

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

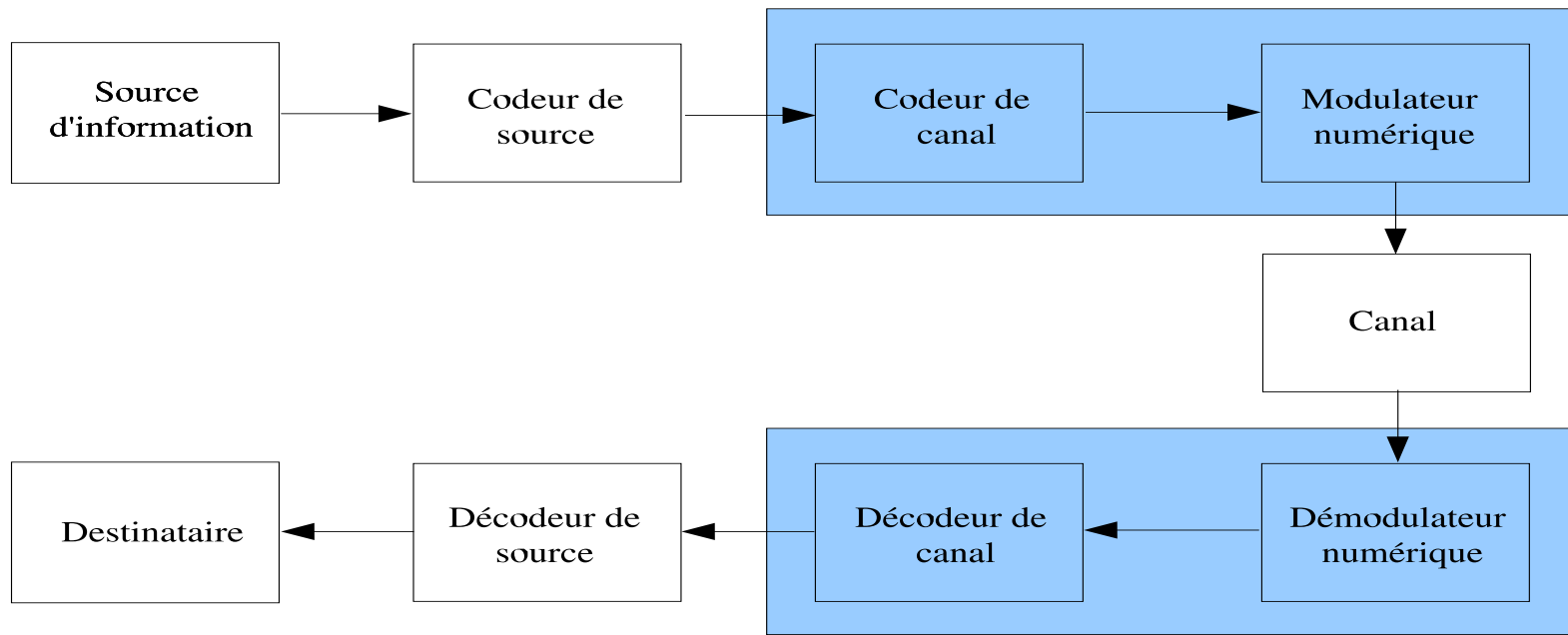
TRANSMISSION D'INFORMATION NUMERIQUE

- 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

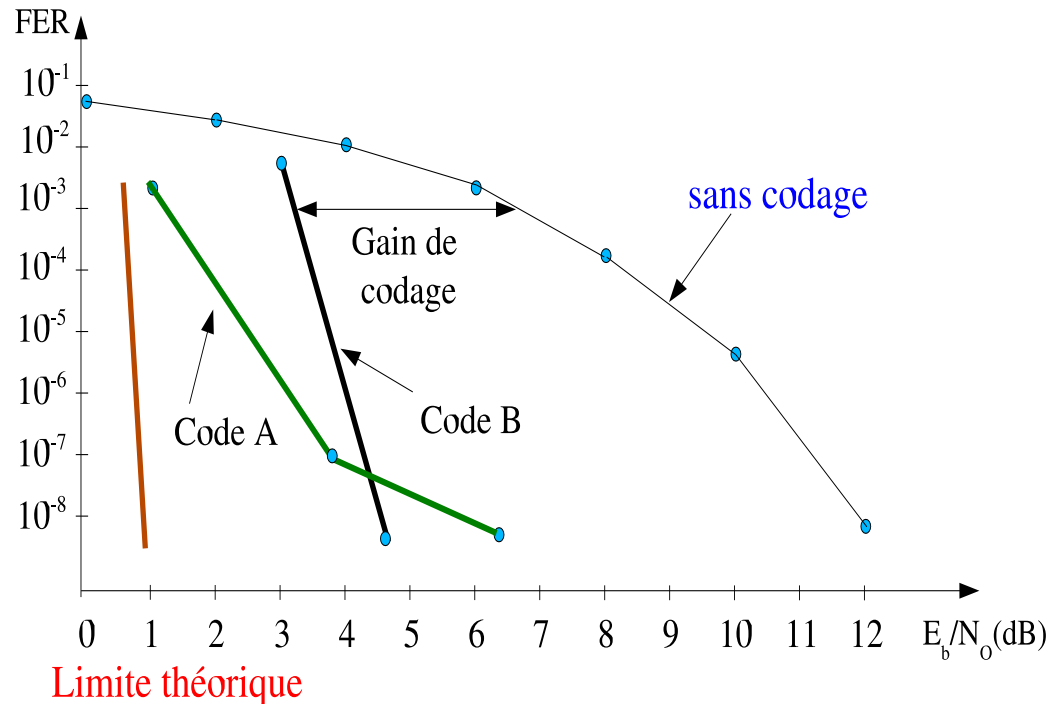
- Les modulations codées en treillis d'Ungerboeck (1982)
- Les modulations codées entrelacées au niveau bit de Zehavi (1989)
- Les turbocodes convolutifs (1993)
- Les modulations turbocodées
 - ⇒ L'approche pragmatique de Le Goff (1994)
 - ⇒ Les turbo-modulations codées en treillis
 - Schéma de Robertson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

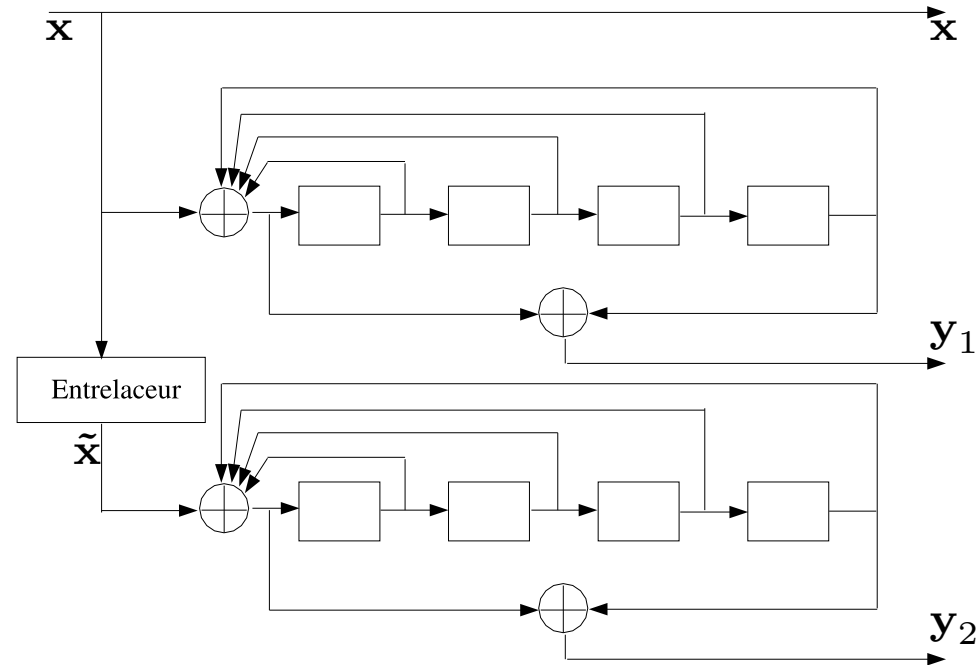


- Gain de codage
- Limite théorique
- Seuil de convergence

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

Les turbocodes convolutifs

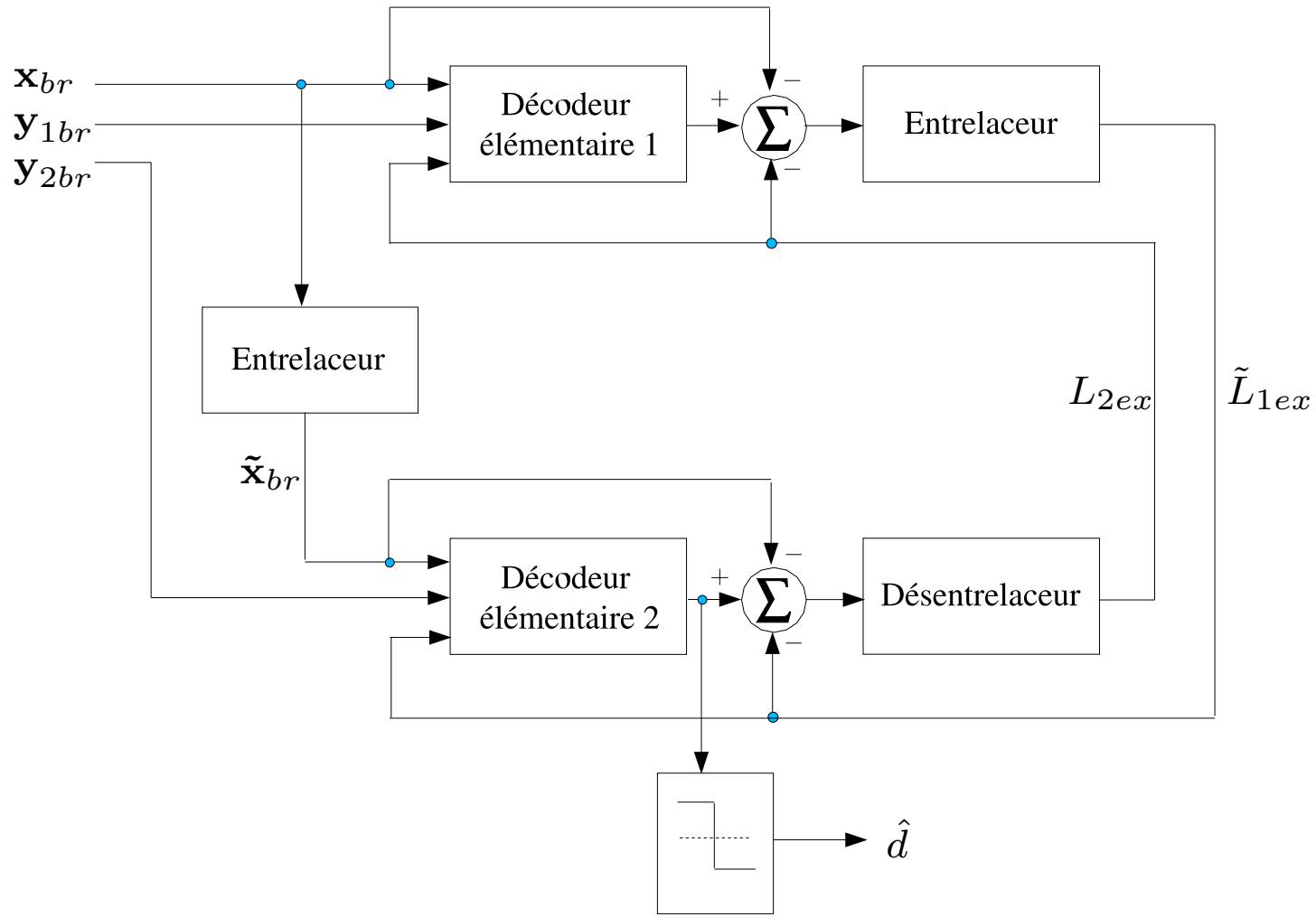
- Introduits par Berrou et Glavieux (1993)
- Concaténation parallèle de 2 codeurs Convolutifs Systématiques Récurifs



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

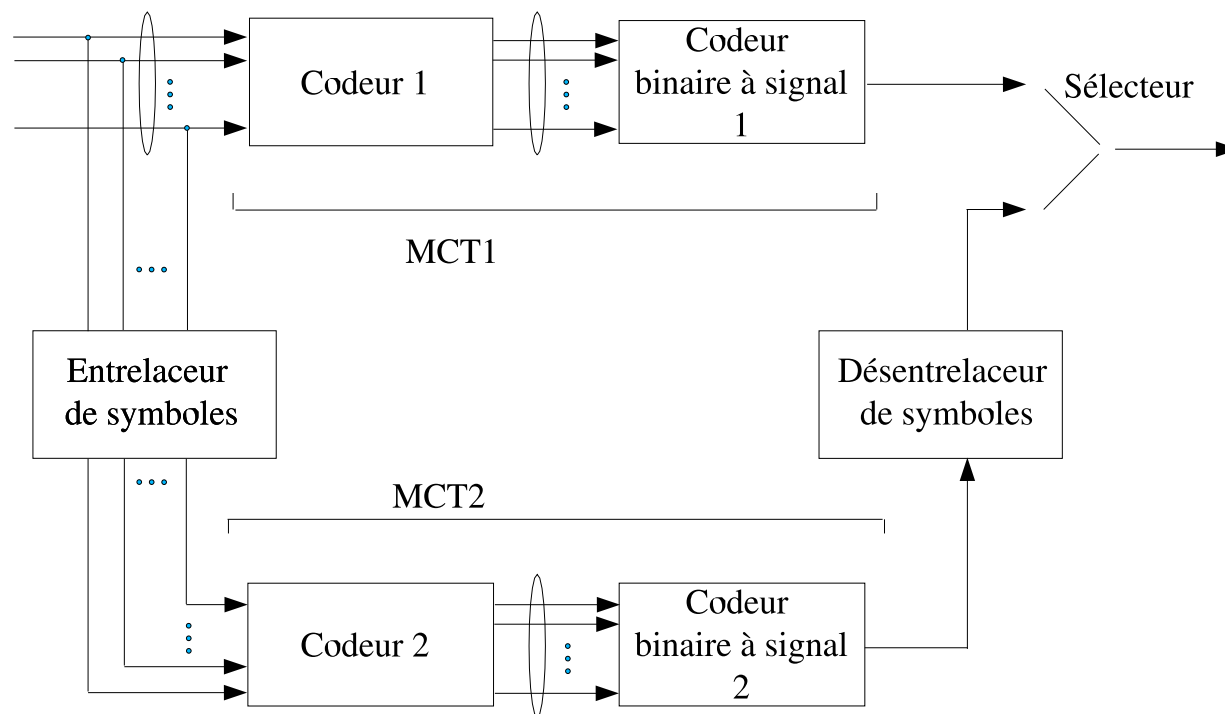
Les modulations turbocodées

Turbo-modulations codées en treillis (TMCT)

Les modulations turbocodées

Turbo-modulations codées en treillis (TMCT)

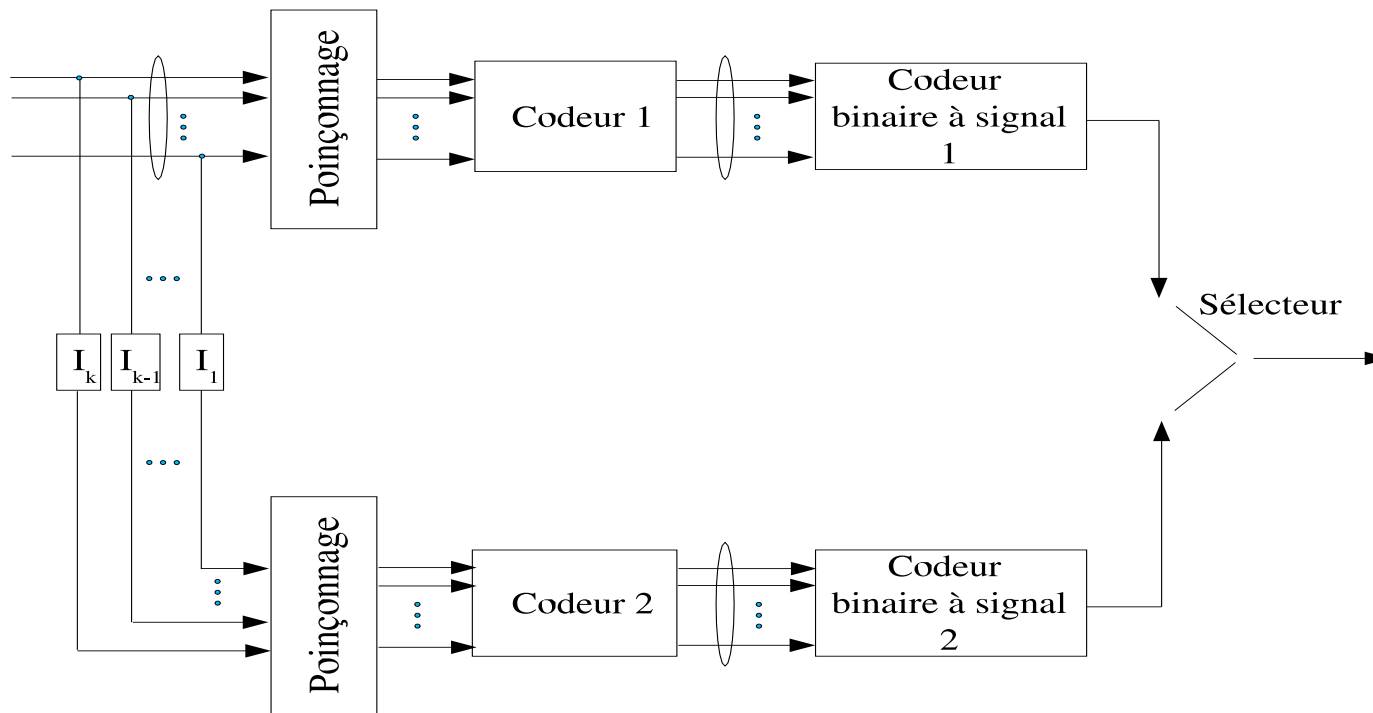
- Schéma de Robertson
⇒ deux codeurs convolutifs récursifs unis par un entrelaceur de symboles



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

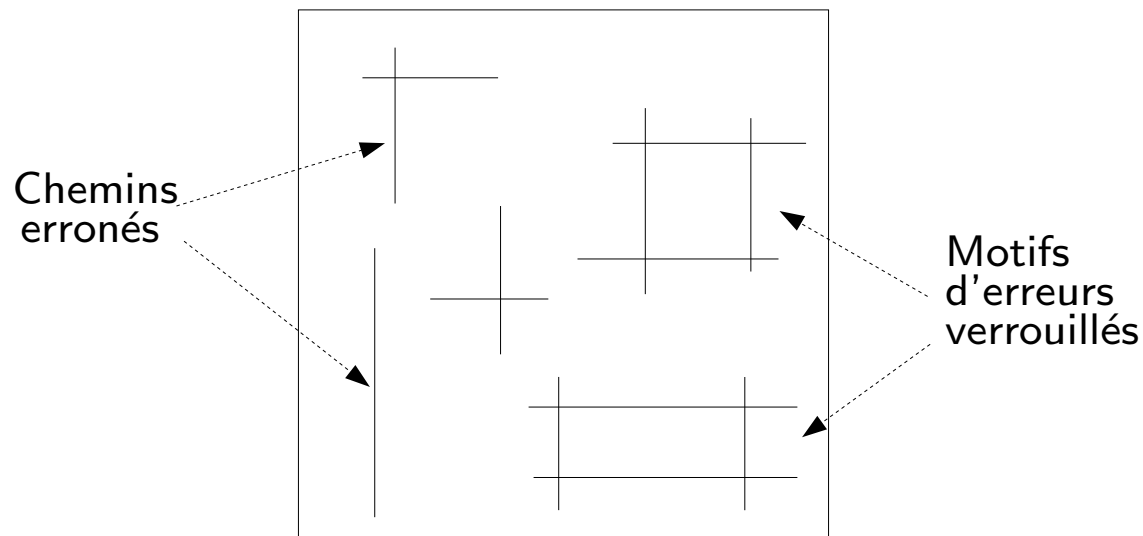
AVANTAGES

- 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

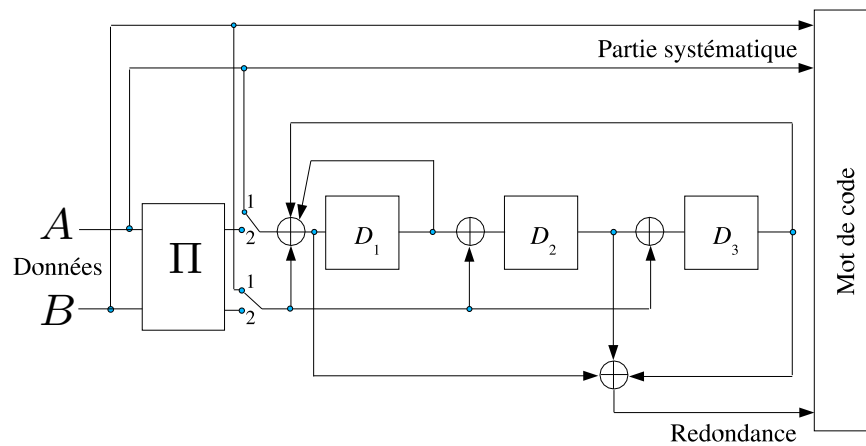
Les turbocodes convolutifs duo-binaires

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

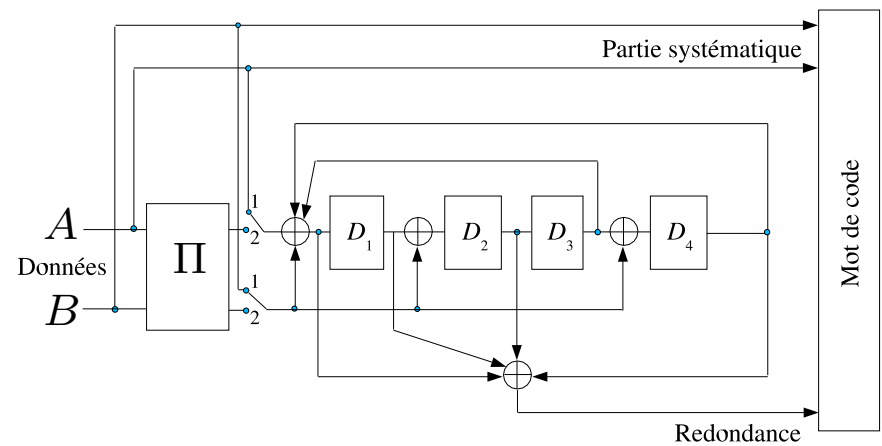
Les turbocodes convolutifs duo-binaires

8 ETATS



- DVB-RCS, DVB-RCT

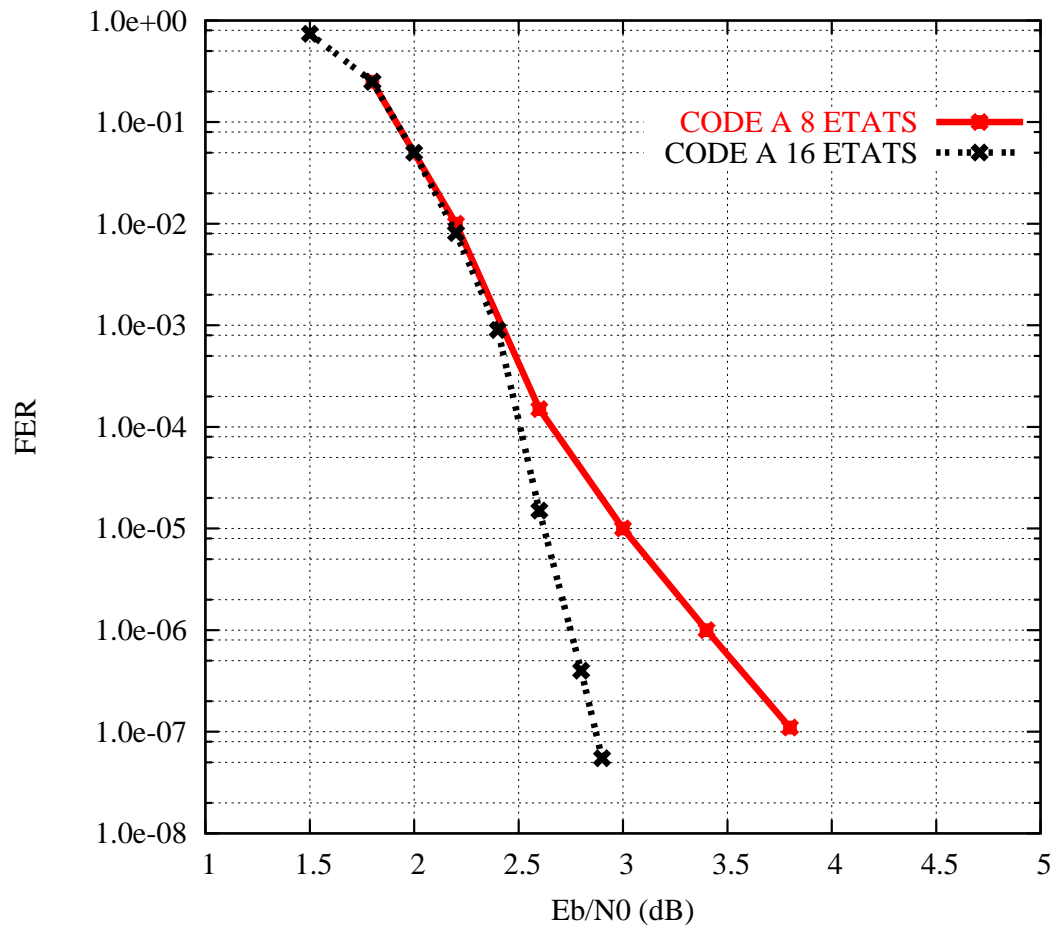
16 ETATS



- TURBO2000, TURBO Φ

Les turbocodes convolutifs duo-binaires

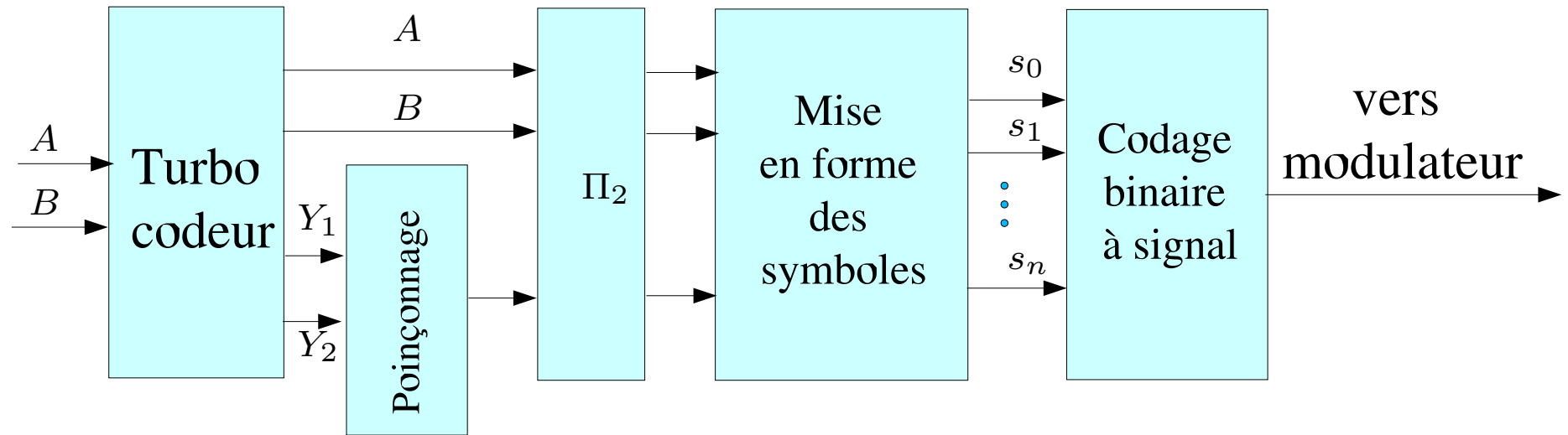
- Comparaison de performances : 8 états - 16 états



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

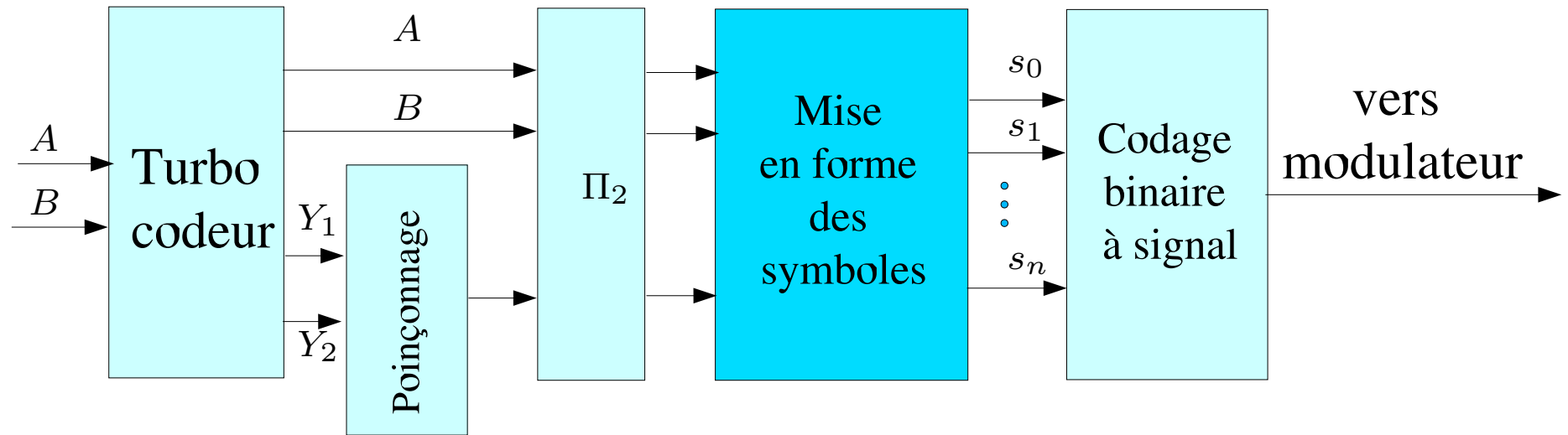
Modulation turbocodée pragmatique duo-binaire

Schéma général d'émission



Modulation turbocodée pragmatique duo-binaire

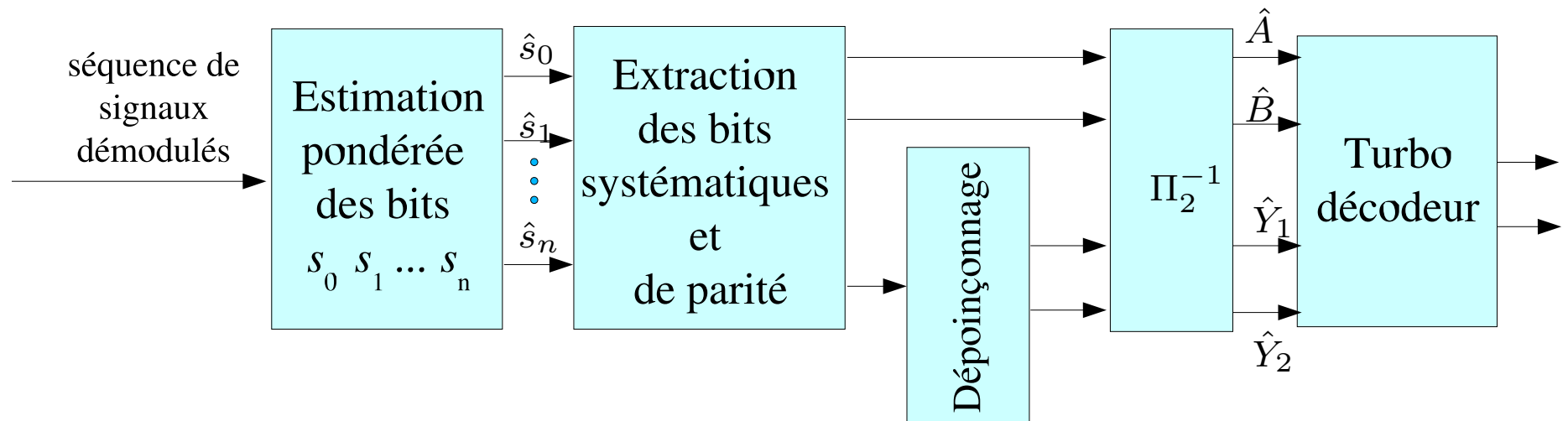
Schéma général d'émission



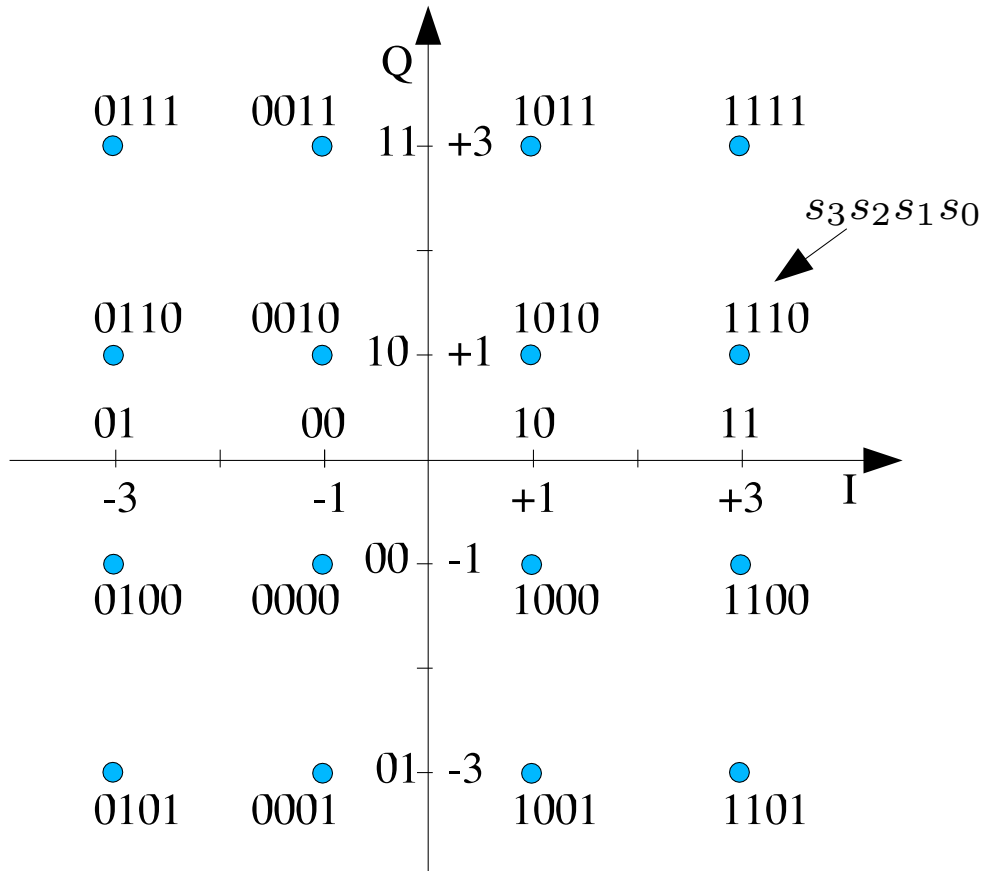
- Stratégies basiques de construction des symboles :
 - ⇒ les places les mieux protégées par la modulation sont affectées en priorité
 - aux bits systématiques : schéma A
 - aux bits de redondance : schéma Y

Modulation turbocodée pragmatique duo-binaire

Schéma général de réception



MAQ-16 turbocodée pragmatique

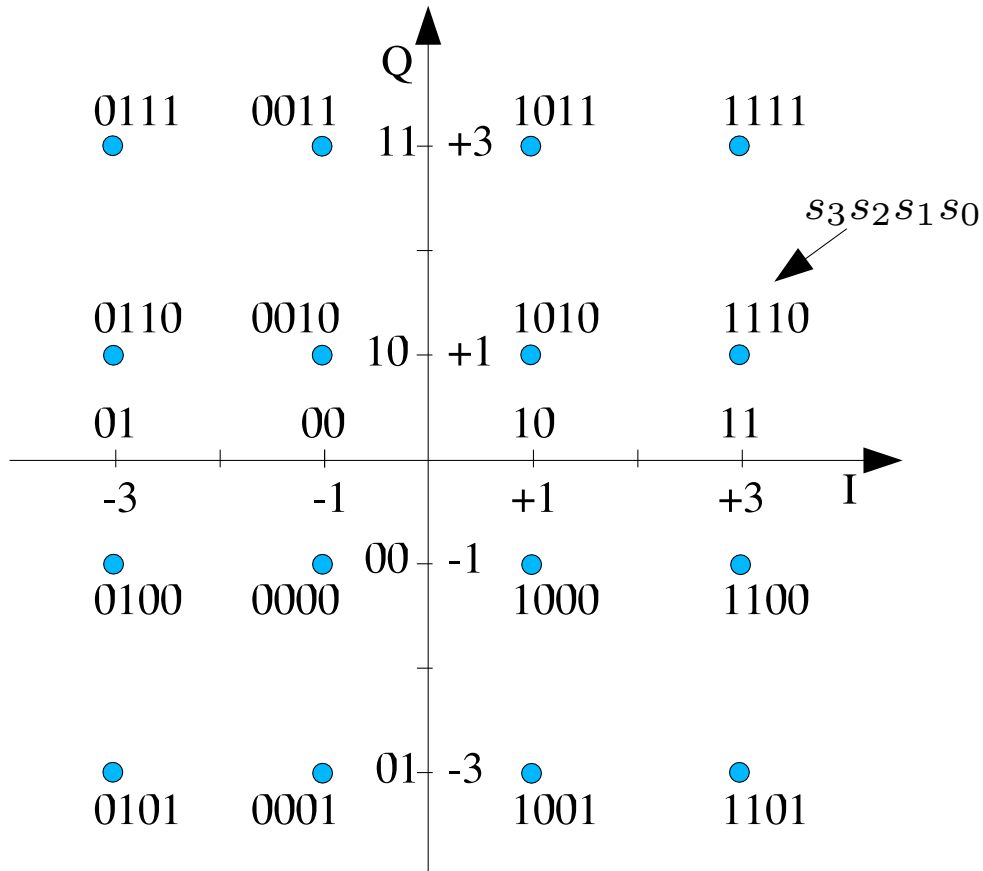


Stratégies de construction des symboles :

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



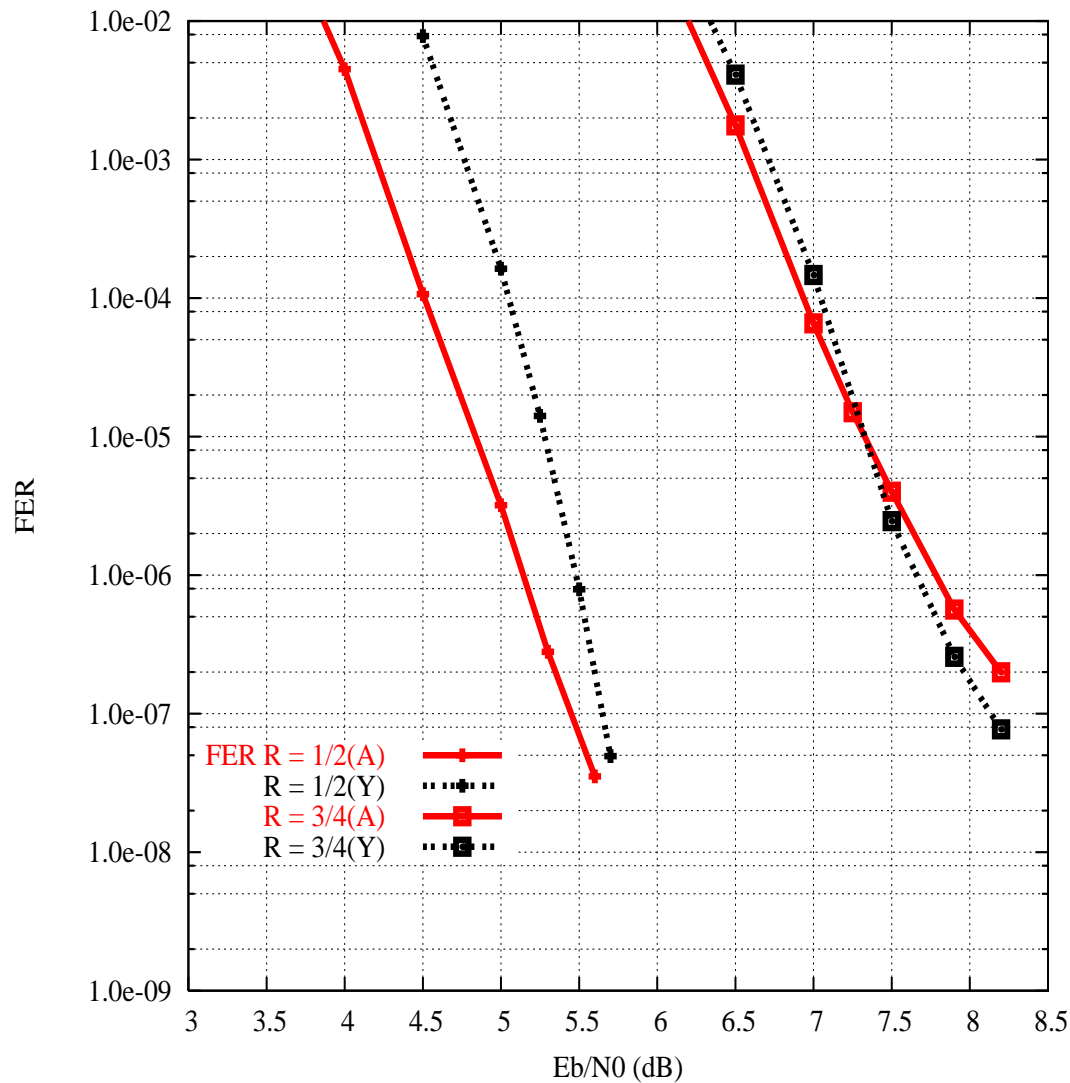
Stratégies de construction des symboles :

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

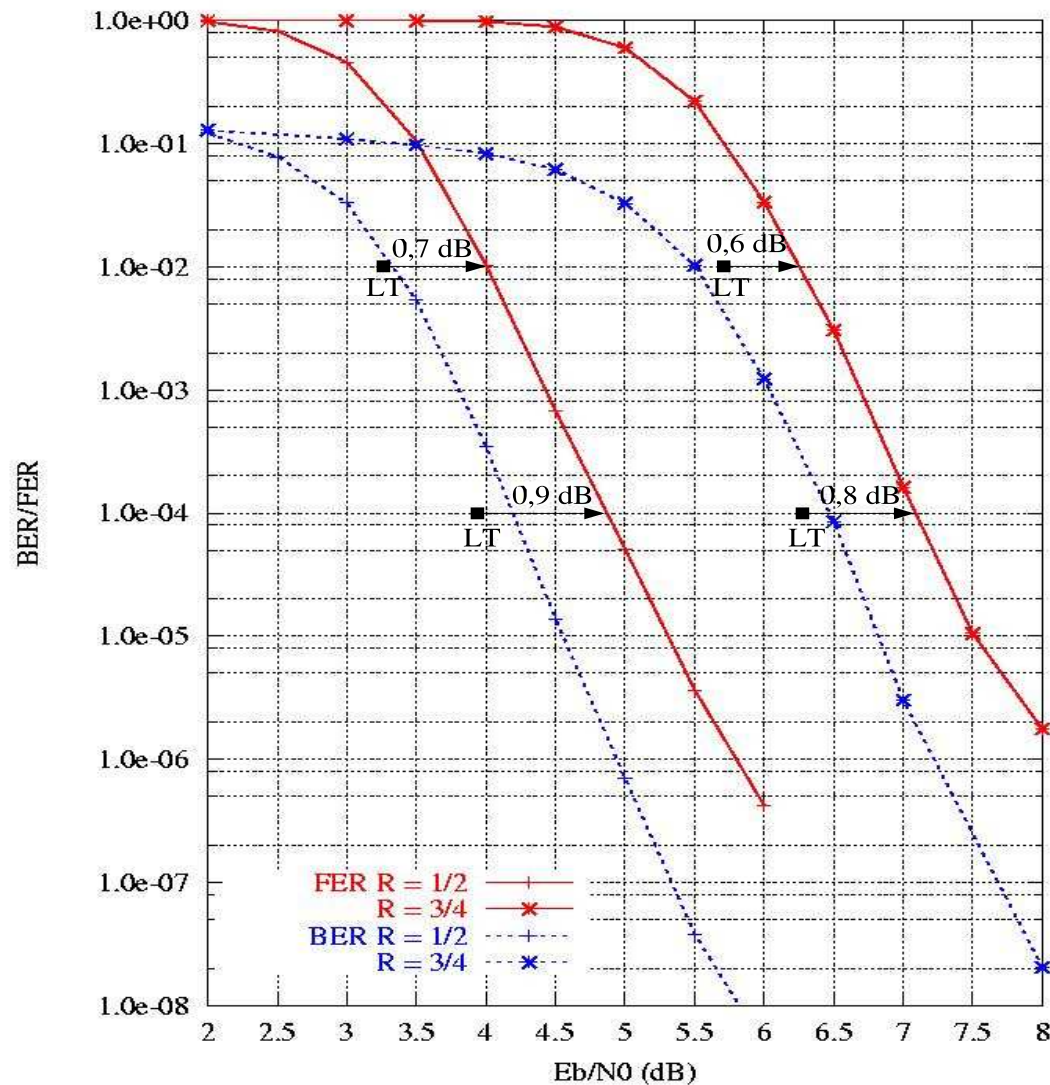
CANAL GAUSSIEN



- 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

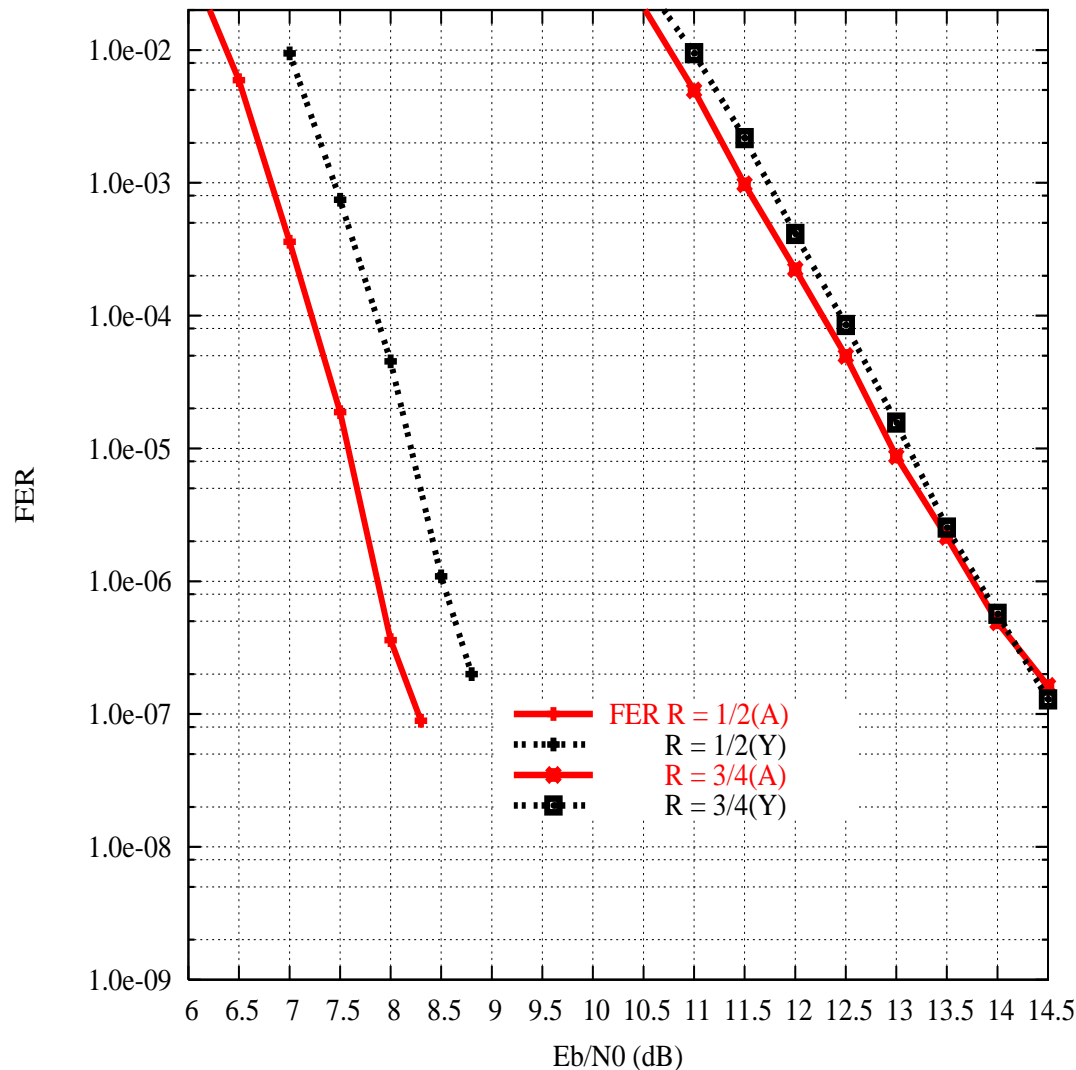
CANAL GAUSSIEN : comparaison avec limites théoriques



- 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

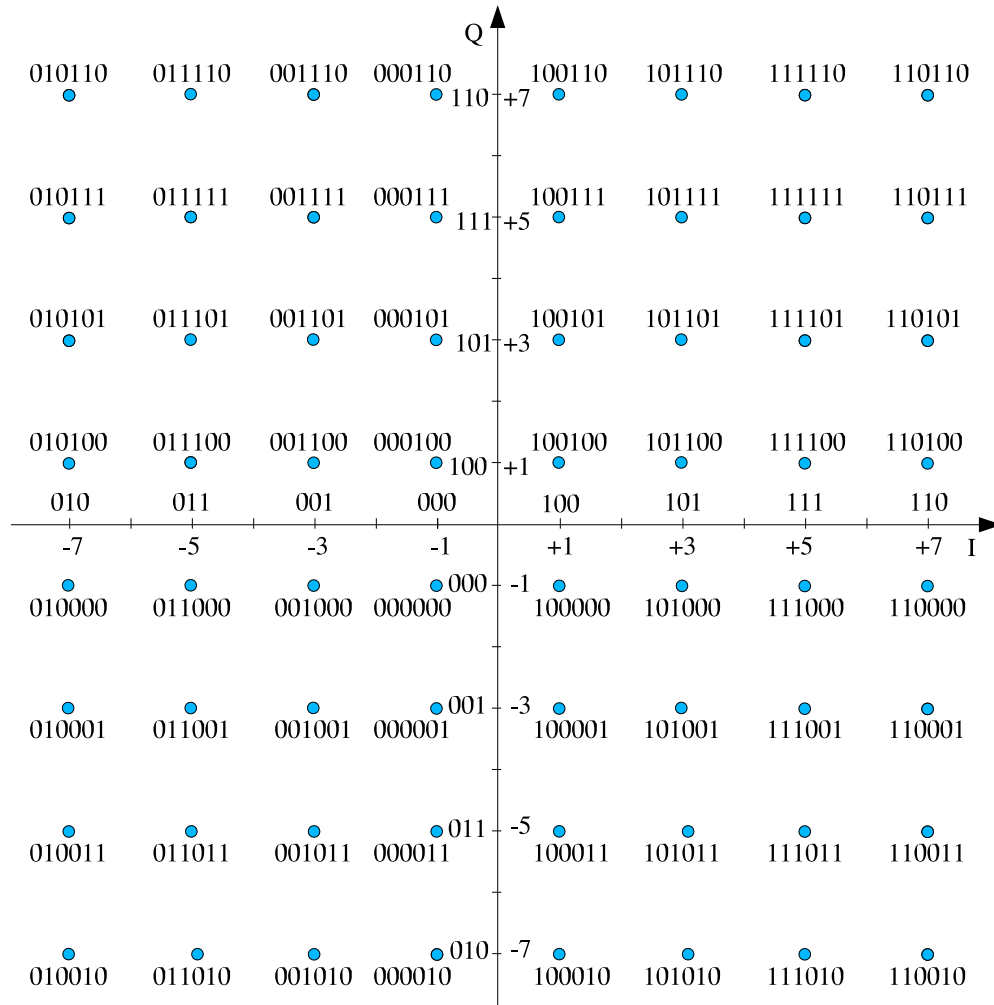
MAQ-16 turbocodée pragmatique

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

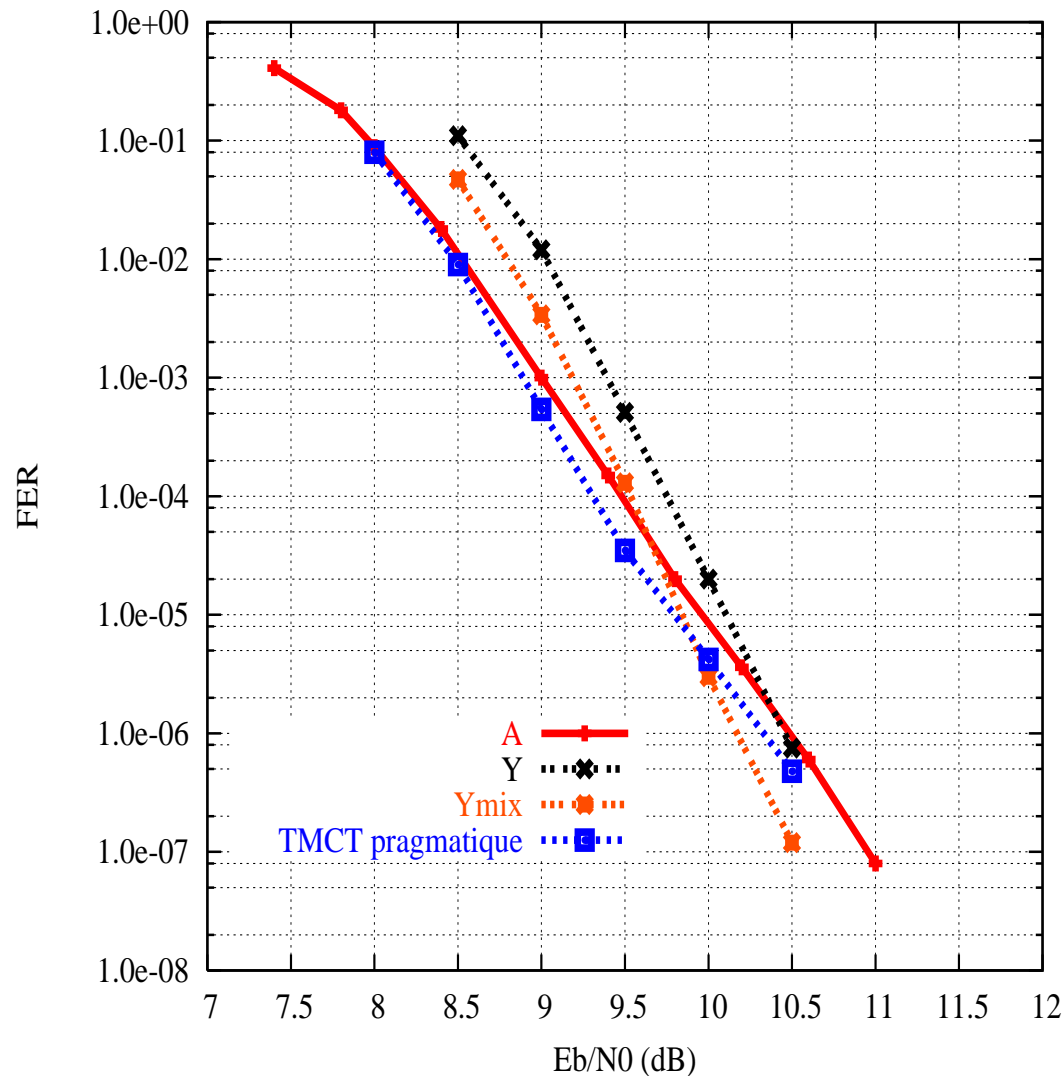
MAQ-64 turbocodée pragmatique



- 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

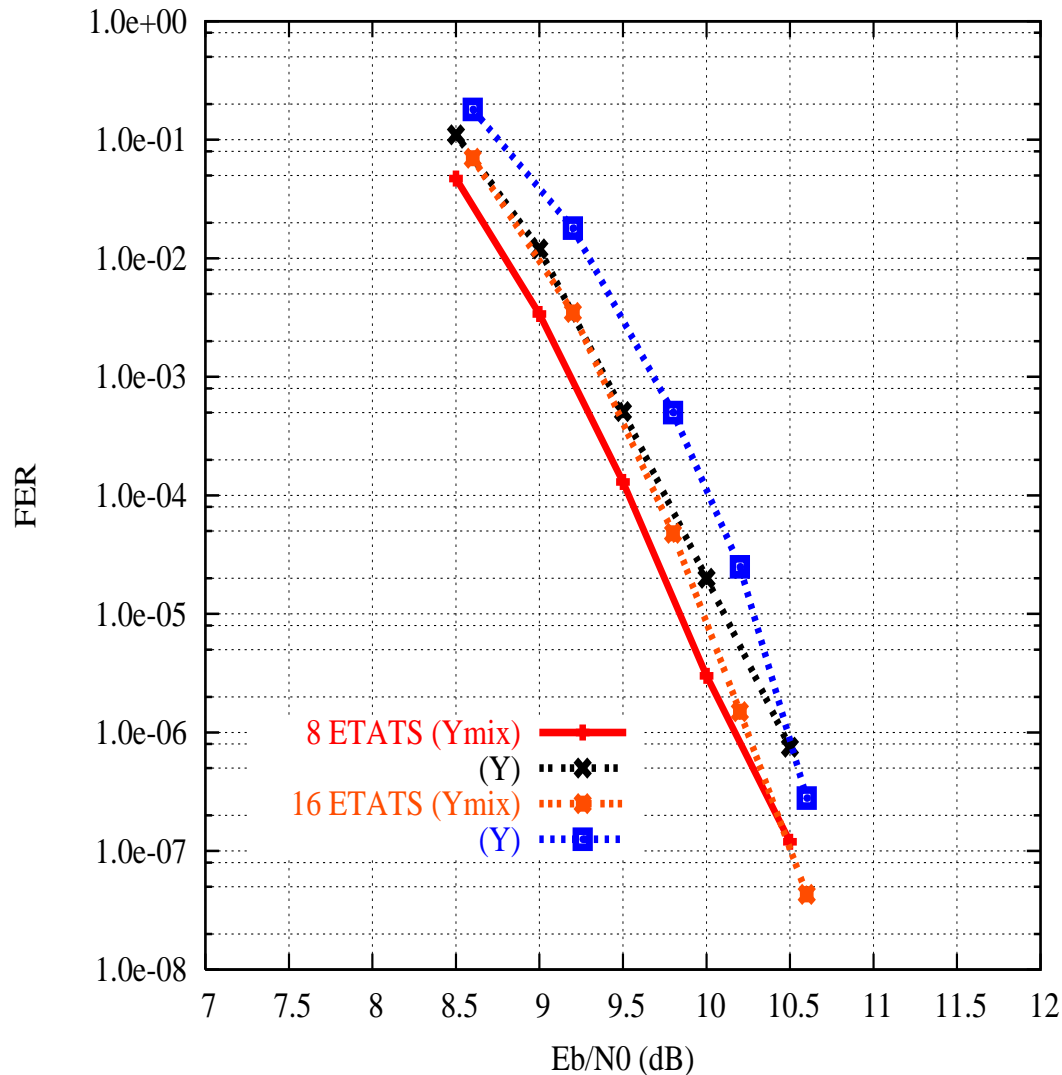
CANAL GAUSSIEN



- 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

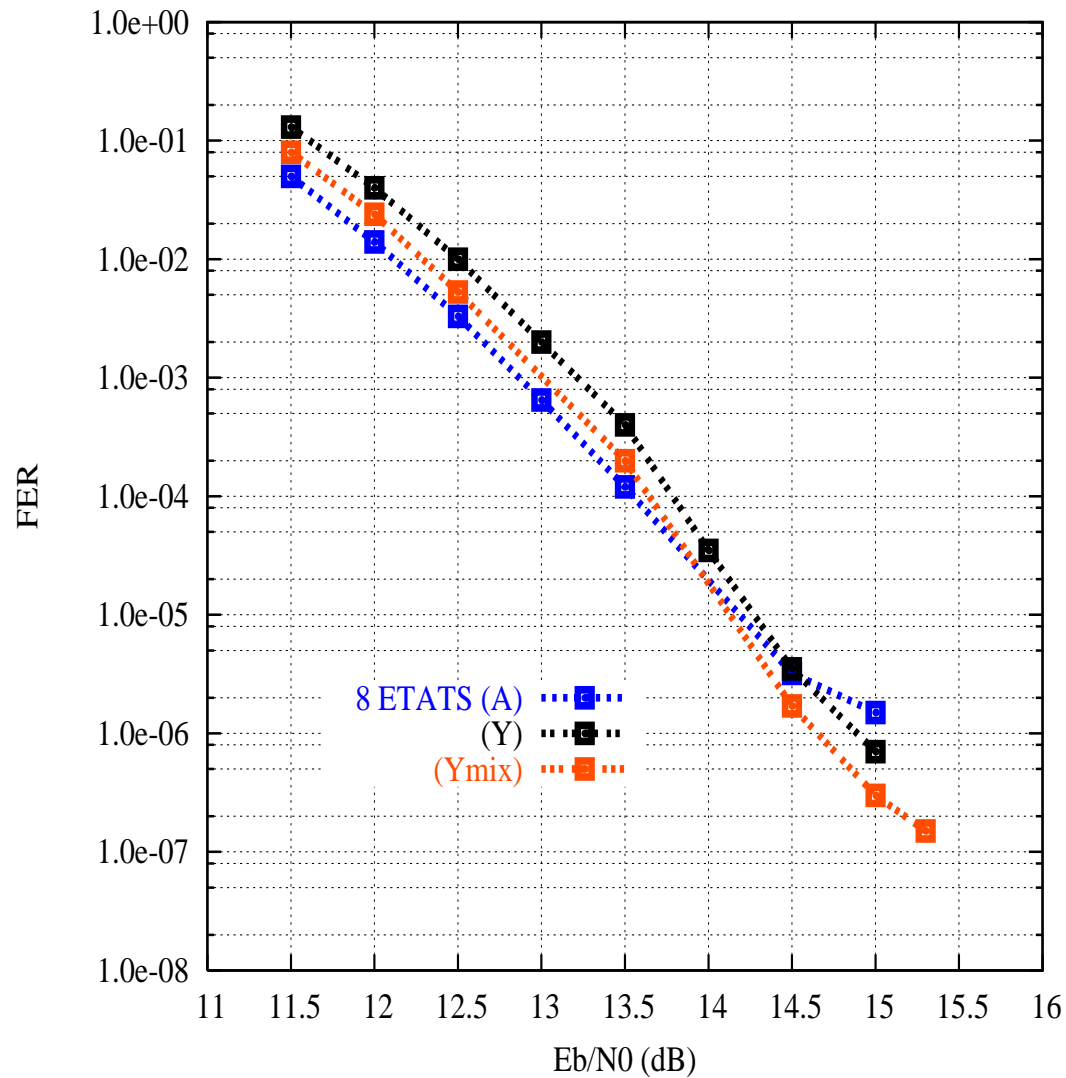
CANAL GAUSSIEN : performance asymptotique



- 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

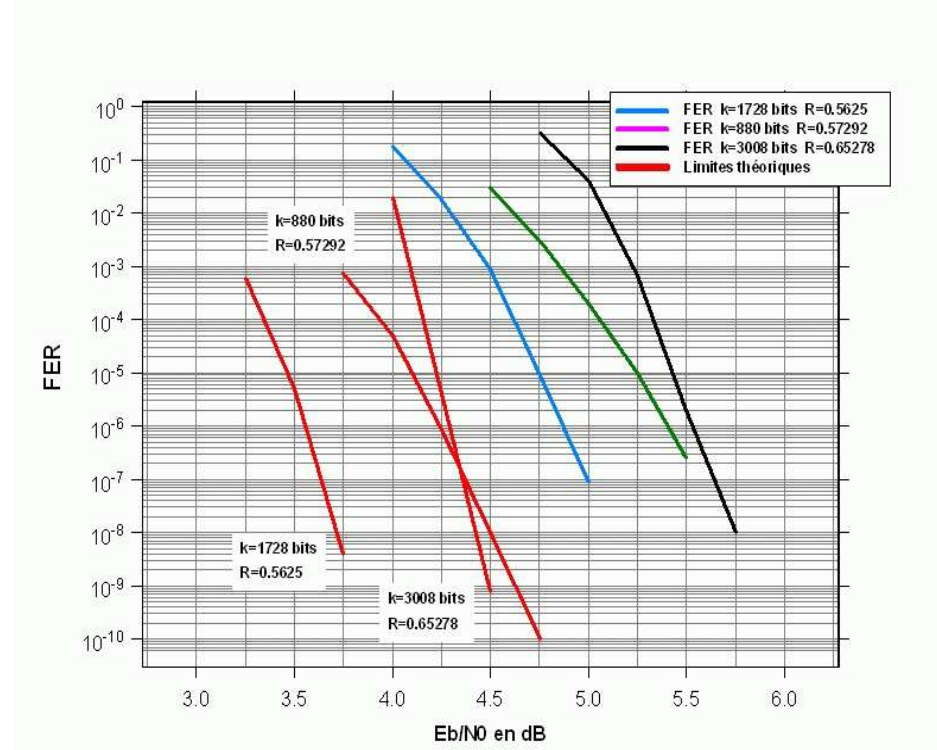
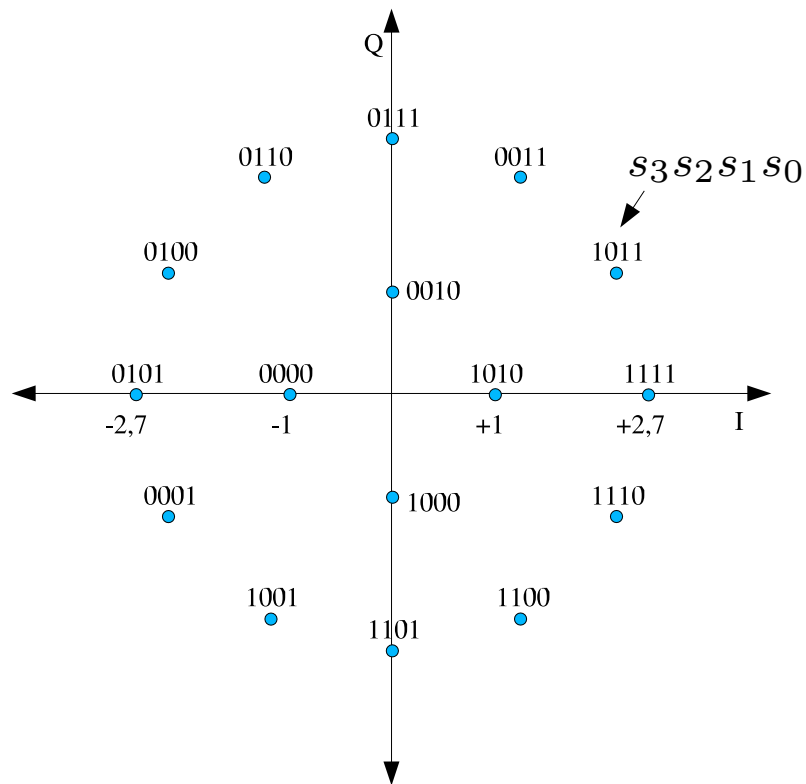
CANAL de RAYLEIGH



- 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 turbocode

- 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 turbocode

- 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 turbocode 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

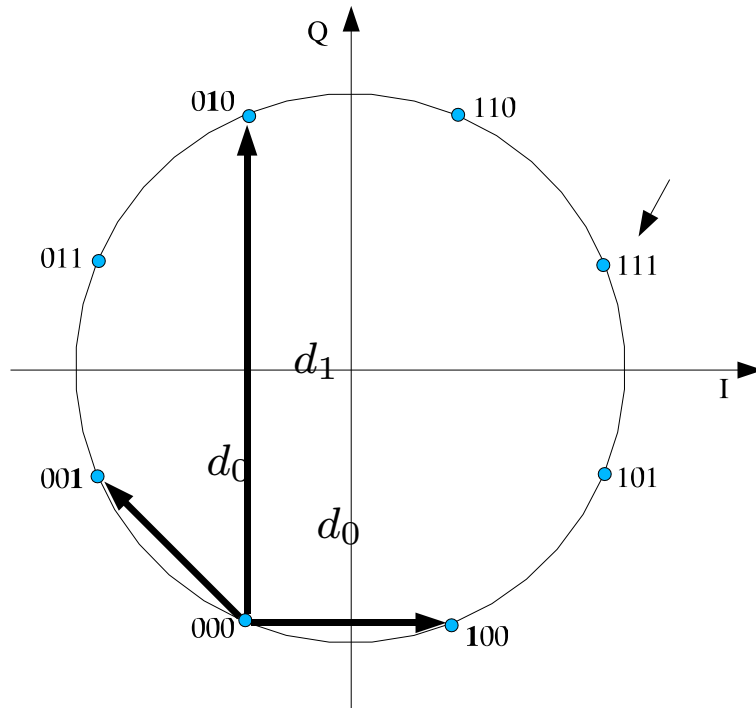
$\hat{\mathbf{s}}_l = (\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_l)$: séquence choisie par le décodeur

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



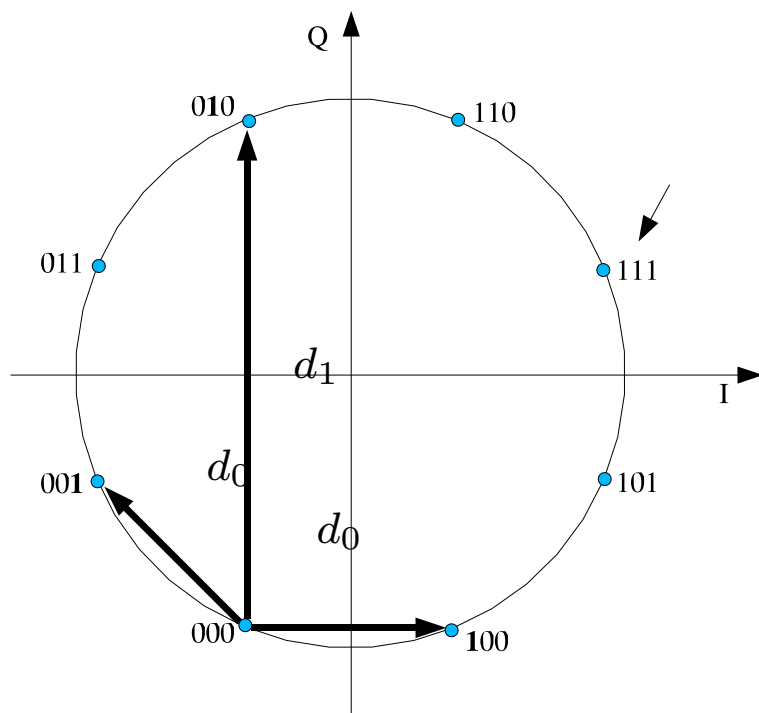
- $d_E^2(s_l, \hat{s}_l) = j d_1^2 + (d_{\min} - j) d_0^2$

- si $s_i \neq \hat{s}_i$:

$$\begin{cases} Pr \{d_E(s_i, \bar{s}_i) = d_0\} = \frac{2}{3} \\ Pr \{d_E(s_i, \bar{s}_i) = d_1\} = \frac{1}{3} \end{cases}$$

Estimation de la performance asymptotique

MDP-8 turbocodée pragmatique CANAL GAUSSIEN : METHODE 2



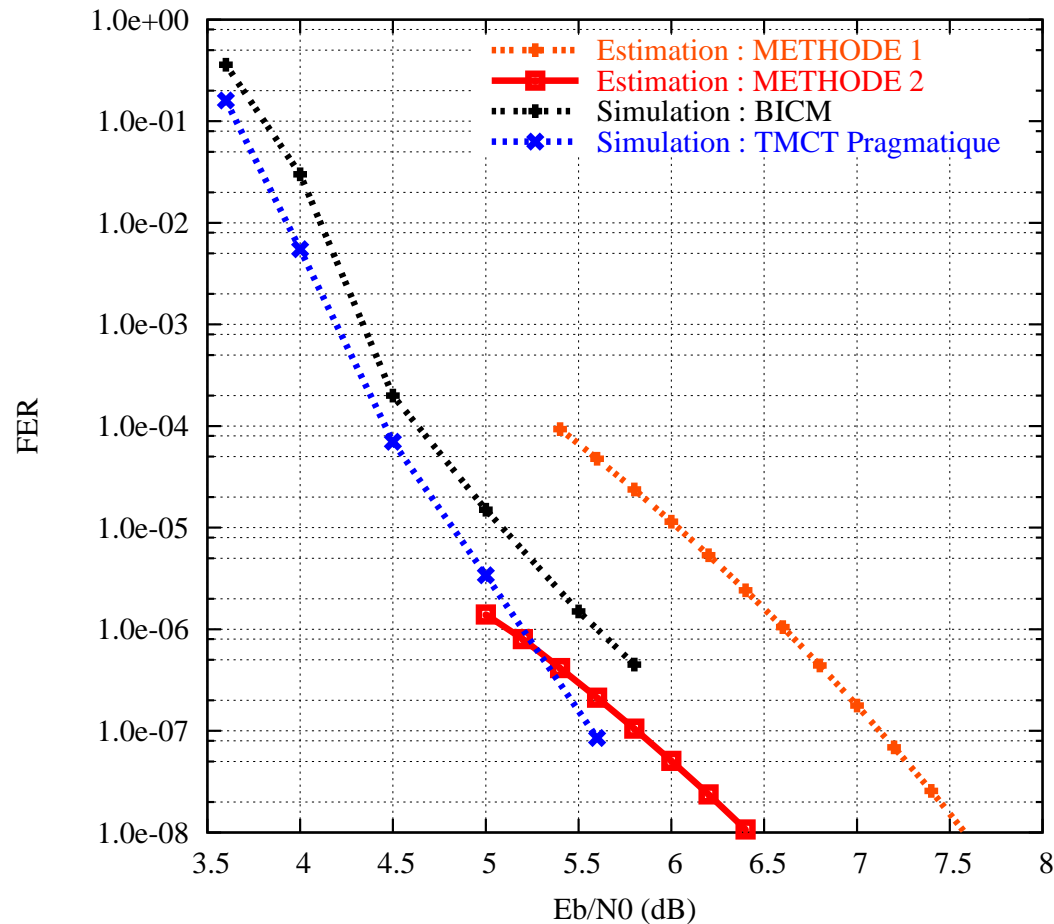
- $d_E^2(s_l, \hat{s}_l) = j d_1^2 + (d_{\min} - j) d_0^2$
- si $s_i \neq \hat{s}_i$:

$$\begin{cases} Pr \{d_E(s_i, \bar{s}_i) = d_0\} = \frac{2}{3} \\ Pr \{d_E(s_i, \bar{s}_i) = d_1\} = \frac{1}{3} \end{cases}$$

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

Estimation de la performance asymptotique

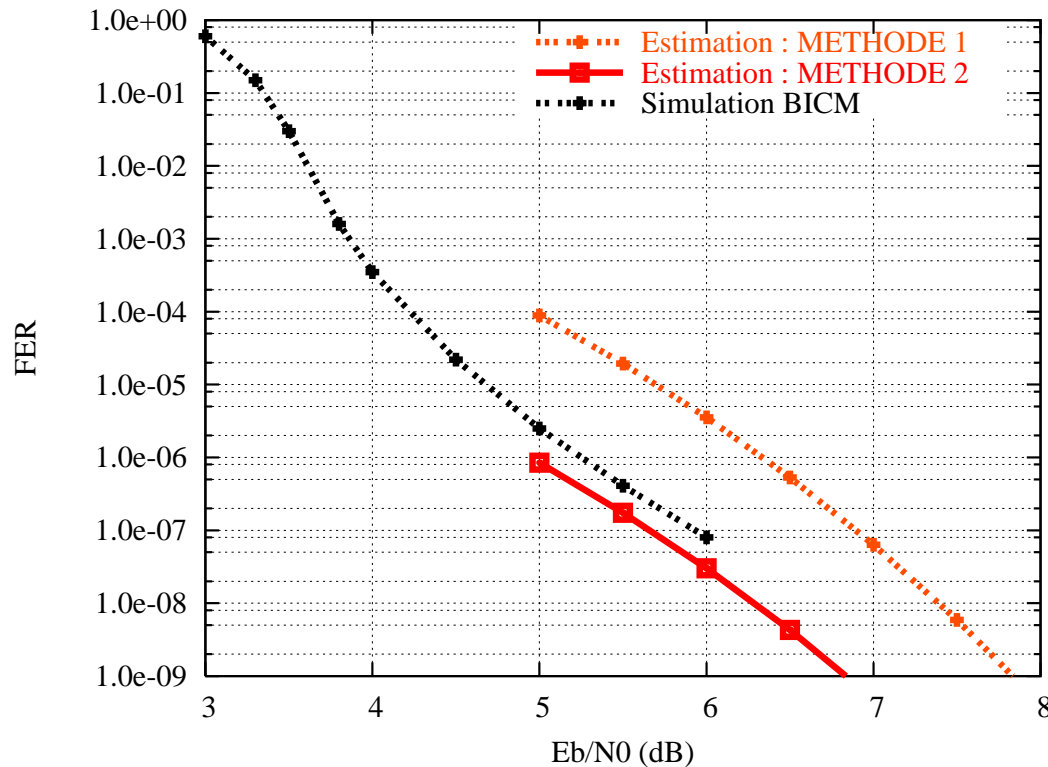
MDP-8 turbocodée pragmatique CANAL GAUSSIEN : Résultats



- 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

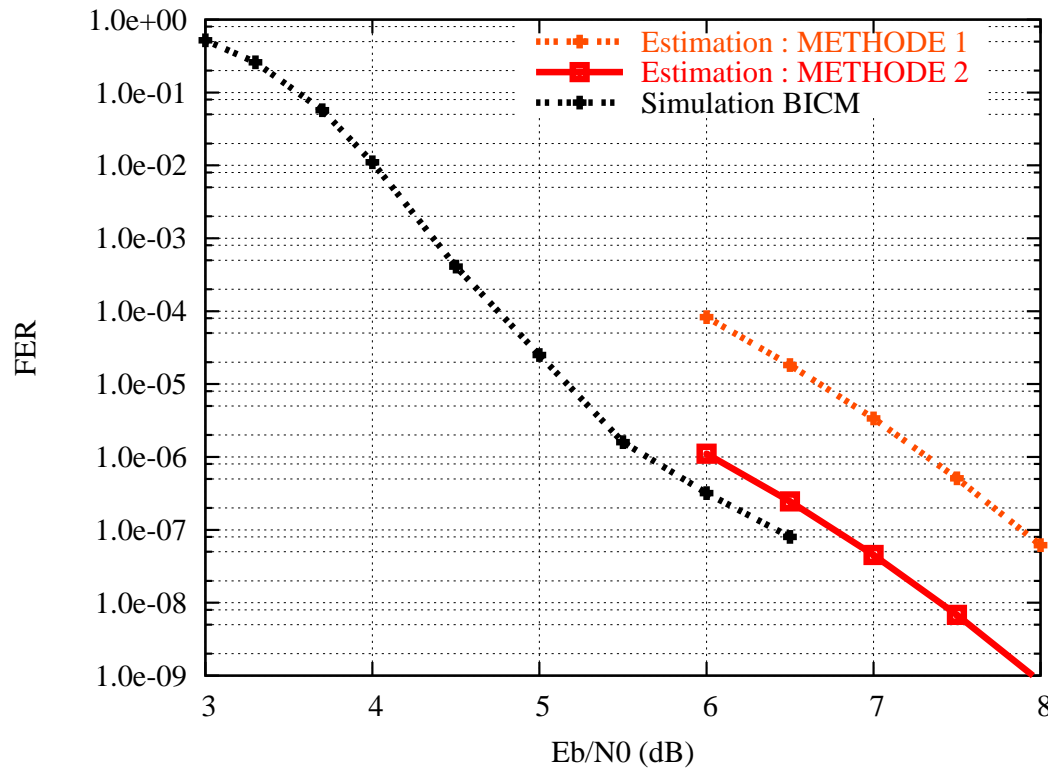
MAQ-16 turbocodée pragmatique CANAL GAUSSIEN : Résultats



- 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.

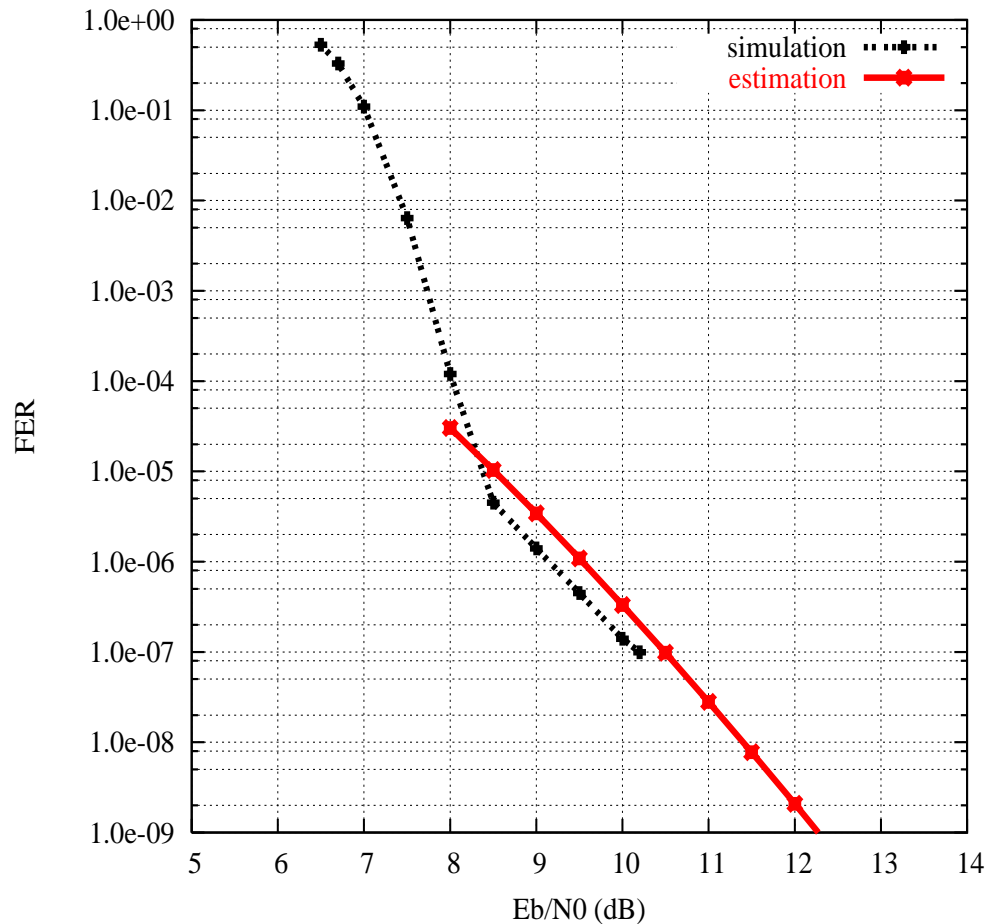
Hypothèse 2 : $\forall i$, si $s_i \neq \hat{s}_i$, s_i et \hat{s}_i sont des signaux adjacents dans la constellation.

- 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