



Démodulation autodidacte de modulations OFDM

THALES Communications

Fabrice Durand - DEA STIR

Plan (1)

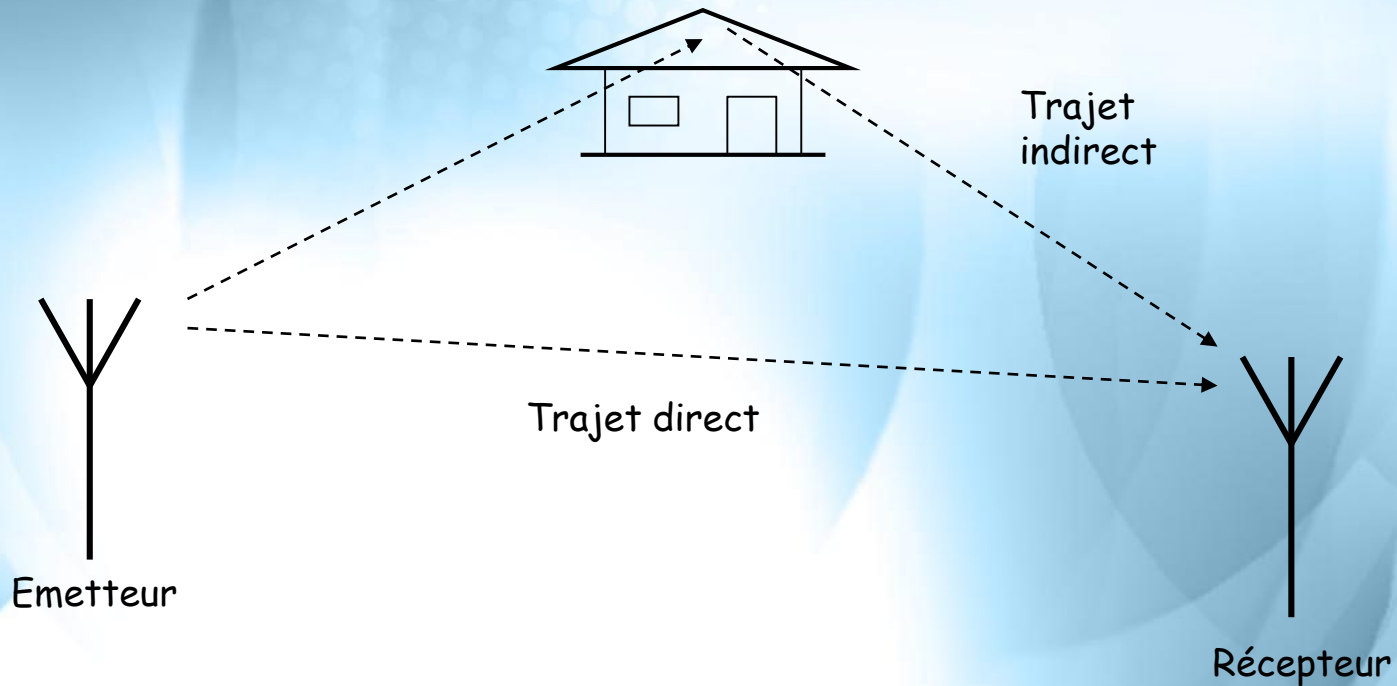
- Introduction aux modulations OFDM
 - Trajets multiples & Interférences Entre Symboles
 - Orthogonalité des sous-porteuses
 - Émetteur et récepteur OFDM
- La synchronisation temps et fréquence
 - Introduction
 - Synchronisation symbole
 - Synchronisation fréquentielle

Plan (2)

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

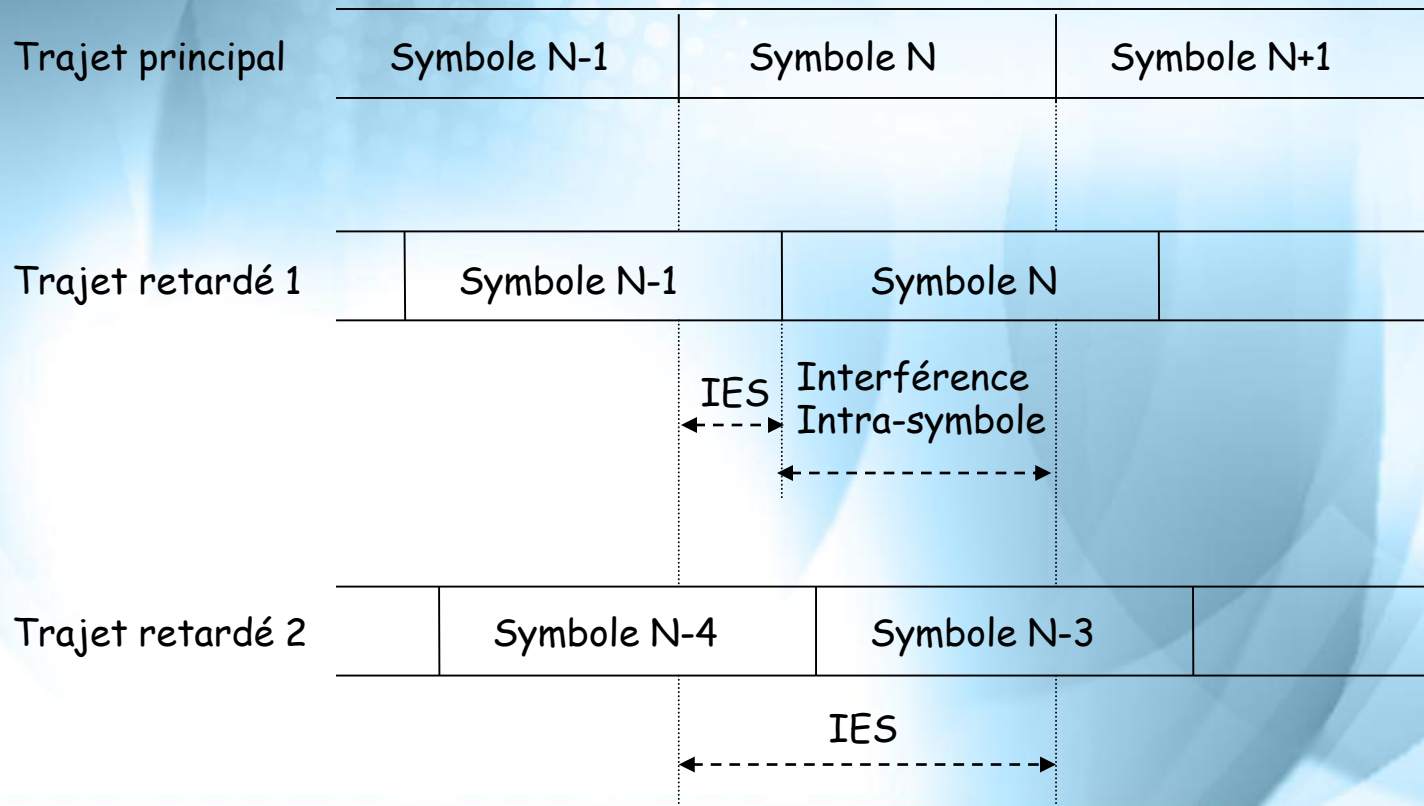
Les modulations OFDM

- Phénomène de trajets multiples



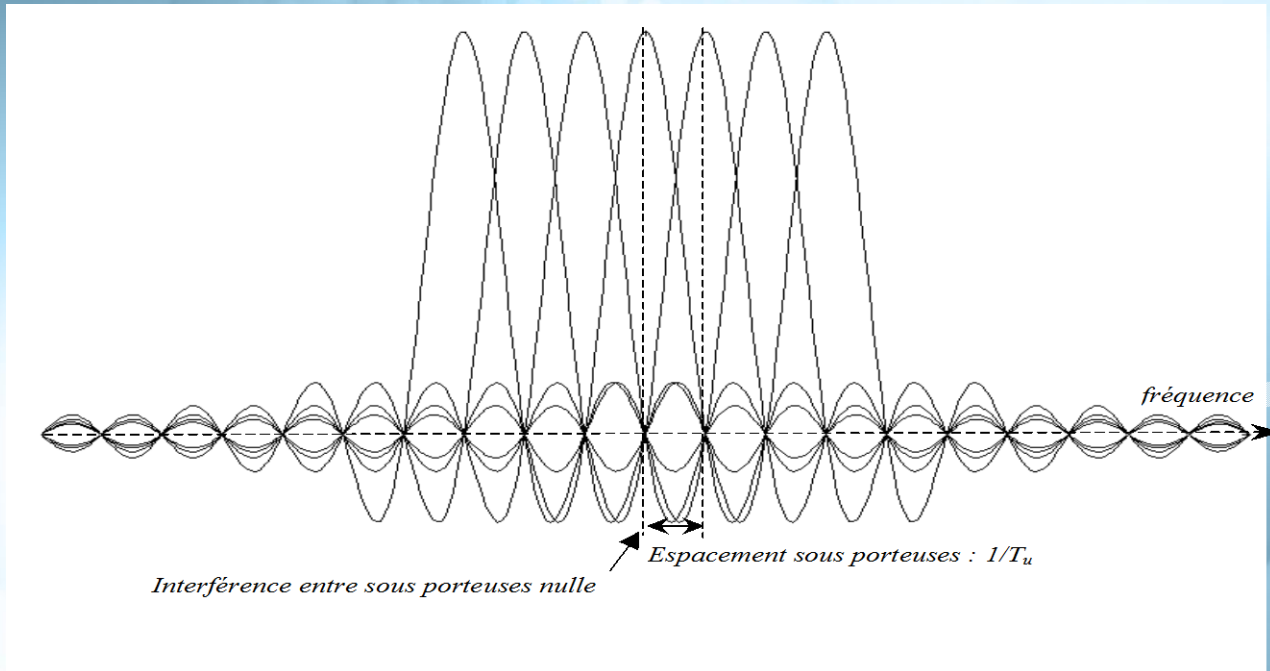
Les modulations OFDM

■ Interférences entre symboles



Les modulations OFDM

- Orthogonalité des sous-porteuses
 - Spectres individuels des sous-porteuses :



- Grande efficacité spectrale

Les modulations OFDM

- Modulation et démodulation par IFFT et FFT

- Symbole OFDM :

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

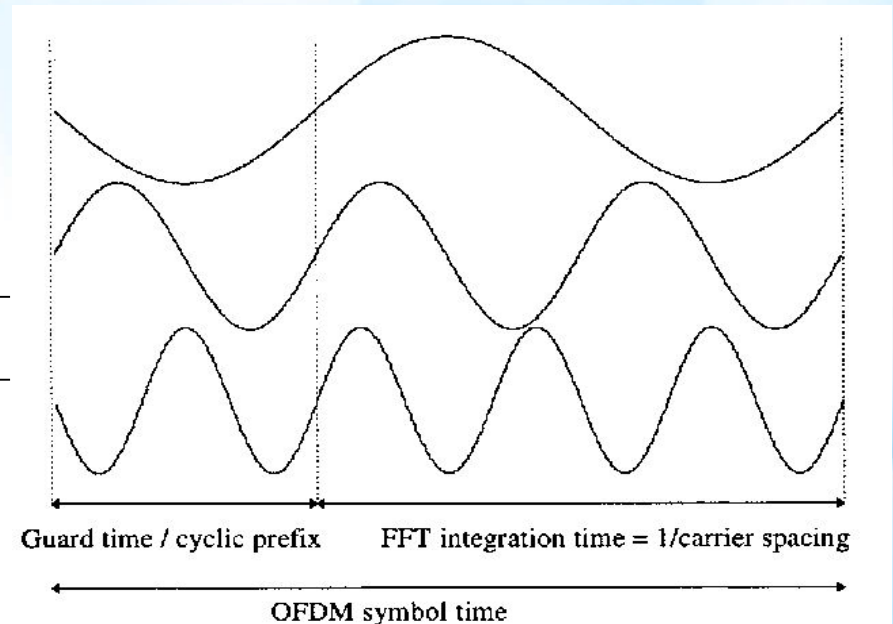
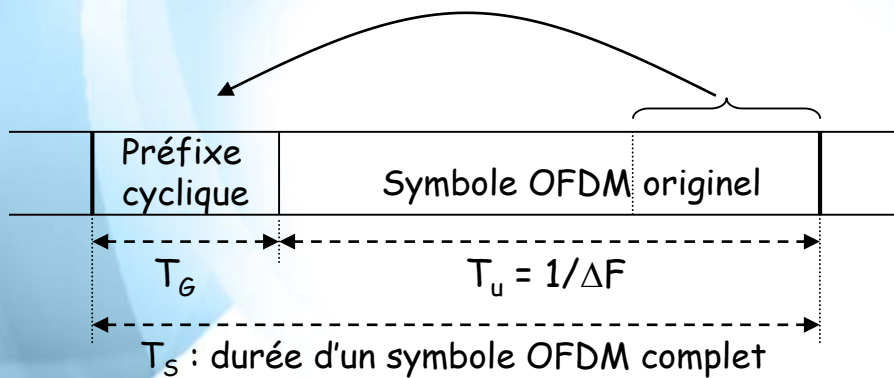
- Échantillonnage du flux série à $T_e = T$
- Séquence $\{s(0), s(1), \dots, s(N-1)\}$ avec :

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

Les modulations OFDM

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

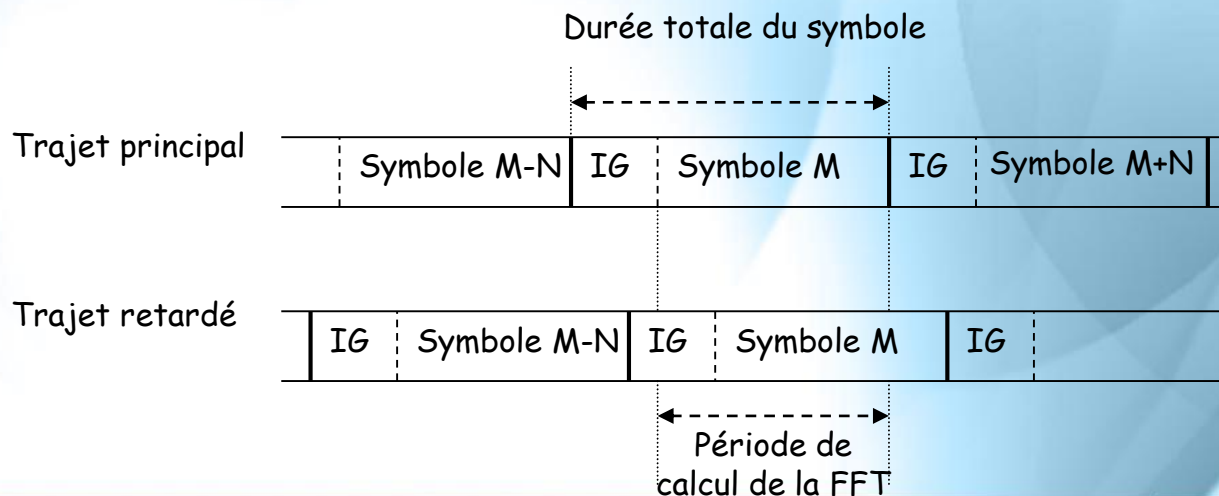
Recopie de la fin du symbole OFDM



Les modulations OFDM

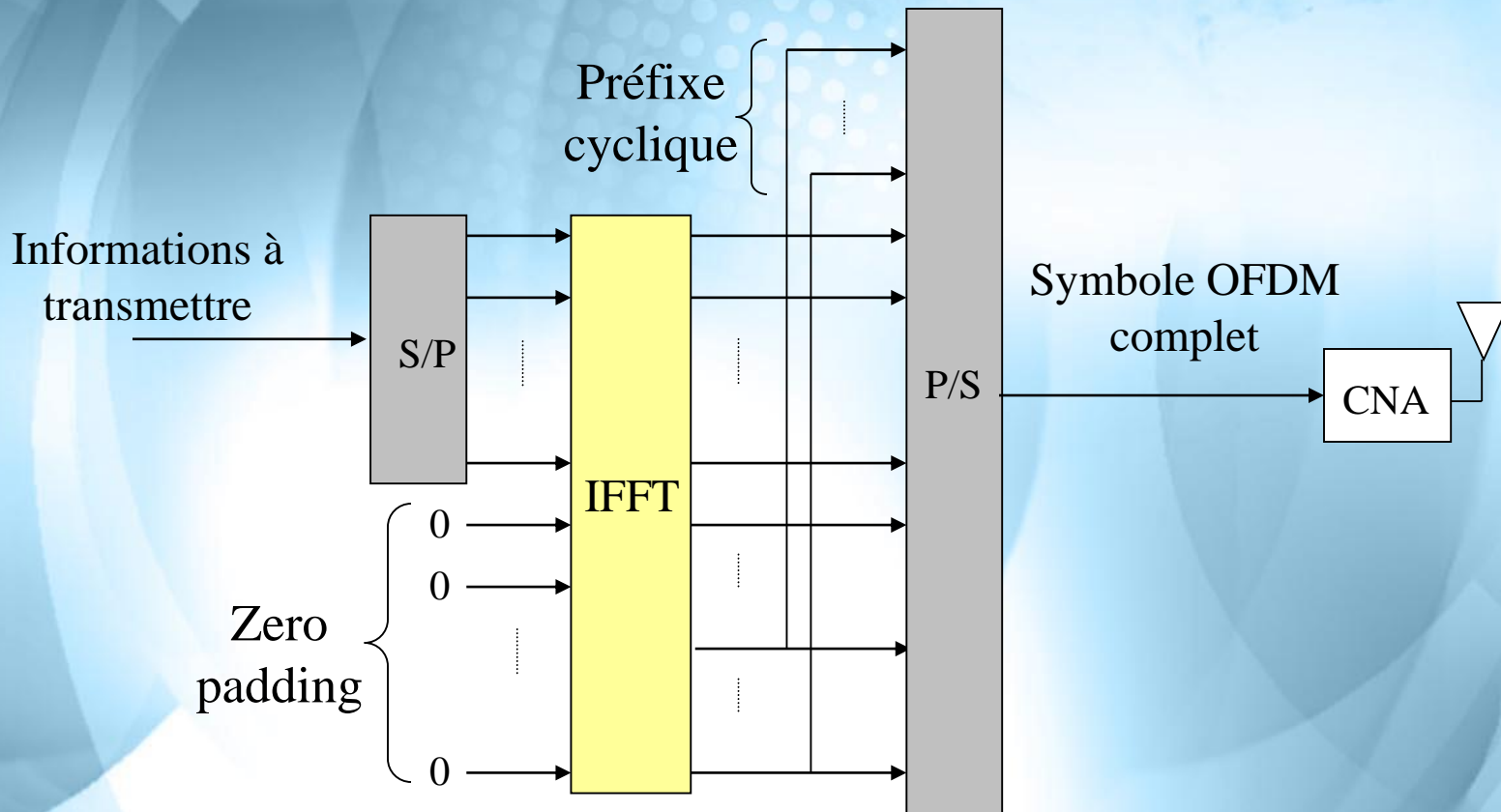
■ Intervalle de garde

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



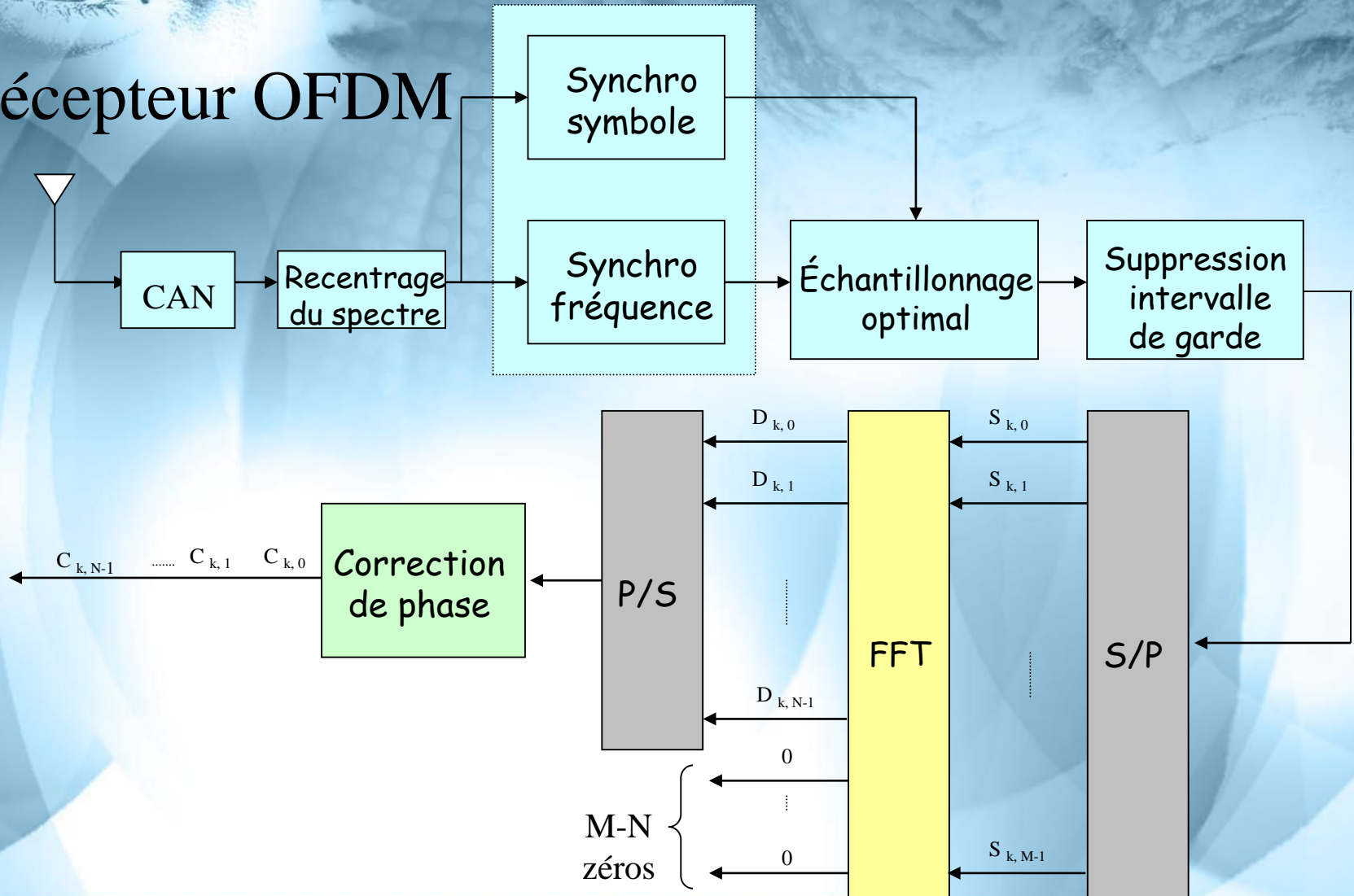
Les modulations OFDM

■ Émetteur OFDM



Les modulations OFDM

■ Récepteur OFDM



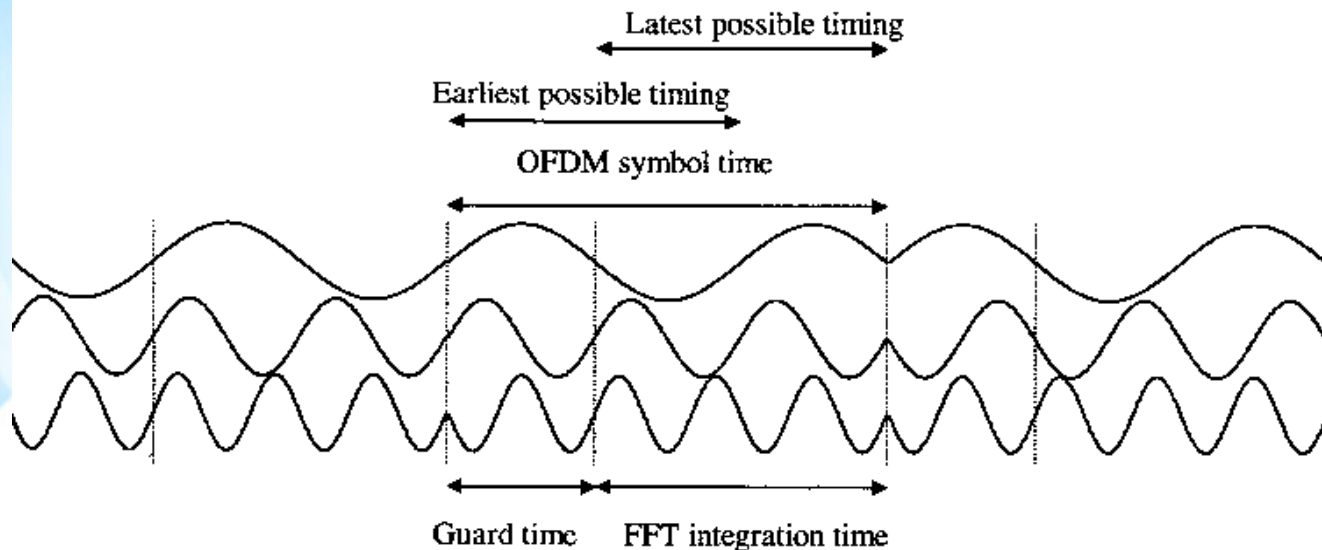
Synchronisation aveugle

■ 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

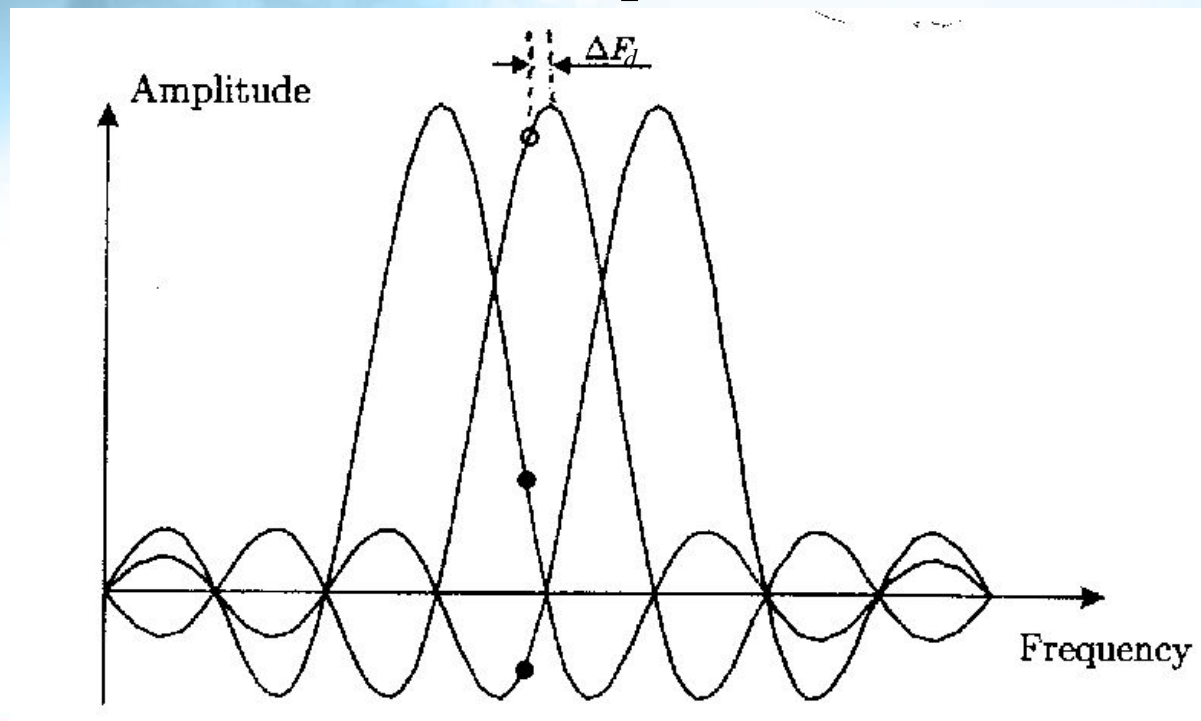
Synchronisation aveugle

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



Synchronisation aveugle

- Synchronisation fréquentielle
 - Effets d'un offset fréquentiel ΔF_d

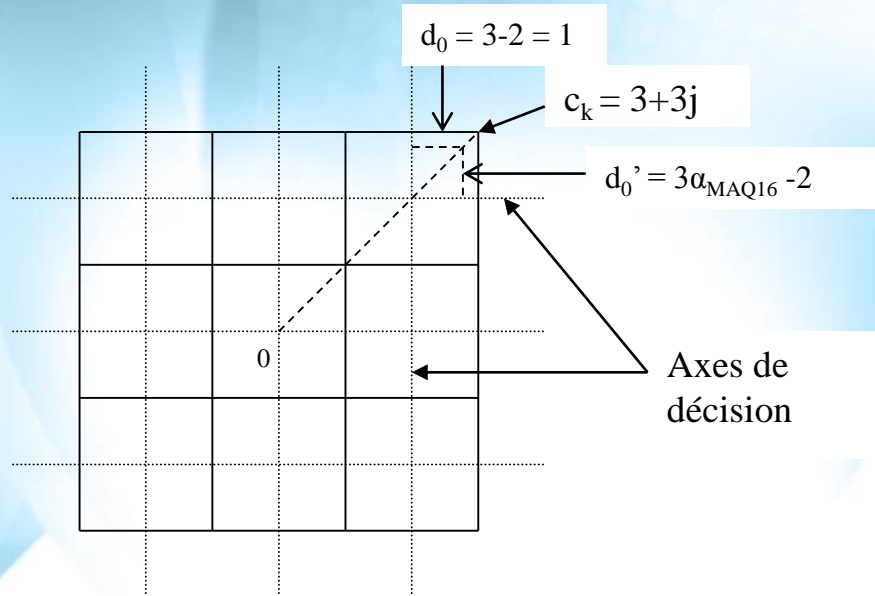


Correction d'amplitude

- Problématique
 - Estimer le gain en module subi par le signal
 - Calculer le nombre n d'échantillons servant à l'estimation de l'amplitude
- 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 ΔRSB
 - 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 pour 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 pour un signal non bruité

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

Constellation	Var $ s ^2$ théorique	Var $ s ^2$ mesurée	(RSB) _{dB}	Var $ s+b ^2$ théorique	Var $ s+b ^2$ mesurée
MAQ16	0.32	0.3188	15 dB	0.3610	0.3606
MAQ32	0.31	0.3061	18 dB	0.3316	0.3288
MAQ64	0.3809	0.3850	21 dB	0.3907	0.3937
MAQ128	0.3437	0.3476	20 dB	0.3479	0.3534
MAQ256	0.3953	0.3863	27 dB	0.3977	0.3897
MAQ512	0.3506	0.3496	30 dB	0.3519	0.3514
MAQ1024	0.3988	0.3952	33 dB	0.3994	0.3963
MAQV29	0.4184	0.4260	15 dB	0.4535	0.4585

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

Correction d'amplitude

- Influence du bruit sur le biais de l'estimateur
 - L'ajout de bruit introduit un léger **biais** dans l'estimation de l'amplitude.
 - Biais plus faible pour un fort RSB, (cas des constellations QAM d'ordre élevé).
 - Biais plus grand pour les PSK, mais le module n'intervient pas dans la décision des points.

Compensation de phase

- Dérive de phase des symboles démodulés
 - Erreurs de synchronisation symbole et fréquentielle => dérive de phase linéaire dans le plan temps fréquence :
 - Bruit de phase dû à l'effet Doppler
 - Bruit thermique et effet Jitter

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

- 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 $nbFreq - 1$

{

$$\varphi_{k,n} = \varphi_{k,n-1} + \Delta\varphi_{freq_{k,n-1}} + K_{\varphi} \text{ erreur}_{k,n-1};$$

$$\Delta\varphi_{freq_{k,n}} = \Delta\varphi_{freq_{k,n-1}} + K_{\varphi}' \text{ erreur}_{k,n-1};$$

Passe aller :

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

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

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

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

}

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 ;

}

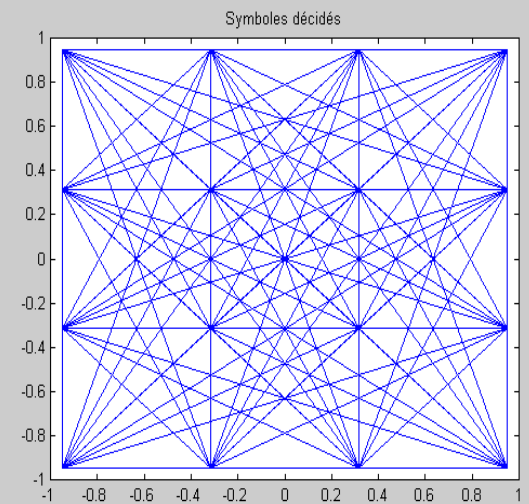
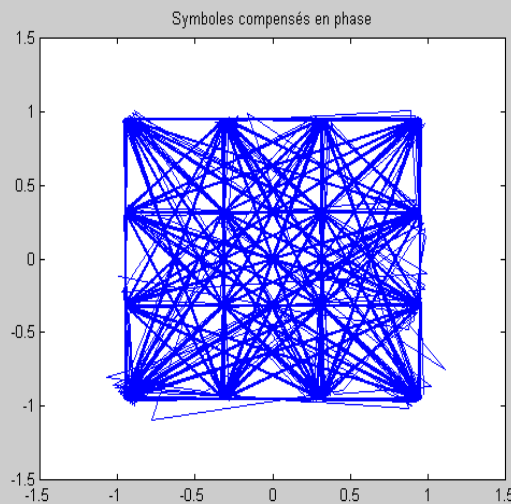
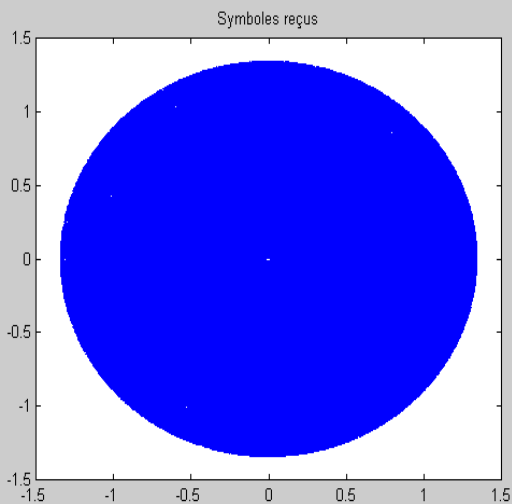
$$EQM_k = \frac{1}{nbFreq} \sum_{n=0}^{nbFreq-1} E_{k,n}$$

Compensation de phase

- Suppression de l'ambiguïté de phase
 - Incertitude de $k \pi/M$ pour les M-PSK et de $k \pi/2$ pour toutes les MAQ.
 - Levée possible de l'ambiguïté par:
 - Tons de synchro connus en mode coopératif
 - Tons de synchro ou Doppler détectés dans le cas aveugle
 - Connaissance des symboles générés appartenant à 2 sous-porteuses successives

Compensation de phase

- Résultats sur la constellation 16-QAM
 - Signal non bruité à trajet unique



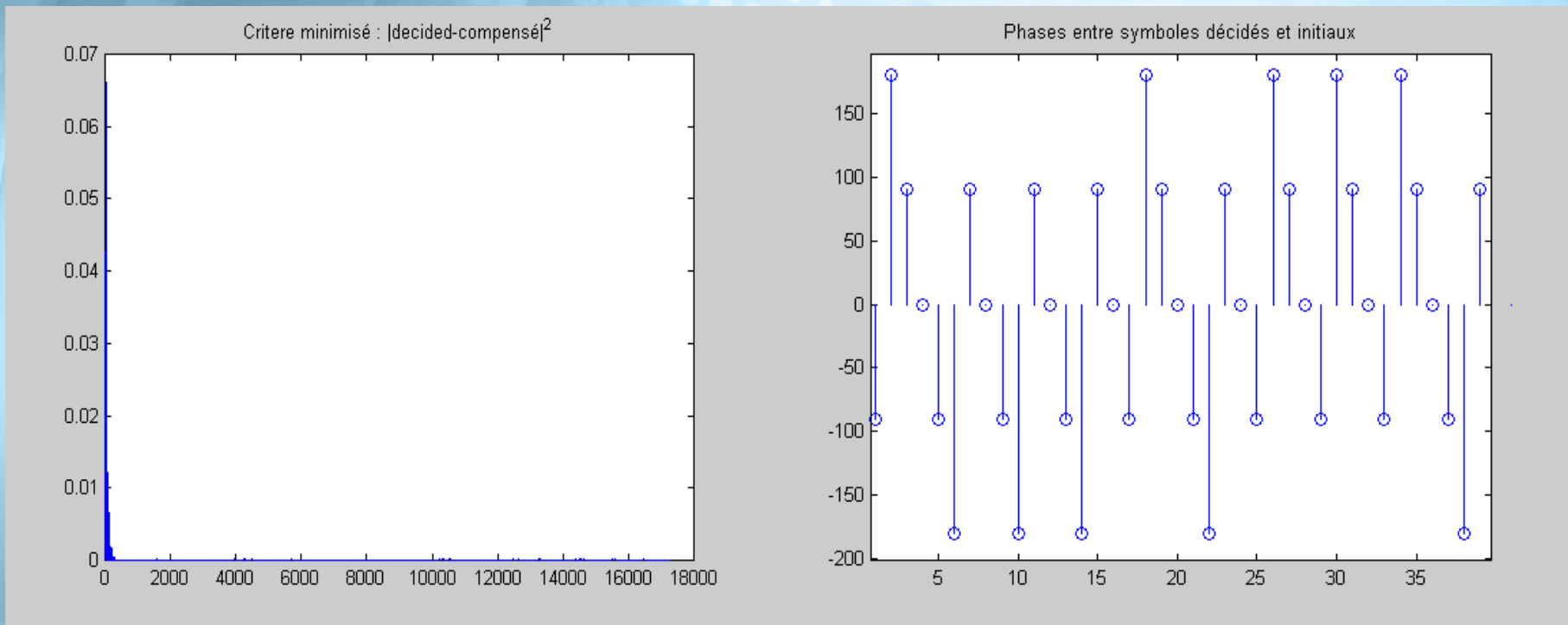
Symboles démodulés

Symboles compensés

Symboles décidés

Compensation de phase

■ Résultats sur la constellation 16-QAM

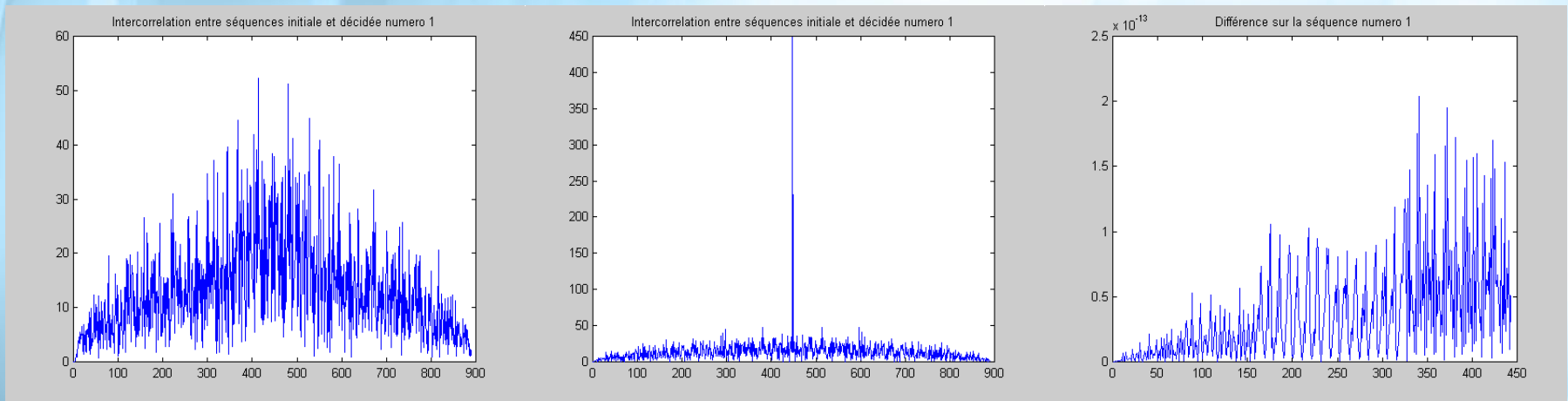


Erreurs finales

Ambiguïtés de phase

Compensation de phase

- Résultat sur la constellation 16-QAM
 - Suppression de l'ambiguïté de phase
 - Par corrélations successives



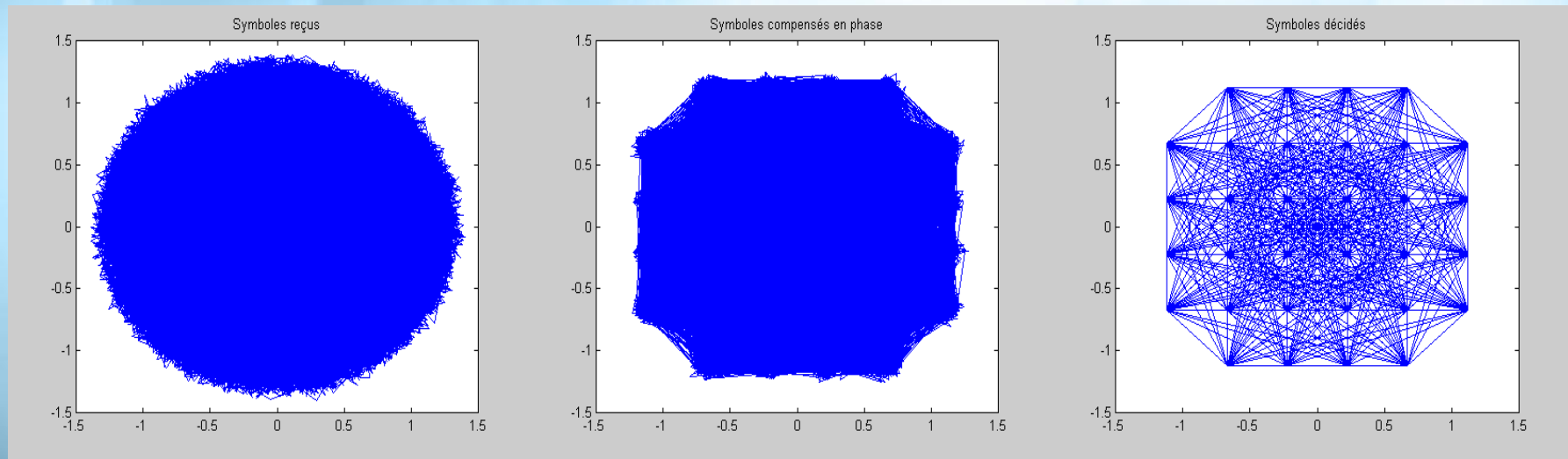
Étape 1

Étape 2

Étape 3

Compensation de phase

- Résultat sur la constellation 16-QAM
 - Bruitée avec un RSB de 15 dB à une F_e de 10 kHz. RSB du signal démodulé : 21,8 dB.



Symboles démodulés

Symboles compensés

Symboles décidés

Compensation de phase

- Conclusion sur la compensation de phase
 - La compensation par l'algorithme du gradient fonctionne correctement
 - Pour un canal à trajet unique non bruité
 - Pour un canal à trajet unique bruité à une certaine fréquence d'échantillonnage et selon un RSB minimal dépendant de la constellation
 - En temps différé, la suppression de l'ambiguïté par corrélations successives entre les séquences émise et démodulée également satisfaisante.

Conclusions

- Estimation de l'amplitude du signal reçu
 - Sur le même nombre de point que pour un signal non bruité
 - Augmentation minime de la variance de l'estimateur avec RSB minimal exigé selon la constellation
 - Introduction d'un léger biais dans l'estimation de l'amplitude du signal utile

Conclusions

- Correction des dérives de phases
 - Première compensation
 - Convergence correcte de l'algorithme du gradient pour des signaux à trajet unique bruités et non bruités
 - Il reste à évaluer les performances dans le cas de trajets multiples à évanouissement, de bruits de phase...
 - Suppression de l'ambiguïté
 - Connaissance partielle du signal généré
 - Tons de synchronisation en mode coopératif
 - Tons Doppler ou de synchronisation en aveugle