

# Turbocodes et modulations à grande efficacité spectrale

*Thèse de doctorat en Electronique*

Laura CONDE CANENCIA

`laura.conde@enst-bretagne.fr`

GET - ENST Bretagne  
Département Electronique



# Plan

- Contexte
- Etude de modulations turbocodées pragmatiques à base de codes duo-binaires
- Estimation de la performance asymptotique des modulations turbocodées
- Conclusions et perspectives

# Contexte

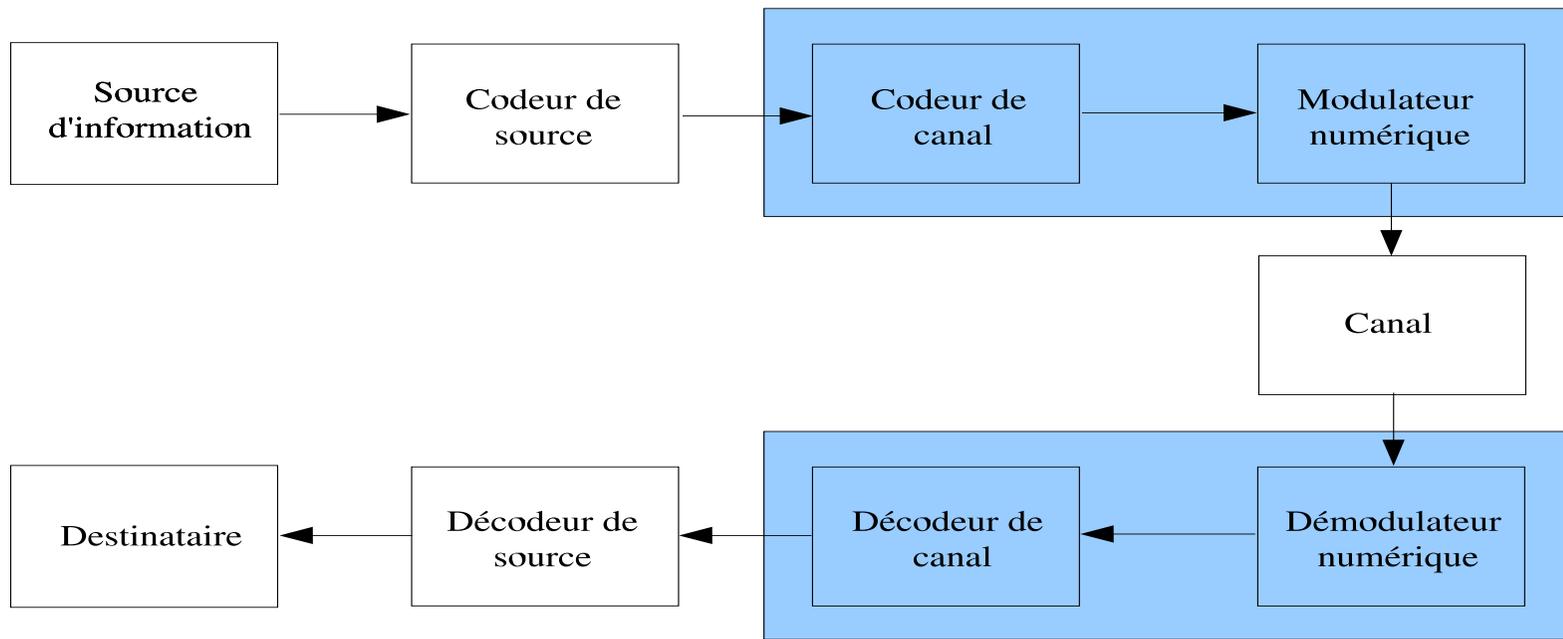
## TRANSMISSION D'INFORMATION NUMERIQUE

- Systèmes limités en puissance d'émission et bande spectrale occupée
  - ⇒ codage de canal ou codage correcteur d'erreurs
  - ⇒ modulation numérique à haute efficacité spectrale

# Contexte

## TRANSMISSION D'INFORMATION NUMERIQUE

- Systèmes limités en puissance d'émission et bande spectrale occupée
  - ⇒ codage de canal ou codage correcteur d'erreurs
  - ⇒ modulation numérique à haute efficacité spectrale



# Contexte

## TRANSMISSION D'INFORMATION NUMERIQUE

- Systèmes limités en puissance d'émission et bande spectrale occupée
  - ⇒ codage de canal ou codage correcteur d'erreurs
  - ⇒ modulation numérique à haute efficacité spectrale
- Turbocodes parmi les codes correcteurs d'erreurs les plus performants :
  - ⇒ étude de leur association aux modulations à grand nombre de points

## MODULATIONS TURBOCODEES

# Etat de l'art

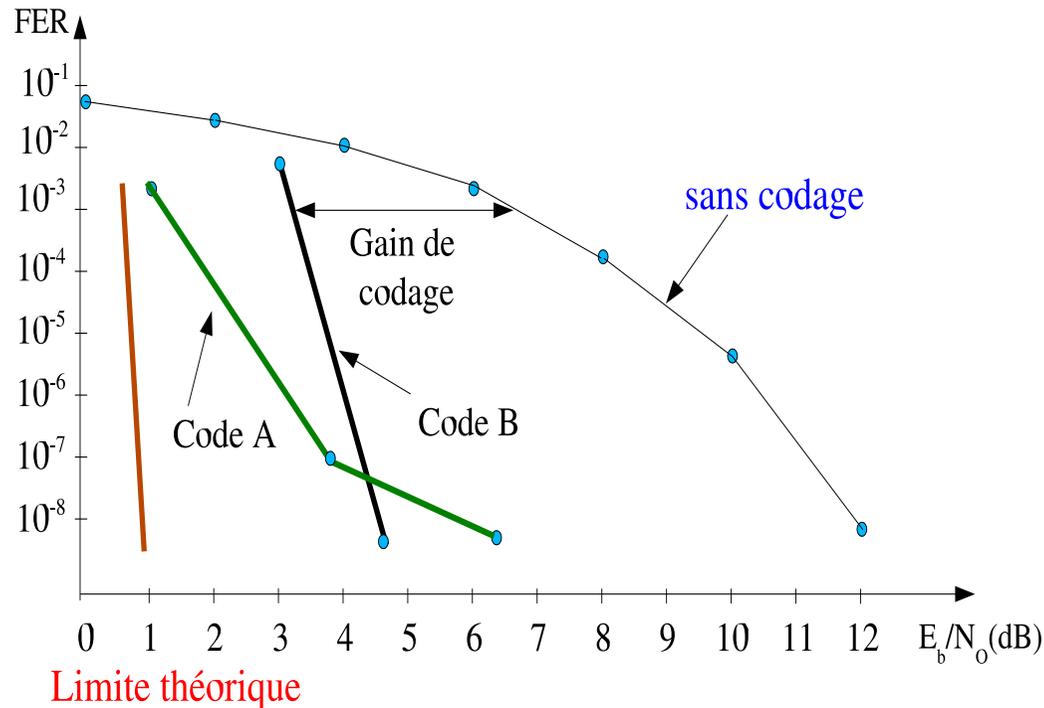
- Les modulations codées en treillis d'Ungerboeck (1982)
- Les modulations codées entrelacées au niveau bit de Zehavi (1989)
- Les turbocodes convolutifs (1993)
- Les modulations turbocodées
  - ⇒ L'approche pragmatique de Le Goff (1994)
  - ⇒ Les turbo-modulations codées en treillis
    - Schéma de Robertson (1995)
    - Schéma de Benedetto (1995)
- Les turbocodes convolutifs duo-binaires (1999)

# Etat de l'art

- Les modulations codées en treillis d'Ungerboeck (1982)
- Les modulations codées entrelacées au niveau bit de Zehavi (1989)
- Les turbocodes convolutifs (1993)
- Les modulations turbocodées
  - ⇒ L'approche pragmatique de Le Goff (1994)
  - ⇒ Les turbo-modulations codées en treillis
    - Schéma de Robertson (1995)
    - Schéma de Benedetto (1995)
- Les turbocodes convolutifs duo-binaires (1999)

## **MODULATIONS TURBOCODEES PRAGMATIQUES à base de codes DUO-BINAIRES**

# Les codes correcteurs d'erreurs

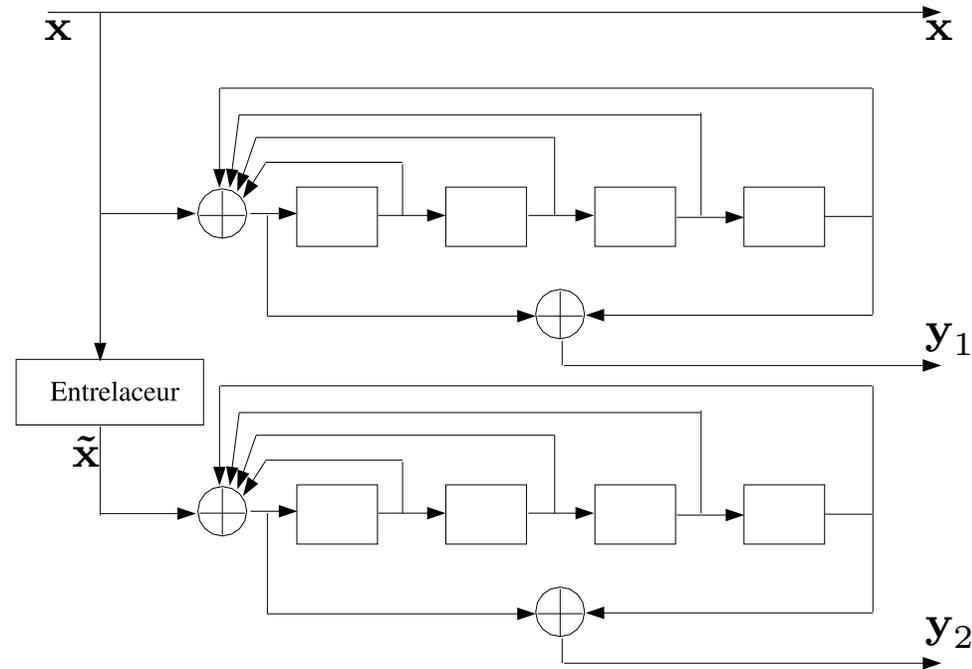


- Gain de codage
- Limite théorique
- Seuil de convergence

- Performance asymptotique
  - $\Rightarrow d_{\min}$  : distance minimale de Hamming
  - $\Rightarrow$  changement de pente (*flattening*)

# Les turbocodes convolutifs

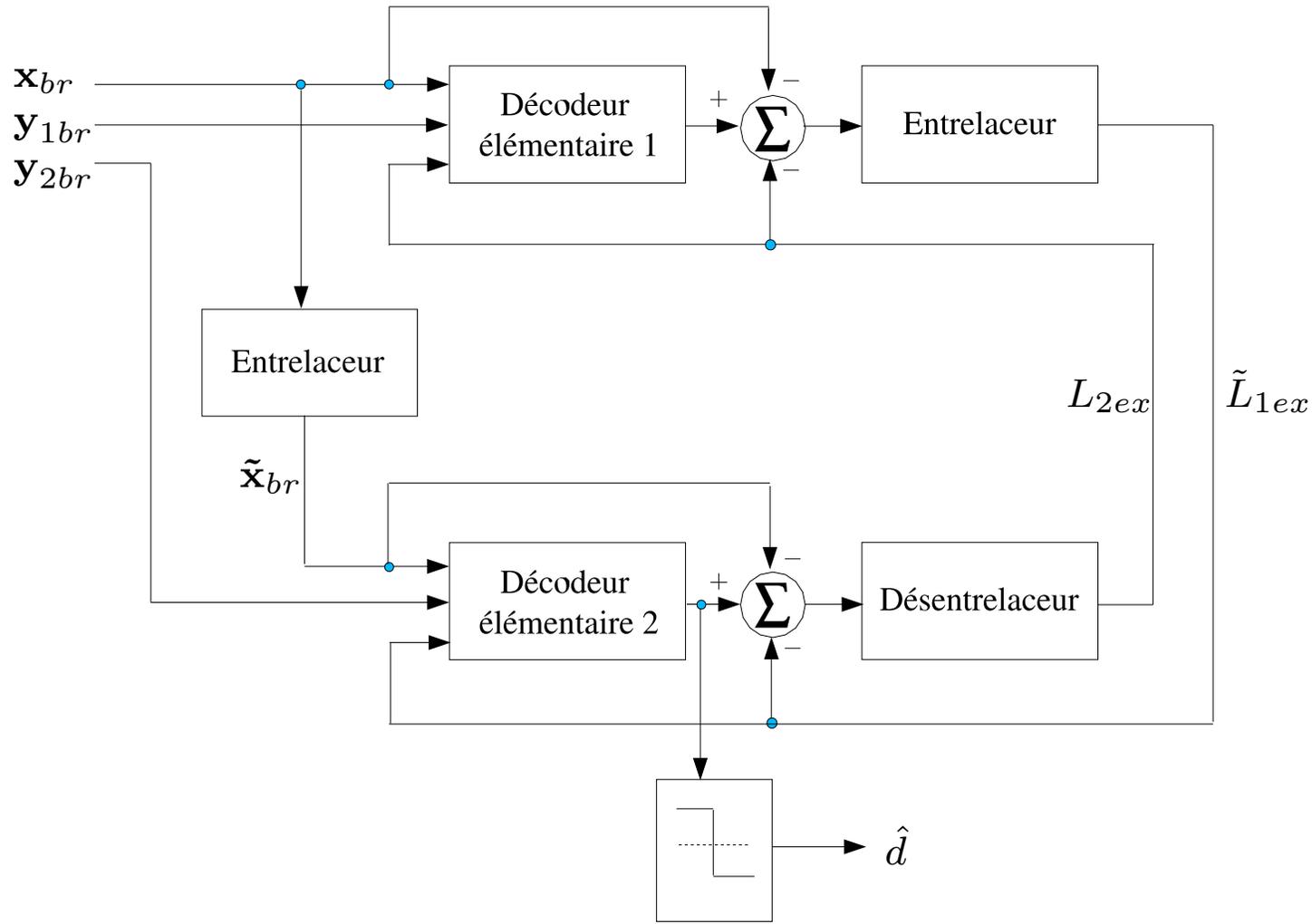
- Introduits par Berrou et Glavieux (1993)
- Concaténation parallèle de 2 codeurs Convolutifs Systématiques Récurifs



Turbocodeur à 16 états de rendement 1/3

# Les turbocodes convolutifs

## PRINCIPE DU TURBO-DECODAGE



# Les modulations codées

## Modulations codées en treillis (MCT)

- Introduites par Ungerboeck en 1982
- Optimisation conjointe du codage et de la modulation

# Les modulations codées

## Modulations codées en treillis (MCT)

- Introduites par Ungerboeck en 1982
- Optimisation conjointe du codage et de la modulation
- Avec un code convolutif :
  - ⇒ représentation du codeur/modulateur par un treillis unique
  - ⇒ un point de la modulation associé à chaque branche du treillis

# Les modulations codées

## Modulations codées en treillis (MCT)

- Introduites par Ungerboeck en 1982
- Optimisation conjointe du codage et de la modulation
- Partitionnement de la constellation (*Set-Partitioning*) :  
⇒ maximisation de la distance libre de la modulation codée

# Les modulations codées

## Modulations codées en treillis (MCT)

- Introduites par Ungerboeck en 1982
- Optimisation conjointe du codage et de la modulation
- Partitionnement de la constellation (*Set-Partitioning*) :
  - ⇒ maximisation de la distance libre de la modulation codée
- Technique *ad-hoc* :
  - ⇒ chaque schéma correspond à une valeur d'efficacité spectrale

# Les modulations codées

## Modulations codées entrelacées au niveau bit (BICM)

- Introduites par Zehavi (1989) et formalisées par Caire *et al* (1998)

# Les modulations codées

## Modulations codées entrelacées au niveau bit (BICM)

- Introduites par Zehavi (1989) et formalisées par Caire *et al* (1998)
- Entrelacement des symboles codés au niveau bit
- Augmentation de l'ordre de diversité sur les canaux à évanouissements

# Les modulations codées

## Modulations codées entrelacées au niveau bit (BICM)

- Introduites par Zehavi (1989) et formalisées par Caire *et al* (1998)
- Entrelacement des symboles codés au niveau bit
- Augmentation de l'ordre de diversité sur les canaux à évanouissements
- Par rapport aux MCTs :
  - ⇒ plus performantes sur canaux à évanouissements
  - ⇒ moins performantes sur canal gaussien

# Les modulations turbocodées

## L'approche pragmatique

- Première technique d'association d'un turbocode convolutif et d'une modulation d'ordre supérieur à 4

# Les modulations turbocodées

## L'approche pragmatique

- Première technique d'association d'un turbocode convolutif et d'une modulation d'ordre supérieur à 4
- Technique simple et directe :
  - ⇒ même turbocodeur/décodeur pour les différentes modulations

# Les modulations turbocodées

## L'approche pragmatique

- Première technique d'association d'un turbocode convolutif et d'une modulation d'ordre supérieur à 4
- Technique simple et directe :
  - ⇒ même turbocodeur/décodeur pour les différentes modulations
- Codage binaire à signal des points de la constellation de type Gray
  - ⇒ minimise le taux d'erreurs binaires à l'entrée du décodeur
  - ⇒ favorise la convergence rapide du processus itératif de décodage

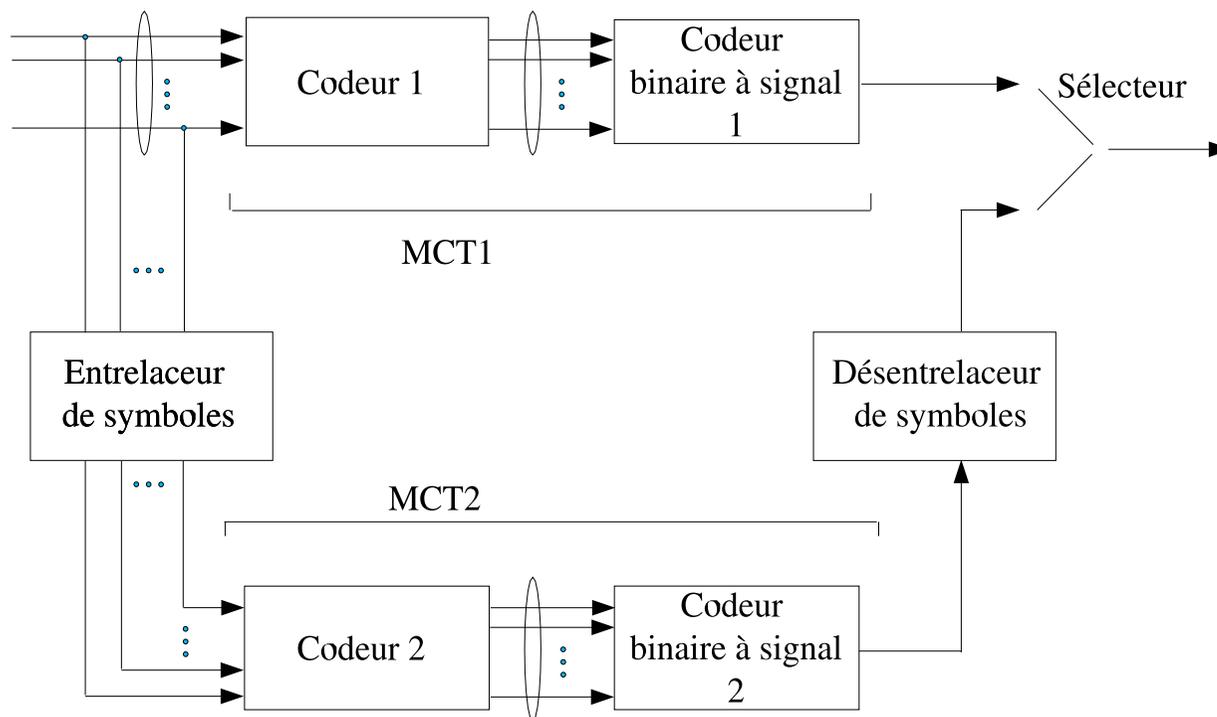
# Les modulations turbocodées

## Turbo-modulations codées en treillis (TMCT)

# Les modulations turbocodées

## Turbo-modulations codées en treillis (TMCT)

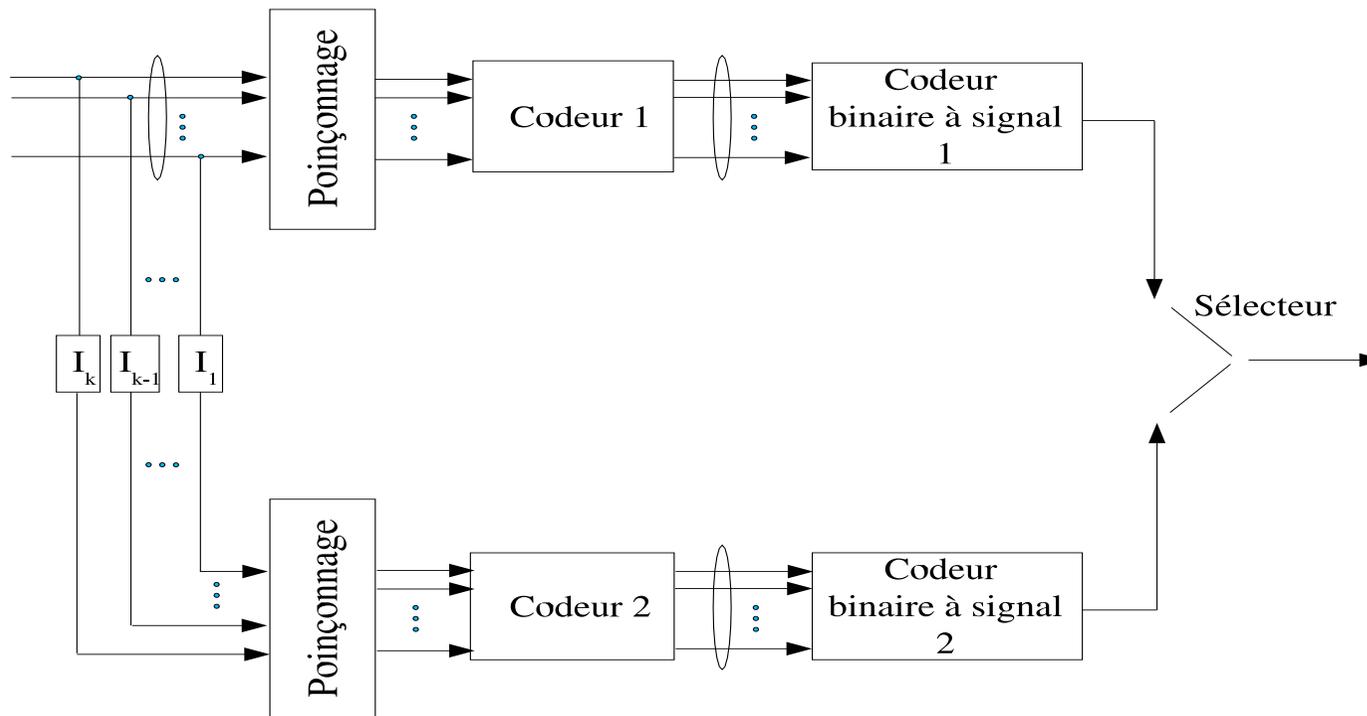
- Schéma de Robertson  
⇒ deux codeurs convolutifs récursifs unis par un entrelaceur de symboles



# Les modulations turbocodées

## Turbo-modulations codées en treillis (TMCT)

- Schéma de Benedetto
  - ⇒ entrelacement au niveau bit
  - ⇒ poinçonnage de bits systématiques



# Les modulations turbocodées

## Comparaison complexité/performances

- En général, les performances sur canal gaussien d'une modulation turbocodée pragmatique sont de 0,5 à 1 dB moins bonnes que celles d'un schéma TMCT

# Les modulations turbocodées

## Comparaison complexité/performances

- En général, les performances sur canal gaussien d'une modulation turbocodée pragmatique sont de 0,5 à 1 dB moins bonnes que celles d'un schéma TMCT
- L'approche pragmatique est la technique la plus intéressante pour des systèmes demandant une certaine souplesse d'utilisation
  - ⇒ TMCT : techniques *ad-hoc*
  - ⇒ approche pragmatique : flexible

# Les modulations turbocodées

## Comparaison complexité/performances

- En général, les performances sur canal gaussien d'une modulation turbocodée pragmatique sont de 0,5 à 1 dB moins bonnes que celles d'un schéma TMCT
- L'approche pragmatique est la technique la plus intéressante pour des systèmes demandant une certaine souplesse d'utilisation
  - ⇒ TMCT : techniques *ad-hoc*
  - ⇒ approche pragmatique : flexible
- Amélioration des performances du schéma pragmatique :
  - ⇒ algorithmes de décodage plus performants
  - ⇒ turbocodes duo-binaires

# Plan

- Contexte
- Etude de modulations turbocodées pragmatiques à base de codes duo-binaires
- Estimation de la performance asymptotique des modulations turbocodées
- Conclusions et perspectives

# Les turbocodes convolutifs duo-binaires

## AVANTAGES

# Les turbocodes convolutifs duo-binaires

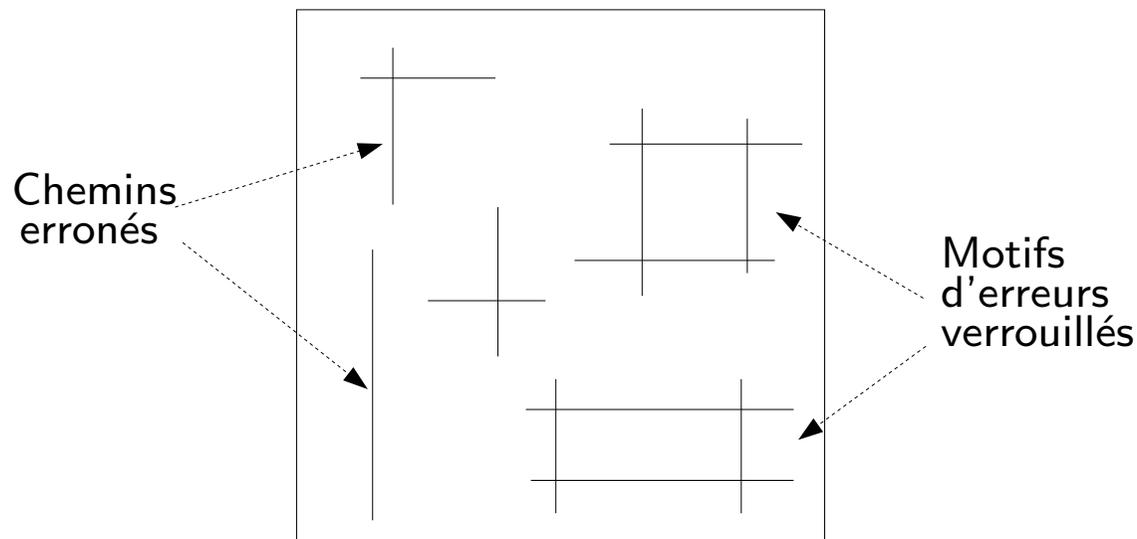
## AVANTAGES

- Possibilité de concevoir un entrelacement à deux niveaux :
  - ⇒ inter-symbole
  - ⇒ intra-symbole

# Les turbocodes convolutifs duo-binaires

## AVANTAGES

- Possibilité de concevoir un entrelacement à deux niveaux
- Diminution de la densité de motifs d'erreurs verrouillés dans le processus de décodage



# Les turbocodes convolutifs duo-binaires

## AVANTAGES

- Possibilité de concevoir un entrelacement à deux niveaux
- Diminution de la densité de motifs d'erreurs verrouillés dans le processus de décodage
- Turbo-décodeur moins sensible à la sous-optimalité des algorithmes de décodage

# Les turbocodes convolutifs duo-binaires

## AVANTAGES

- Possibilité de concevoir un entrelacement à deux niveaux
- Diminution de la densité de motifs d'erreurs verrouillés dans le processus de décodage
- Turbo-décodeur moins sensible à la sous-optimalité des algorithmes de décodage
- Moins de redondance poinçonnée pour atteindre des rendements élevés

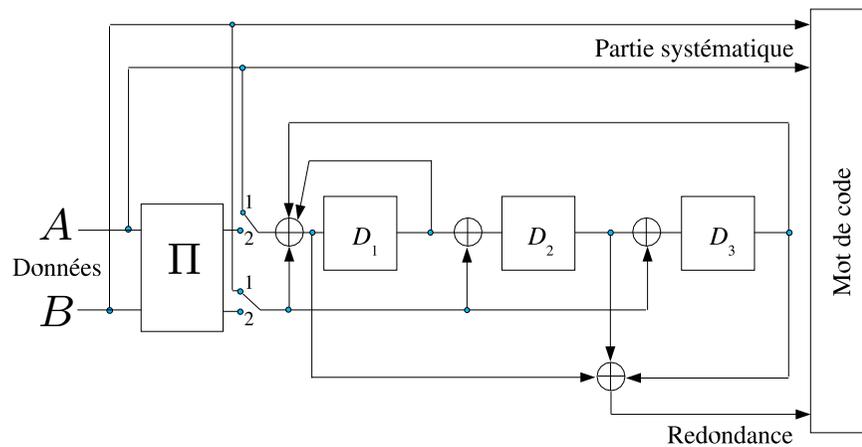
# Les turbocodes convolutifs duo-binaires

## AVANTAGES

- Possibilité de concevoir un entrelacement à deux niveaux
- Diminution de la densité de motifs d'erreurs verrouillés dans le processus de décodage
- Turbo-décodeur moins sensible à la sous-optimalité des algorithmes de décodage
- Moins de redondance poinçonnée pour atteindre des rendements élevés
- Réduction de la latence du circuit d'implémentation

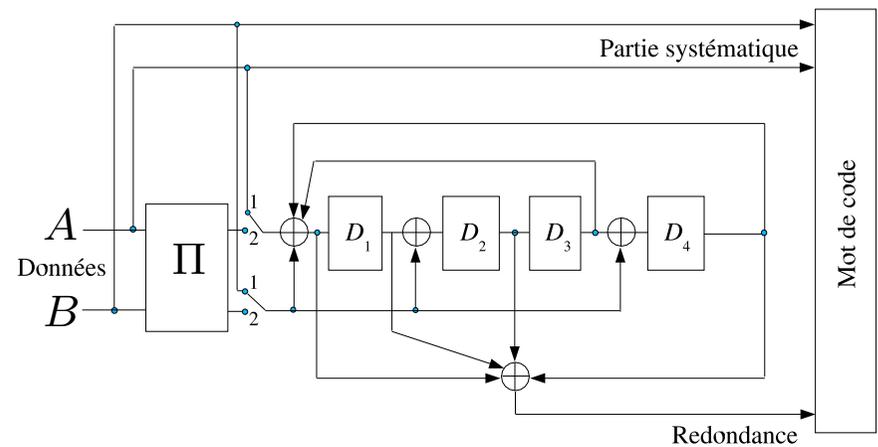
# Les turbocodes convolutifs duo-binaires

8 ETATS



- DVB-RCS, DVB-RCT

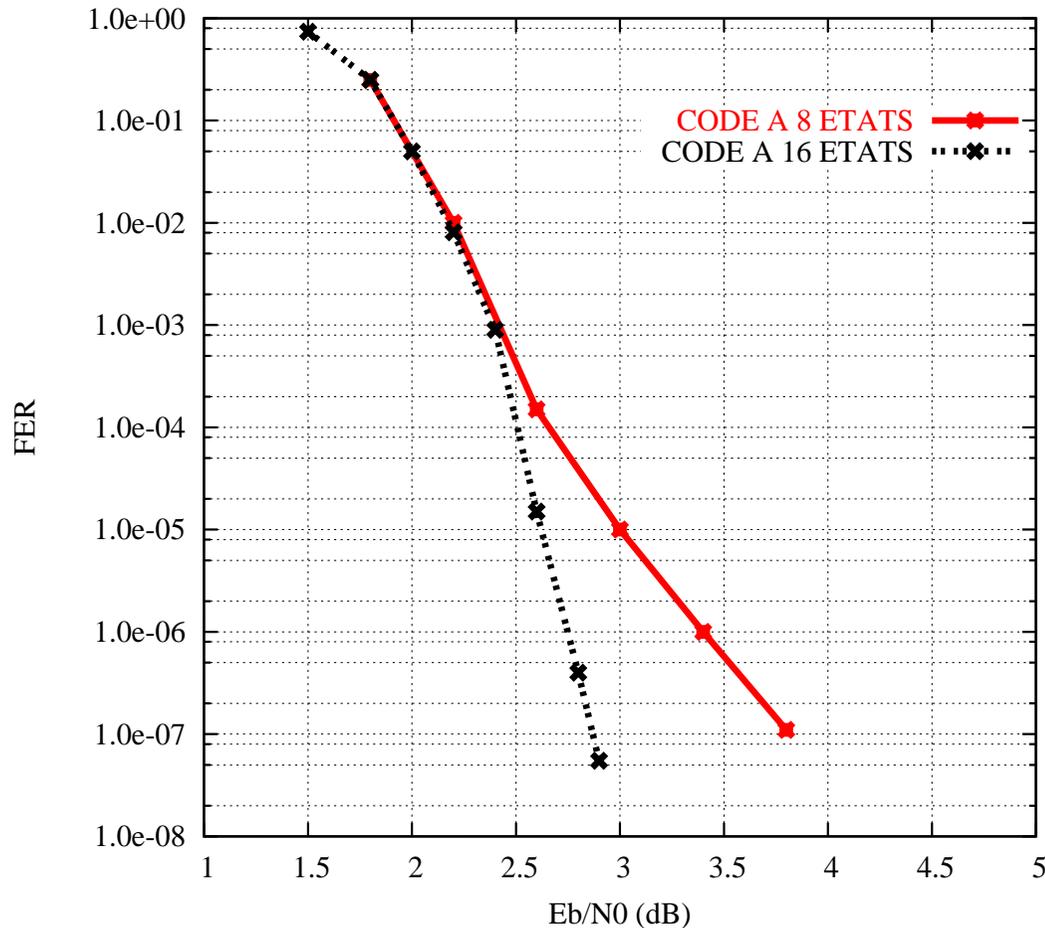
16 ETATS



- TURBO2000, TURBO $\Phi$

# Les turbocodes convolutifs duo-binaires

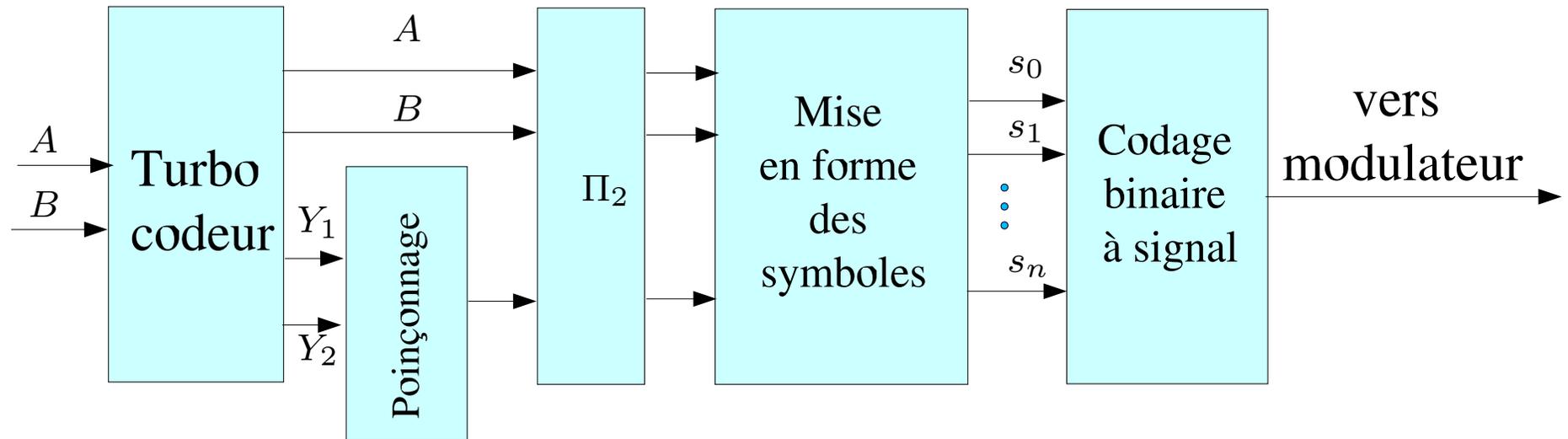
- Comparaison de performances : 8 états - 16 états



- Codage circulaire
- Permutation ARP
- 188 octets,  $R=2/3$
- Max-Log-MAP
- 8 itérations de décodage
- 6 bits de quantification

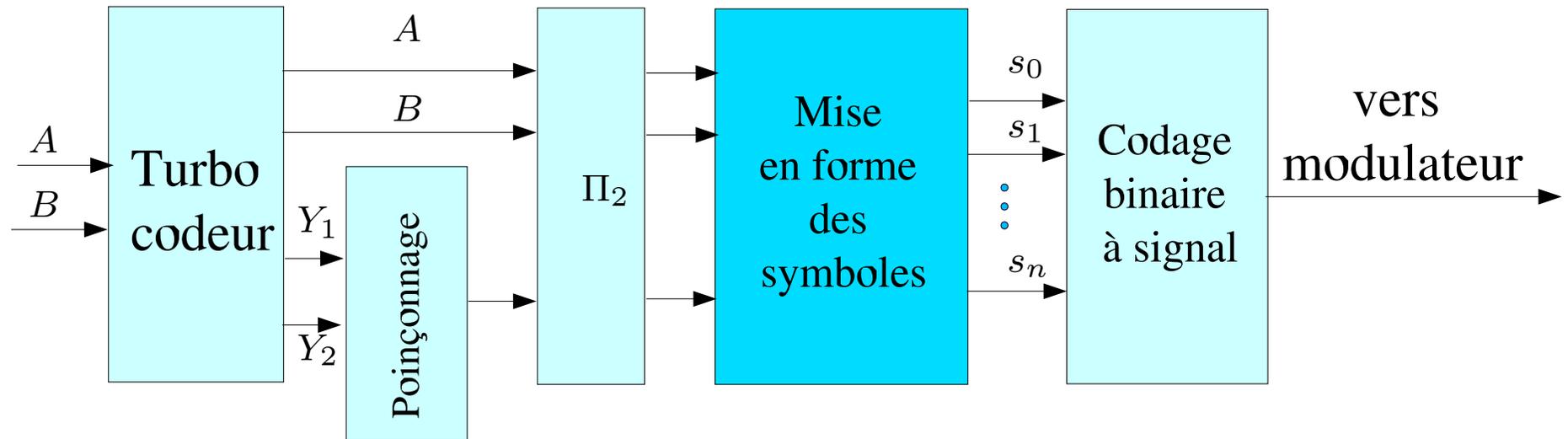
# Modulation turbocodée pragmatique duo-binaire

## Schéma général d'émission



# Modulation turbocodée pragmatique duo-binaire

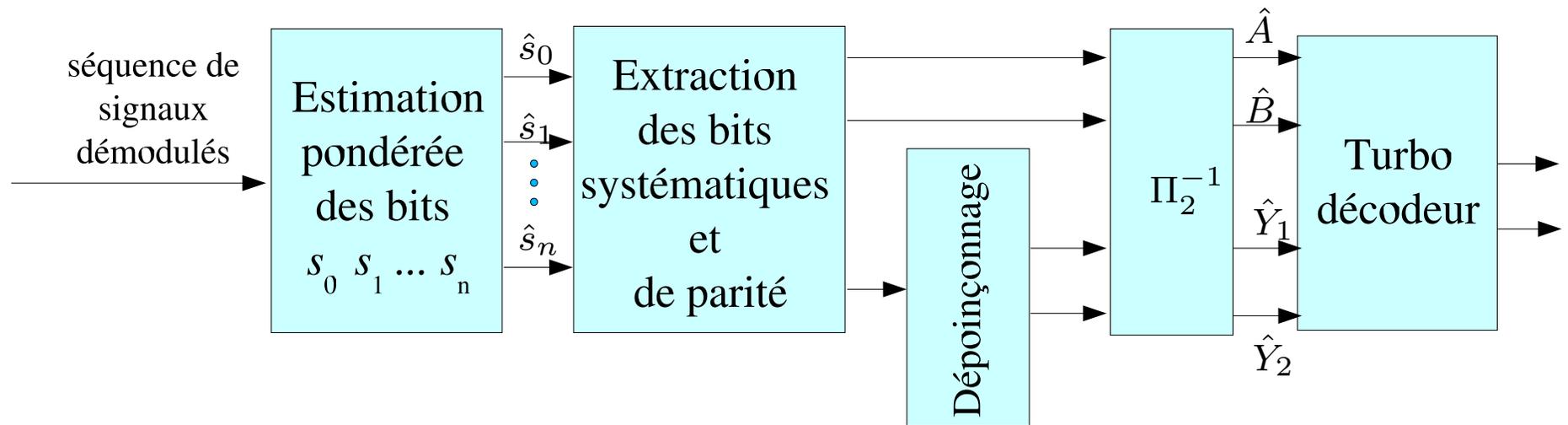
## Schéma général d'émission



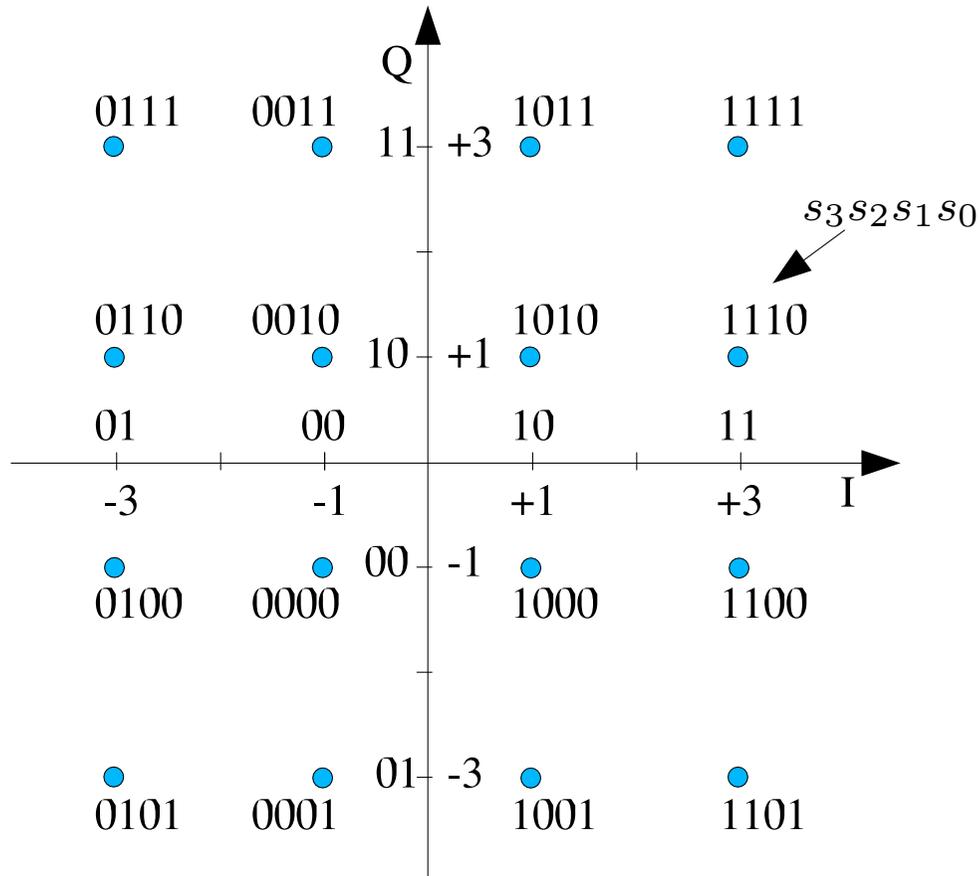
- Stratégies basiques de construction des symboles :
  - ⇒ les places les mieux protégées par la modulation sont affectées en priorité
    - aux bits systématiques : schéma A
    - aux bits de redondance : schéma Y

# Modulation turbocodée pragmatique duo-binaire

## Schéma général de réception



# MAQ-16 turbocodée pragmatique

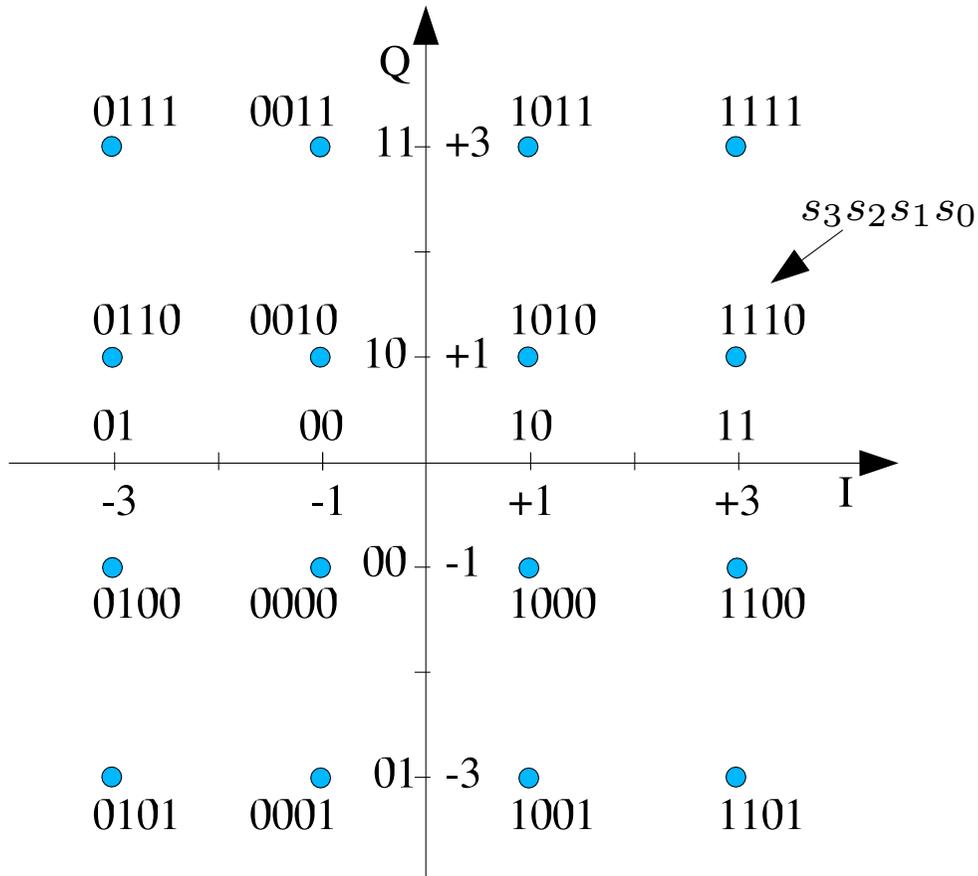


Stratégies de construction des symboles :

Schéma A

N° de symbole ( $1 \leq i \leq N$ )	$i$
$s_3$	$A[i]$
$s_2$	$Y_1[i]$
$s_1$	$B[i]$
$s_0$	$Y_2[i]$

# MAQ-16 turbocodée pragmatique



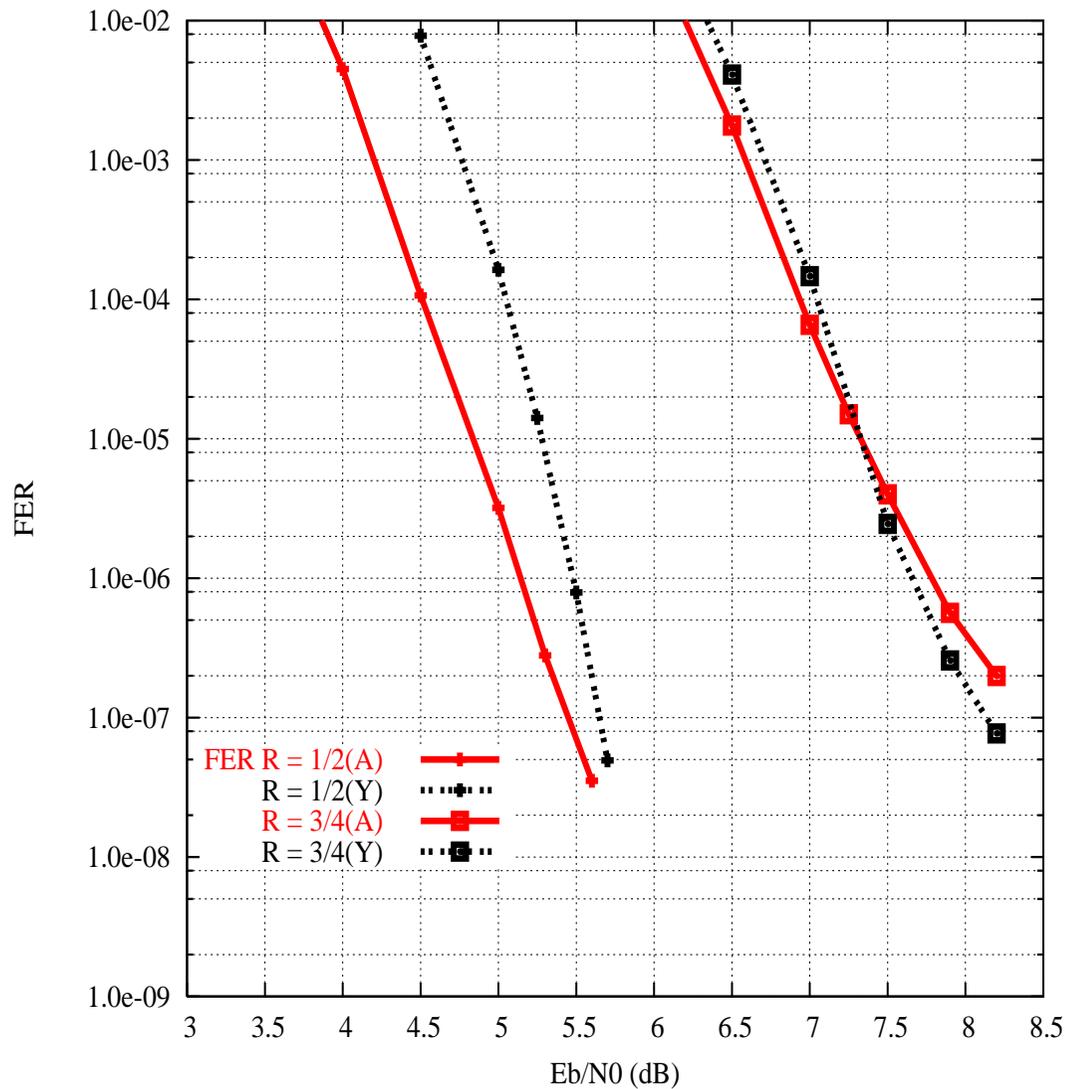
Stratégies de construction des symboles :

**Schéma Y**

N° de symbole ( $1 \leq i \leq N$ )	$i$
$s_3$	$Y_1[i]$
$s_2$	$A[i]$
$s_1$	$Y_2[i]$
$s_0$	$B[i]$

# MAQ-16 turbocodée pragmatique

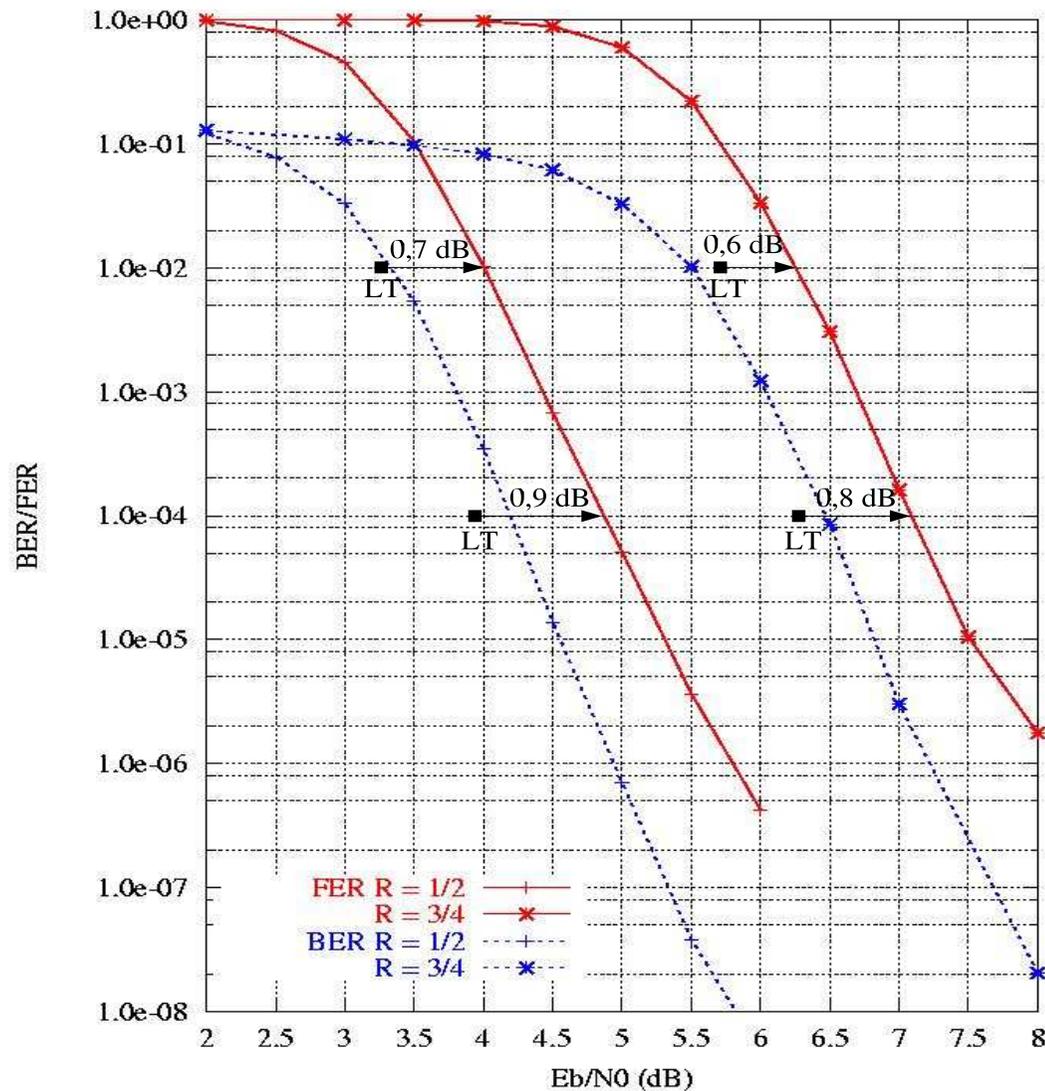
## CANAL GAUSSIEN



- Code à 16 états
- Rendements de codage : 1/2, 3/4
- Schémas : A, Y
- Blocs de 54 octets
- Décodage Max-Log-MAP
- 6 bits de quantification
- 8 itérations de décodage

# MAQ-16 turbocodée pragmatique

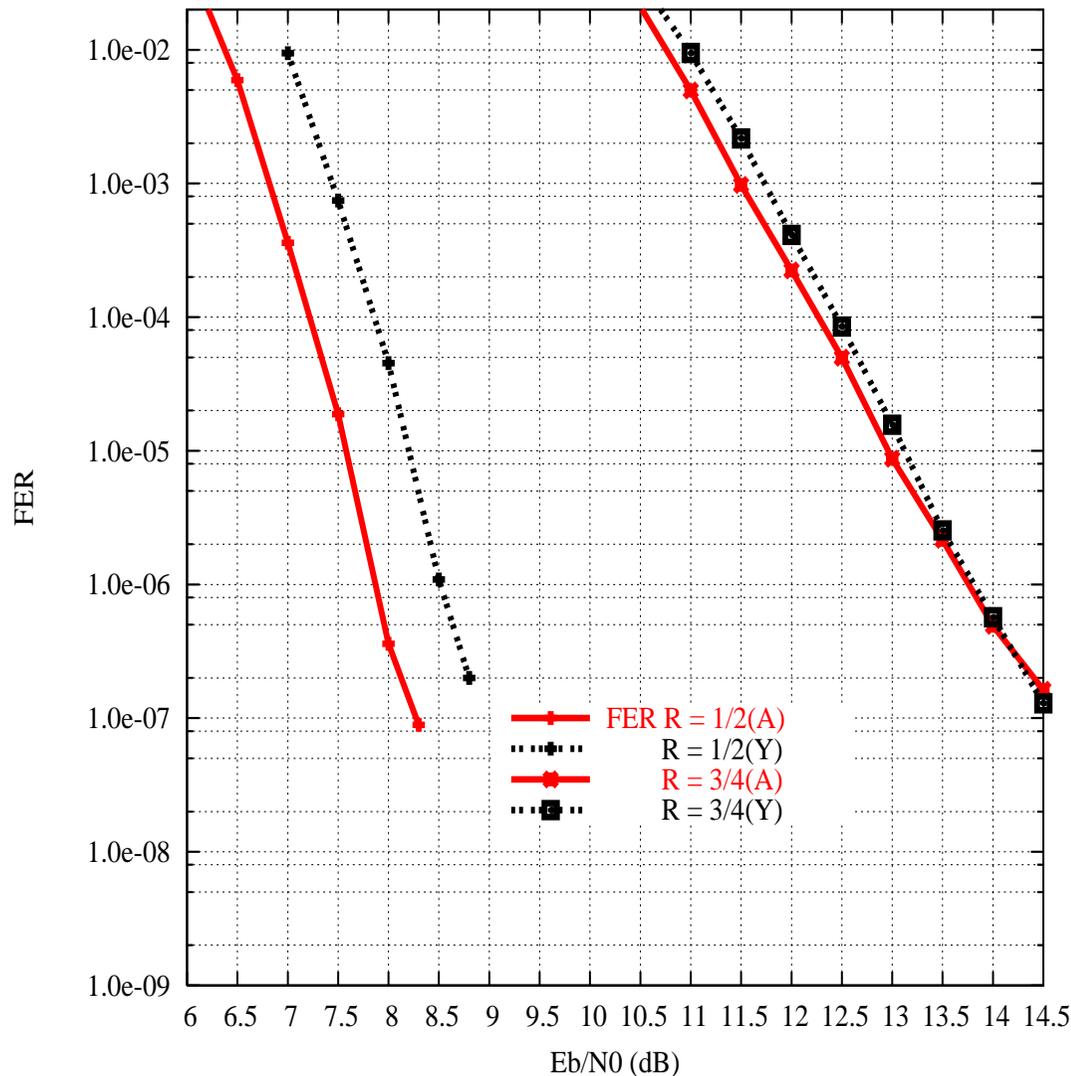
CANAL GAUSSIEN : comparaison avec limites théoriques



- Code à 8 états (DVB-RCT)
- Rendements de codage : 1/2, 3/4
- Schéma A
- Blocs de 54 octets
- Décodage Max-Log-MAP
- 6 bits de quantification
- 8 itérations de décodage

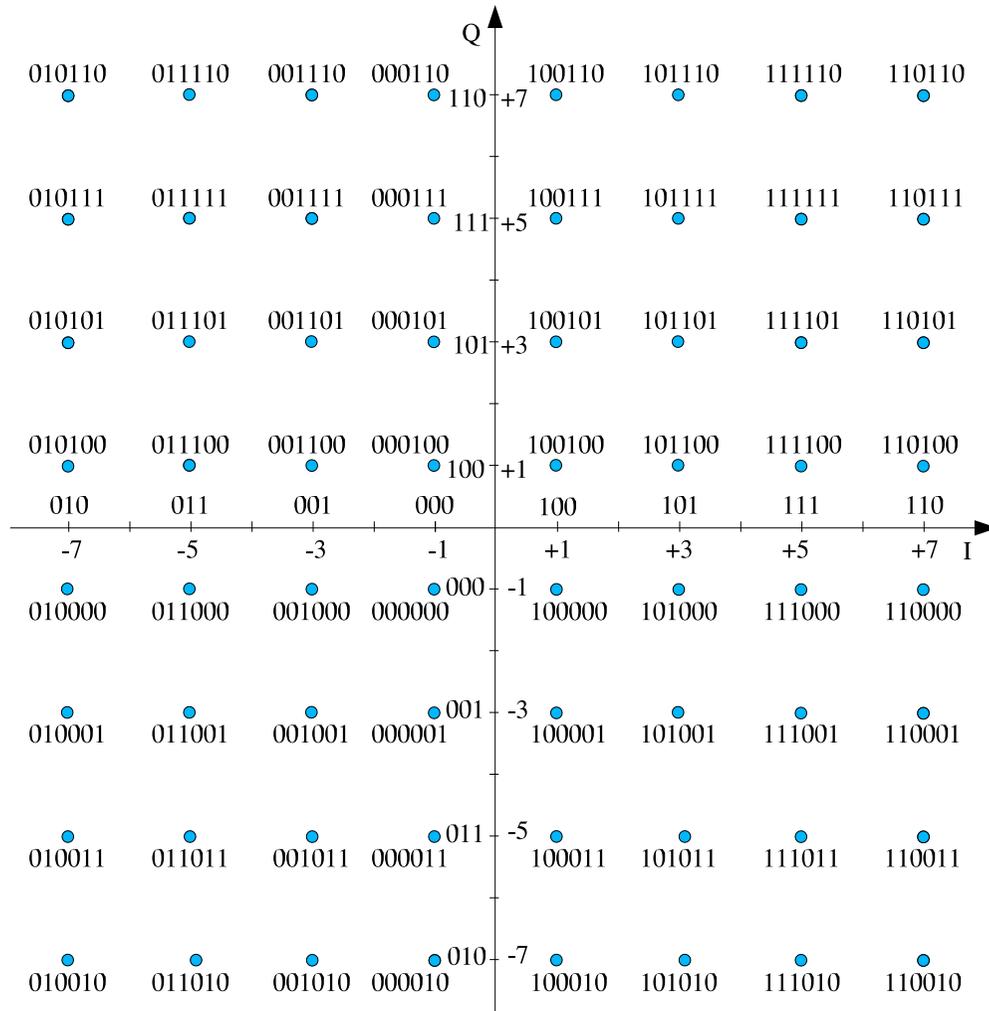
# MAQ-16 turbocodée pragmatique

## CANAL de RAYLEIGH



- Code à 16 états
- Rendements de codage : 1/2, 3/4
- Schémas : A, Y
- Blocs de 54 octets
- Décodage Max-Log-MAP
- 6 bits de quantification
- 8 itérations de décodage

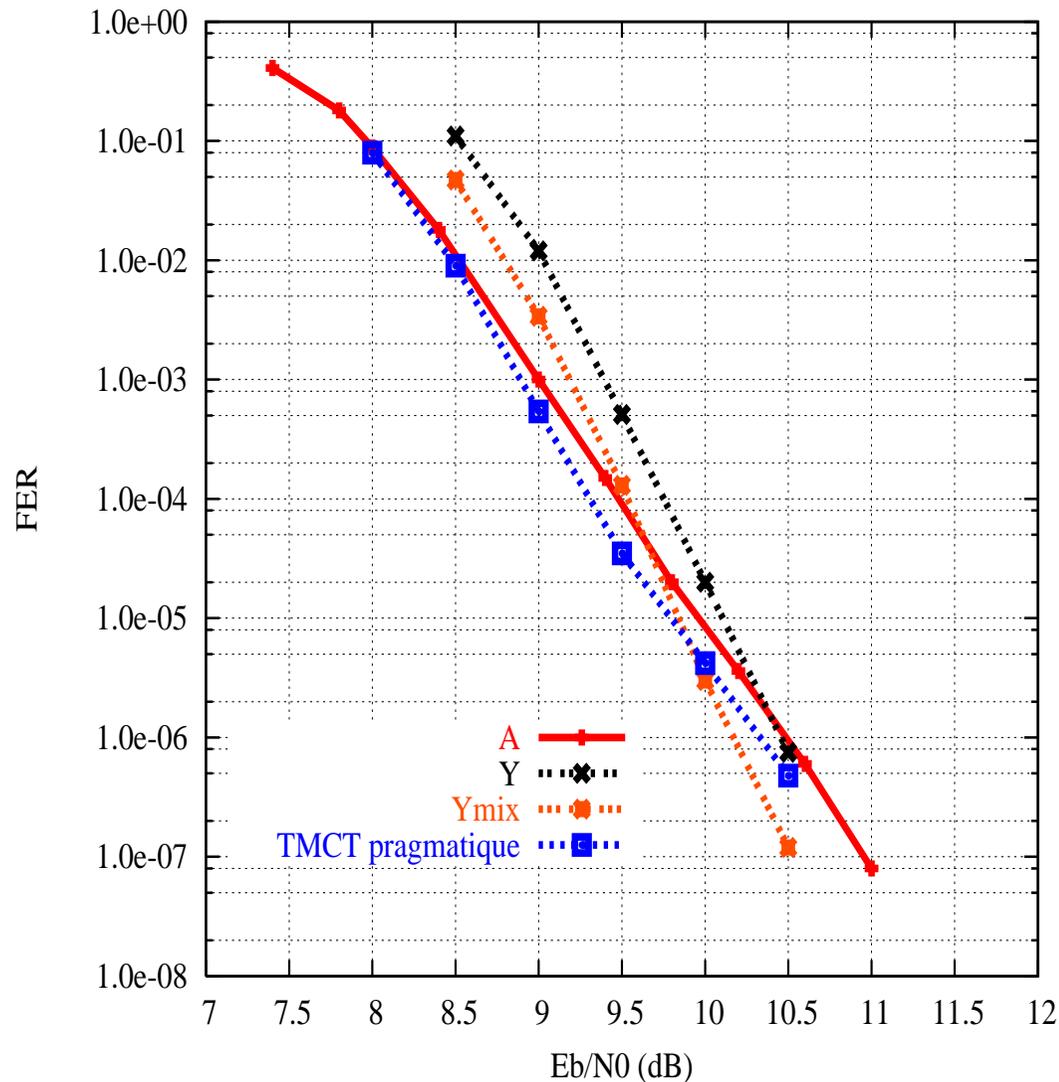
# MAQ-64 turbocodée pragmatique



- Trois niveaux différents de protection des bits
- Stratégies de construction des symboles :
  - ⇒ Schéma A
  - ⇒ Schéma Y
  - ⇒ Schéma Ymix
- TMCT pragmatique ( $R = 2/3$ )

# MAQ-64 turbocodée pragmatique

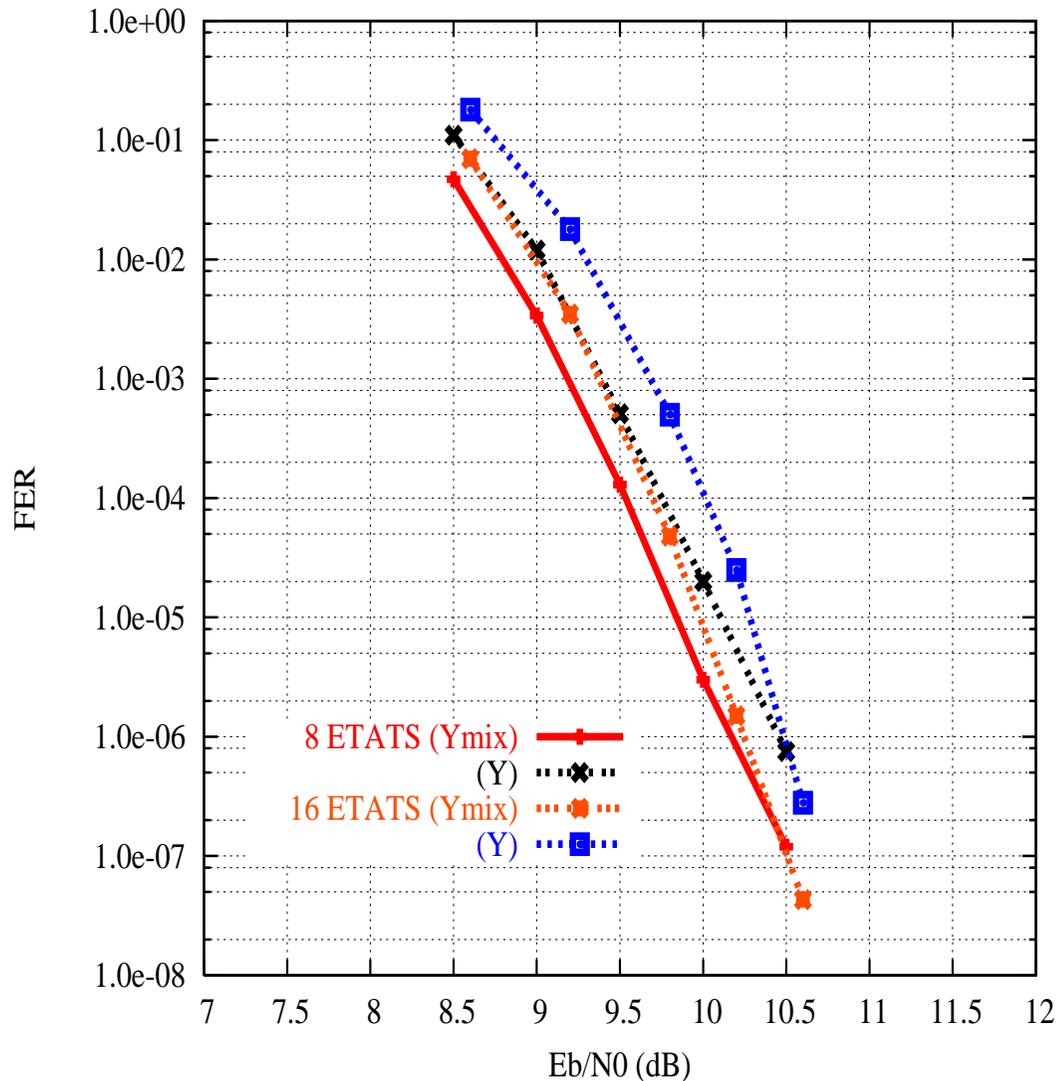
## CANAL GAUSSIEN



- Code DVB-RCT
- Rendement de codage : 2/3
- Schémas : A, Y, Ymix et TMCT pragmatique
- Blocs de 54 octets
- Décodage Max-Log-MAP
- 6 bits de quantification
- 8 itérations de décodage

# MAQ-64 turbocodée pragmatique

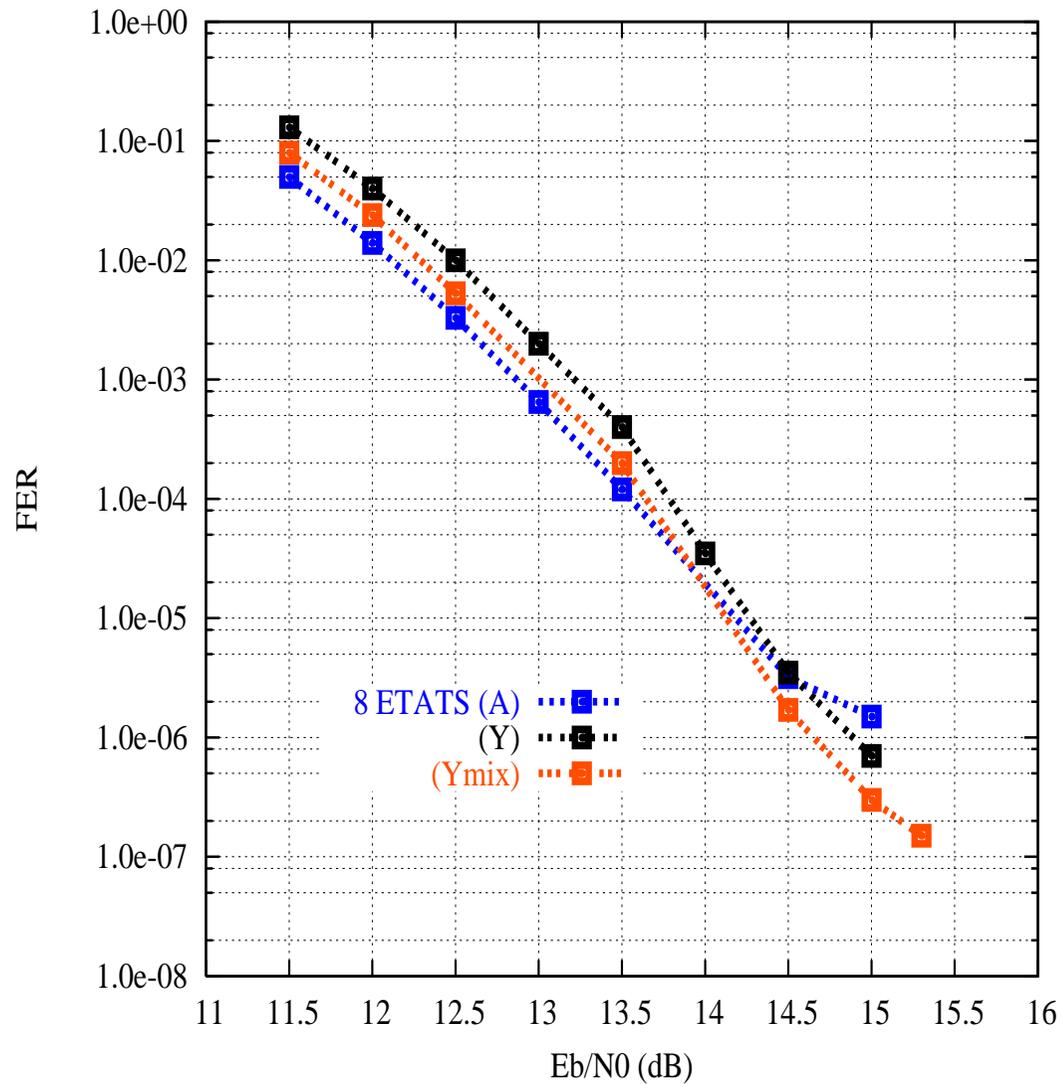
## CANAL GAUSSIEN : performance asymptotique



- Codes : 8 états, 16 états
- Rendement de codage : 2/3
- Schémas : Y, Ymix
- Blocs de 54 octets
- Décodage Max-Log-MAP
- 6 bits de quantification
- 8 itérations de décodage

# MAQ-64 turbocodée pragmatique

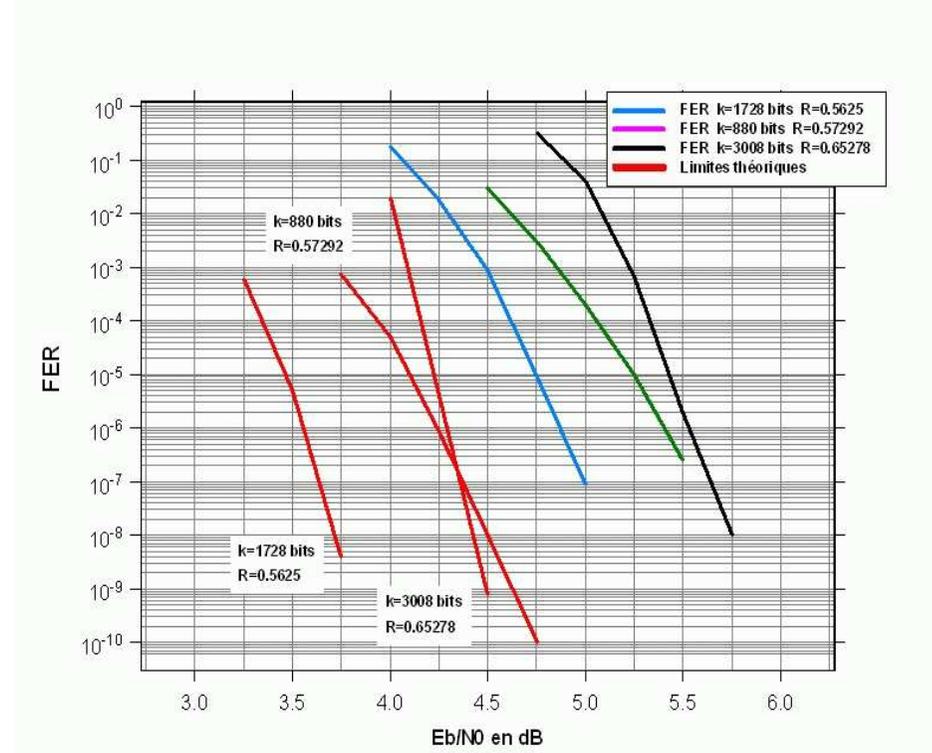
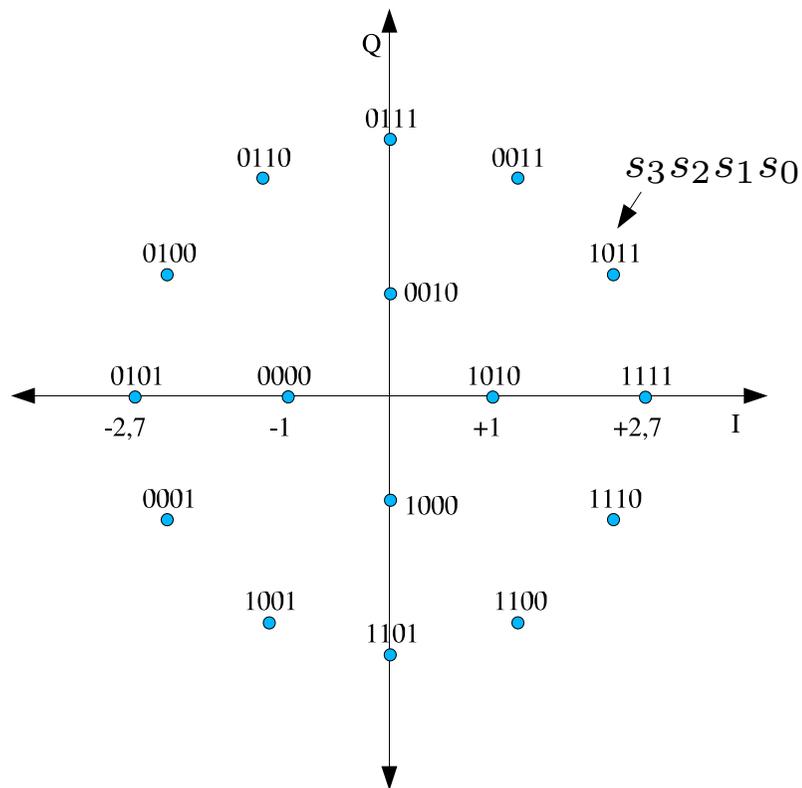
## CANAL de RAYLEIGH



- Codes : 8 états, 16 états
- Rendement de codage :  $2/3$
- Schémas : A, Y, Ymix
- Blocs de 54 octets
- Décodage Max-Log-MAP
- 6 bits de quantification
- 8 itérations de décodage

# MDAP-4-12 turbocodée pragmatique

Association pragmatique d'un TCC duo-binaire et d'une MDAP-16 pour des communications satellitaires



Mapping "quasi-Gray"

$$N_1 = 4, N_2 = 12, \varphi_1 = 0, \rho = 2.7$$

@ Projet MHOMS

# Conclusions

## **Modulations turbocodées pragmatiques** CONSTRUCTION DES SYMBOLES

- Une meilleure convergence est obtenue en protégeant au mieux les bits systématiques
- Les meilleures performances asymptotiques s'obtiennent en favorisant la protection des bits de parité
- Des solutions intermédiaires permettent d'obtenir un bon compromis convergence/performance asymptotique

# Conclusions

## Modulations turbocodées pragmatiques CONSTRUCTION DES SYMBOLES

- Une meilleure convergence est obtenue en protégeant au mieux les bits systématiques
- Les meilleures performances asymptotiques s'obtiennent en favorisant la protection des bits de parité
- Des solutions intermédiaires permettent d'obtenir un bon compromis convergence/performance asymptotique
- Ces conclusions diffèrent partiellement de celles établies par Le Goff
- Sur canal de Rayleigh : comportement semblable à celui sur canal gaussien mais visible à des taux d'erreurs plus faibles

# Conclusions

- La complexité du codeur est moins déterminante que la stratégie de construction des symboles pour obtenir les meilleures performances.

# Conclusions

- La complexité du codeur est moins déterminante que la stratégie de construction des symboles pour obtenir les meilleures performances.
- Le code 16 états conserve le bon compromis seuil de convergence/distance minimale lors de son association pragmatique avec les modulations étudiées

# Conclusions

- La complexité du codeur est moins déterminante que la stratégie de construction des symboles pour obtenir les meilleures performances.
- Le code 16 états conserve le bon compromis seuil de convergence/distance minimale lors de son association pragmatique avec les modulations étudiées
- Difficulté d'obtention des résultats de simulation à très faible taux d'erreurs
  - ⇒ étude de la performance asymptotique par des moyens autres que la simulation

# Plan

- Contexte
- Etude de modulations turbocodées pragmatiques à base de codes duo-binaires
- Estimation de la performance asymptotique des modulations turbocodées
- Conclusions et perspectives

# Performance asymptotique sur canal gaussien

- La borne de l'union :

$$\text{FER} \leq \frac{1}{2} \sum_{d \geq d_{\min}} m(d) \text{erfc} \sqrt{dR \frac{E_b}{N_0}}$$

# Performance asymptotique sur canal gaussien

- La borne de l'union :

$$\text{FER} \leq \frac{1}{2} \sum_{d \geq d_{\min}} m(d) \text{erfc} \sqrt{dR \frac{E_b}{N_0}}$$

- A faible taux d'erreurs :

$$\text{FER} \simeq \frac{1}{2} m(d_{\min}) \text{erfc} \sqrt{d_{\min} R \frac{E_b}{N_0}}$$

⇒ A partir de la connaissance de  $d_{\min}$  et  $m(d_{\min})$ , possibilité d'estimer les performances d'une transmission codée à très faible taux d'erreurs sans nécessiter des simulations coûteuses en temps et en puissance de calcul

# Distance minimale d'un turboencode

- Modèle d'entrelacement uniforme ou statistique introduit par Benedetto *et al* (1996)

# Distance minimale d'un turboencode

- Modèle d'entrelacement uniforme ou statistique introduit par Benedetto *et al* (1996)
- Méthode d'énumération partielle des mots de codes proposée par Garello *et al* (2000)

# Distance minimale d'un turboencode

- Modèle d'entrelacement uniforme ou statistique introduit par Benedetto *et al* (1996)
- Méthode d'énumération partielle des mots de codes proposée par Garello *et al* (2000)
- La **Méthode de l'Impulsion d'Erreur** introduite par Berrou *et al* (2002)
  - ⇒ fournit une estimation de la distance minimale d'un turboencode convolutif et de sa multiplicité
  - ⇒ rapide : ne considère pas les propriétés du code mais l'algorithme de décodage associé

# Estimation de la performance asymptotique

## Modulations turbocodées pragmatiques

### CANAL GAUSSIEN : METHODE 1

- A fort rapport signal à bruit :

$$\text{FER} \simeq m(d_{\text{libre}}) \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \frac{d_{\text{libre}}}{2\sqrt{N_0}} \right)$$

# Estimation de la performance asymptotique

## Modulations turbocodées pragmatiques

### CANAL GAUSSIEN : METHODE 1

- A fort rapport signal à bruit :

$$\text{FER} \simeq m(d_{\text{libre}}) \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \frac{d_{\text{libre}}}{2\sqrt{N_0}} \right)$$

$\mathbf{s}_l = (s_1, s_2, \dots, s_l)$  : séquence de symboles codés transmise

$\hat{\mathbf{s}}_l = (\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_l)$  : séquence choisie par le décodeur

**Hypothèse 1** : deux symboles appartenant à  $\mathbf{s}_l$  et  $\hat{\mathbf{s}}_l$  contiennent au plus un bit différent

# Estimation de la performance asymptotique

## Modulations turbocodées pragmatiques

### CANAL GAUSSIEN : METHODE 1

- A fort rapport signal à bruit :

$$\text{FER} \simeq m(d_{\text{libre}}) \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \frac{d_{\text{libre}}}{2\sqrt{N_0}} \right)$$

$\mathbf{s}_l = (s_1, s_2, \dots, s_l)$  : séquence de symboles codés transmise

$\hat{\mathbf{s}}_l = (\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_l)$  : séquence choisie par le décodeur

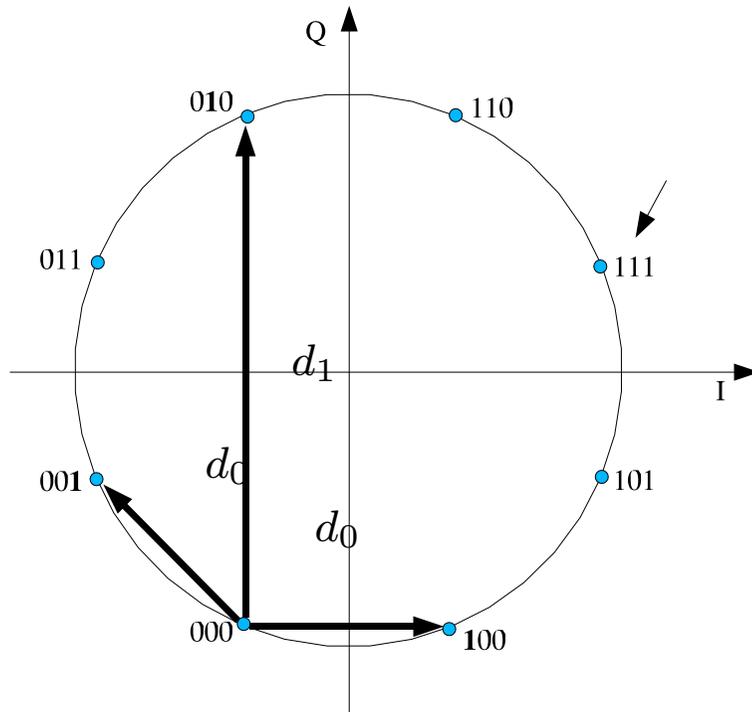
**Hypothèse 1** : deux symboles appartenant à  $\mathbf{s}_l$  et  $\hat{\mathbf{s}}_l$  contiennent au plus un bit différent

$$d_{\text{libre}}^2 = d_{\text{min}} d_0^2$$



# Estimation de la performance asymptotique

## MDP-8 turbocodée pragmatique CANAL GAUSSIEN : METHODE 2

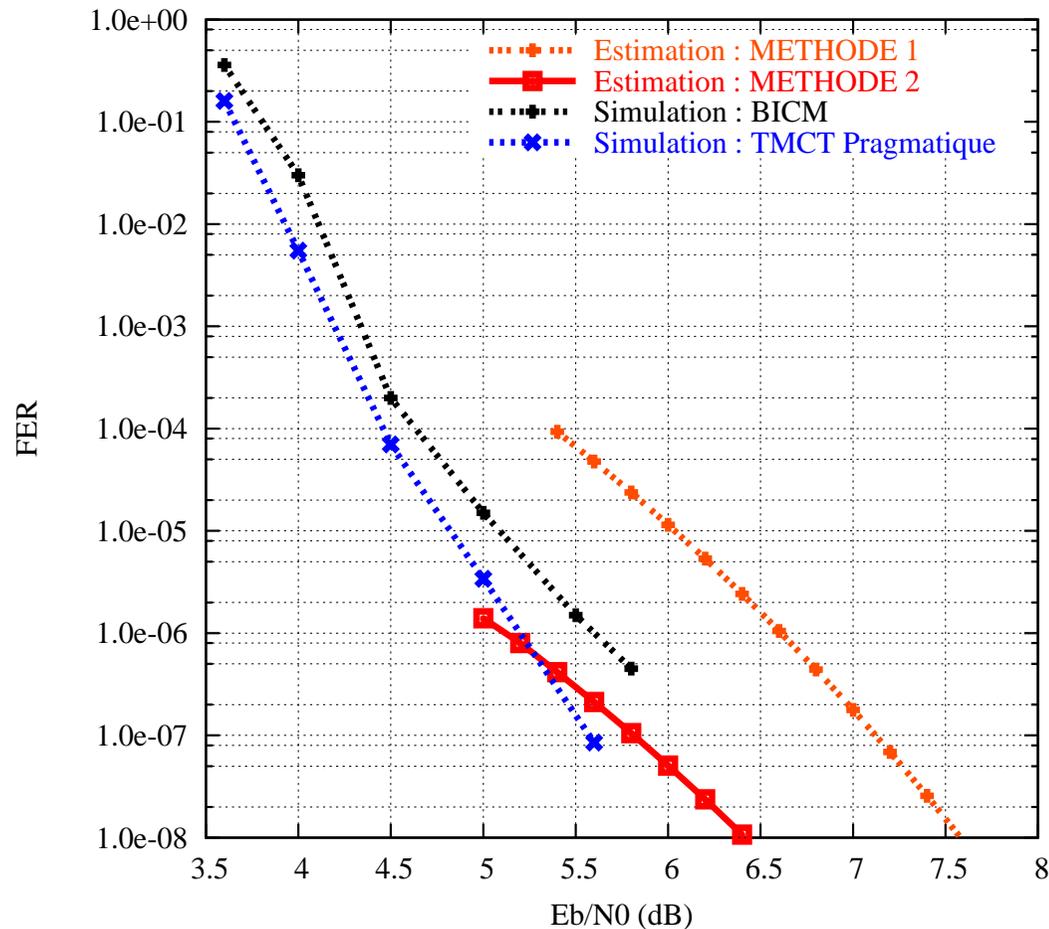


- $d_E^2(s_l, \hat{s}_l) = j d_1^2 + (d_{\min} - j) d_0^2$
- si  $s_i \neq \hat{s}_i$  :
 
$$\begin{cases} Pr \{d_E(s_i, \bar{s}_i) = d_0\} = \frac{2}{3} \\ Pr \{d_E(s_i, \bar{s}_i) = d_1\} = \frac{1}{3} \end{cases}$$

$$FER \simeq \sum_{j=0}^{d_{\min}} \binom{d_{\min}}{j} \left(\frac{1}{3}\right)^j \left(\frac{2}{3}\right)^{d_{\min}-j} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_s}{N_0} \left\{ j \sin^2 \frac{3\pi}{8} + (d_{\min} - j) \sin^2 \frac{\pi}{8} \right\}}$$

# Estimation de la performance asymptotique

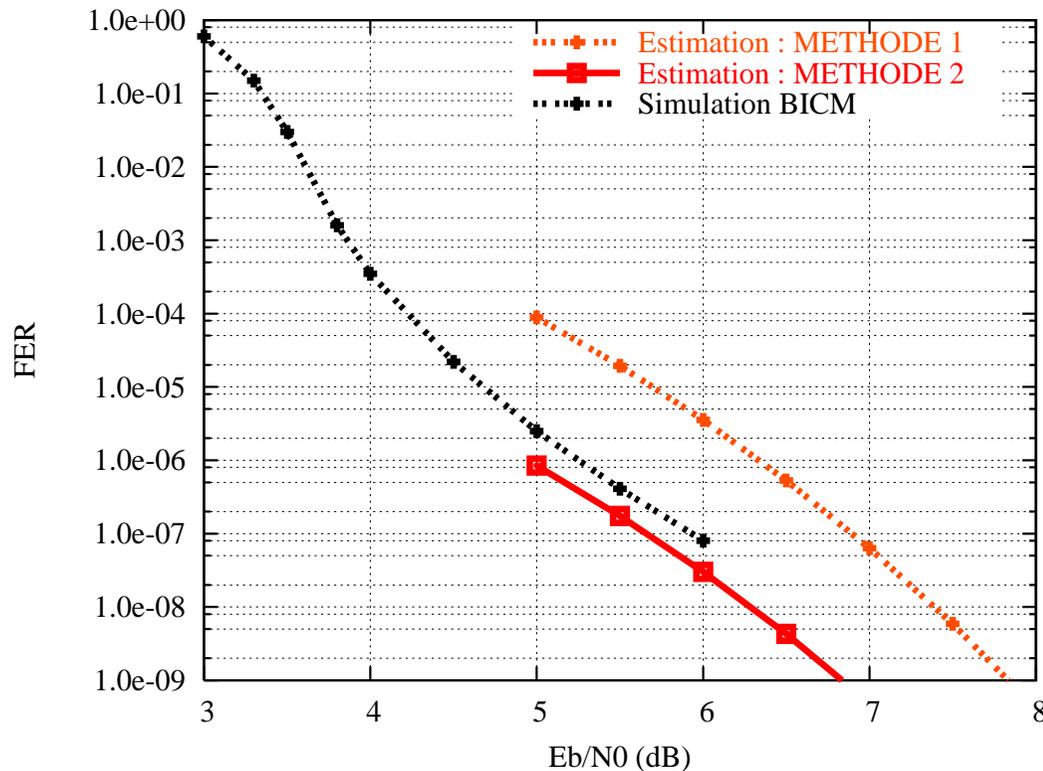
## MDP-8 turbocodée pragmatique CANAL GAUSSIEN : Résultats



- Code 8 états
- Rendement de codage : 2/3
- Blocs de 188 octets
- Simulations :  
Max-Log-MAP  
8 itérations
- Estimations :  
Méthode 1  
Méthode 2

# Estimation de la performance asymptotique

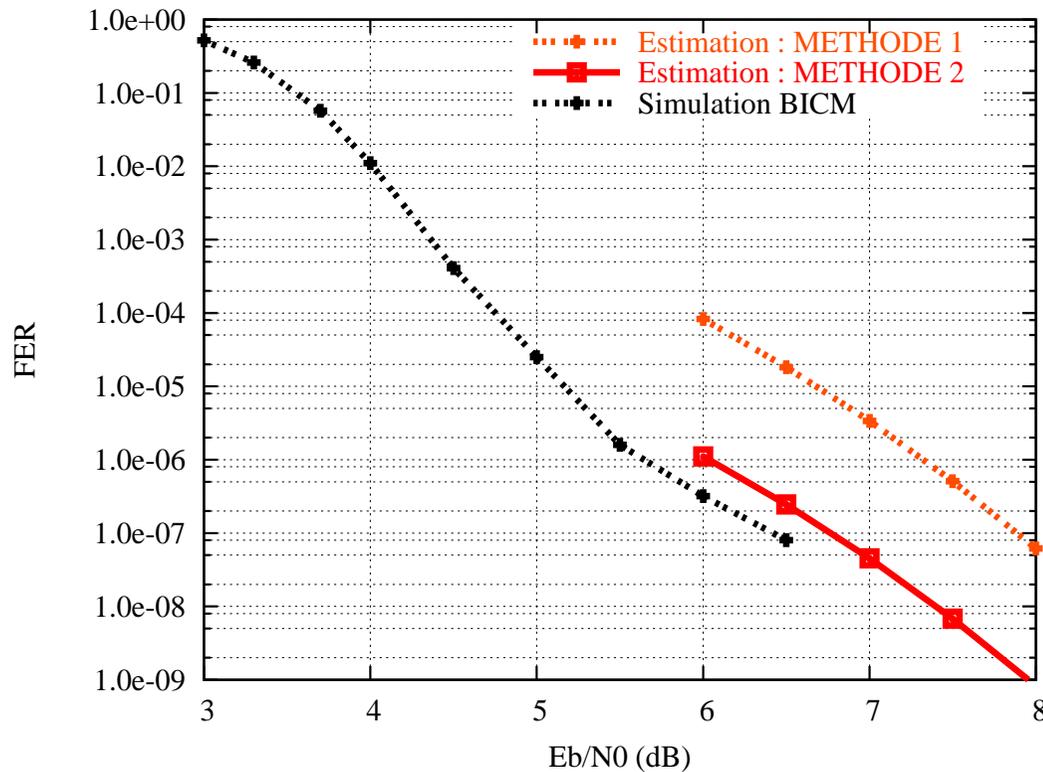
## MAQ-16 turbocodée pragmatique CANAL GAUSSIEN : Résultats



- Code 8 états
- Rendement de codage : 1/2
- Blocs de 188 octets
- Estimations :
  - Méthode 1
  - Méthode 2
- Simulation BICM :
  - Max-Log-MAP
  - 8 itérations

# Estimation de la performance asymptotique

## MAQ-16 turbocodée pragmatique CANAL GAUSSIEN : Résultats



- Code 8 états
- Rendement de codage : 1/2
- Blocs de 54 octets
- Estimations :
  - Méthode 1
  - Méthode 2
- Simulation BICM :
  - Max-Log-MAP
  - 8 itérations

# Estimation de la performance asymptotique

## Modulations codées en treillis CANAL A EVANOUISSEMENTS

- Borne de la probabilité d'erreur par paire (Chernoff) :

$$P_2(\mathbf{s}_l, \hat{\mathbf{s}}_l) \leq \prod_{i=1}^{l_Q} \frac{1}{1 + \frac{1}{4N_0} |s_i - \hat{s}_i|^2}$$

# Estimation de la performance asymptotique

## Modulations codées en treillis CANAL A EVANOUISSEMENTS

- Borne de la probabilité d'erreur par paire (Chernoff) :

$$P_2(\mathbf{s}_l, \hat{\mathbf{s}}_l) \leq \prod_{i=1}^{l_Q} \frac{1}{1 + \frac{1}{4N_0} |s_i - \hat{s}_i|^2}$$

- Nouvelles bornes introduites par Slimane *et al* (1995)
  - ⇒ introduction du facteur  $K(L, 1) = \frac{(2L-1)!!}{2^{L+1}L!}$
  - $L = \min(l_Q)$  : longueur effective du code
  - $(2L - 1)!! = (2L - 1) \cdot (2L - 3) \cdot \dots \cdot 3 \cdot 1$

# Estimation de la performance asymptotique

## Modulations codées en treillis CANAL A EVANOUISSEMENTS

- Borne de la probabilité d'erreur par paire (Chernoff) :

$$P_2(\mathbf{s}_l, \hat{\mathbf{s}}_l) \leq \prod_{i=1}^{l_Q} \frac{1}{1 + \frac{1}{4N_0} |s_i - \hat{s}_i|^2}$$

- Pour de forts rapports signal à bruit :

$$P_2(\mathbf{s}_l, \hat{\mathbf{s}}_l) \approx K(L, 1) \prod_{i=1}^L \frac{1}{1 + \frac{1}{4N_0} |s_i - \hat{s}_i|^2}$$

# Estimation de la performance asymptotique

## Modulations codées en treillis CANAL A EVANOUISSEMENTS

- Distance produit :  $d_p^2(L) = \prod_{i=1}^L |s_i - \hat{s}_i|^2$

# Estimation de la performance asymptotique

## Modulations codées en treillis CANAL A EVANOUISSEMENTS

- Distance produit :  $d_p^2(L) = \prod_{i=1}^L |s_i - \hat{s}_i|^2$
- Borne supérieure de  $P_e$  pour de forts rapports signal à bruit :

$$P_e \approx \gamma(L, d_p^2(L)) P_2(\mathbf{s}_l, \hat{\mathbf{s}}_l)$$

$\gamma(L, d_p^2(L))$  : nombre moyen de séquences avec une distance effective  $L$  et une distance produit  $d_p(L)$

# Estimation de la performance asymptotique

## Modulations codées en treillis CANAL A EVANOUISSEMENTS

- Distance produit :  $d_p^2(L) = \prod_{i=1}^L |s_i - \hat{s}_i|^2$
- Borne supérieure de  $P_e$  pour de forts rapports signal à bruit :

$$P_e \approx \gamma(L, d_p^2(L)) P_2(\mathbf{s}_l, \hat{\mathbf{s}}_l)$$

- Utilisation de ces résultats dans le cadre des modulations turbocodées
  - ⇒ Duman et Salehi (1999) :
    - modèle d'entrelacement uniforme
    - connaissance de la distribution des poids des mots de code des codeurs élémentaires

# Estimation de la performance asymptotique

## Modulations codées en treillis CANAL A EVANOUISSEMENTS

- Distance produit :  $d_p^2(L) = \prod_{i=1}^L |s_i - \hat{s}_i|^2$
- Borne supérieure de  $P_e$  pour de forts rapports signal à bruit :

$$P_e \approx \gamma(L, d_p^2(L)) P_2(\mathbf{s}_l, \hat{\mathbf{s}}_l)$$

- Utilisation de ces résultats dans le cadre des modulations turbocodées

⇒ **Application de la Méthode de l'Impulsion d'Erreur**

# Estimation de la performance asymptotique

## Modulations turbocodées pragmatiques CANAL A EVANOUISSEMENTS

**Hypothèse 1** : deux symboles appartenant à  $\mathbf{s}_l$  et  $\hat{\mathbf{s}}_l$  contiennent au plus un bit différent.

**Hypothèse 2** :  $\forall i$ , si  $s_i \neq \hat{s}_i$ ,  $s_i$  et  $\hat{s}_i$  sont des signaux adjacents dans la constellation.

$$|s_i - \hat{s}_i| = \begin{cases} 0 & \text{si } s_i = \hat{s}_i \\ d_0 & \text{si } s_i \neq \hat{s}_i \end{cases}$$

# Estimation de la performance asymptotique

## Modulations turbocodées pragmatiques CANAL A EVANOUISSEMENTS

**Hypothèse 1** : deux symboles appartenant à  $\mathbf{s}_l$  et  $\hat{\mathbf{s}}_l$  contiennent au plus un bit différent.

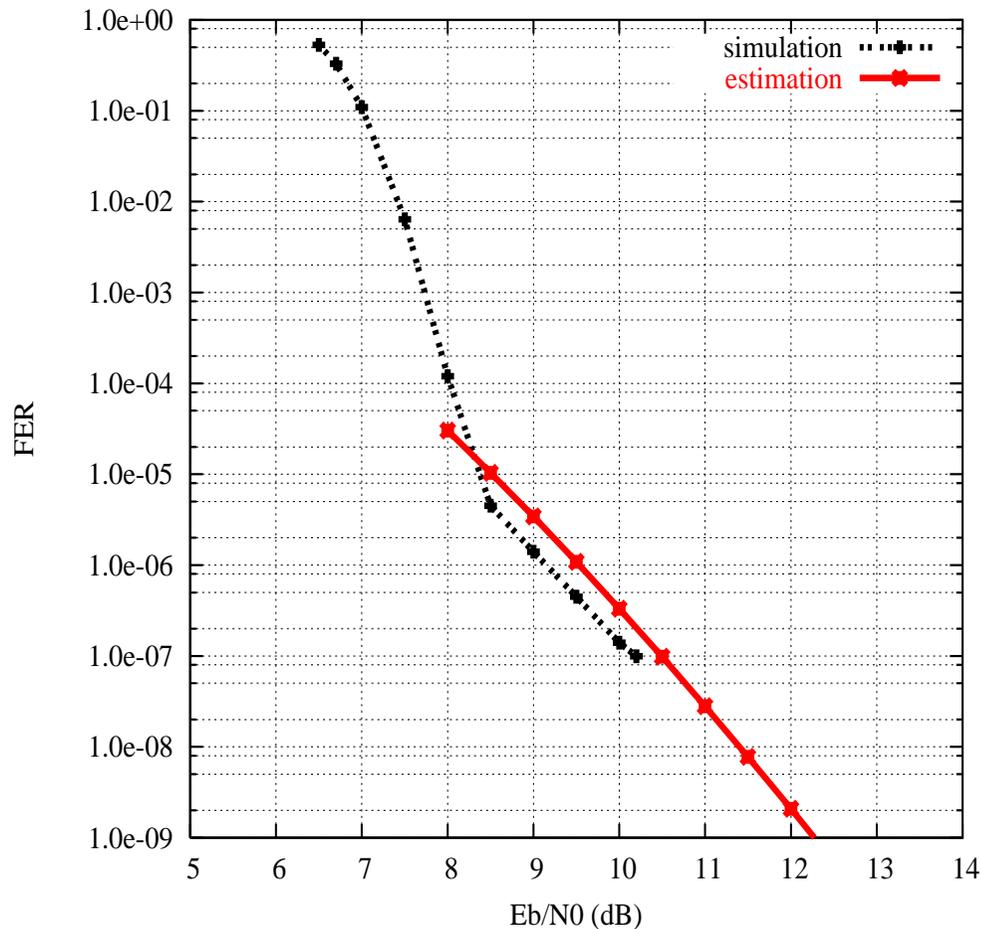
**Hypothèse 2** :  $\forall i$ , si  $s_i \neq \hat{s}_i$ ,  $s_i$  et  $\hat{s}_i$  sont des signaux adjacents dans la constellation.

- Calcul de la distance produit :  $d_p^2(L) = (d_0^2)^{d_{\min}}$
- Estimation du FER asymptotique :

$$\text{FER} \approx \gamma(d_{\min}, d_p^2(d_{\min})) K(d_{\min}, 1) \left( \frac{1}{1 + \frac{d_0^2}{4N_0}} \right)^{d_{\min}}$$

# Estimation de la performance asymptotique

## MDP-8 turbocodée pragmatique CANAL de RAYLEIGH : Résultats



- Code DVB-RCS
- Rendement de codage : 2/3
- Blocs de 188 octets
- Simulation :  
Max-Log-MAP  
8 itérations

# Conclusions

## Estimation de la performance asymptotique

- Analyse qui permet d'utiliser les informations fournies par la Méthode de l'Impulsion d'Erreur dans l'estimation des performances asymptotiques des MDP/MAQ turbocodées pragmatiques avec entrelacement au niveau bit

# Conclusions

## Estimation de la performance asymptotique

- Analyse qui permet d'utiliser les informations fournies par la Méthode de l'Impulsion d'Erreur dans l'estimation des performances asymptotiques des MDP/MAQ turbocodées pragmatiques avec entrelacement au niveau bit

## Sur canal gaussien

- Méthode 2 : estimation statistique à 0,3 dB des résultats de simulation BICM

# Conclusions

## Estimation de la performance asymptotique

- Analyse qui permet d'utiliser les informations fournies par la Méthode de l'Impulsion d'Erreur dans l'estimation des performances asymptotiques des MDP/MAQ turbocodées pragmatiques avec entrelacement au niveau bit

## Sur canal à évanouissements

- Méthode présentant 2 avantages par rapport aux travaux précédents :
  - ⇒ valable pour n'importe quel entrelaceur
  - ⇒ ne requiert pas la connaissance de la distribution de poids des mots de code des codeurs élémentaires

# Plan

- Contexte
- Etude de modulations turbocodées pragmatiques à base de codes duo-binaires
- Estimation de la performance asymptotique des modulations turbocodées
- Conclusions et perspectives

# Conclusions générales

- Introduction des turbocodes duo-binaires dans le schéma de modulation turbocodée pragmatique
  - ⇒ analyse de la construction des symboles pour obtenir
    - meilleure convergence
    - meilleure performance asymptotique

# Conclusions générales

- Introduction des turbocodes duo-binaires dans le schéma de modulation turbocodée pragmatique
  - ⇒ analyse de la construction des symboles pour obtenir
    - meilleure convergence
    - meilleure performance asymptotique
- Estimation de la performance asymptotique des modulations turbocodées à partir de la Méthode de l'Impulsion d'Erreur
  - ⇒ courbes d'estimation obtenues permettent de prévoir avec une bonne précision les résultats de simulation

# Perspectives

- Extension de l'étude de la construction des symboles :
  - ⇒ pour des blocs longs
  - ⇒ pour d'autres types de modulation :
    - MAQ-32, MAQ-256, MDAP-32, MDAP-64

# Perspectives

- Extension de l'étude de la construction des symboles :
  - ⇒ pour des blocs longs
  - ⇒ pour d'autres types de modulation :
    - MAQ-32, MAQ-256, MDAP-32, MDAP-64
- Etude du comportement des modulations turbocodées sur des canaux à évanouissements et amélioration du schéma pragmatique afin de gagner en performance sur ce type de canaux

# Perspectives

- Extension de l'étude de la construction des symboles :
  - ⇒ pour des blocs longs
  - ⇒ pour d'autres types de modulation :
    - MAQ-32, MAQ-256, MDAP-32, MDAP-64
- Etude du comportement des modulations turbocodées sur des canaux à évanouissements et amélioration du schéma pragmatique afin de gagner en performance sur ce type de canaux
- Problématique de la prise en compte du schéma de construction des symboles dans l'estimation des performances asymptotiques