

# Algorithmes de Discrimination de Signaux pour la Radio Cognitive

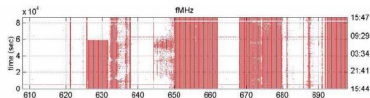
Abdelaziz BOUZEGZI, Philippe CIBLAT, Pierre JALLON

Télécom ParisTech & CEA-LETI

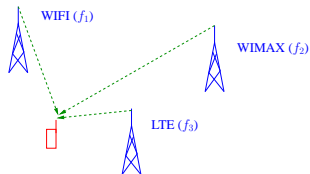
# Problématique (I)

## Applications en radio cognitive

- Malgré un spectre officiellement saturé, de nombreuses bandes restent libres à certaines heures.



- Afin d'exploiter ces bandes libres, un système dit secondaire aura le droit de les utiliser.



- Un terminal cognitif souhaitera se connecter à un système plus nécessairement caractérisé par sa localisation spectrale.

# Problématique (II)

Par conséquent, le terminal cognitif doit être en mesure d'analyser rapidement et efficacement le spectre visé

1. détecter la présence d'un système (primaire ou secondaire)
2. **discriminer ces systèmes (standard utilisé)**
3. analyser leur qualité (SNR, charge)

## Applications militaires

# Méthodes de discrimination

- Méthodes supervisées

- préambule

**NON** car nécessite une longue période d'écoute

- Méthodes autodidactes

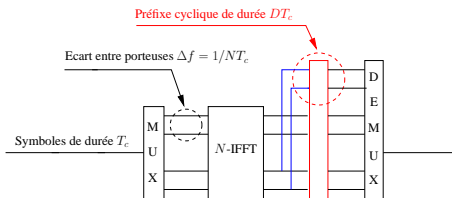
- Utiliser des structures intrinsèques à chaque système pour les différencier
- La majorité des systèmes actuels et futurs emploient l'OFDM (3GGP/LTE, WIFI, WIMAX, TNT, etc)

**OUI** (en espérant avoir une courte période d'écoute)

## Objectif

Discrimination autodidacte de systèmes OFDM

# Discrimination de systèmes OFDM



- Préfixe cyclique : **NON**
- Nombre de sous-porteuses : **NON**
- Modulations linéaires affectées aux porteuses : **NON**
- Ecart entre porteuses ( $1/NT_c$ ) : **OUI**

Système	LTE	Wifi	F-Wimax	M-Wimax	TNT
$1/NT_c$ (kHz)	15	312.5	15.6	10.9	1.1

## Objectif

Discrimination autodidacte de systèmes OFDM par estimation de  $NT_c$

# Modèle du signal OFDM

- Soit  $x_a(t)$  le signal OFDM à temps continu émis (de bande  $1/T_c$ )
- Après le canal de propagation, on a

$$y_a(t) = \left( \sum_{l=1}^L \lambda_l x_a(t - \tau_l) \right) e^{2i\pi \delta f t} + b_a(t)$$

- $y_a(t)$  est échantillonné à  $1/T_e$  satisfaisant le théorème de Shannon (soit  $1/T_e > 1/T_c$ ). Ainsi  $y(m) = y_a(mT_e)$ , pour  $m = 0, \dots, M-1$ , s'écrit de la manière suivante

$$y(m) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{l=1}^L \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{N-1} \lambda_l e^{2i\pi n \frac{\tau_l}{NT_c}} a_{k,n} e^{-2i\pi nm \frac{T_e}{NT_c}} e^{2i\pi(k+1) \frac{DT_c}{NT_c}} \\ \times g_a(mT_e - \tau_l - k(NT_c + DT_c)) e^{2i\pi \Delta f m} + b(m)$$

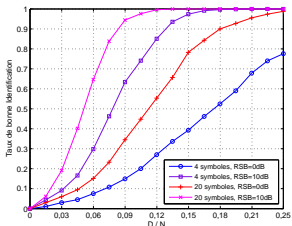
avec

- $a_{k,n}$  symboles d'information inconnus.
- $g_a(t)$  une fonction porte sur  $[0, (NT_c + DT_c)]$
- $M$  le nombre d'échantillons disponibles
- $\Delta f = \delta f T_e$  le résidu de fréquence porteuse normalisé

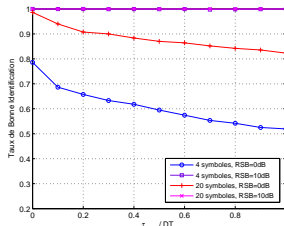
# État de l'art

## Estimateur basé sur la corrélation (induite par le préfixe)

$$\widehat{NT}_c = T_e \arg \max_{n \neq 0} \frac{1}{M-n+1} \sum_{m=0}^{M-n} y(m+n)^* y(m)$$



(a) Performances vs. préfixe



(b) Performances vs. canal

## Objectif

Discrimination autodidacte de systèmes OFDM par estimation de  $NT_c$  robustes au canal et à un court préfixe cyclique

# Contributions

**Nous avons développé cinq nouveaux algorithmes scindés en deux familles :**

- Méthodes synchrones
  - *Méthode par minimisation de kurtosis (KM)*
  - Méthode par maximum de vraisemblance (ML)
  - Méthode par filtrage adapté (MF)
- Méthodes asynchrones
  - *Méthode basée sur la cyclo-corrélation (CC)*
  - Méthode exploitant la périodicité en fréquence du kurtosis (PK)



# Minimisation du Kurtosis - KM (I)

Soient  $\tilde{N}$ ,  $\tilde{NT}_c$  et  $\tilde{DT}_c$  des valeurs-tests de  $N$ ,  $NT_c$  et  $DT_c$ .  
Le récepteur fonctionne de la manière suivante :

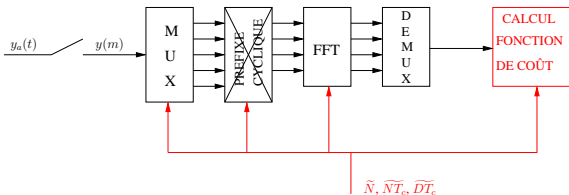
- 1 Décomposer les échantillons reçus en blocs OFDM estimés

$$r_{k,p} = y_a(pT_e + \tilde{DT}_c + k(\tilde{NT}_c + \tilde{DT}_c))$$

- 2 Estimer les symboles transmis

$$\forall n \in \{0, \dots, \tilde{N}-1\}, \hat{a}_{k,n} = \frac{1}{\sqrt{\tilde{P}}} \sum_{p=0}^{\tilde{P}-1} r_{k,p} e^{2i\pi p \frac{nT_e}{\tilde{NT}_c}} \text{ avec } \tilde{P} = \lfloor \tilde{NT}_c / T_e \rfloor$$

- 3 Calculer une fonction de coût adéquate



# Minimisation du Kurtosis - KM (II)

- L'algorithme KM est basé sur l'idée suivante
  - 1 Si  $\widetilde{NT}_c = NT_c$  et  $\widetilde{DT}_c = DT_c$ ,  $\hat{a}_{k,n}$  ne dépend que de  $a_{k,n}$ .
  - 2 Sinon,  $\hat{a}_{k,n}$  dépend de  $a_{k,n}$  **et** de termes supplémentaires associés à l'interférence entre porteuses et entre blocs.
- Une synchronisation du récepteur est nécessaire et sera réalisée **conjointement** avec l'estimation des paramètres.
- On propose d'utiliser le kurtosis comme mesure du niveau d'interférence

$$[\widehat{\tau}_{min}, \widehat{\Delta f}, \widehat{NT}_c, \widehat{DT}_c] = \arg \min_{\widetilde{\tau}_{min}, \widetilde{\Delta f}, \widetilde{NT}_c, \widetilde{DT}_c} \hat{J}_{KM} \left( \widetilde{\tau}_{min}, \widetilde{\Delta f}, \widetilde{NT}_c, \widetilde{DT}_c \right)$$

avec

## Estimateur KM

$$\hat{J}_{KM} = \frac{\frac{1}{KN} \sum_{k=0}^{\tilde{K}-1} \sum_{n=0}^{\tilde{N}-1} |\hat{a}_{k,n}|^4 - \left| \frac{1}{KN} \sum_{k=0}^{\tilde{K}-1} \sum_{n=0}^{\tilde{N}-1} \hat{a}_{k,n} \right|^2}{\left( \frac{1}{KN} \sum_{k=0}^{\tilde{K}-1} \sum_{n=0}^{\tilde{N}-1} |\hat{a}_{k,n}|^2 \right)^2} - 2$$

# Cyclocorrélation - CC (I)

- Soit  $R(m, n) = \mathbb{E}[y(m+n)^* y(m)]$  l'autocorrélation du signal OFDM reçu
- L'autocorrélation est non nulle pour  $R(m, 0)$  et  $R(m, \pm\alpha)$  avec  $\alpha = \lfloor NT_c/T_e \rfloor$  (cf. méthode par corrélation de l'état de l'art)
- La fonction  $m \mapsto R(m, \pm\alpha)$  est périodique de période  $\alpha + \beta$  avec  $\beta = \lfloor DT_c/T_e \rfloor$ .
  - $p/(\alpha + \beta)$ , pour  $p = 0, \dots, \alpha + \beta - 1$ , sont des fréquences cycliques
  - La fonction  $m \mapsto R(m, \pm\alpha)$  se décompose en séries de Fourier

$$R(m, \pm\alpha) = \sum_p R^{(p/(\alpha+\beta))}(\pm\alpha) e^{2i\pi \frac{mp}{\alpha+\beta}}$$

avec  $R^{(p/(\alpha+\beta))}(\pm\alpha)$  la cyclocorrélation à la fréquence cyclique  $p/(\alpha + \beta)$  au retard  $\pm\alpha$

# Cyclocorrélation - CC (II)

- On remarque que de l'information sur  $NT_c$  est présente dans le **décalage** et dans la **fréquence cyclique**
- La méthode par corrélation de l'état de l'art n'utilise que l'information sur  $NT_c$  portée par le décalage (à la fréquence cyclique nulle)
- Nous proposons d'utiliser conjointement le décalage et les fréquences cycliques pour estimer  $NT_c$ , d'où,

## Estimateur CC

$$[\hat{\alpha}, \hat{\beta}] = \arg \max_{\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}} \left\{ \hat{J}_{CC}^{(N_b)}(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}) = \frac{1}{2N_b + 1} \sum_{p=-N_b}^{N_b} \left| \hat{R}^{(p/(\tilde{\alpha}+\tilde{\beta}))}(\tilde{\alpha}) \right|^2 \right\}$$

avec

$$\hat{R}^{(p/(\alpha+\beta))}(\alpha) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} y(m+\alpha)^* y(m) e^{-2i\pi \frac{mp}{\alpha+\beta}}$$

et  $N_b$  le nombre de fréquences cycliques positives considérées

# Simulations (I)

## Protocole de simulations :

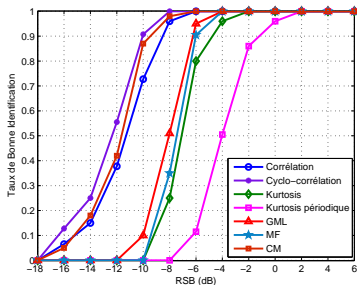
nombre de sous-porteuses ( $N$ )	64
période utile ( $NT_c$ )	$3.2\mu\text{s}$
préfixe cyclique ( $D/N$ )	1/32
sur-échantillonnage ( $T_c/T_e$ )	2
nombre de symboles OFDM	100
canal multi-trajets	$\tau_{max} = (D/N)/4$
rapport signal-à-bruit	0dB
tirages Monte Carlo	1000

## Critère de performances :

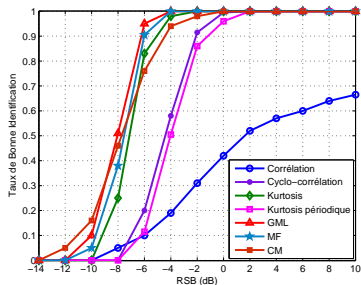
- Erreur Quadratique Moyenne  $\mathbb{E}[|\widehat{NT_c} - NT_c|^2]$  : **NON**
- Probabilité de bonne détection : **OUI**
  - Si on trouve un  $\widehat{NT_c}$  à moins de 1% d'erreur du  $NT_c$  testé, on dit qu'il y a bonne détection
  - Probabilité de fausse alarme pour cette mesure de bonne détection est très faible

$$P_{\text{fausse alarme}} \leq 1 - P_{\text{bonne détection}}$$

# Simulations (II) : SNR et préfixe cyclique

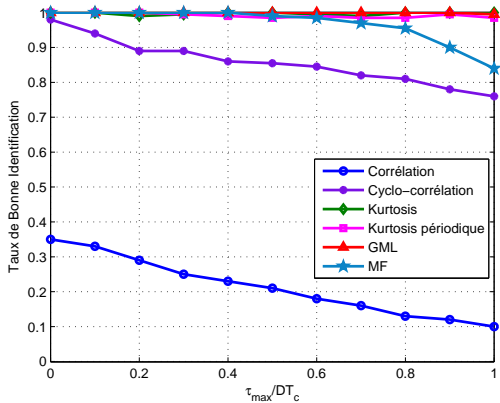


$D/N = 1/4$

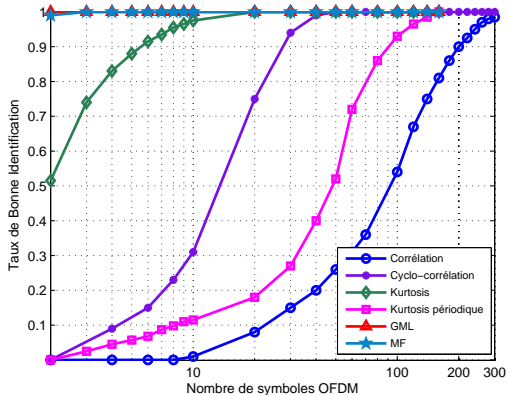


$D/N = 1/32$

# Simulations (III) : canal de propagation



# Simulations (IV) : durée d'observation





# Comparaison

Sensibilité à	SNR	$T_o$	$D/N$	Canal	Sync.	Complexité
Corrélation	A	B	C	C	A	A
Corrélation cyclique	A	B	B	B	A	A
Kurtosis périodique	B	C	A	A	A	A
Minimum de Kurtosis	A	B	A	A	A	C
Vraisemblance	A	A	A	A	A	C
Filtrage adapté	A	A	A	B	A	C

- Si complexité interdite, le choix se porte sur CC
- Si complexité autorisée, le choix se porte sur KM

# Conclusion

## Conclusions

- Le travail mené aborde la problématique de caractérisation de signaux dans des contextes de fonctionnement extrêmes.
- Cinq nouvelles méthodes ont été proposées et validées par simulation et sur un banc de test.
- Toutes les méthodes présentent de nets avantages par rapport à l'état de l'art.

## Perspectives

- Connaissance des variances pour le GML à contourner
- Autres méthodes possibles s'inspirant de la séparation de sources ou de l'égalisation autodididacte (par ex., ajustement de covariance)
- Travailler sur la troisième étape du terminal cognitif : analyse de la qualité du lien