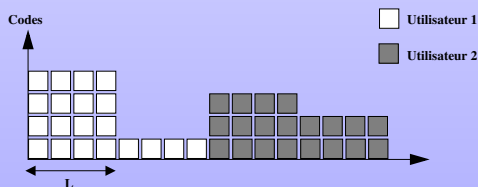
# Allocation dynamique en mode SS-MC-MA

**Exemple simple** : système SS-MC-MA à 2 utilisateurs auxquels on attribue deux blocs de  $L$  sous-porteuses chacun



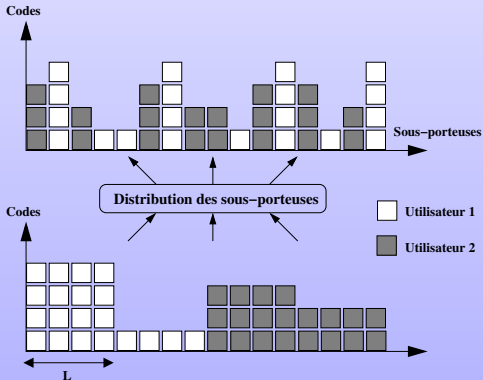
# Allocation dynamique en mode SS-MC-MA

**Exemple simple** : système SS-MC-MA à 2 utilisateurs auxquels on attribue deux blocs de  $L$  sous-porteuses chacun

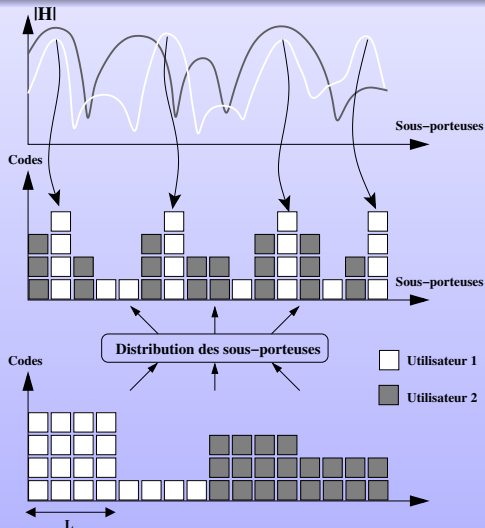


# Allocation dynamique en mode SS-MC-MA

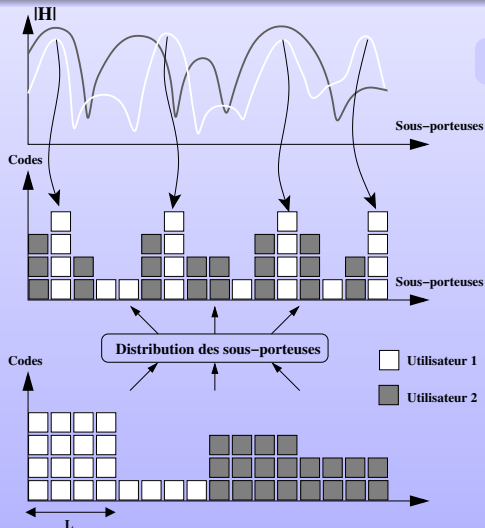
**Exemple simple** : système SS-MC-MA à 2 utilisateurs auxquels on attribue deux blocs de  $L$  sous-porteuses chacun



# Allocation dynamique en mode SS-MC-MA

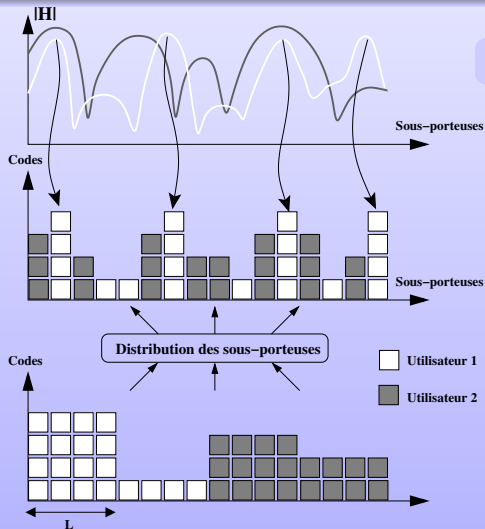


# Allocation dynamique en mode SS-MC-MA



**Problème général**

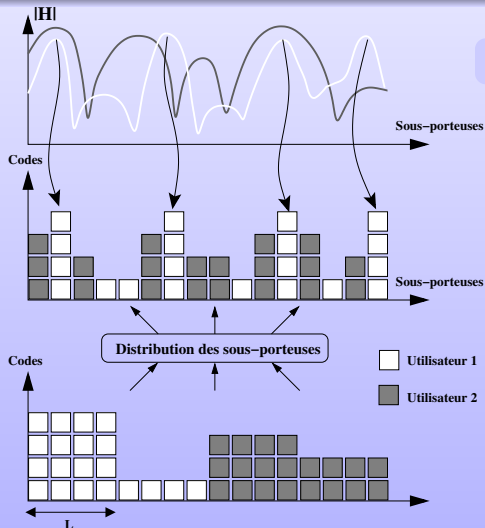
# Allocation dynamique en mode SS-MC-MA



## Problème général

- Distribuer les sous-porteuses par blocs de  $L$  entre les  $U$  utilisateurs

# Allocation dynamique en mode SS-MC-MA

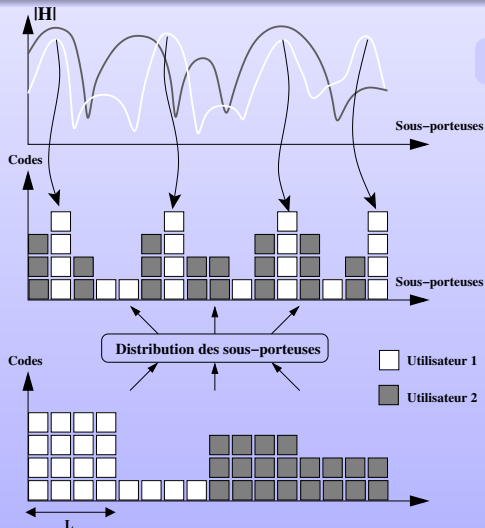


## Problème général

- Distribuer les sous-porteuses par blocs de  $L$  entre les  $U$  utilisateurs
- Organiser l'allocation au sein des  $B = \lfloor N/L \rfloor$  blocs  $S_b$  formés

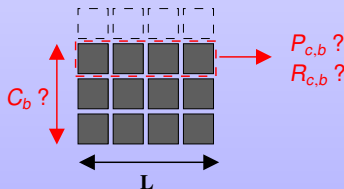


# Allocation dynamique en mode SS-MC-MA



## Problème général

- Distribuer les sous-porteuses par blocs de  $L$  entre les  $U$  utilisateurs
- Organiser l'allocation au sein des  $B = \lfloor N/L \rfloor$  blocs  $S_b$  formés



# Formulation mathématique : détection ZF

$$R_{\text{SSMCMA}} = \sum_{u=0}^{U-1} R_u = \sum_{u=0}^{U-1} \sum_{b \in \mathcal{B}_u} \sum_{c=0}^{C_b-1} \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\Gamma \gamma_u} \frac{L^2}{\sum_{k \in S_b} \frac{1}{h_{k,u}}} \frac{P_{c,b}}{N_0} \right)$$

- ▶  $S_b$  jeu des indices des  $L$  sous-porteuses du bloc  $b$
- ▶  $\mathcal{B}_u$  jeu des indices de blocs de l'utilisateur  $u$
- ▶  $C_b$  nombre de codes exploités au sein du bloc  $b$
- ▶  $P_{c,b}$  puissance associée au code  $c$  du bloc  $b$
- ▶  $R_{c,b}$  débit associé au code  $c$  du bloc  $b$



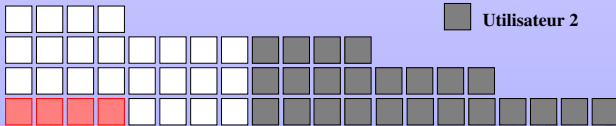
Utilisateur 1

Utilisateur 2

# Formulation mathématique : détection ZF

$$R_{\text{SSMCMA}} = \sum_{u=0}^{U-1} R_u = \sum_{u=0}^{U-1} \sum_{b \in \mathcal{B}_u} \sum_{c=0}^{C_b-1} \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\Gamma \gamma_u} \frac{L^2}{\sum_{k \in S_b} \frac{1}{h_{k,u}}} \frac{P_{c,b}}{N_0} \right)$$

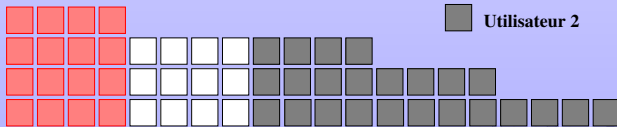
- ▶  $S_b$  jeu des indices des  $L$  sous-porteuses du bloc  $b$
- ▶  $\mathcal{B}_u$  jeu des indices de blocs de l'utilisateur  $u$
- ▶  $C_b$  nombre de codes exploités au sein du bloc  $b$
- ▶  $P_{c,b}$  puissance associée au code  $c$  du bloc  $b$
- ▶  $R_{c,b}$  débit associé au code  $c$  du bloc  $b$



## Formulation mathématique : détection ZF

$$R_{\text{SSMCMA}} = \sum_{u=0}^{U-1} R_u = \sum_{u=0}^{U-1} \sum_{b \in \mathcal{B}_u} \sum_{c=0}^{C_b-1} \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\Gamma \gamma_u} \frac{L^2}{\sum_{k \in S_b} \frac{1}{h_{k,u}}} \frac{P_{c,b}}{N_0} \right)$$

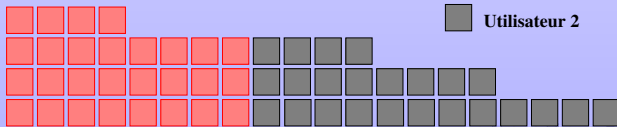
- ▶  $S_b$  jeu des indices des  $L$  sous-porteuses du bloc  $b$
- ▶  $\mathcal{B}_u$  jeu des indices de blocs de l'utilisateur  $u$
- ▶  $C_b$  nombre de codes exploités au sein du bloc  $b$
- ▶  $P_{c,b}$  puissance associée au code  $c$  du bloc  $b$
- ▶  $R_{c,b}$  débit associé au code  $c$  du bloc  $b$



## Formulation mathématique : détection ZF

$$R_{\text{SSMCMA}} = \sum_{u=0}^{U-1} R_u = \sum_{u=0}^{U-1} \sum_{b \in \mathcal{B}_u} \sum_{c=0}^{C_b-1} \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\Gamma \gamma_u} \frac{L^2}{\sum_{k \in \mathcal{S}_b} \frac{1}{h_{k,u}}} \frac{P_{c,b}}{N_0} \right)$$

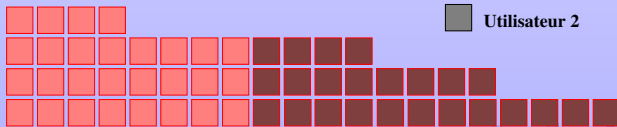
- ▶  $\mathcal{S}_b$  jeu des indices des  $L$  sous-porteuses du bloc  $b$
- ▶  $\mathcal{B}_u$  jeu des indices de blocs de l'utilisateur  $u$
- ▶  $C_b$  nombre de codes exploités au sein du bloc  $b$
- ▶  $P_{c,b}$  puissance associée au code  $c$  du bloc  $b$
- ▶  $R_{c,b}$  débit associé au code  $c$  du bloc  $b$



## Formulation mathématique : détection ZF

$$R_{\text{SSMCMA}} = \sum_{u=0}^{U-1} R_u = \sum_{u=0}^{U-1} \sum_{b \in \mathcal{B}_u} \sum_{c=0}^{C_b-1} \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\Gamma \gamma_u} \frac{L^2}{\sum_{k \in S_b} \frac{1}{h_{k,u}}} \frac{P_{c,b}}{N_0} \right)$$

- ▶  $S_b$  jeu des indices des  $L$  sous-porteuses du bloc  $b$
- ▶  $\mathcal{B}_u$  jeu des indices de blocs de l'utilisateur  $u$
- ▶  $C_b$  nombre de codes exploités au sein du bloc  $b$
- ▶  $P_{c,b}$  puissance associée au code  $c$  du bloc  $b$
- ▶  $R_{c,b}$  débit associé au code  $c$  du bloc  $b$



## Formulation mathématique : détection ZF

$$R_{\text{SSMCMA}} = \sum_{u=0}^{U-1} R_u = \sum_{u=0}^{U-1} \sum_{b \in \mathcal{B}_u} \sum_{c=0}^{C_b-1} \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\Gamma \gamma_u} \frac{L^2}{\sum_{k \in \mathcal{S}_b} \frac{1}{h_{k,u}}} \frac{P_{c,b}}{N_0} \right)$$

- ▶  $\mathcal{S}_b$  jeu des indices des  $L$  sous-porteuses du bloc  $b$
- ▶  $\mathcal{B}_u$  jeu des indices de blocs de l'utilisateur  $u$
- ▶  $C_b$  nombre de codes exploités au sein du bloc  $b$
- ▶  $P_{c,b}$  puissance associée au code  $c$  du bloc  $b$
- ▶  $R_{c,b}$  débit associé au code  $c$  du bloc  $b$

⇒ Paramètres à déterminer  
pour réaliser l'allocation des  
ressources

## Formulation mathématique : détection ZF

$$R_{\text{SSMCMA}} = \sum_{u=0}^{U-1} R_u = \sum_{u=0}^{U-1} \sum_{b \in \mathcal{B}_u} \sum_{c=0}^{C_b-1} \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\Gamma \gamma_u} \frac{L^2}{\sum_{k \in S_b} \frac{1}{h_{k,u}}} \frac{P_{c,b}}{N_0} \right)$$

- ▶  $S_b$  jeu des indices des  $L$  sous-porteuses du bloc  $b$
- ▶  $\mathcal{B}_u$  jeu des indices de blocs de l'utilisateur  $u$
- ▶  $C_b$  nombre de codes exploités au sein du bloc  $b$
- ▶  $P_{c,b}$  puissance associée au code  $c$  du bloc  $b$
- ▶  $R_{c,b}$  débit associé au code  $c$  du bloc  $b$

⇒ Paramètres à déterminer pour réaliser l'allocation des ressources

**Remarque** : si  $L = 1$ , on retrouve  $R_{\text{DMT}}$

- ▶ **Granularité infinie** ( $R \in \mathbb{R}$ ) :  $R_{\text{SSMCMA}} \leq R_{\text{DMT}}$  !
- ▶ **Granularité finie** ( $R \in \mathbb{N}$ ) ? étude menée



## Politiques d'optimisation

- Optimisation des débits individuels  
 $R_u$  à marge fixée  $\gamma$
- Optimisation des marges  
individuelles  $\gamma_u$  à débit cible  $\check{R}$

$$\forall u, \max_{B_u, S_b, C_b, P_{c,b}, R_{c,b}} R_u$$

$$\forall u, \max_{B_u, S_b, C_b, P_{c,b}, R_{c,b}} \gamma_u$$

# Politiques d'optimisation

- Optimisation des débits individuels

$R_u$  à marge fixée  $\gamma$

$$\forall u, \max_{B_u, S_b, C_b, P_{c,b}, R_{c,b}} R_u$$

- Optimisation des marges individuelles  $\gamma_u$  à débit cible  $\check{R}$

$$\forall u, \max_{B_u, S_b, C_b, P_{c,b}, R_{c,b}} \gamma_u$$

## Contraintes

- Limitation en terme de DSP d'émission  $\check{P}$

- Utilisation de modulations QAM

granularité finie  $R \in \mathbb{N}$

# Algorithmes développés

## Partage du spectre entre les utilisateurs

⇒ problème d'optimisation quant au choix de  $B_u$  et  $S_b$

# Algorithmes développés

## Partage du spectre entre les utilisateurs

⇒ problème d'optimisation quant au choix de  $\mathcal{B}_u$  et  $\mathcal{S}_b$

- Solution optimale complexe
- Utilisation d'une solution sous-optimale :  
→ Algorithme de **RHEE&GIOFFI** modifié

# Algorithmes développés

## Partage du spectre entre les utilisateurs

⇒ problème d'optimisation quant au choix de  $\mathcal{B}_u$  et  $\mathcal{S}_b$

- Solution optimale complexe
- Utilisation d'une solution sous-optimale :  
→ Algorithme de **RHEE&CIOFFI** modifié

### Principe :

- ▶ Distribuer **itérativement** les sous-porteuses par blocs de  $L$  aux différents utilisateurs
- ▶ À chaque itération :
  - ▶ servir l'utilisateur dont le débit  $R_u$  (resp. la marge  $\gamma_u$ ) recalculé est **le plus faible**
  - ▶ Attribuer les  $L$  **meilleures** sous-porteuses restantes

## Algorithmes développés : maximisation du débit

Optimisation du débit au sein des blocs de chaque utilisateur

⇒ Trouver  $C_b$ ,  $P_{c,b}$ , et  $R_{c,b}$  pour chaque  $S_b$

## Algorithmes développés : maximisation du débit

### Optimisation du débit au sein des blocs de chaque utilisateur

⇒ Trouver  $C_b$ ,  $P_{c,b}$ , et  $R_{c,b}$  pour chaque  $S_b$

- **Granularité infinie :**

Répartition **uniforme** des bits et des puissances sur les différents codes

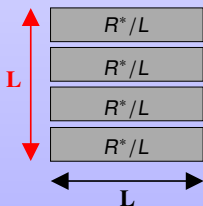
# Algorithmes développés : maximisation du débit

## Optimisation du débit au sein des blocs de chaque utilisateur

⇒ Trouver  $C_b$ ,  $P_{c,b}$ , et  $R_{c,b}$  pour chaque  $S_b$

- **Granularité infinie :**

Répartition **uniforme** des bits et des puissances sur les différents codes



$R^*$  obtenu par la formule de capacité



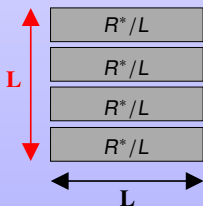
# Algorithmes développés : maximisation du débit

## Optimisation du débit au sein des blocs de chaque utilisateur

⇒ Trouver  $C_b$ ,  $P_{c,b}$ , et  $R_{c,b}$  pour chaque  $S_b$

- **Granularité infinie :**

Répartition **uniforme** des bits et des puissances sur les différents codes



$R^*$  obtenu par la formule de capacité

- **Granularité finie :**

Répartition **la plus uniforme possible** des bits et des puissances sur les différents codes

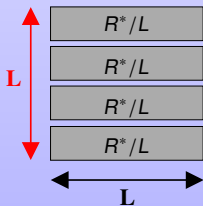
# Algorithmes développés : maximisation du débit

## Optimisation du débit au sein des blocs de chaque utilisateur

⇒ Trouver  $C_b$ ,  $P_{c,b}$ , et  $R_{c,b}$  pour chaque  $S_b$

### ● Granularité **infinie** :

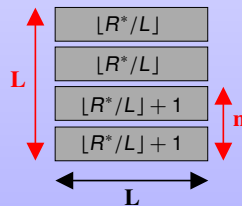
Répartition **uniforme** des bits et des puissances sur les différents codes



$R^*$  obtenu par la formule de capacité

### ● Granularité **finie** :

Répartition **la plus uniforme possible** des bits et des puissances sur les différents codes



avec  $n = \lfloor L(2^{R^*/L} - \lfloor R^*/L \rfloor - 1) \rfloor$

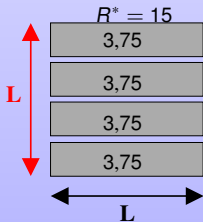
# Algorithmes développés : maximisation du débit

## Optimisation du débit au sein des blocs de chaque utilisateur

⇒ Trouver  $C_b$ ,  $P_{c,b}$ , et  $R_{c,b}$  pour chaque  $S_b$

### ● Granularité **infinie** :

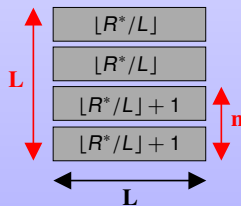
Répartition **uniforme** des bits et des puissances sur les différents codes



$R^*$  obtenu par la formule de capacité

### ● Granularité **finie** :

Répartition **la plus uniforme possible** des bits et des puissances sur les différents codes



avec  $n = \lfloor L(2^{R^*/L} - \lfloor R^*/L \rfloor - 1) \rfloor$

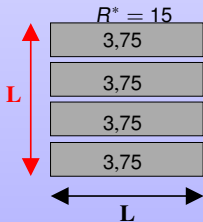
# Algorithmes développés : maximisation du débit

## Optimisation du débit au sein des blocs de chaque utilisateur

⇒ Trouver  $C_b$ ,  $P_{c,b}$ , et  $R_{c,b}$  pour chaque  $S_b$

- Granularité **infinie** :

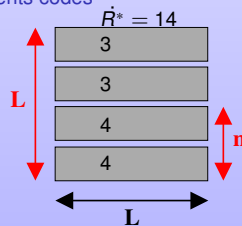
Répartition **uniforme** des bits et des puissances sur les différents codes



$R^*$  obtenu par la formule de capacité

- Granularité **finie** :

Répartition **la plus uniforme possible** des bits et des puissances sur les différents codes



avec  $n = \lfloor L(2^{R^*/L} - \lfloor R^*/L \rfloor - 1) \rfloor$

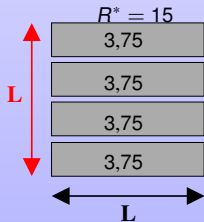
# Algorithmes développés : maximisation du débit

## Optimisation du débit au sein des blocs de chaque utilisateur

⇒ Trouver  $C_b$ ,  $P_{c,b}$ , et  $R_{c,b}$  pour chaque  $S_b$

- Granularité **infinie** :

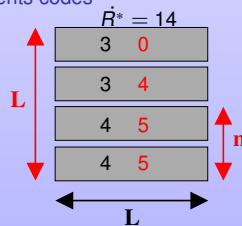
Répartition **uniforme** des bits et des puissances sur les différents codes



$R^*$  obtenu par la formule de capacité

- Granularité **finie** :

Répartition **la plus uniforme possible** des bits et des puissances sur les différents codes

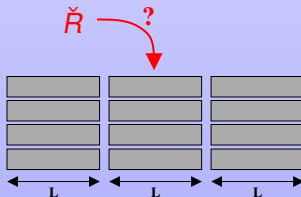


avec  $n = \lfloor L(2^{R^*/L} - \lfloor R^*/L \rfloor - 1) \rfloor$

## Algorithmes développés : maximisation de la marge

Maximisation de la marge au sein des blocs de chaque utilisateur

⇒ Trouver  $C_b$ ,  $P_{c,b}$ , et  $R_{c,b}$  pour chaque  $S_b$



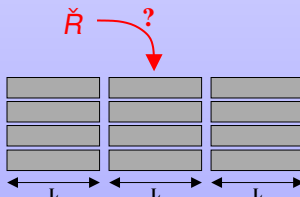
## Algorithmes développés : maximisation de la marge

Maximisation de la marge au sein des blocs de chaque utilisateur

⇒ Trouver  $C_b$ ,  $P_{c,b}$ , et  $R_{c,b}$  pour chaque  $S_b$

- **Granularité infinie :**

- ▶ La répartition optimale des  $\check{R}$  bits est obtenue par optimisation de Lagrange



# Algorithmes développés : maximisation de la marge

Maximisation de la marge au sein des blocs de chaque utilisateur

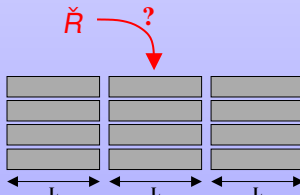
⇒ Trouver  $C_b$ ,  $P_{c,b}$ , et  $R_{c,b}$  pour chaque  $S_b$

- **Granularité infinie :**

- ▶ La répartition optimale des  $\check{R}$  bits est obtenue par optimisation de Lagrange

- **Granularité finie :**

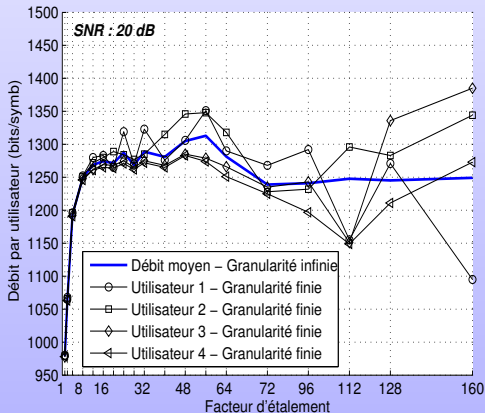
- ▶ La répartition optimale des  $\check{R}$  bits est obtenue par l'intermédiaire d'un **crible** (algorithme *greedy*)





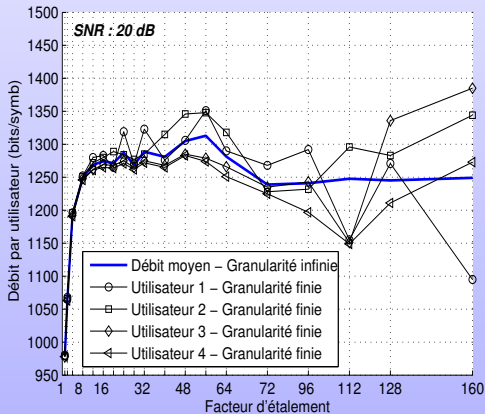
# Comparaison DMT / SS-MC-MA : débits

- Évolution des débits lorsque  $L$  augmente



# Comparaison DMT / SS-MC-MA : débits

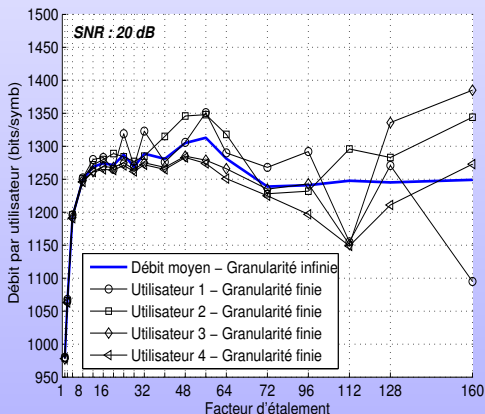
- Évolution des débits lorsque  $L$  augmente



- Apport de l'étalement : 30 % à  $L = 64$

## Comparaison DMT / SS-MC-MA : débits

- Évolution des débits lorsque  $L$  augmente

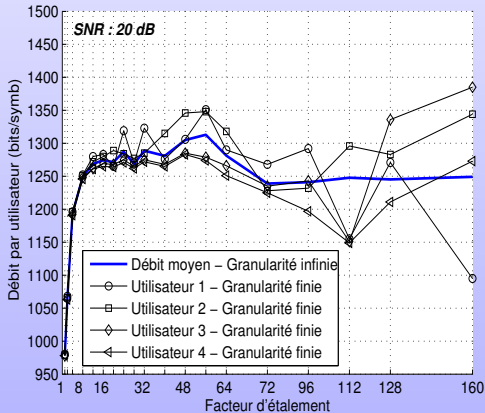


- Apport de l'étalement :  
30 % à  $L = 64$

Exploitation collective de  
la ressource pour  $L > 1$

# Comparaison DMT / SS-MC-MA : débits

- Évolution des débits lorsque  $L$  augmente



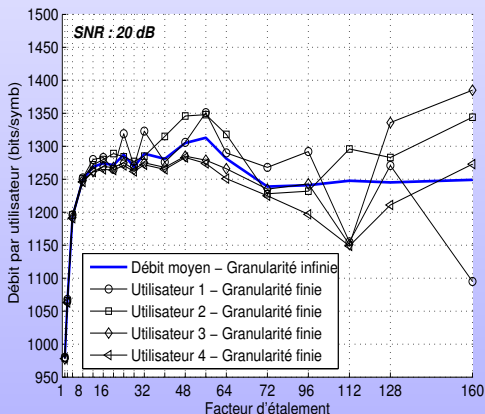
- Apport de l'étalement : 30 % à  $L = 64$

Exploitation collective de la ressource pour  $L > 1$

- Pallier et dispersion des résultats pour  $L$  grand

## Comparaison DMT / SS-MC-MA : débits

- Évolution des débits lorsque  $L$  augmente



- Apport de l'étalement :  
30 % à  $L = 64$

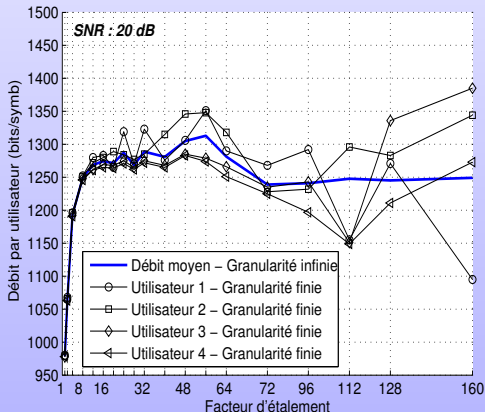
Exploitation collective de la ressource pour  $L > 1$

- Pallier et dispersion des résultats pour  $L$  grand

Distribution sous-optimale des sous-porteuses

# Comparaison DMT / SS-MC-MA : débits

- Évolution des débits lorsque  $L$  augmente



- Apport de l'étalement : 30 % à  $L = 64$

Exploitation collective de la ressource pour  $L > 1$

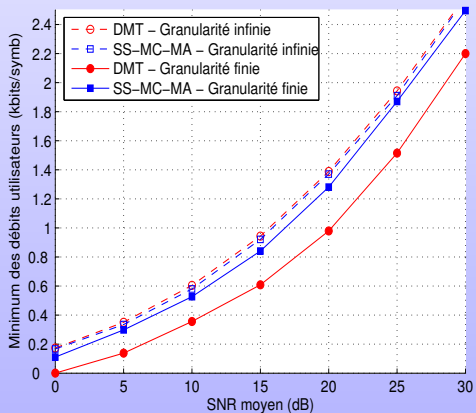
- Pallier et dispersion des résultats pour  $L$  grand

Distribution sous-optimale des sous-porteuses

Compromis :  $1 < L \ll \frac{N}{U}$

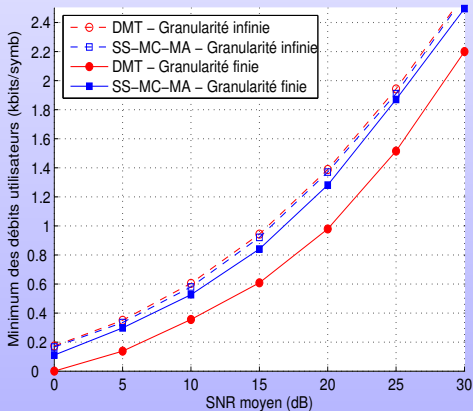
# Comparaison DMT / SS-MC-MA : débits

## Évolution des débits en fonction du SNR



# Comparaison DMT / SS-MC-MA : débits

## Évolution des débits en fonction du SNR



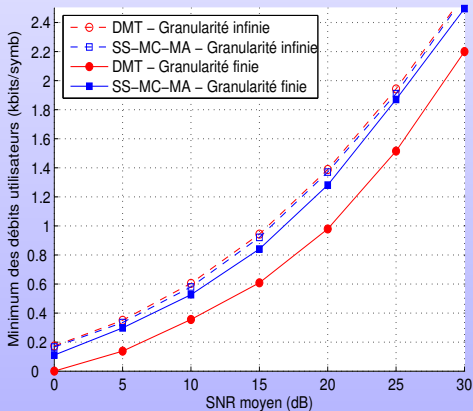
- ▶ Résultats proches de la courbe de capacité pour le SS-MC-MA ( $L = 64$ )
- ▶ Apport de l'étalement pour SNR = 20 dB

DMT : 32 Mbit/s  
SS-MC-MA : 42 Mbit/s }  $\approx 30\%$



# Comparaison DMT / SS-MC-MA : débits

## Évolution des débits en fonction du SNR



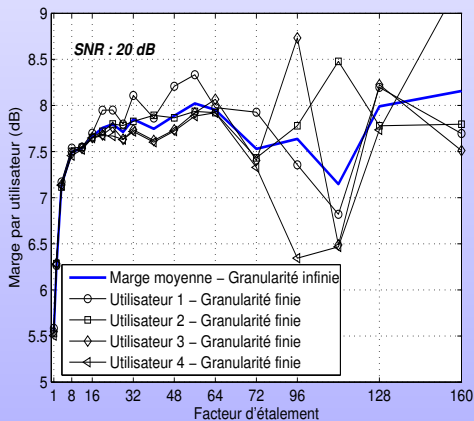
- ▶ Résultats proches de la courbe de capacité pour le SS-MC-MA ( $L = 64$ )
- ▶ Apport de l'étalement pour SNR = 20 dB

DMT : 32 Mbit/s  
SS-MC-MA : 42 Mbit/s }  $\approx 30\%$

Mutualisation des ressources  
= augmentation des débits

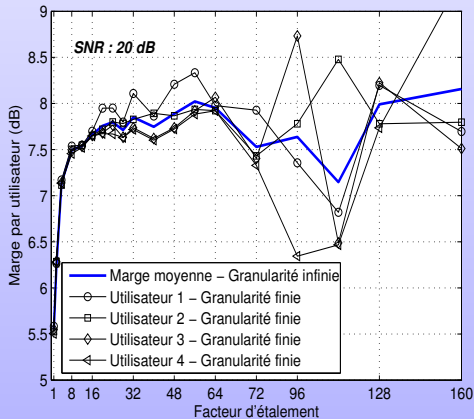
# Comparaison DMT / SS-MC-MA : marges

- Évolution des marges de bruit lorsque  $L$  augmente



# Comparaison DMT / SS-MC-MA : marges

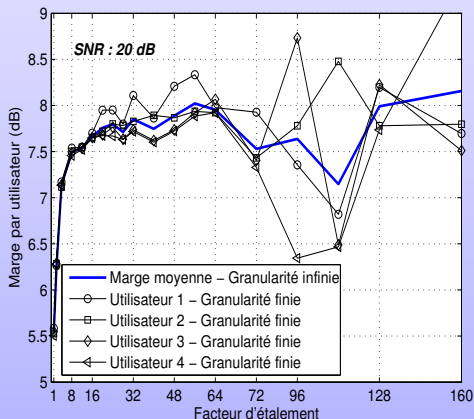
- Évolution des marges de bruit lorsque  $L$  augmente



- Apport de l'étalement :  
2,5 dB à  $L = 64$

# Comparaison DMT / SS-MC-MA : marges

- Évolution des marges de bruit lorsque  $L$  augmente

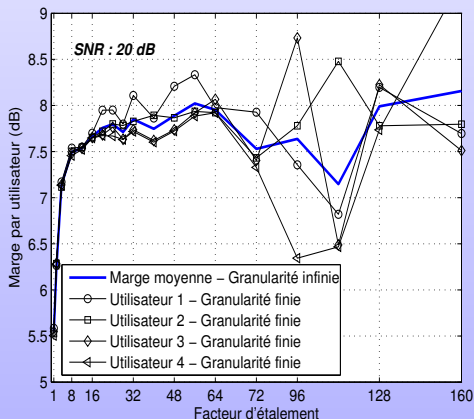


- Apport de l'étalement :  
2,5 dB à  $L = 64$

Exploitation collective de la ressource pour  $L > 1$

# Comparaison DMT / SS-MC-MA : marges

- Évolution des marges de bruit lorsque  $L$  augmente



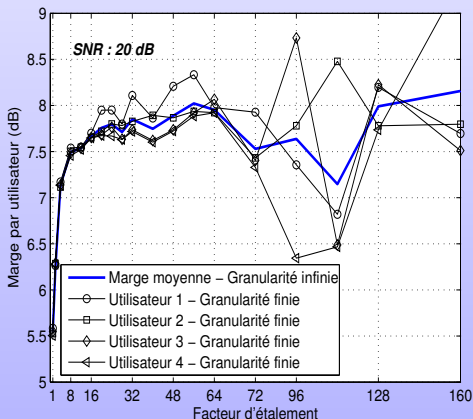
- Apport de l'étalement :  
2,5 dB à  $L = 64$

Exploitation collective de la ressource pour  $L > 1$

- Pallier et dispersion des résultats pour  $L$  grand

# Comparaison DMT / SS-MC-MA : marges

- Évolution des marges de bruit lorsque  $L$  augmente



- Apport de l'étalement :  
2,5 dB à  $L = 64$

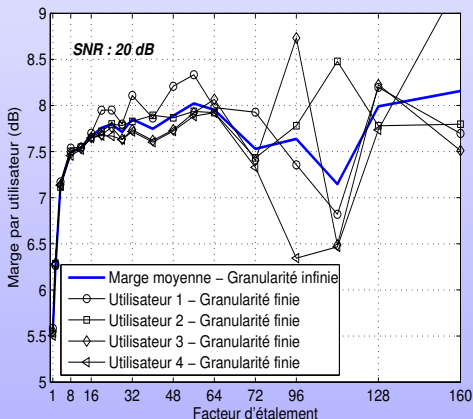
Exploitation collective de la ressource pour  $L > 1$

- Pallier et dispersion des résultats pour  $L$  grand

Distribution sous-optimale des sous-porteuses

# Comparaison DMT / SS-MC-MA : marges

- Évolution des marges de bruit lorsque  $L$  augmente



- Apport de l'étalement :  
2,5 dB à  $L = 64$

Exploitation collective de la ressource pour  $L > 1$

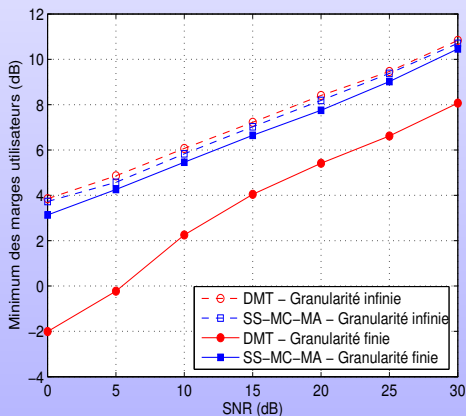
- Pallier et dispersion des résultats pour  $L$  grand

Distribution sous-optimale des sous-porteuses

Compromis :  $1 < L \ll \frac{N}{U}$

# Comparaison DMT / SS-MC-MA : marges

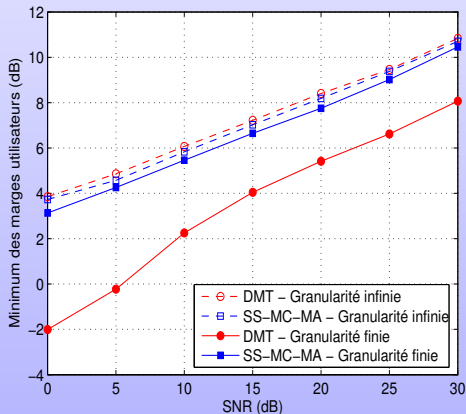
- Évolution des marges de bruit en fonction du SNR





# Comparaison DMT / SS-MC-MA : marges

## Évolution des marges de bruit en fonction du SNR



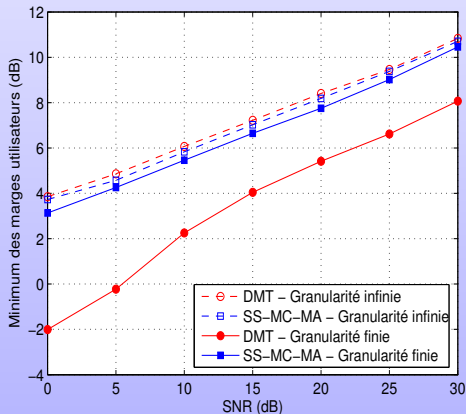
- ▶ Résultats proches de la courbe de granularité infinie pour le SS-MC-MA ( $L = 64$ )
- ▶ Apport de l'étalement à  $\text{SNR} = 10 \text{ dB}$

DMT : 2 dB

SS-MC-MA : 5,5 dB

# Comparaison DMT / SS-MC-MA : marges

## Évolution des marges de bruit en fonction du SNR



- ▶ Résultats proches de la courbe de granularité infinie pour le SS-MC-MA ( $L = 64$ )
- ▶ Apport de l'étalement à  $\text{SNR} = 10 \text{ dB}$

DMT : 2 dB

SS-MC-MA : 5,5 dB

Mutualisation des  
ressources =  
augmentation des  
marges

# Bilan

- Combinaison des principes de modulations adaptatives avec la forme d'onde SS-MC-MA
  - ▶ Extension de la DMT avec étalement suivant l'axe fréquentiel
- Dérivation des algorithmes d'allocation des ressources en mode SS-MC-MA en granularité finie
  - ▶ Maximisation des débits et marges sous contrainte d'une limitation en DSP
  - ▶ Modification de l'algorithme de РНЕЕ&СЮФФИ pour traiter le cas multiutilisateur
- Principaux résultats
  - ▶ Augmentation des débits ou des marges sous contrainte de DSP grâce à la mutualisation des ressources effectuée par l'étalement
  - ▶ Compromis  $1 < L \ll \frac{N}{D}$  pour vérifier le critère de partage équitable des ressources entre utilisateurs

## Partie V : Conclusion

# Principales contributions

Évaluation du potentiel de la technique SS-MC-MA dans le cadre de transmissions à haut-débit sur la boucle locale électrique

## Étude système

- Proposition d'un nouveau système combinant la forme d'onde SS-MC-MA et le principe de modulations adaptatives
  - ▶ Solution robuste face à l'hostilité du canal
  - ▶ Solution adaptée à la gestion dynamique des ressources
- Organisation des échanges sur le réseau CPL *outdoor*
  - ▶ Dimensionnement du système
  - ▶ Proposition d'une trame d'échanges

# Principales contributions

Évaluation du potentiel de la technique SS-MC-MA dans le cadre de transmissions à haut-débit sur la boucle locale électrique

## Procédés de synchronisation et d'estimation de canal

- Étude de deux approches, fréquentielle et temporelle, d'estimation des erreurs de synchronisation et d'estimation de canal en OFDM
- Dérivation de nouveaux algorithmes conjoints optimisés et adaptés au contexte multicellulaire
- Comparaison des résultats des deux approches
  - ▶ Mise en évidence d'une différence fondamentale de comportement

# Principales contributions

Évaluation du potentiel de la technique SS-MC-MA dans le cadre de transmissions à haut-débit sur la boucle locale électrique

## Étude des procédés d'allocation dynamique des ressources

- Proposition de nouveaux algorithmes d'allocation en mode SS-MC-MA :
  - ▶ Extension de la DMT avec étalement suivant l'axe fréquentiel
  - ▶ Dérivation d'algorithmes liés aux problèmes de maximisation des débits et des marges de bruit
- Mise en évidence de l'intérêt d'étaler les données suivant l'axe fréquentiel par le principe de mutualisation des ressources
  - ▶ Augmentation des débits et des marges

# Perspectives

## À court terme

- Étude de l'influence des estimations imparfaites sur la dégradation du taux d'erreur
- Évaluation de la résistance de la composante étalement vis-à-vis des bruits impulsifs

## Générales

- Synchronisation, estimation de canal
  - ▶ Recherche de procédures d'estimation purement temporelles
  - ▶ Généralisation des comparaisons d'approches temporelle/fréquentielle
- Allocation des ressources
  - ▶ Extension de l'étude à d'autres environnements (CPL *indoor*, xDSL, UWB, ...)
  - ▶ Recherche de nouvelles politiques de partage des ressources
  - ▶ Prise en compte de schémas de codage
  - ▶ Généralisation des procédures à n'importe quel cas de *chip mapping*



## Rapports techniques – projet RNRT IDILE

- EDF, ELSYS, ENST, IETR-INSA, CEA-LETI, SAGEM et SUPÉLEC, « Rapport sur les spécifications du projet IDILE, SP1.1 ». *Projet RNRT IDILE*, 2003.
- M. CRUSSIÈRE, J.-Y. BAUDAIS et J.-F. HÉLARD, « Spécifications d'un modem haut-débit pour communications sur ligne d'énergie : rapport du sous-projet 2, phase 1 (SP2.1). ». *Projet RNRT IDILE*, juin 2004.
- J.-Y. BAUDAIS, M. CRUSSIÈRE et J.-F. HÉLARD, « Allocations de l'information en mode MC-CDMA pour les communications sur ligne d'énergie : rapport du sous-projet 2, phase 2 (SP2.2). ». *Projet RNRT IDILE*, juin 2005.

## Communications nationales

- M. CRUSSIÈRE, J.-Y. BAUDAIS et J.-F. HÉLARD, « Vers la transmission de données haut-débit par courant porteur en ligne ». Journées Thématiques *Les Nouvelles Technologies dans la Cité (TIC-Cité)*, décembre 2003.
- J.-Y. BAUDAIS et M. CRUSSIÈRE, « Allocation MC-CMDA : augmentation des débits sur les lignes de transmission. ». In *Proc. GRETSI*, septembre 2005.

## Communications internationales

- M. CRUSSIÈRE, J.-Y. BAUDAIS et J.-F. HÉLARD, « New Loading algorithms for Adaptive SS-MC-MA Systems over Power Line Channels : Comparison with DMT ». In *Proc. IEEE MCSS*, septembre 2005.
- M. CRUSSIÈRE, J.-Y. BAUDAIS et J.-F. HÉLARD, « Robust High-Bit Rate Communications over PLC Channels : a Bit-Loading Multi-Carrier Spread-Spectrum Solution. ». In *Proc. IEEE ISPLC*, avril 2005.
- M. CRUSSIÈRE, J.-Y. BAUDAIS et J.-F. HÉLARD, « A Novel Joint and Iterative Scheme for Synchronization and Channel Estimation in MC-CDMA Power Line Communications. ». In *Proc. IEEE VTC-Fall*, septembre 2004.
- M. CRUSSIÈRE, J.-Y. BAUDAIS et J.-F. HÉLARD, « New Iterative and Time and Frequency Synchronization Scheme for MC-CDMA Systems over Power Line Channels. ». In *Proc. IEEE ISSSTA*, août 2004.

## Publication internationale

- M. CRUSSIÈRE, J.-Y. BAUDAIS et J.-F. HÉLARD, « Improve Throughput over Line with Spread-Spectrum Multi-Carrier Multiple Access : New Bit Loading Algorithms ». À paraître dans *IEEE J-SAC*, numéro spécial *powerline communications*, juillet 2006.

# Plan des annexes

- 6 Annexe
  - Partie I

# Réseau CPL indoor

