



# Démodulation aveugle dans un contexte d'interception

*DAUMONT Steredenn  
Equipe SCEE Supélec  
Séminaire 02 octobre 2008*



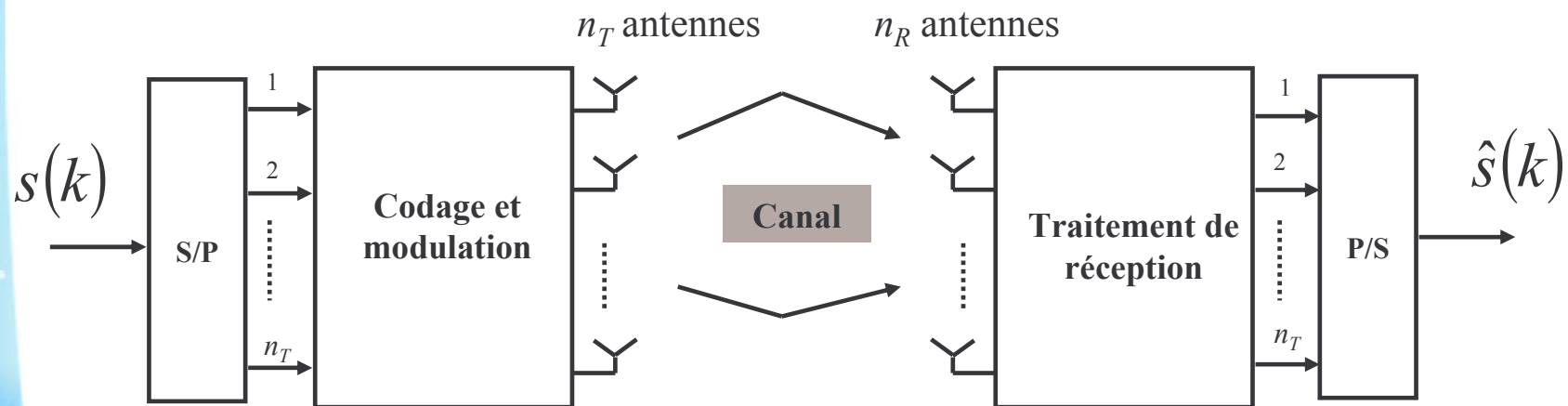


## Plan

- Les transmissions MIMO
- La séparation aveugle de source
- Poursuite du canal : filtre de Kalman
- Conclusion

## I-Les transmissions MIMO

- MIMO : Multiple Input Multiple Output
- Système BLAST (1996, Laboratoire Bell) : premier système MIMO, augmentation de la capacité du canal
- Code d'Alamouti (1998) : code introduisant de la redondance, augmente la robustesse de la transmission



système MIMO – V-BLAST

## I-Les transmissions MIMO

### La démodulation aveugle

- **Contexte : interception MIMO**
- **Pas de séquences d'apprentissage => aucune connaissance sur le canal de transmission**
- **Problématique : comment estimer les symboles transmis lorsque :**
  - Le canal MIMO est instantané, invariant ou variant
  - Le canal MIMO est convolutif, invariant ou variant
- **Solutions lorsque le canal MIMO est instantané:**
  - La séparation aveugle de source (BSS) (canal invariant)
  - L'estimation aveugle du canal à l'aide du filtre de Kalman (canal variant)

# I-Les transmissions MIMO

## Systeme

- Signaux reçus  $y$  à l'instant  $k$

$$y(k) = H(k)s(k) + b(k)$$

- Où
- $s(k)$  = vecteur ( $N_{tx} \times 1$ ) des sources à l'instant  $k$ ,
  - $H(k)$  = matrice ( $N_{rx} \times N_{tx}$ ) de canal, de rang colonne plein
  - $b(k)$  = vecteur ( $N_{rx} \times 1$ ) des bruits additifs gaussiens
  - $y(k)$  = vecteurs ( $N_{rx} \times 1$ ) des signaux reçus

## II-La séparation aveugle de sources

### a) Hypothèses

- $N_r \geq N_t$
- Le type de constellation utilisé en émission est connu
- Les composantes de  $H$  sont iid
- $H$  unitaire sinon les signaux  $Y$  reçus doivent être blanchis avant la BSS
- Le bruit est blanc gaussien de moyenne nulle
- Les signaux sources  $S$  ont une moyenne nulle, une puissance unitaire et sont mutuellement indépendants à un instant  $k$

## II-La séparation aveugle de sources

### b) Principe

- Principe

$$\begin{aligned} \mathbf{z}(\mathbf{k}) &= \mathbf{W}^t(\mathbf{k})\mathbf{y}(\mathbf{k}) \\ &= \mathbf{W}^t(\mathbf{k})\mathbf{H}\mathbf{s}(\mathbf{k}) + \mathbf{b}'(\mathbf{k}) \\ &= \mathbf{G}^t(\mathbf{k})\mathbf{s}(\mathbf{k}) + \mathbf{b}'(\mathbf{k}) \end{aligned}$$

- Idéalement :

$$\begin{aligned} \mathbf{z}(\mathbf{k}) &= \hat{\mathbf{s}}(\mathbf{k}) \\ \mathbf{G}(k) &= \mathbf{I} \end{aligned}$$

- En réalité,

$$\mathbf{z}(k) = \Phi\mathbf{P}\hat{\mathbf{s}}(k)$$

## II-La séparation aveugle de sources

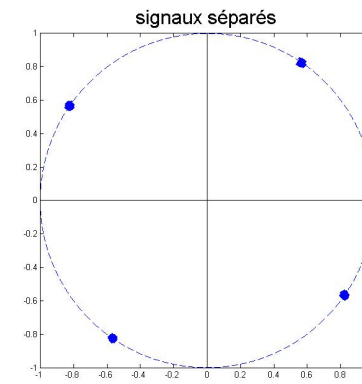
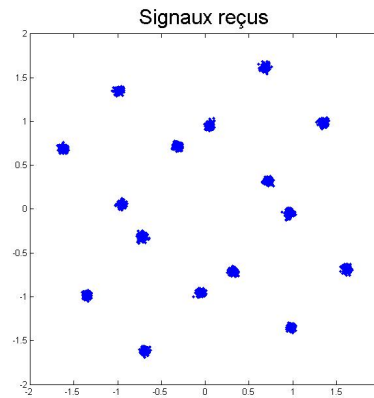
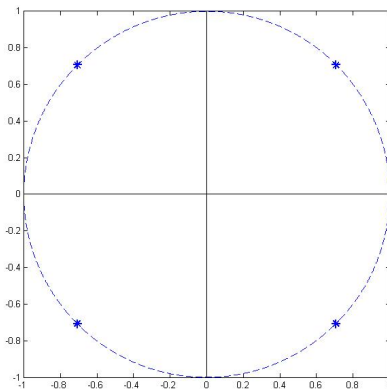
### c) Fonction de coût

- **Constant Modulus** : exploite la propriété de module constant des sources

$$J(W) = \sum_{n=1}^{N_t} E \left[ \left( |z_n(k)|^2 - R \right)^2 \right], \text{ avec } R = \frac{E \left[ |\Re(\mathbf{x}(k))|^4 \right]}{E \left[ |\Re(\mathbf{x}(k))|^2 \right]}$$

- Complété par une contrainte d'orthogonalisation des sorties :

$\mathbf{G}^H \mathbf{G} = \mathbf{I}_{N_t}$  indépendance entre les sorties de l'égaliseur



## II-La séparation aveugle de sources

### c) Fonction de coût

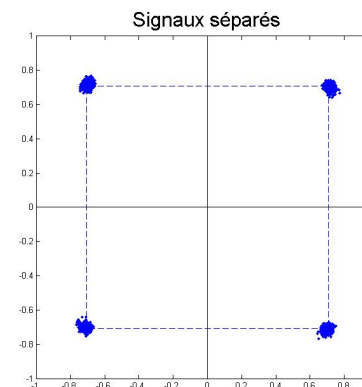
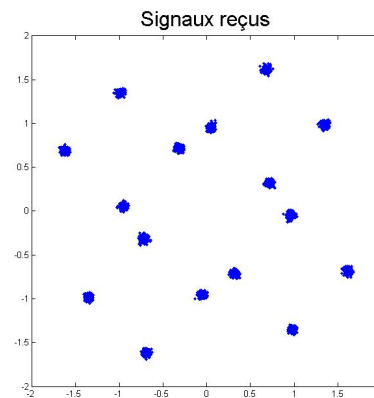
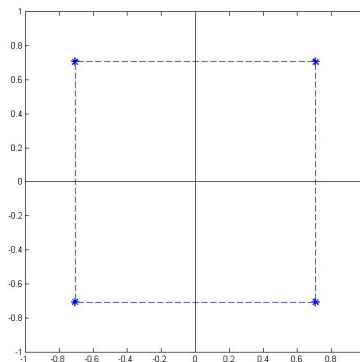
- **MultiModulus** : composé de deux fonctions de coût (partie réelle et imaginaire)

$$J(W) = \sum_{n=1}^{N_t} E \left[ \left( \Re(z_n(k))^2 - R \right)^2 \right] + E \left[ \left( \Im(z_n(k))^2 - R \right)^2 \right]$$

- Complété par une contrainte d'orthogonalisation des sorties :

$$G^H G = I_{N_t}$$

indépendance entre les sorties de l'égaliseur



## II-La séparation aveugle de sources

### d) Implémentation

- **Gradient stochastique (Algorithme CMA et MMA)**
  - *Technique adaptative*
  - *Convergence lente => peu performant sur des canaux sélectifs en temps*
  - *Bonnes performances sur des canaux fixes*
  - *Peu de connaissances nécessaires sur l'émission*
- **Méthodes algébriques (Algorithme ACMA)**
  - *Technique adaptative ou par blocs*
  - *Technique adaptative : convergence rapide en 4-QAM, complexité(ACMA) > complexité(CMA ou MMA)*
  - *Technique par blocs : peu de données nécessaires pour obtenir la convergence*
  - *Méthodes utiles sur des canaux variant dans le temps*

## II-La séparation aveugle de sources

### d) Implémentation

#### Gradient stochastique (Algorithme CMA et MMA)

- Mise à jour de la matrice d'égalisation à l'aide du gradient stochastique

$$\mathbf{W}'(k+1) = \mathbf{W}(k) + \mu \nabla_{\mathbf{W}} J(\mathbf{W})$$

$\mathbf{W}(k+1)$  est obtenu ensuite par orthogonalisation de  $\mathbf{W}'(k+1)$

## II-La séparation aveugle de sources

### d) Implémentation

### Méthode algébrique (Algorithme ACMA)

- Basée sur la réécriture du critère CM :

$$J(W) = \sum_{n=1}^{N_t} E \left[ \left( |\mathbf{w}_n^H \mathbf{y}(k)|^2 - R \right)^2 \right] = \sum_{n=1}^{N_t} E \left[ \left( (\mathbf{y}^*(n) \otimes \mathbf{y}(n))^H (\mathbf{w}_n^* \otimes \mathbf{w}_n) - R \right)^2 \right]$$

$$= \sum_{n=1}^{N_t} \frac{1}{N_p} \|\mathbf{Y}\mathbf{p} - \mathbf{1}\|^2 \quad \text{avec } \mathbf{Y} = \begin{pmatrix} (\mathbf{y}^*(1) \otimes \mathbf{y}(1))^H \\ \vdots \\ (\mathbf{y}^*(N_p) \otimes \mathbf{y}(N_p))^H \end{pmatrix}, \quad \mathbf{p} = (\mathbf{w}_n^* \otimes \mathbf{w}_n)$$

- Résolution du système linéaire  $\mathbf{Y}\mathbf{p}=\mathbf{1}$  de manière adaptative ou par bloc

$$\mathbf{a} \otimes \mathbf{b} = \begin{pmatrix} a_1 \mathbf{b} \\ a_2 \mathbf{b} \\ \vdots \\ a_b \mathbf{b} \end{pmatrix}$$

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Problématique

$$\mathbf{z}(k) = \Phi \mathbf{P} \mathbf{s}(k)$$

- **Indéterminations sur la phase des sources :**

Solutions : utilisation du critère MM

- **Indétermination sur l'ordre des sources :**

Solutions : utilisation de la redondance introduite par le code d'Alamouti pour lever l'ambiguïté sur l'ordre

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

#### • Alamouti

■ Les symboles envoyés sont :

$$\begin{pmatrix} s(1) & -s^*(2) & s(3) & -s^*(4) & \dots \\ s(2) & s^*(1) & s(4) & s^*(3) & \dots \end{pmatrix}$$

■ Après séparation on obtient une version permutée, tournée et bruitée de symboles envoyés :

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} z_1(0) & z_1(1) & z_1(2) & z_1(3) & \dots \\ z_2(0) & z_2(1) & z_2(2) & z_2(3) & \dots \end{pmatrix}$$

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

■ A cause des permutations sur les lignes on a :

$$\mathbf{Z} \approx \begin{pmatrix} s(1)e^{jk\frac{\pi}{2}} & -s^*(2)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s(3)e^{jk\frac{\pi}{2}} & -s^*(4)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \dots \\ s(2)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s^*(1)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s(4)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s^*(3)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \dots \end{pmatrix}$$

$$\text{ou } \mathbf{Z} \approx \begin{pmatrix} s(2)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s^*(1)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s(4)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s^*(3)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \dots \\ s(1)e^{jk\frac{\pi}{2}} & -s^*(2)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s(3)e^{jk\frac{\pi}{2}} & -s^*(4)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \dots \end{pmatrix}$$

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

■ A cause de l'interception :

**Début de trame?**

$$\mathbf{Z} \approx \begin{pmatrix} s(1)e^{jk\frac{\pi}{2}} & -s^*(2)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s(3)e^{jk\frac{\pi}{2}} & -s^*(4)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \dots \\ s(2)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & s^*(1)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & s(4)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & s^*(3)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & \dots \end{pmatrix}$$

$$\text{ou } \mathbf{Z} \approx \begin{pmatrix} s^*(1)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s(4)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s^*(3)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \dots \\ -s^*(2)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & s(3)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & -s^*(4)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & \dots \end{pmatrix}$$

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

- A cause de la phase  $k$  différent de  $k'$  :

#### Perte du schéma d'Alamouti

$$\mathbf{Z} \approx \begin{pmatrix} s(1)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s^*(2)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s(3)e^{jk\frac{\pi}{2}} & -s^*(4)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \dots \\ s(2)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & s^*(1)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & s(4)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & s^*(3)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & \dots \end{pmatrix} \begin{matrix} \leftarrow \text{phase } k\pi/2 \\ \leftarrow \text{phase } k'\pi/2 \end{matrix}$$

$$\text{ou } \mathbf{Z} \approx \begin{pmatrix} s(2)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s^*(1)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s(4)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s^*(3)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \dots \\ s(1)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & -s^*(2)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & s(3)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & -s^*(4)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & \dots \end{pmatrix}$$

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

- **Méthodologie**

1) Détection du début de trame : les signaux interceptés sont :

$$\begin{pmatrix} s(1) & -s^*(2) & s(3) & -s^*(4) & \dots \\ s(2) & s^*(1) & s(4) & s^*(3) & \dots \end{pmatrix} \text{ ou } \begin{pmatrix} -s^*(2) & s(3) & -s^*(4) & s(5) & \dots \\ s^*(1) & s(4) & s^*(3) & s(6) & \dots \end{pmatrix}$$

2) Retrouver un schéma de codage d'Alamouti en réception

$$\mathbf{Z} \approx \begin{pmatrix} s(1)e^{jk\frac{\pi}{2}} & -s^*(2)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \dots \\ s(2)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & s^*(1)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & \dots \end{pmatrix}, \begin{cases} s^*(1)e^{jk'\frac{\pi}{2}} \neq \left(s(1)e^{jk\frac{\pi}{2}}\right)^* \\ -s^*(2)e^{jk\frac{\pi}{2}} \neq -\left(s(2)e^{jk'\frac{\pi}{2}}\right)^* \end{cases}$$

3) Lever l'indétermination sur l'ordre

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

#### Détection du début de trame

- Après la BSS le début du code d'Alamouti doit être déterminé. Les indicateurs de synchronisation sont :

$$\begin{cases} I1 = |E[z_1(2n)z_2(2n+1) - z_2(2n)z_1(2n+1)]| \\ I2 = |E[z_1(2n+1)z_2(2n) - z_2(2n+1)z_1(n)]| \end{cases}$$

$$\mathbf{Z} \approx \begin{pmatrix} s(1)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \mathbf{I1} & -s^*(2)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \mathbf{I2} & s(3)e^{jk\frac{\pi}{2}} & -s^*(4)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \dots \\ s(2)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & & s^*(1)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & & s(4)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & s^*(3)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & \dots \end{pmatrix}$$

$$\text{ou } \mathbf{Z} \approx \begin{pmatrix} s^*(1)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \mathbf{I1} & s(4)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \mathbf{I2} & s^*(3)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \dots \\ -s^*(2)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & & s(3)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & & -s^*(4)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & \dots \end{pmatrix}$$

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

#### • Valeurs de I1 et I2 si on est bien synchronisé

$$I1 = \begin{cases} \left| E[|s(n)|^2] e^{j(k+k')\frac{\pi}{2}} + E[|s(n+1)|^2] e^{j(k+k')\frac{\pi}{2}} \right| \approx \left| 2e^{j(k+k')\frac{\pi}{2}} \right| \approx 2 \\ \left| -E[|s(n+1)|^2] e^{j(k+k')\frac{\pi}{2}} - E[|s(n)|^2] e^{j(k+k')\frac{\pi}{2}} \right| \approx \left| -2e^{j(k+k')\frac{\pi}{2}} \right| \approx 2 \text{ si permutation} \end{cases}$$

$$I2 = \begin{cases} \left| E[s(n+1)s^*(n)] e^{j(k+k')\frac{\pi}{2}} + E[s(n+1)s^*(n)] e^{j(k+k')\frac{\pi}{2}} \right| \approx 0 \\ \left| -E[s(n+1)s^*(n)] e^{j(k+k')\frac{\pi}{2}} - E[s(n+1)s^*(n)] e^{j(k+k')\frac{\pi}{2}} \right| \approx 0 \text{ si permutation} \end{cases}$$

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

- Si la synchronisation est bonne alors  $I1 = \left| e^{j(k+k')\frac{\pi}{2}} \right| \approx 2$  et  $I2 \approx 0$
- Algorithme de synchronisation du début du code d'Alamouti :

Si  $I1 > I2$  alors la synchronisation est bonne

Sinon la synchronisation est fautive et le premier vecteur reçu doit être enlevé

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

Retrouver un schéma de codage d'Alamouti en réception

• Calcul de  $(k+k')\pi/2$  :

$$(k + k') \frac{\pi}{2} = \frac{\text{Arg}(z_1(k)z_2(k+1) + z_2(k)z_1(k+1)) - \pi}{2}$$

• Transformation de la matrice  $\mathbf{Z}$

$$\mathbf{Z} \approx \begin{pmatrix} s(1)e^{jk\frac{\pi}{2}} & -s^*(2)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s(3)e^{jk\frac{\pi}{2}} & -s^*(4)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \dots \\ s(2)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & s^*(1)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & s(4)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & s^*(3)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & \dots \end{pmatrix}$$

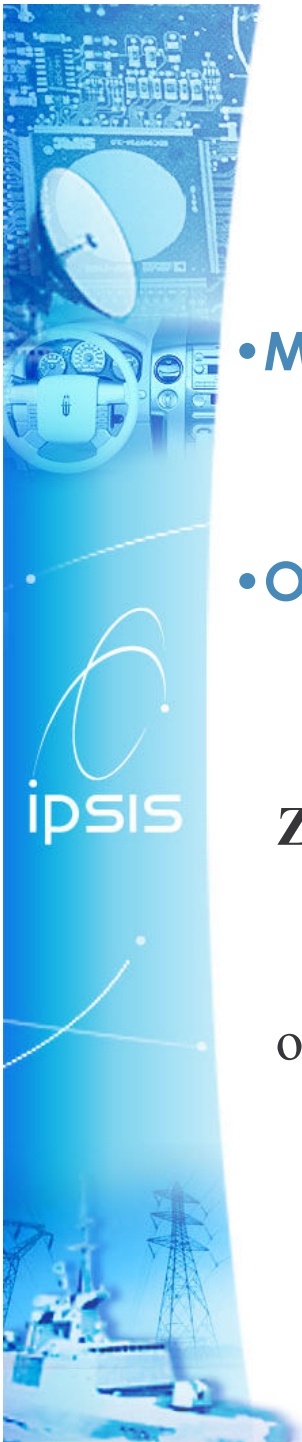
$\uparrow \mathbf{x}e^{-j(k+k')\pi/2}$

$\uparrow \mathbf{x}e^{-j(k+k')\pi/2}$

ou 
$$\mathbf{Z} \approx \begin{pmatrix} s(2)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s^*(1)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s(4)e^{jk\frac{\pi}{2}} & s^*(3)e^{jk\frac{\pi}{2}} & \dots \\ s(1)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & -s^*(2)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & s(3)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & -s^*(4)e^{jk'\frac{\pi}{2}} & \dots \end{pmatrix}$$

$\uparrow \mathbf{x}e^{-j(k+k')\pi/2}$

$\uparrow \mathbf{x}e^{-j(k+k')\pi/2}$



• **Modifications des symboles estimés :**

$$Z'_1(2n+1) = Z_1(2n+1)e^{-j(k+k')\frac{\pi}{2}} \text{ et } Z'_2(n+1) = Z_2(n+1)e^{-j(k+k')\frac{\pi}{2}}$$

• **On obtient :**

$$\mathbf{Z}' \approx \begin{pmatrix} s'(1) & -s'^*(2) & s'(3) & -s'^*(4) & \dots \\ s'(2) & s'^*(1) & s'(4) & s'^*(3) & \dots \end{pmatrix} \text{ avec } \begin{cases} s'(1) = s(1)e^{jk\frac{\pi}{2}} \\ s'(2) = s(2)e^{jk'\frac{\pi}{2}} \end{cases}$$

$$\text{ou } \mathbf{Z}' \approx \begin{pmatrix} s'(2) & s'^*(1) & s'(4) & s'^*(3) & \dots \\ s'(1) & -s'^*(2) & s'(3) & -s'^*(4) & \dots \end{pmatrix}$$

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

#### Détection de la permutation

- Prise de décision

Si la BSS n'a engendré aucune permutation sur les lignes on a

$$z'_1(2n)z'_2(2n+1) > z'_2(2n)z'_1(2n+1)$$

En effet on a :

$$z'_1(2n)z'_2(2n+1) \approx |s'(2n+1)|^2 \text{ et } z'_2(2n)z'_1(2n+1) \approx -|s'(2n+2)|^2$$

$$\mathbf{Z}' \approx \begin{pmatrix} s'(1) & -s'^*(2) & s'(3) & -s'^*(4) & \dots \\ s'(2) & s'^*(1) & s'(4) & s'^*(3) & \dots \end{pmatrix}$$

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

Si la BSS  $\alpha$ , au contraire, engendré une permutation sur les lignes on a

$$z'_1(2n)z'_2(2n+1) < z'_2(2n)z'_1(2n+1)$$

Puisque :

$$z'_1(2n)z'_2(2n+1) \approx -|s'(2n+2)|^2 \text{ et } z'_2(2n)z'_1(2n+1) \approx |s'(2n+1)|^2$$

$$\mathbf{Z}' \approx \begin{pmatrix} s'(2) & s'^*(1) & s'(4) & s'^*(3) & \dots \\ s'(1) & -s'^*(2) & s'(3) & -s'^*(4) & \dots \end{pmatrix}$$

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

- Si il n'y a pas permutation alors

$$\hat{s}'(2n+1) = \frac{z_1(2n) + z_2^*(2n+1)}{2} \text{ et } \hat{s}'(2n+2) = \frac{z_2(2n) - z_1^*(2n+1)}{2}$$

- Si il y a permutation alors

$$\hat{s}'(2n+2) = \frac{z_1(2n) - z_2^*(2n+1)}{2} \text{ et } \hat{s}'(2n+1) = \frac{z_2(2n) + z_1^*(2n+1)}{2}$$

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

- Expression de l'EQM théorique lorsque l'on exploite la redondance:

$$EQM1(\sigma_b^2) = 10 \times \log_{10} \left( \frac{|g_{11} + g_{22}^* - 2|^2 + |g_{21} - g_{12}^*|^2}{4} + \frac{\sigma_b^2}{2} \right)$$

$$\text{où } g_{kl} = \mathbf{G}(k, l) \text{ et } \mathbf{G} = \mathbf{W}^t \mathbf{H} \xrightarrow{\text{idéalement}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Expression de l'EQM théorique lorsque l'on n'exploite pas la redondance:

$$EQM2(\sigma_b^2) = 10 \times \log_{10} \left( \frac{|g_{11} - 1|^2 + |g_{21}|^2 + |g_{22} - 1|^2 + |g_{12}|^2}{2} + \sigma_b^2 \right)$$

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

- Lorsqu'il n'y a pas d'interférences intersymboles on a :

$$\mathbf{G} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

c'est à dire :  $g_{11} \rightarrow 1, g_{22} \rightarrow 1, g_{12} \rightarrow 0, g_{21} \rightarrow 0$

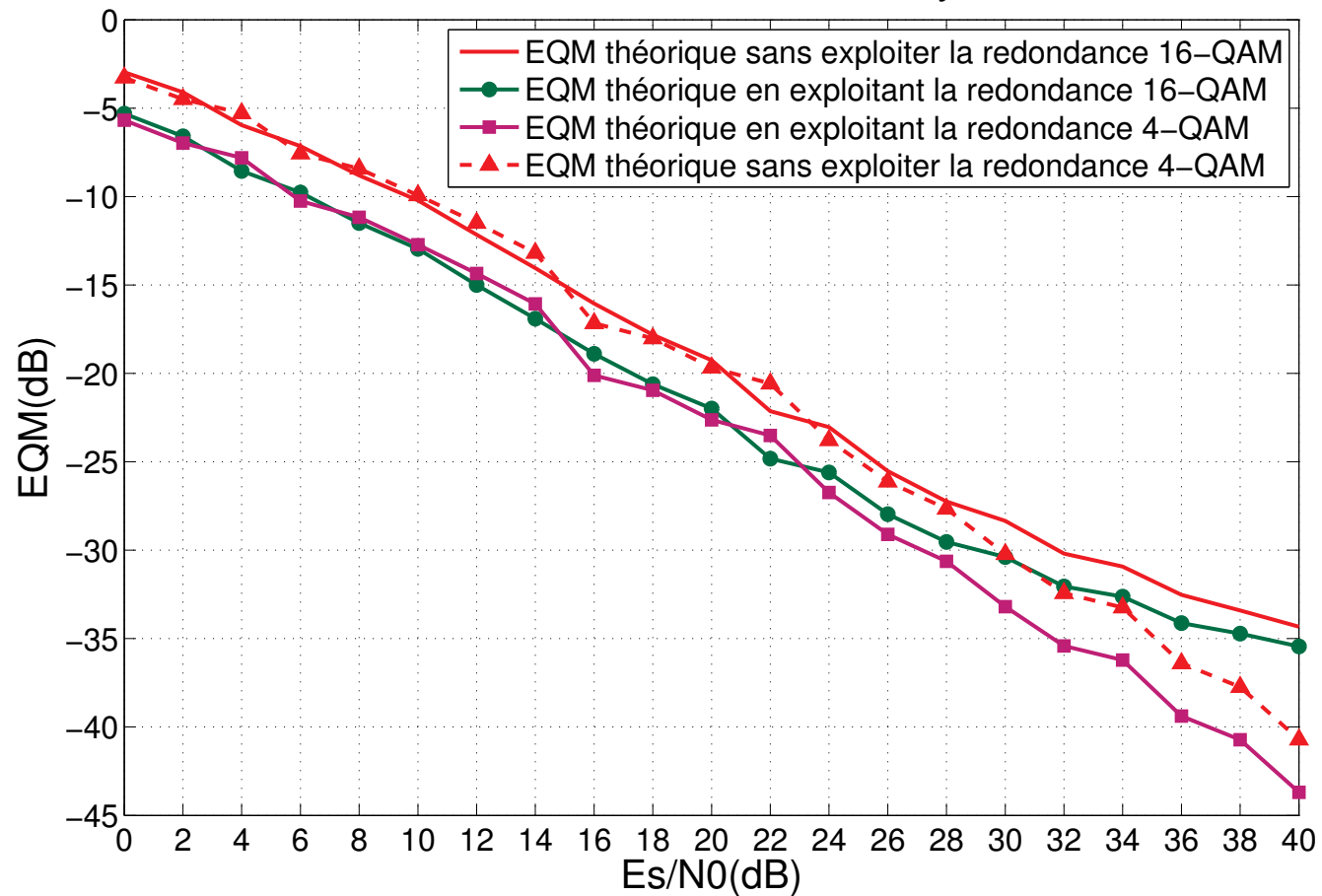
$$EQM1(\sigma_b^2) - EQM2(\sigma_b^2) = 10 \times \log_{10} \left( \frac{1}{2} \right) = -3dB$$

## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

- EQM théorique

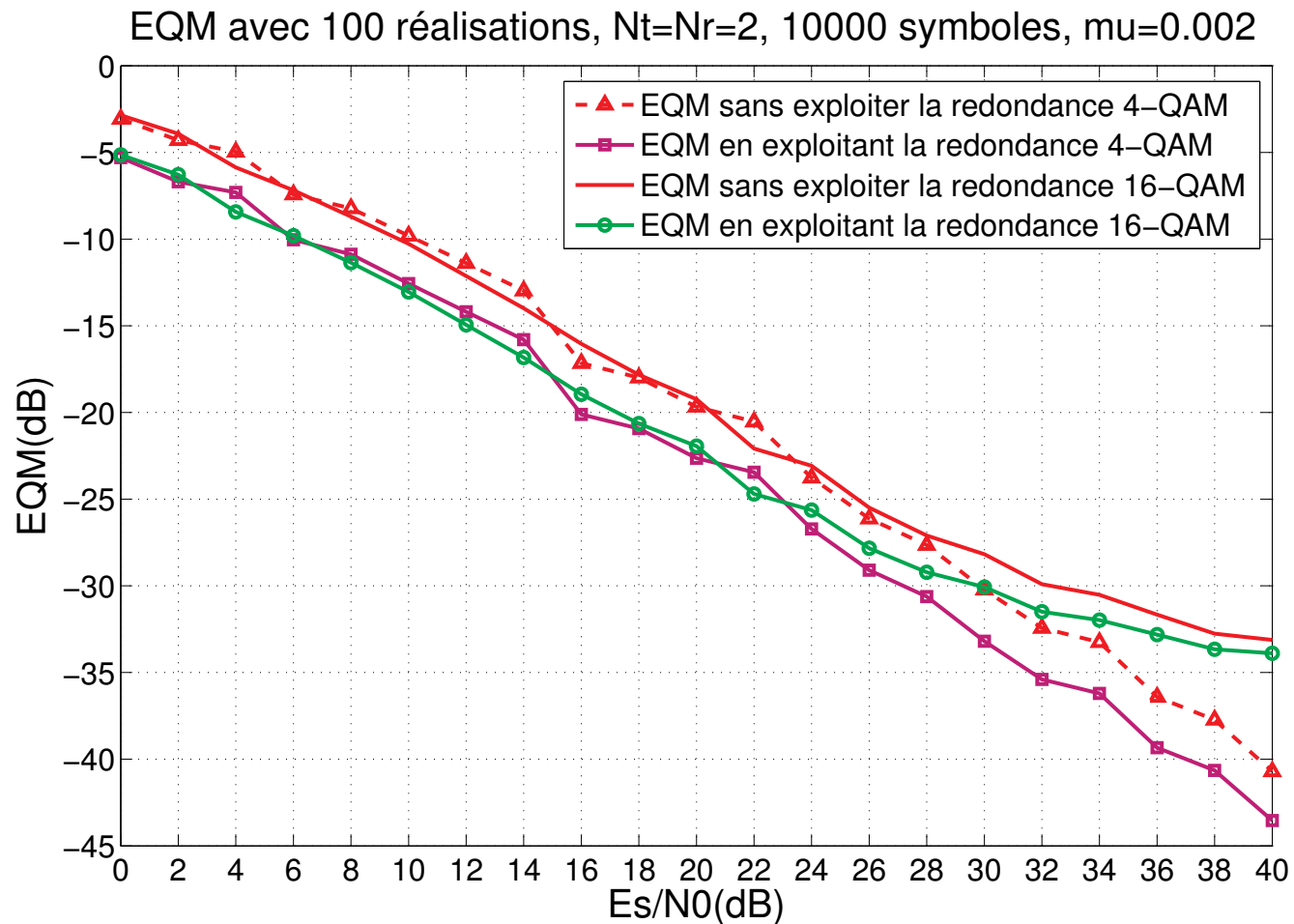
EQM avec 100 réalisations,  $N_t=N_r=2$ , 10000 symboles,  $\mu=0.002$



## II-La séparation aveugle de sources

### e) Lever d'ambiguïté sur l'ordre des sources

- Résultats de simulations



## II-La séparation aveugle de sources

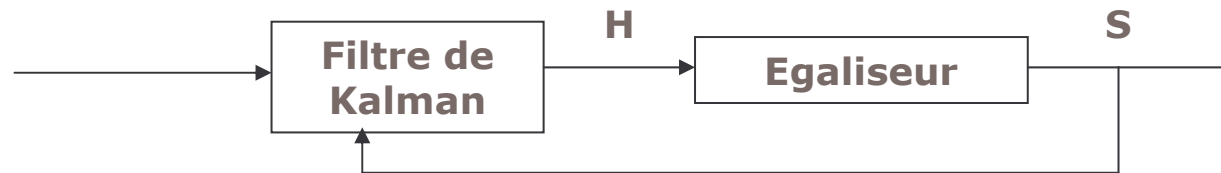
### e) Conclusion et problématique

- Exploitation de la redondance => levée de l'ambiguïté sur l'ordre + diminution de l'EQM
- Vitesse de convergence des algorithmes de BSS lente => inadaptée aux canaux variant rapidement dans le temps

**Solution : utilisation du filtre de Kalman pour poursuivre les variations du canal**

### III-Poursuite du canal : filtre de Kalman

#### Principe



- **Filtre de Kalman**

$$\begin{cases} \mathbf{h}(n) = \mathbf{F}\mathbf{h}(n-1) + \mathbf{v}(n) & \text{équation d'état} \\ \mathbf{y}(n) = \mathbf{X}'(n)\mathbf{h}(n) + \mathbf{b}(n) & \text{équation de mesure} \end{cases}$$

Où

- $\mathbf{h}(n) = \text{vec}(H(n))$  est le vecteur d'état
- $\mathbf{v}(n)$  le vecteur de bruit
- $\mathbf{F} = \alpha \mathbf{I}$  la matrice de transition diagonale ( $\alpha = J_0(2\pi F_d T_s)$ )
- $\mathbf{y}(n)$  est le vecteur de signaux reçus
- $\mathbf{X}'(n) = \mathbf{I} \otimes x(n)$  est la matrice des signaux sources
- $\mathbf{b}(n)$  est le vecteur de bruit de mesure

### III-Poursuite du canal : filtre de Kalman

#### a) Algorithme

- Etape de prédiction

- 1)  $\mathbf{h}(n|n-1) = \mathbf{F}\mathbf{h}(n-1|n-1)$

- 2)  $\mathbf{P}(n|n-1) = \mathbf{F}\mathbf{P}(n-1|n-1)\mathbf{F}^H + \mathbf{Q}$

- Etape d'estimation

- 1)  $\mathbf{K}(n) = \frac{\mathbf{P}(n|n-1)\mathbf{X}'^H(n)}{\mathbf{R} + \mathbf{X}'(n)\mathbf{P}(n|n-1)\mathbf{X}'^H(n)}$

- 2)  $\mathbf{e}(n) = \mathbf{y}(n) - \mathbf{X}'(n)\mathbf{h}(n|n-1)$

- 3)  $\mathbf{h}(n|n) = \mathbf{h}(n|n-1) + \mathbf{K}(n)\mathbf{e}(n)$

- 3)  $\mathbf{P}(n|n) = \mathbf{P}(n|n-1) + \mathbf{K}(n)\mathbf{X}'(n)\mathbf{P}(n|n-1)$

### III-Poursuite du canal : filtre de Kalman

#### b) Problématique

- Pour poursuivre le canal, le filtre de Kalman doit connaître les symboles transmis.

A  $t=0$ , utilisation d'une séquence d'apprentissage dans les systèmes coopératifs

Lorsque  $t>0$ , ces symboles transmis peuvent être estimés à l'aide d'un égaliseur et de l'estimation du canal à l'instant précédent

- Solutions pour  $t=0$  : estimations des  $N_p$  premiers symboles transmis à l'aide d'une BSS

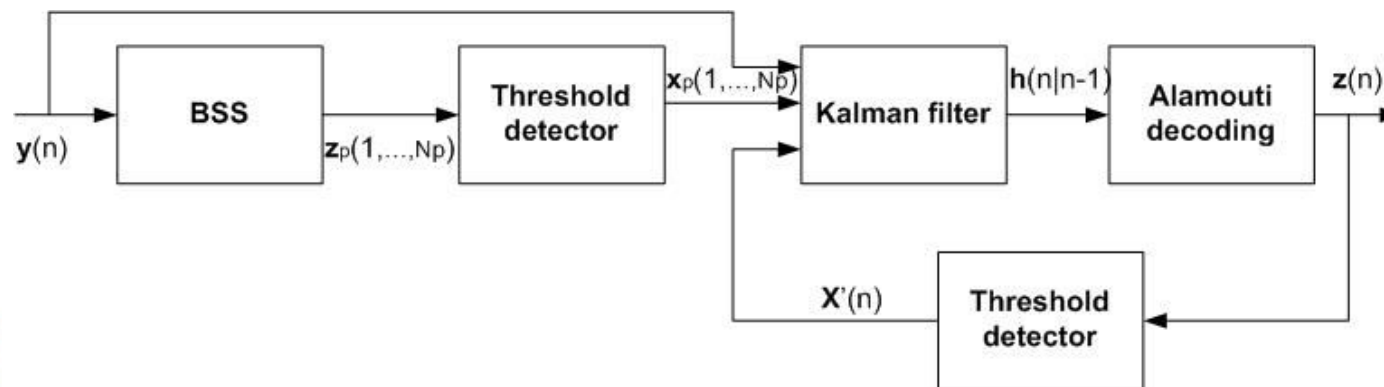
Hypothèse : Le canal est supposé stationnaire sur les  $N_p$  premiers symboles reçus

- Choix de la BSS : ACMA, une méthode algébrique par bloc (convergence sur des blocs de faible taille,  $N_p > N_t^2$ )

### III-Poursuite du canal : filtre de Kalman

#### c) Initialisation du filtre de Kalman

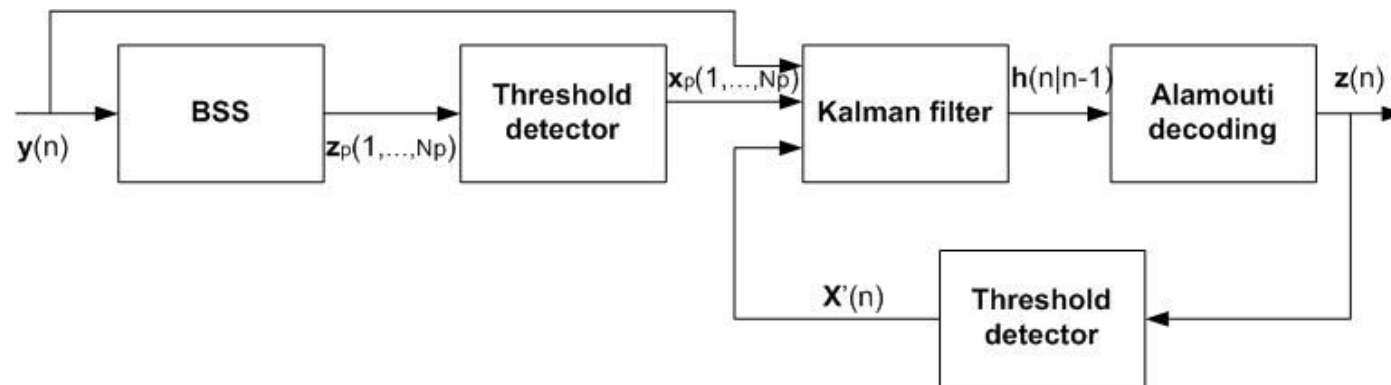
- **Hypothèse** : code d'Alamouti utilisé en émission
- 1) Utilisation d'une BSS ACMA par blocs sur les  $N_p$  premiers symboles reçus
- 2) Levée de l'ambiguïté sur l'ordre des sources
- 3) Estimation des  $N_p$  premières sources grâce à un détecteur à seuil



### III-Poursuite du canal : filtre de Kalman

#### c) Initialisation du filtre de Kalman (suite)

- 4) Initialisation du filtre de Kalman à l'aide des  $N_p$  sources estimées
- 5) Estimation du canal MIMO à l'aide du filtre de Kalman
- 6) Estimation des symboles transmis à l'aide de l'égaliseur d'Alamouti

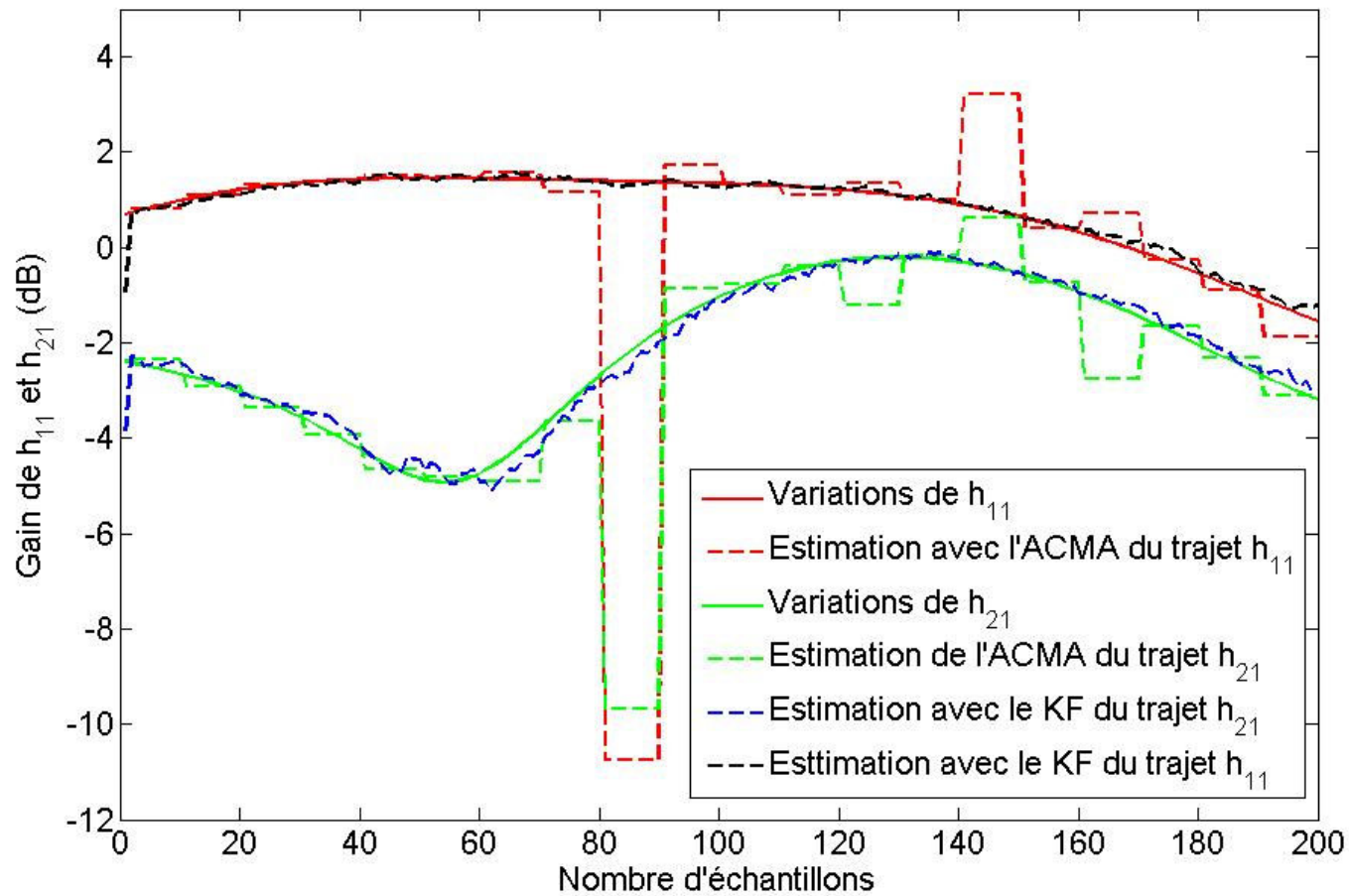


### III-Poursuite du canal : filtre de Kalman

#### d) Résultats de simulations

- Estimation du canal

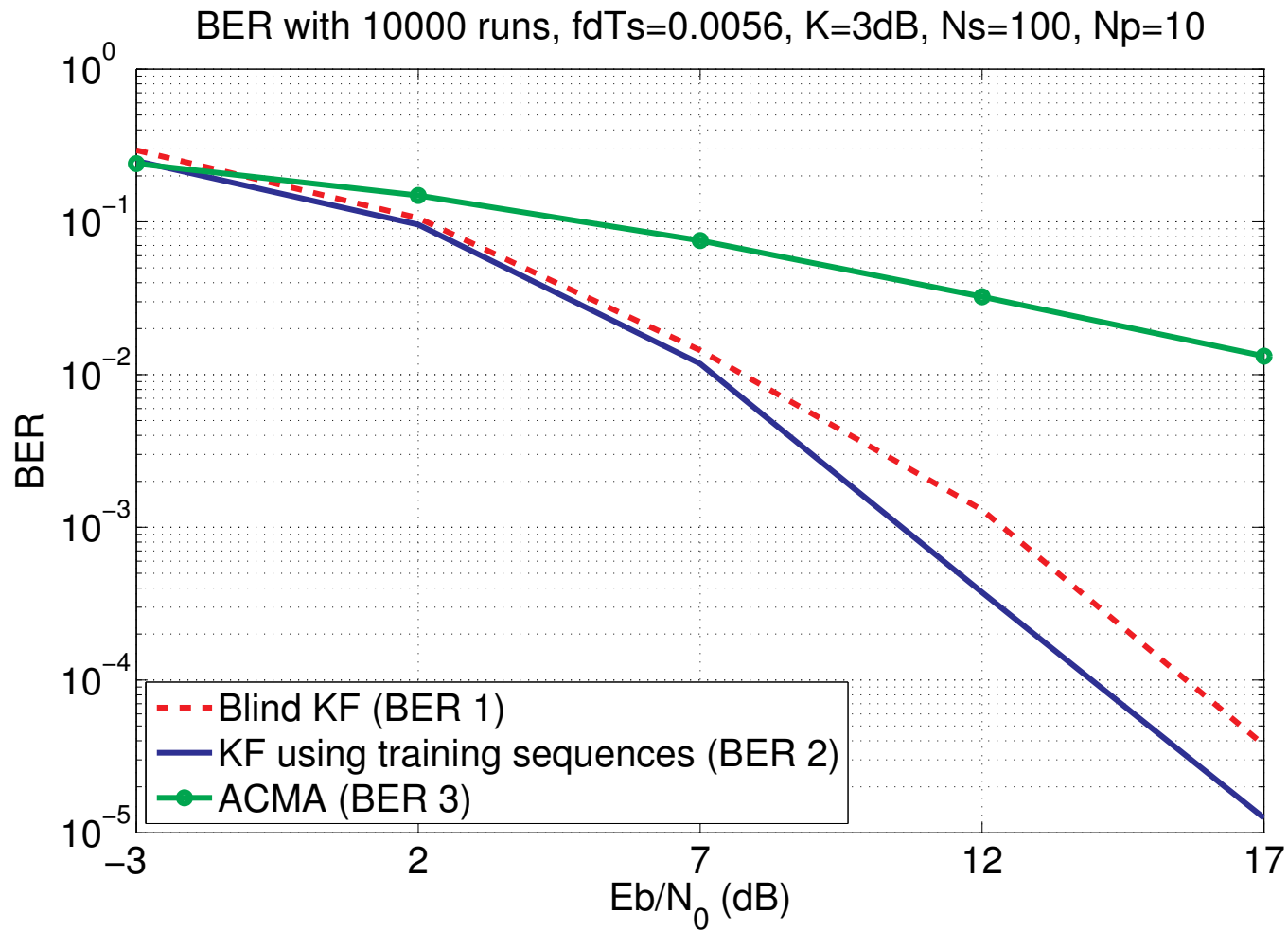
Gain des trajets  $h_{11}$  and  $h_{21}$ ,  $f_d T_s = 0.0056$ ,  $K = 3$  dB,  $N_s = 100$ ,  $N_p = 10$ ,  $E_s / N_0 = 30$  dB



### III-Poursuite du canal : filtre de Kalman

#### c) Initialisation du filtre de Kalman

- TEB moyen



## IV-Conclusion

### Réponse aux problématiques de démodulation aveugle lorsque :

- **Le canal MIMO est fixe et instantané**
  - Utilisation du MMA
  - Levée de l'ambiguïté sur l'ordre des sources en exploitant la redondance introduite par la code d'Alamouti
  - Diminution de l'EQM en exploitant la redondance
- **Le canal MIMO varie rapidement dans le temps et est instantané**
  - Utilisation du filtre de Kalman associé à un égaliseur
  - Initialisation du filtre de Kalman à l'aide d'une BSS ACMA par blocs
- **Poursuite des travaux sur les canaux convolutifs variant et invariant**