



# Démodulation autodidacte de modulations OFDM

THALES Communications  
Fabrice Durand - DEA STIR

# Plan

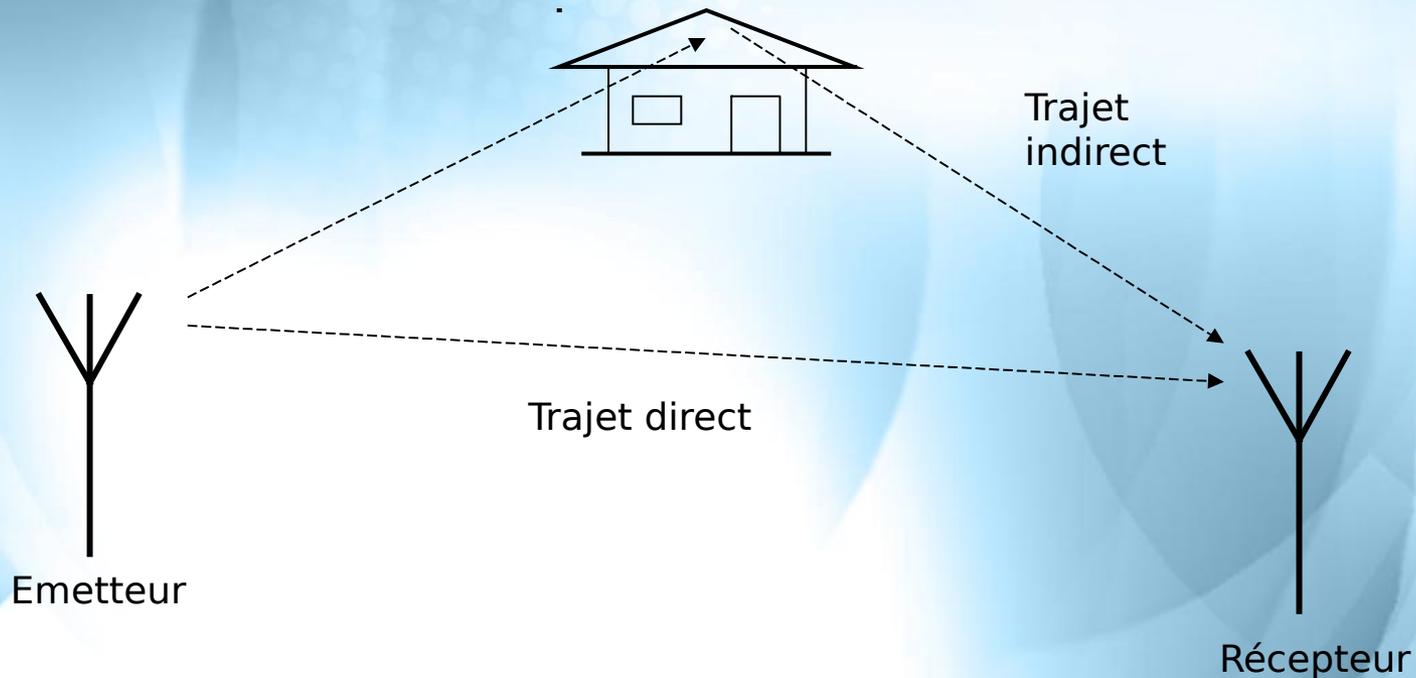
- Introduction aux modulations OFDM
  - Trajets multiples & Interférences Entre Symboles
  - Orthogonalité des sous-porteuses
  - Modulation et démodulation par IFFT et FFT
- La synchronisation temps et fréquence
  - Introduction
  - Synchronisation symbole
  - Synchronisation fréquentielle

# Plan

- Correction d 'amplitude
  - Estimation de la puissance moyenne
  - Influence du bruit
- Compensation de phase
  - Algorithme du gradient
  - Suppression de l'ambiguïté
  - Résultats
- Conclusion

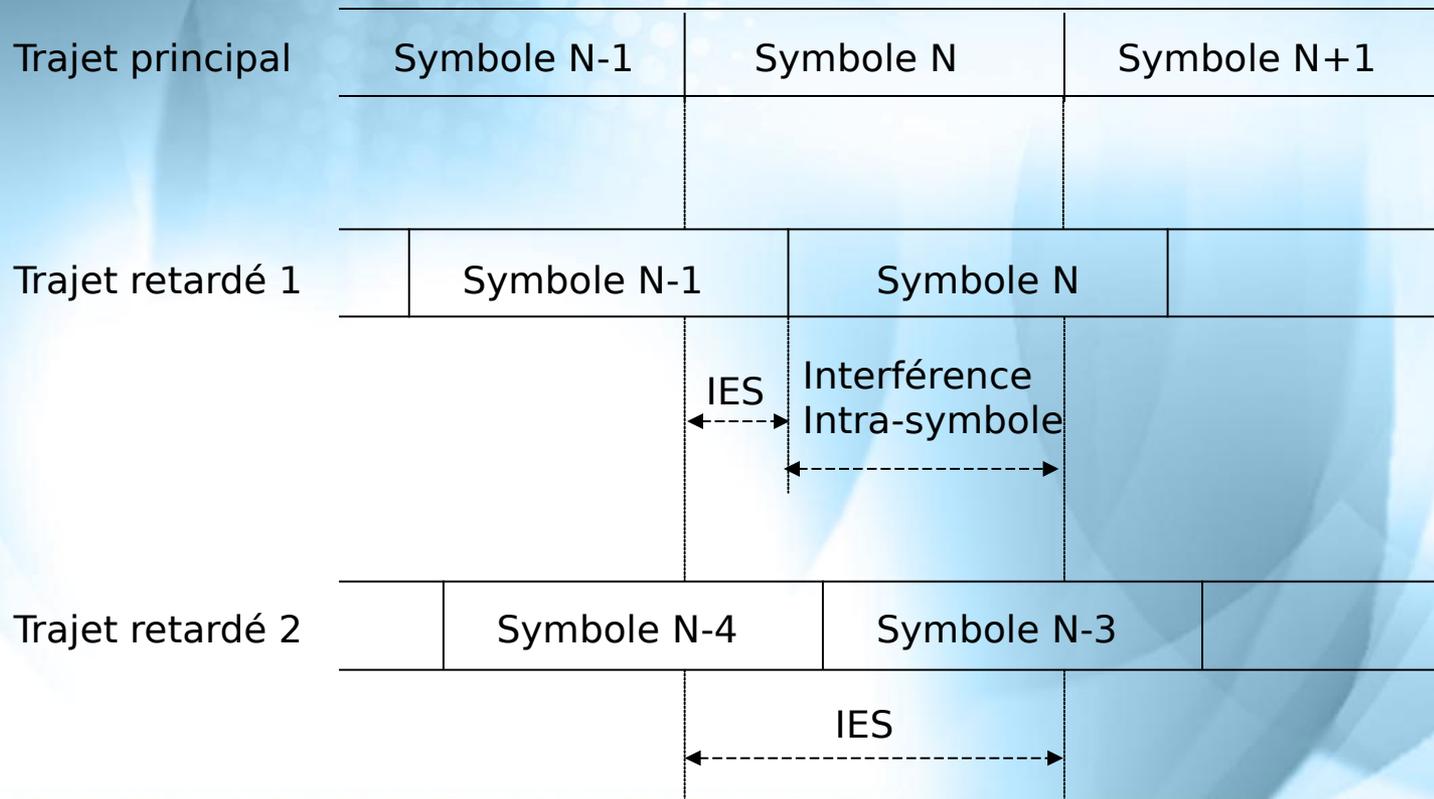
# Les modulations OFDM

## ■ Phénomène de trajets multiples



# Les modulations OFDM

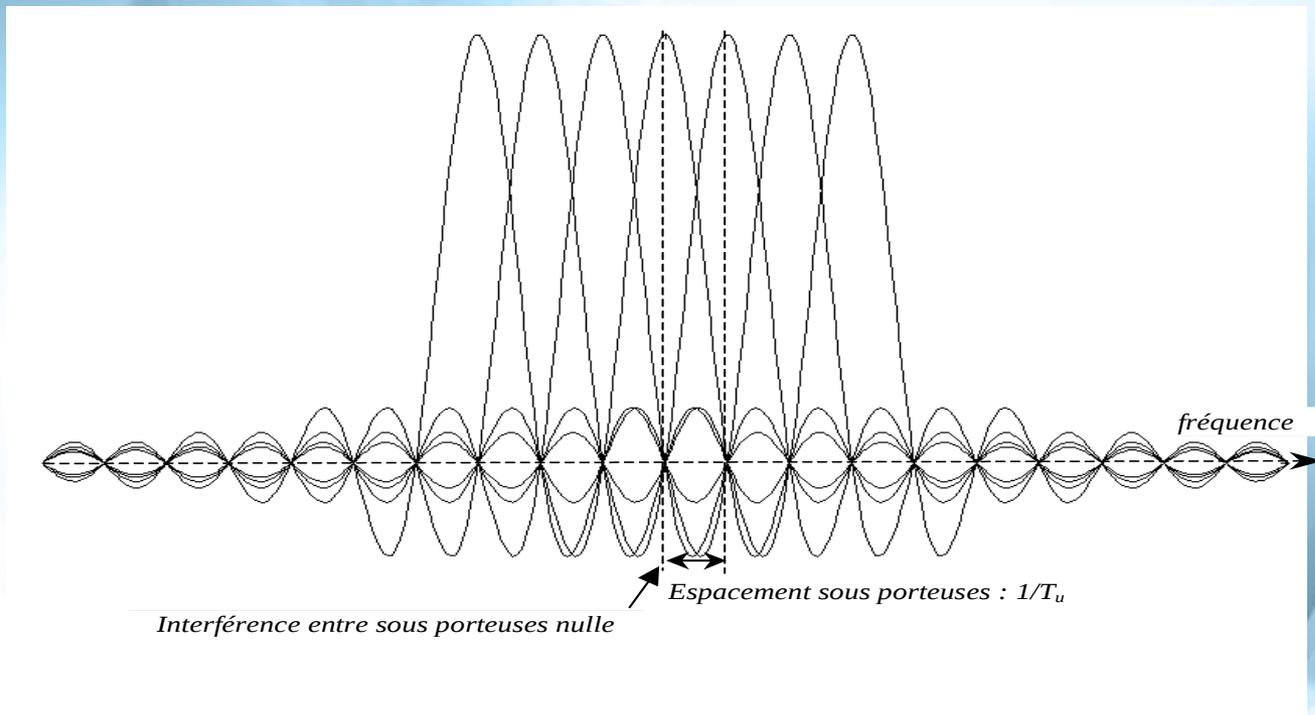
## ■ Interférences entre symboles



# Les modulations OFDM

## ■ Orthogonalité des sous-porteuses

- Spectres individuels des sous-porteuses :



# Les modulations OFDM

## ■ Modulation et démodulation par IFFT et FFT

- Symbole OFDM :

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_u}\right) \sum_{k=0}^{N-1} c_k \exp\left(j2\pi \frac{k}{T_u} t\right)$$

- Échantillonnage du flux série à  $T_e = T$

- Séquence  $\{s(0), s(1), \dots, s(N-1)\}$  avec :

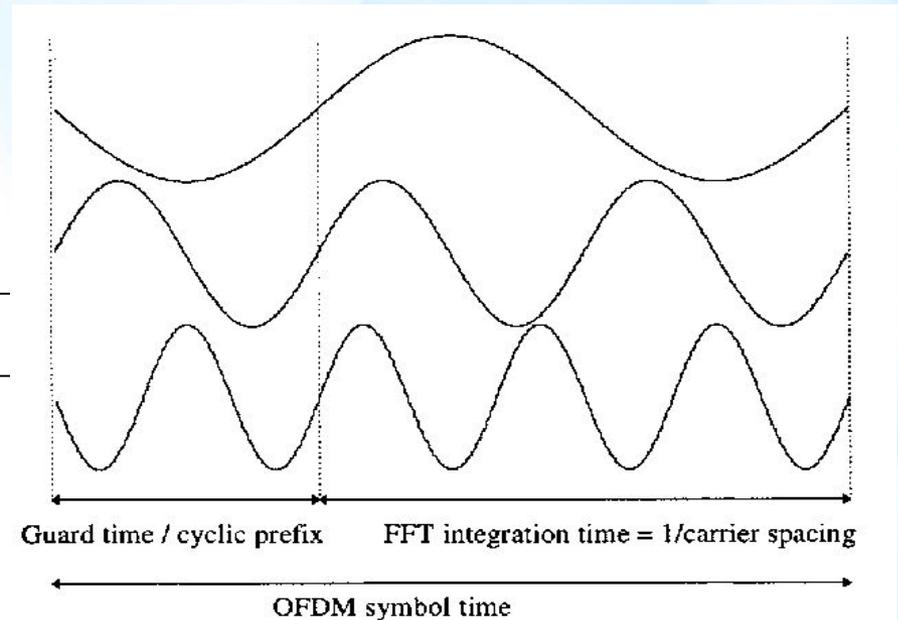
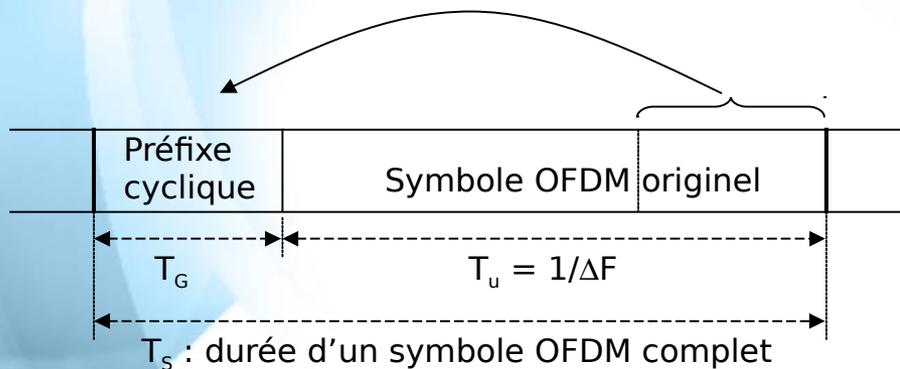
$$s(n) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j2\pi \frac{k}{N} n}$$

# Les modulations OFDM

## ■ Intervalle de garde

- Extension cyclique du symbole originel
- Pour annuler les IES dus aux retards

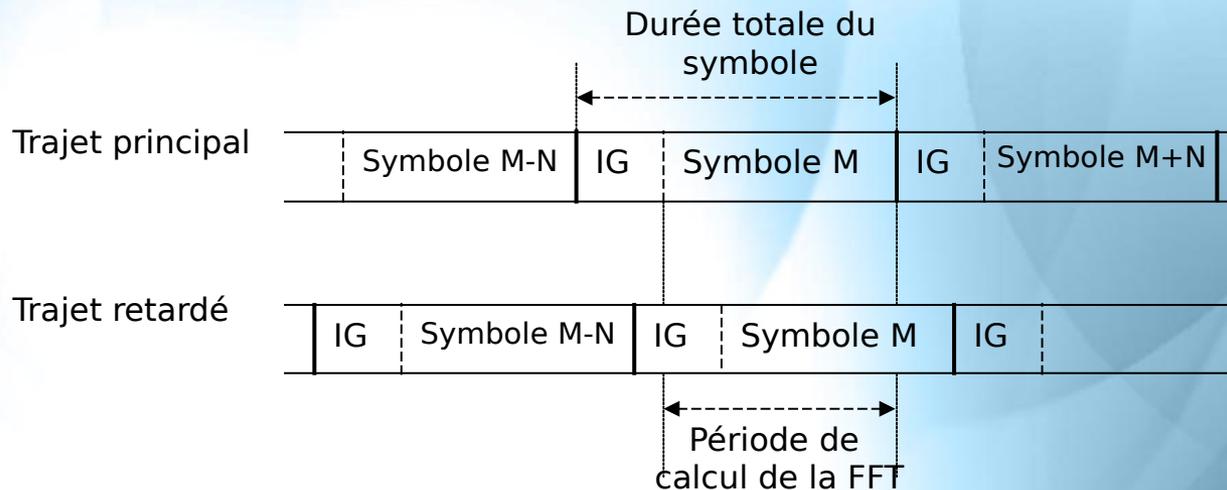
Recopie de la fin du symbole OFDM



# Les modulations OFDM

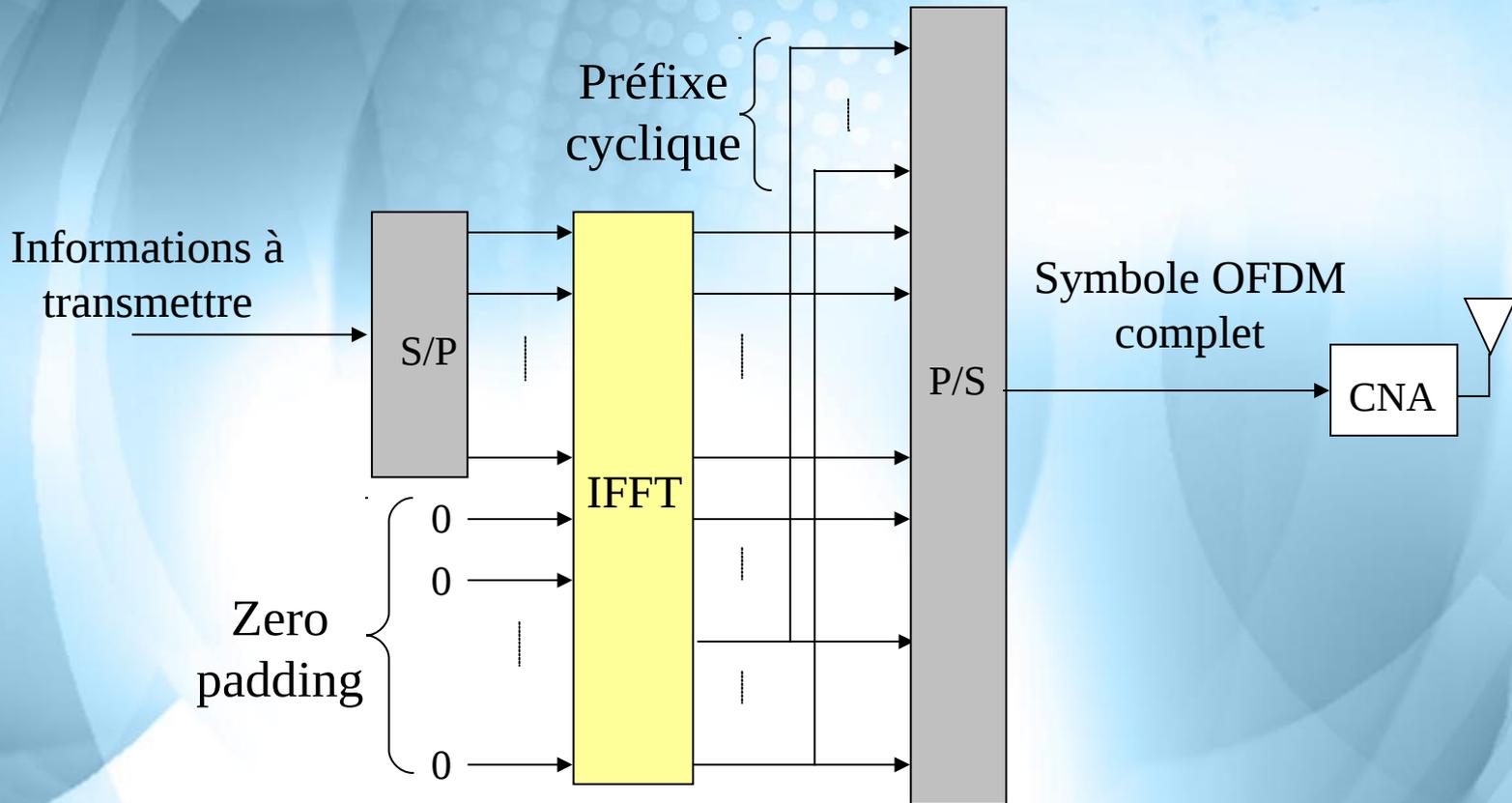
## ■ Intervalle de garde

- Le **préfixe cyclique** conserve l'orthogonalité
- Évite également les IEP
- Est utilisé pour la synchronisation en aveugle



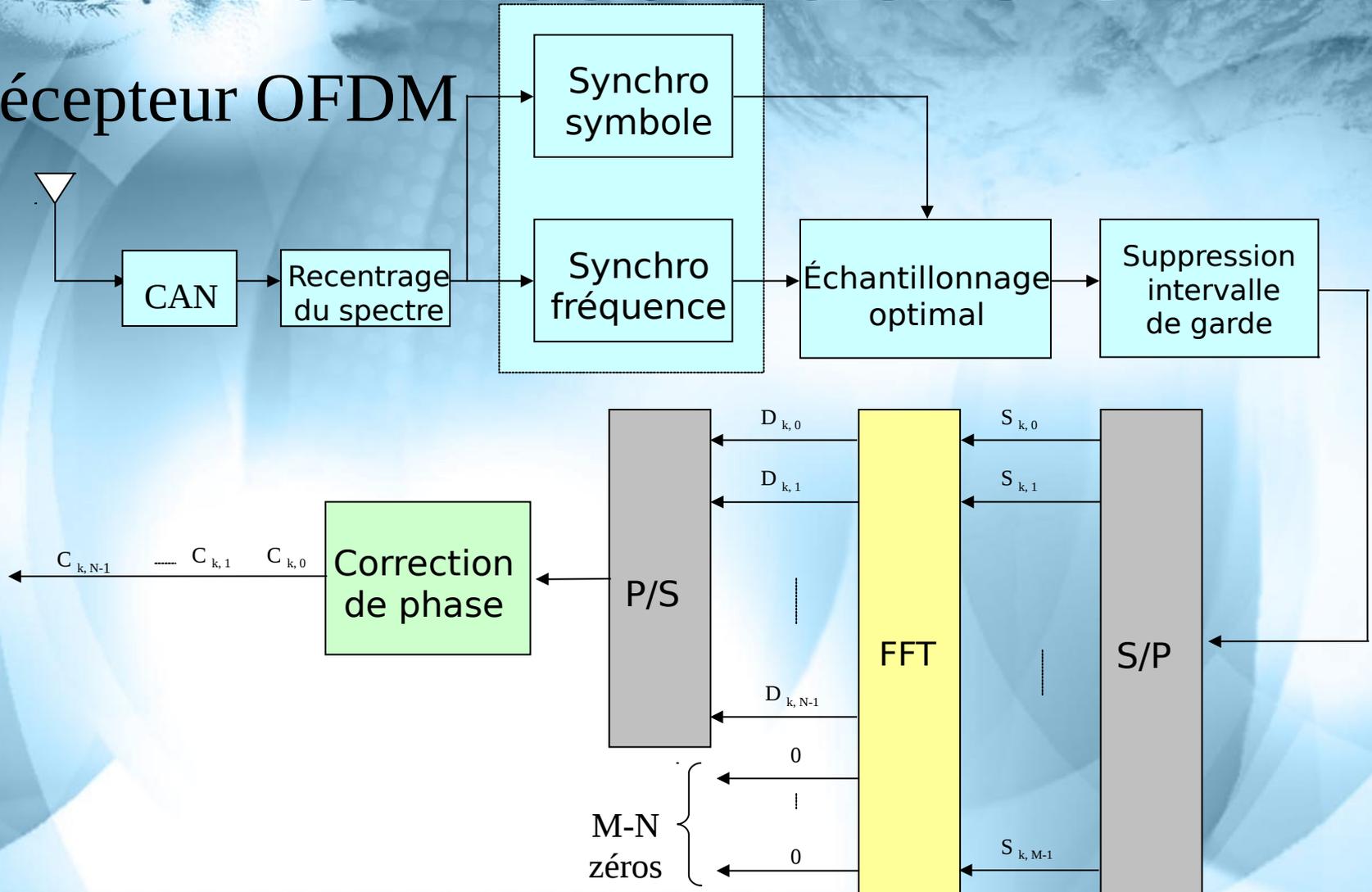
# Les modulations OFDM

## ■ Émetteur OFDM



# Les modulations OFDM

## ■ Récepteur OFDM



# Synchronisation aveugle

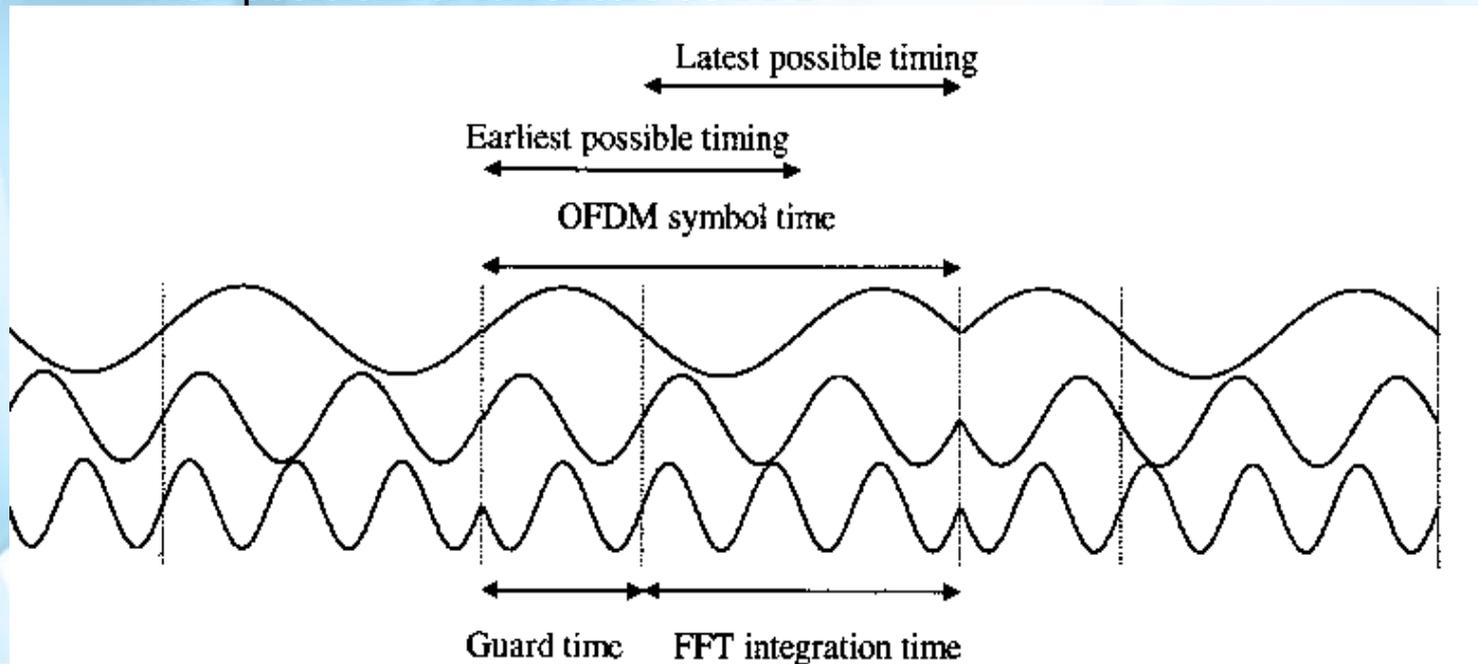
## ■ Introduction

- Démodulation en aveugle
- Nous devons estimer
  - pour la synchronisation symbole
    - la période de symboles OFDM complets
    - les instants de débuts de symboles utiles
  - pour la synchronisation fréquentielle
    - l'espacement entre sous-porteuses
    - le résidu de porteuse entre récepteur et émetteur

# Synchronisation aveugle

## ■ Synchronisation symbole

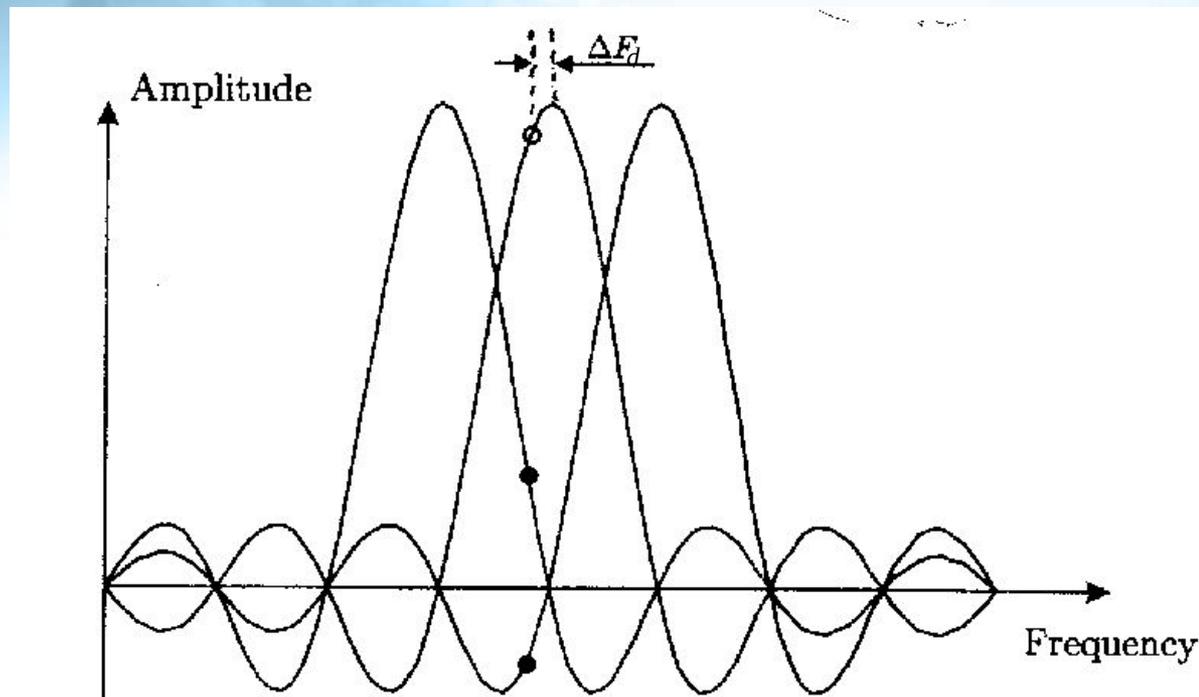
- Estimer l'offset temporel
- Bien positionner la fenêtre de FFT



# Synchronisation aveugle

## ■ Synchronisation fréquentielle

- Effets d'un offset fréquentiel  $\Delta F_d$



# Correction d'amplitude

## ■ Problématique

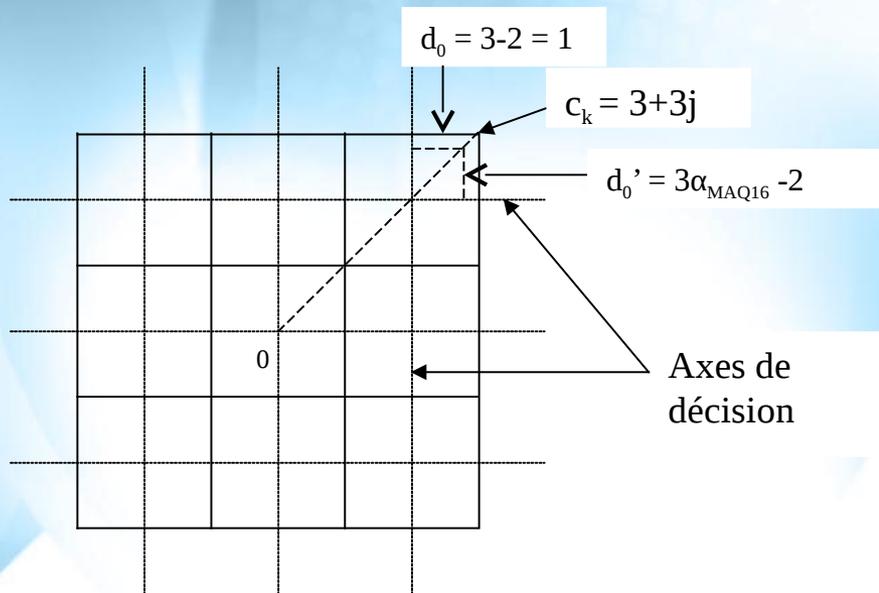
- Estimer le gain en module subi par le signal
- Calculer le nombre  $n$  d'échantillons servant à l'estimation

## ■ Estimation de l'amplitude du signal reçu

- Estimateur de la moyenne  
de variance  $\text{Var}(Y_n) = \sigma^2/n$
- Dégradation en RSB souhaitée de moins de 1 dB

# Correction d'amplitude

- Facteur de contraction en fonction de  $\Delta RSB$ 
  - Exemple pour la 16-QAM



$$\Delta RSB = 10 \log (d'/d)$$

# Correction d'amplitude

## ■ Nombre points servant à l'estimation

— Exemple pour la 16-QAM :

$$n_{MAQ16} = \left( \frac{\alpha_{MAQ16}^2 q \sigma_{MAQ16}}{(1 - \alpha_{MAQ16}^2) E_{MAQ16}} \right)^2 \quad \text{avec} \quad \alpha_{MAQ16} = \frac{1}{3} \left( 2 + 10^{-\Delta RSB/20} \right)$$

— où  $q=3$  : valeurs prises entre  $1-3\sigma$  et  $1+3\sigma$

— Il faut estimer sur 491 points afin que la probabilité une dégradation de moins de 1 dB soit inférieure à  $2,7 \cdot 10^{-3}$

# Correction d'amplitude

- Nombre de points et variance de l'estimateur selon la constellation

Constellation	Espérance module carré	Variance module carré = Sigma2	Nombre n	Sigma2 / n théorique
MAQ16	1	0,32	491	$6,5173 \cdot 10^{-4}$
MAQ32	1	0,31	1381	$2,2247 \cdot 10^{-4}$
MAQ64	1	0,3809	3389	$1,1241 \cdot 10^{-4}$
MAQ128	1	0,3427	7658	$1,4750 \cdot 10^{-5}$
MAQ256	1	0,3953	16556	$2,3877 \cdot 10^{-5}$
MAQ512	1	0,3506	34788	$1,0078 \cdot 10^{-5}$
MAQ1024	1	0,3988	72149	$5,5274 \cdot 10^{-6}$
MAQV29	1	0,4184	1863	$2,2457 \cdot 10^{-4}$

# Correction d'amplitude

- Influence du bruit sur la variance de l'estimateur
  - On constate que l'ajout de bruit sur le signal utile avec un RSB adapté à la constellation a peu d'influence sur la variance.
  - On pourra donc estimer la puissance du signal sur le même nombre de points que pour le signal non bruité.

# Compensation de phase

- Dérive de phase des symboles démodulés
  - Erreurs de synchronisation symbole et fréquentielle => dérive de phase linéaire dans le plan temps fréquence :

$$\phi_{k,n} = \phi_{0,0} + n \cdot \Delta\phi_{freq} + k \cdot \Delta\phi_{temp}$$

- Nécessité de compenser cette dérive de phase.

# Compensation de phase

## ■ Convergence sur les symboles

- Par un **algorithme du gradient**
- Passes aller et retour sur chaque symbole

Pour  $n=1$  à  $\text{nbFreq}$  répéter

Passé aller :

$$\phi_{k,n} = \phi_{k,n-1} + \Delta\phi_{\text{freq}_{k,n-1}} + K_{\phi} \text{erreur}_{k,n-1};$$

$$\Delta\phi_{\text{freq}_{k,n}} = \Delta\phi_{\text{freq}_{k,n-1}} + K_{\phi}' \text{erreur}_{k,n-1};$$

$$c_{k,n}^{\text{compensé}} = e^{-j\phi_{k,n}} c_{k,n}^{\text{reçu}};$$

$$c_{k,n}^{\text{décidé}} = \text{DecideSymbole} \left( c_{k,n}^{\text{compensé}} \right);$$

$$E_{k,n} = |c_{k,n}^{\text{compensé}} - c_{k,n}^{\text{décidé}}|^2;$$

$$\text{erreur}_{k,n} = \text{Im} \left\{ c_{k,n}^{\text{compensé}} \text{conj} \left( c_{k,n}^{\text{décidé}} \right) \right\};$$

Fin répéter

# Compensation de phase

- Convergence sur un symbole :

Tant que ( $EQM_k > \text{seuil}$ )

{

    passe aller sur le symbole numéro k ;

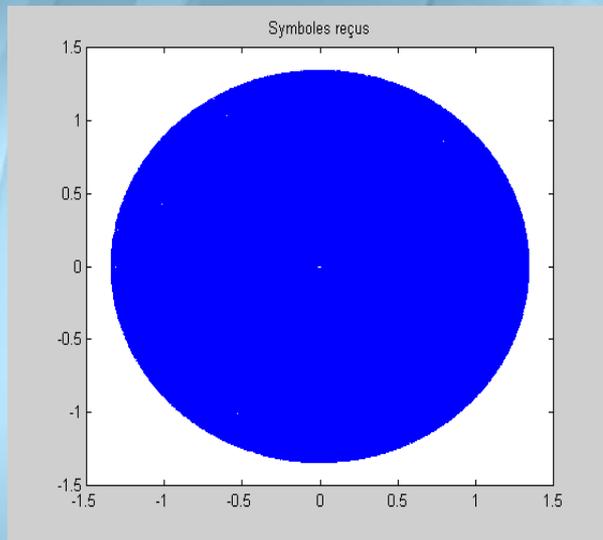
    passe retour sur le symbole numéro k ;

}

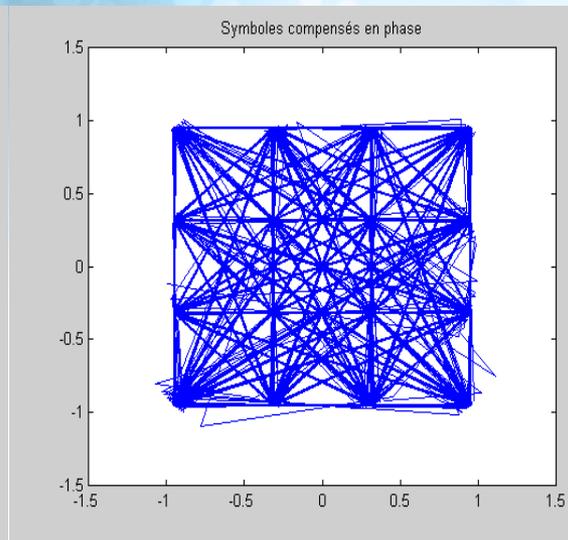
$$EQM_k = \frac{1}{nbFreq} \sum_{n=0}^{nbFreq-1} E_{k,n}$$

# Compensation de phase

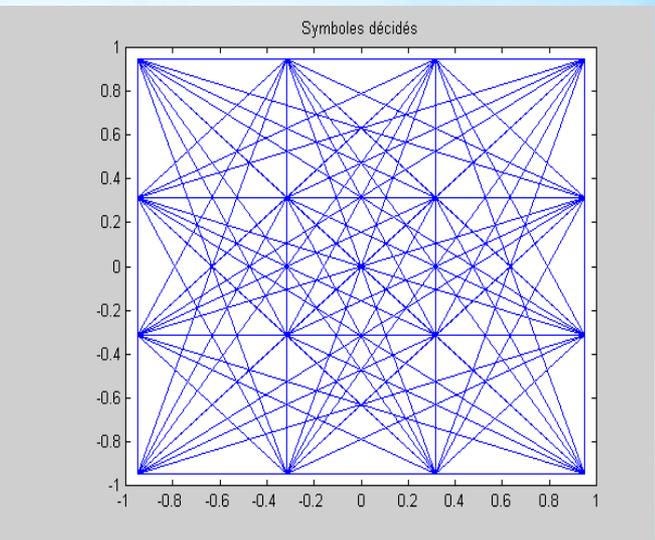
## ■ Résultat sur la constellation 16-QAM



Symboles démodulés



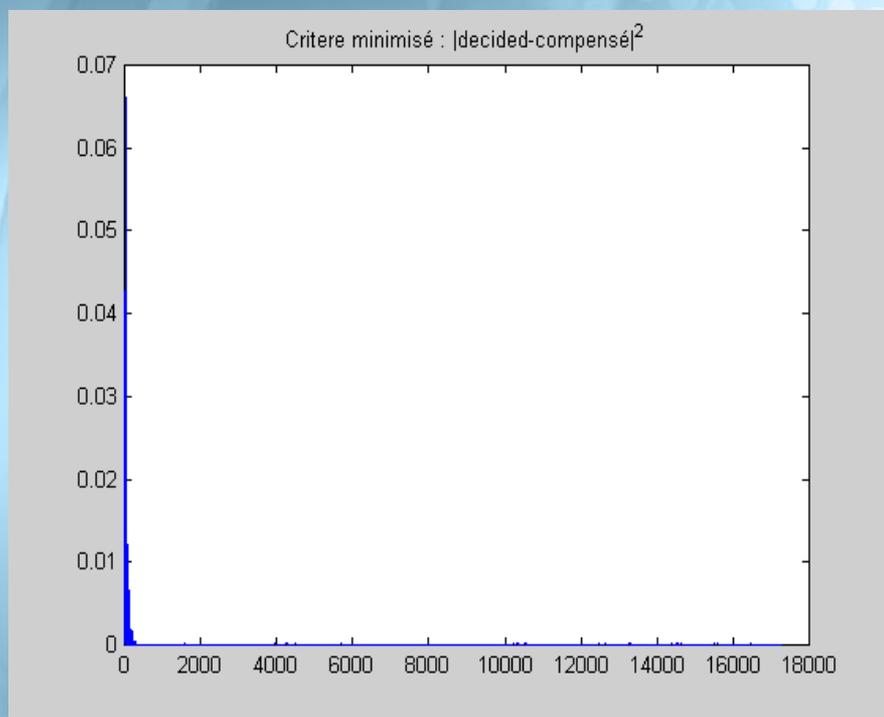
Symboles compensés



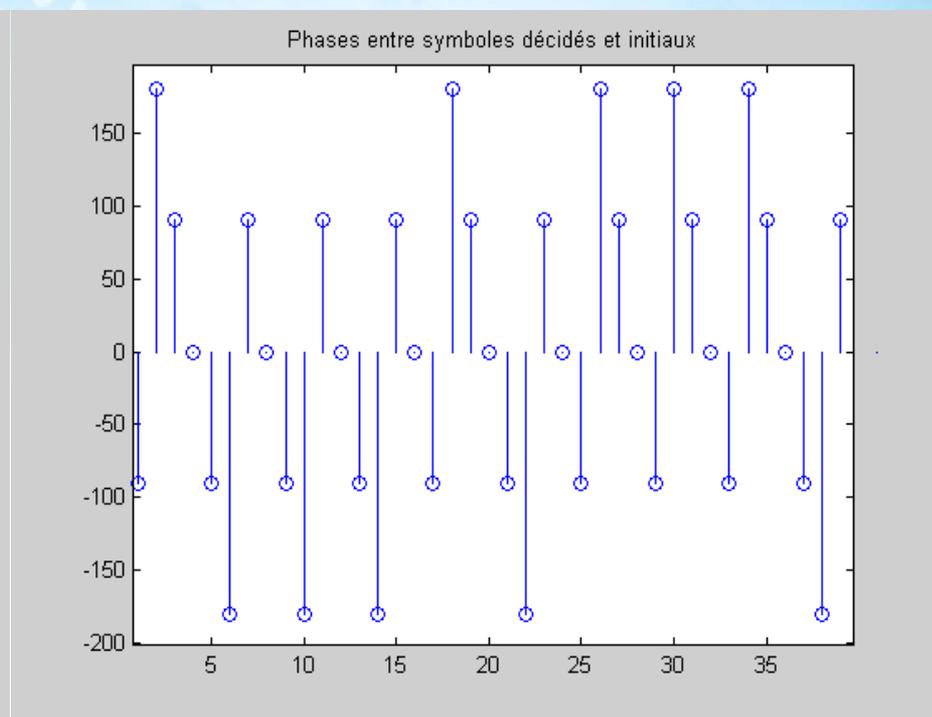
Symboles décidés

# Compensation de phase

## ■ Résultat sur la constellation 16-QAM



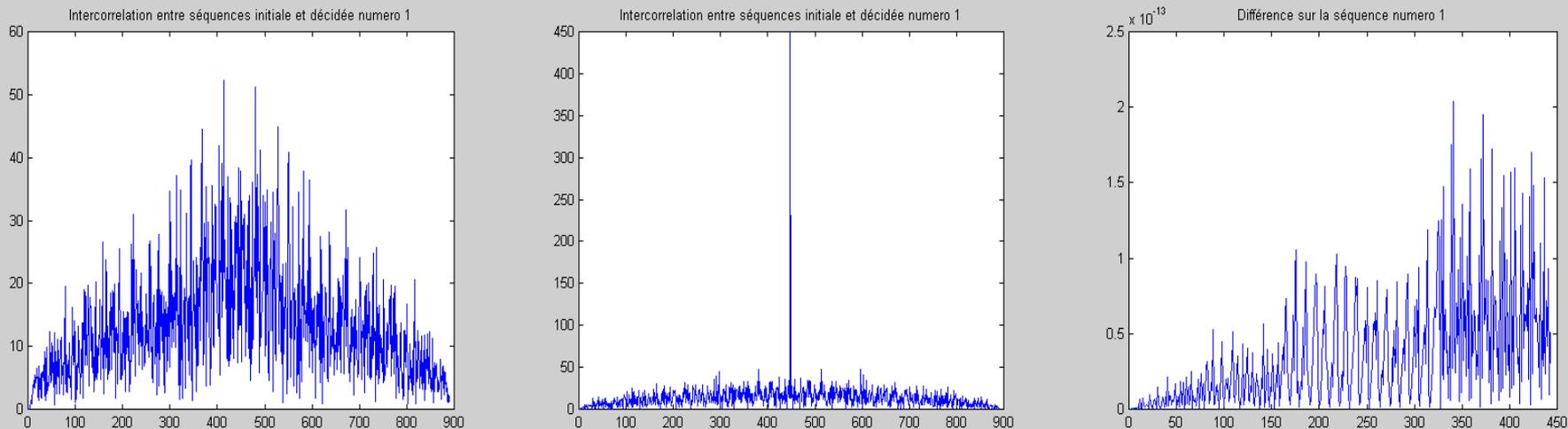
Erreurs finales



Ambiguïtés de phase

# Compensation de phase

## ■ Résultat sur la constellation 16-QAM



- Technique de corrélations successives
- Calcul de la différence avec le symbole compensé

# Compensation de phase

- Résultats pour des signaux OFDM non bruités
  - Compensation correcte pour toutes les constellations testées (BPSK, ..., 16-PSK, 16-QAM, ..., 1024-QAM)
  - En mode coopératif, suppression de l'ambiguïté par technique de corrélation entre séquences émise et démodulée également satisfaisante.