

Forme d'onde multiporteuse pour de la diffusion par satellite haute capacité

Clément DUDAL

26 octobre 2012

Directrice de thèse: Marie-Laure Boucheret

Co-directrice de thèse: Nathalie Thomas

Encadrant industriel: Mathieu Dervin



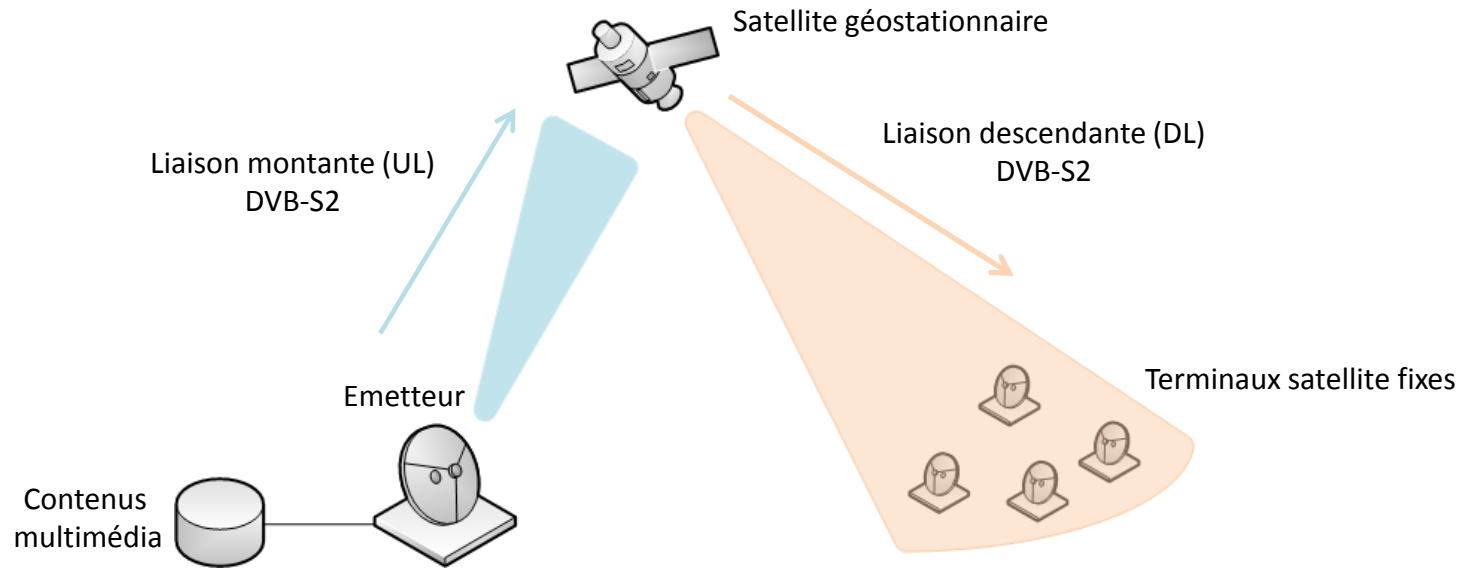
Université
de Toulouse



Sommaire

1. Introduction
2. Approche monoporteuse: forme d'onde CDM-CCSK
3. Approche multiporteuse: forme d'onde MC-CSK
4. Forme d'onde et codage canal
5. Conclusions et perspectives

Contexte: diffusion par satellite



- Transmissions possibles sur plusieurs bandes de fréquence entre 1 et 40 GHz (C, Ku, Ka)
ressources attribuées limitées: bande C: < 100 MHz, bande Ku: $\approx$ 500 MHz
- Augmentation des besoins en termes de débit (TV HD, internet par satellite)
- Améliorations continues sur les technologies bord et sol (antennes, traitement du signal, ...): bilans de liaison de plus en plus favorables
- Evolution des normes: DVB-S2 (2003) issu du DVB-S (1994), gain sur la capacité de diffusion de 30%

Motivations

- Dans ce contexte de diffusion, amélioration du compromis entre efficacité en puissance et efficacité spectrale offert par la norme actuelle

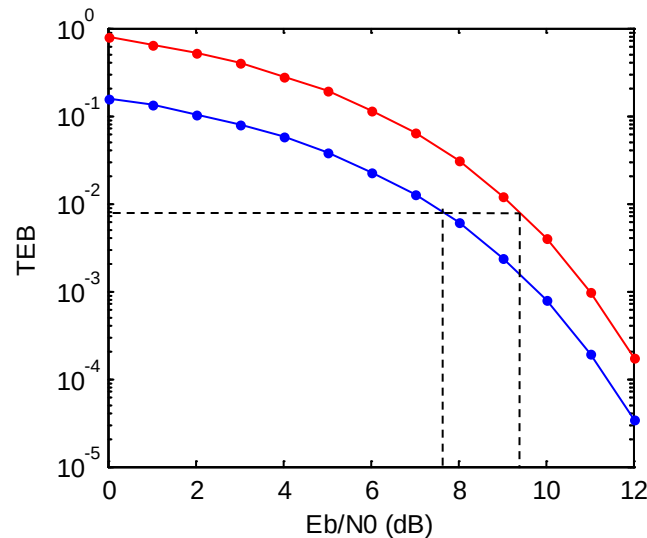
- Nouvelle approche basée sur une combinaison de techniques caractérisées par
 - une bonne efficacité en puissance
modulation par codage Cyclic Code Shift Keying (CCSK)
 - une bonne efficacité spectrale
multiplexage par codage Code Division Multiplexing (CDM)

Sommaire

1. Introduction
2. Approche monoporteuse: forme d'onde CDM-CCSK
3. Approche multiporteuse: forme d'onde MC-CSK
4. Forme d'onde et codage canal
5. Conclusions et perspectives

Proposer une forme d'onde qui offre conjointement

- Une haute efficacité en puissance η_p
- Une haute efficacité spectrale η_f
- Un rapport de puissance signal à bruit par bit (E_b/N_0) nécessaire pour atteindre un taux d'erreur cible



Proposer une forme d'onde qui offre conjointement

- Une haute efficacité en puissance η_p
- Une haute efficacité spectrale η_s
 - débit binaire atteignable pour une largeur de bande donnée
 - dépend de la modulation, de la mise en forme et du codage canal
 - exemples avec roll-off = 0.25
 - modulation 16-APSK 3/4, efficacité spectrale = 2.4 bit/s/Hz
 - modulation 32-APSK 4/5, efficacité spectrale = 3.2 bit/s/Hz

Forme d'onde CDM-CCSK

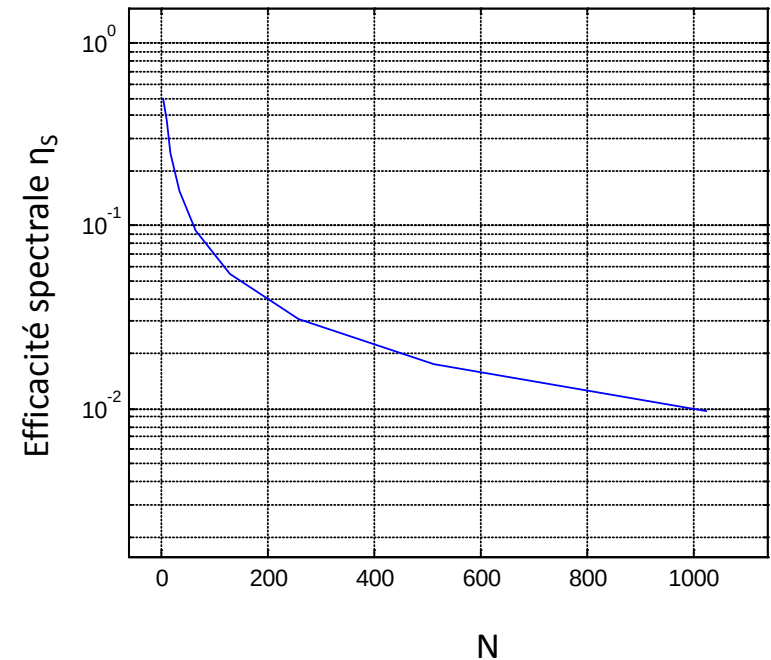
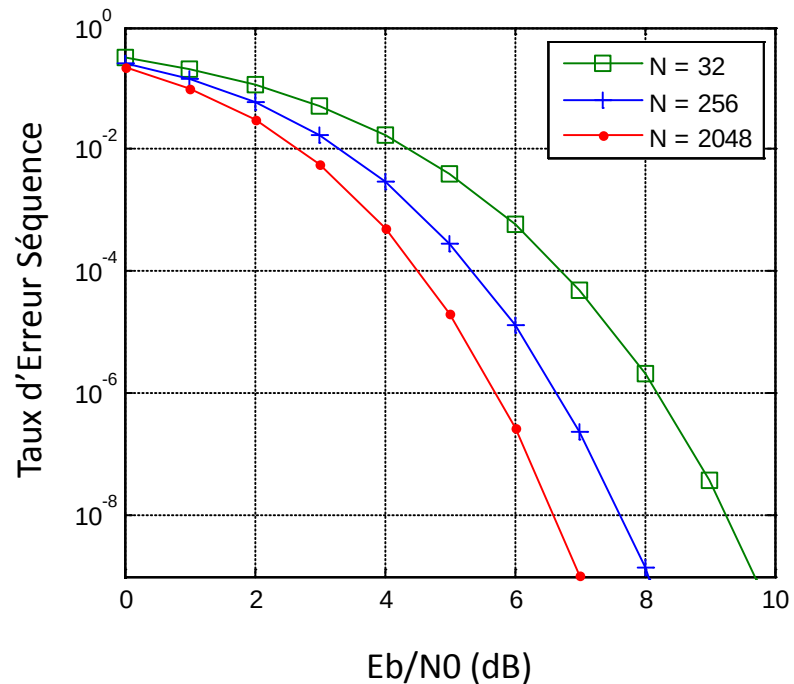
Basée sur l'utilisation de la modulation Cyclic Code Shift Keying (CCSK)

- Modulation des bits à transmettre par codage
- Séquence d'étalement binaire de longueur N chips et ses N-1 permutations circulaires
- Ensemble de N séquences permettant de coder $\log_2(N)$ bits par séquence
- Utilisée en navigation (service de géolocalisation japonais QZSS, 2010)
- Efficacité spectrale: $\eta_s = \frac{\log_2(N)}{N}$, (DS-CDMA: $\eta_s = \frac{1}{N}$)

Forme d'onde CDM-CCSK

Performances de la modulation CCSK

- proches des modulations orthogonales (type FSK)
- son efficacité en puissance augmente avec la longueur N des séquences utilisées

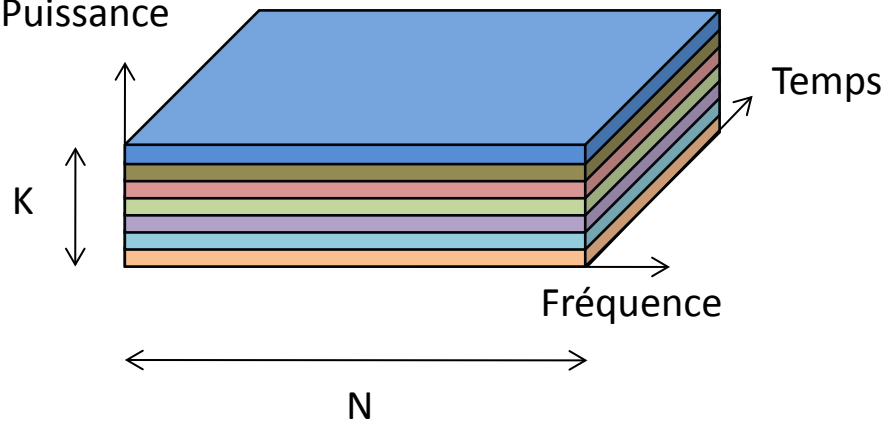


Forme d'onde CDM-CCSK

Amélioration de l'efficacité spectrale proposée par la modulation CCSK seule

- Technique de multiplexage par codage: Code Division Multiplexing (CDM)
- Utilisation de toute la bande simultanément par tous les flux multiplexés
- L'efficacité spectrale globale est fonction du nombre de flux multiplexés K

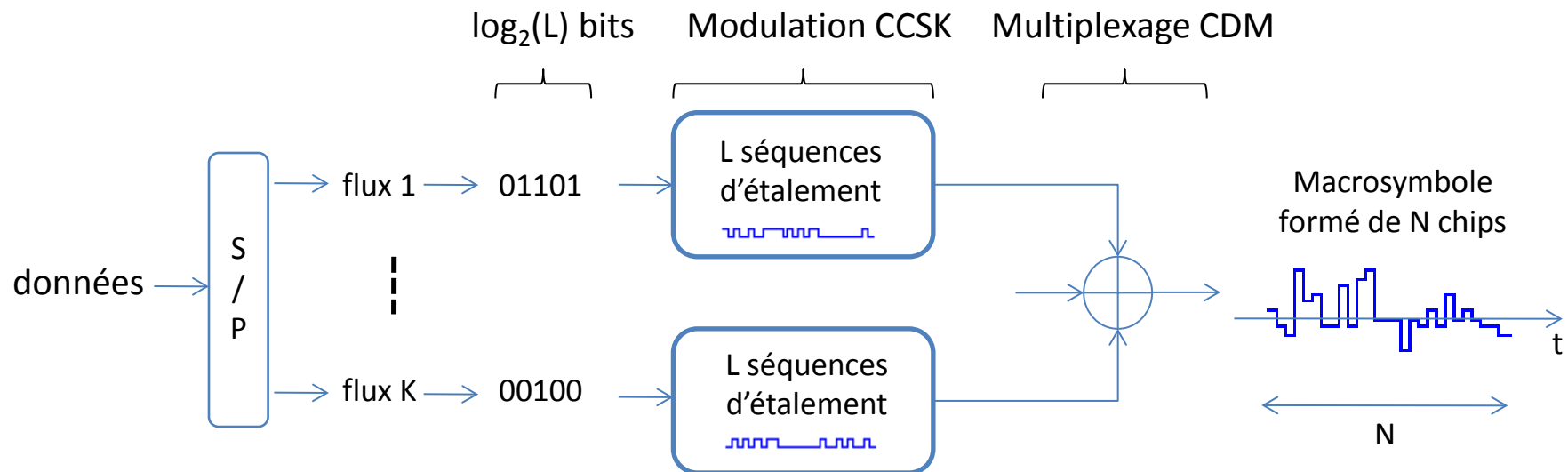
Densité Spectrale
de Puissance



$$\eta_s = K \frac{\log_2(N)}{N}$$

Forme d'onde CDM-CCSK

- Les données à transmettre sont parallélisées en K flux, $K \leq N$
- Chaque flux est modulé grâce à L séquences d'étalement de longueur N chips
- Chaque séquence attribuée à un flux code $\log_2(L)$ bits



- La capacité de transmission dépend de la charge du système
 - Nombre L de séquences par flux
 - Nombre K de flux multiplexés

Forme d'onde CDM-CCSK – Séquences d'étalement

Quelles séquences utiliser pour réaliser la modulation et le multiplexage simultanément?

Conditions sur les séquences du système:

- une séquence doit être discernable d'une version permutée d'elle-même
 - application de la modulation CCSK
- une séquence doit être discernable des autres séquences du système et de leurs versions permutées
 - application du multiplexage CDM
- le nombre de séquences remplissant ces deux conditions doit être le plus grand possible
 - capacité globale de la forme d'onde CDM-CCSK

Forme d'onde CDM-CCSK – Séquences d'étalement

Séquences de Gold (R. Gold, 1967)

- Construites à partir d'une paire préférée de séquences de longueur maximale a et b
- Pour une longueur N de séquence, il existe $N+2$ séquences de Gold:

$$\text{Ensemble } G(a,b) = \{a, b, a \oplus b, a \oplus Tb, \dots, a \oplus T^{N-1}b\}$$

$\xleftarrow{\hspace{10em}} \hspace{10em} \xrightarrow{\hspace{10em}}$
 $N+2$

T: opérateur de permutation circulaire

- Chaque séquence de $G(a,b)$ peut être permutée $N-1$ fois pour former un sous-ensemble de N séquences (une séquence et ses $N-1$ permutations)

$N(N+2)$ séquences disponibles

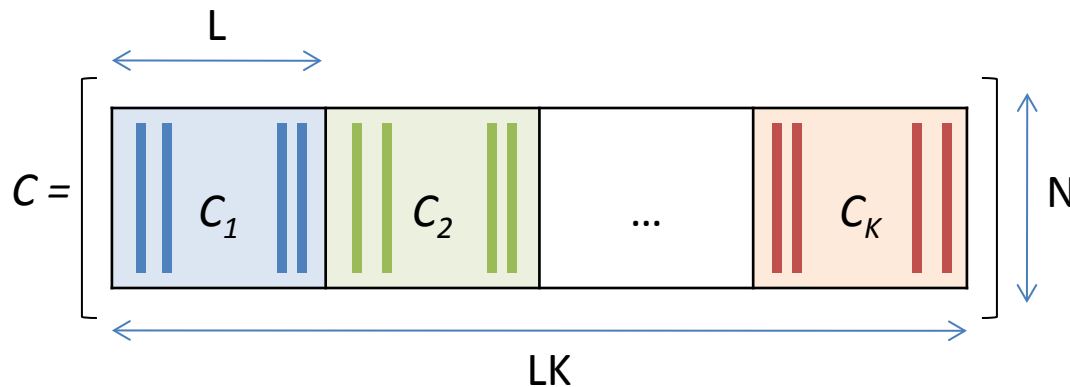
- Les valeurs d'intercorrélation entre deux séquences et les lobes secondaires de l'autocorrélation sont bornés

Forme d'onde CDM-CCSK – Formalisme

- Chaque flux i utilise L séquences de Gold de longueur $N = 2^m - 1$ regroupées selon les colonnes d'une matrice C_i de taille $N \times L$ pour moduler les données à transmettre:

$$C_i = (c_{1i} \ c_{2i} \ \dots \ c_{Li})$$

- Les K matrices C_i associées aux K flux parallélisés sont regroupées dans une matrice C de taille $N \times LK$



Forme d'onde CDM-CCSK – Formalisme

Méthode d'attribution des séquences par flux

- A partir de l'ensemble $G(a,b) = \{a, b, a \oplus b, a \oplus Tb, \dots, a \oplus T^{N-1}b\}$,

on déduit l'ensemble $G'(a,b) = \{a, a \oplus b, a \oplus Tb, \dots, a \oplus T^{N-1}b\}$

$$\xleftrightarrow{N+1 = 2^m \text{ séquences}}$$

- Les séquences de $G'(a,b)$ sont équidistantes au sens de la distance Euclidienne et

la distance entre deux séquences s_1 et s_2 vaut $d = \|s_1 - s_2\| = \sqrt{2(N+1)}$

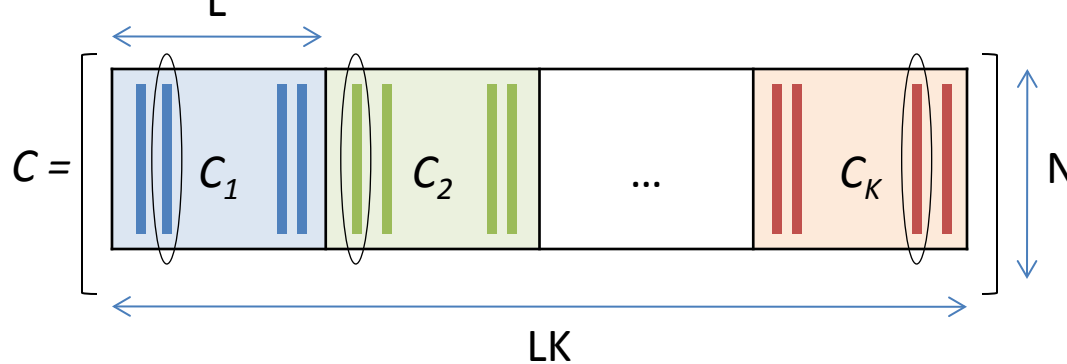
- C_1 reçoit L séquences de Gold issues de l'ensemble $G'(a,b)$

C_2 reçoit les mêmes L séquences permutées d'un chip

C_K reçoit les mêmes L séquences permutées de $K-1$ chips

Forme d'onde CDM-CCSK – Formalisme

- Expression d'un macrosymbole: $y = Cg$

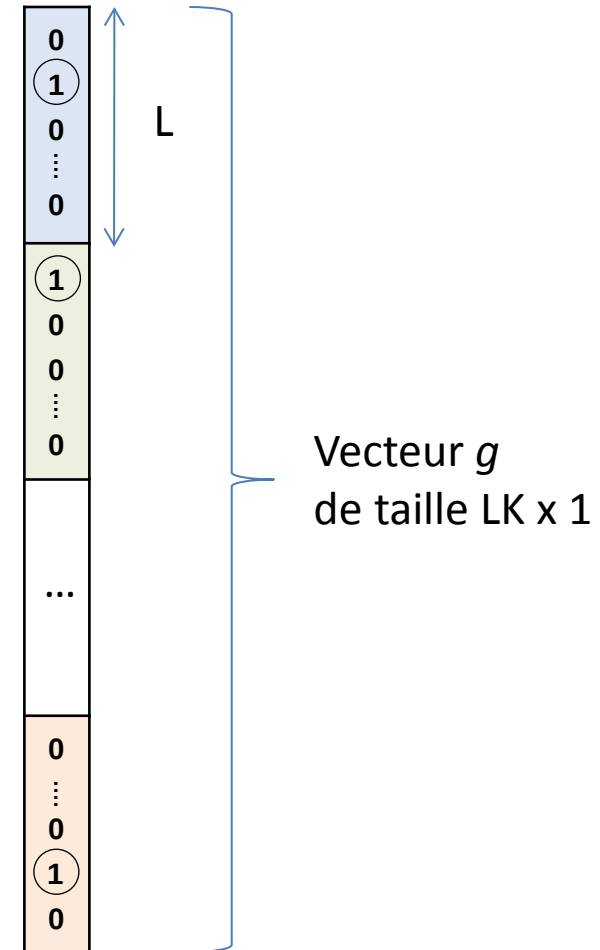


- Structure particulière du vecteur g

Composé de 0 et de K valeurs non nulles valant 1 désignant la séquence transmise pour chaque flux

- A chaque macrosymbole transmis correspond une configuration du vecteur g
- Macrosymbole reçu: $z = y + w$, w bruit blanc Gaussien

$$= Cg + w$$

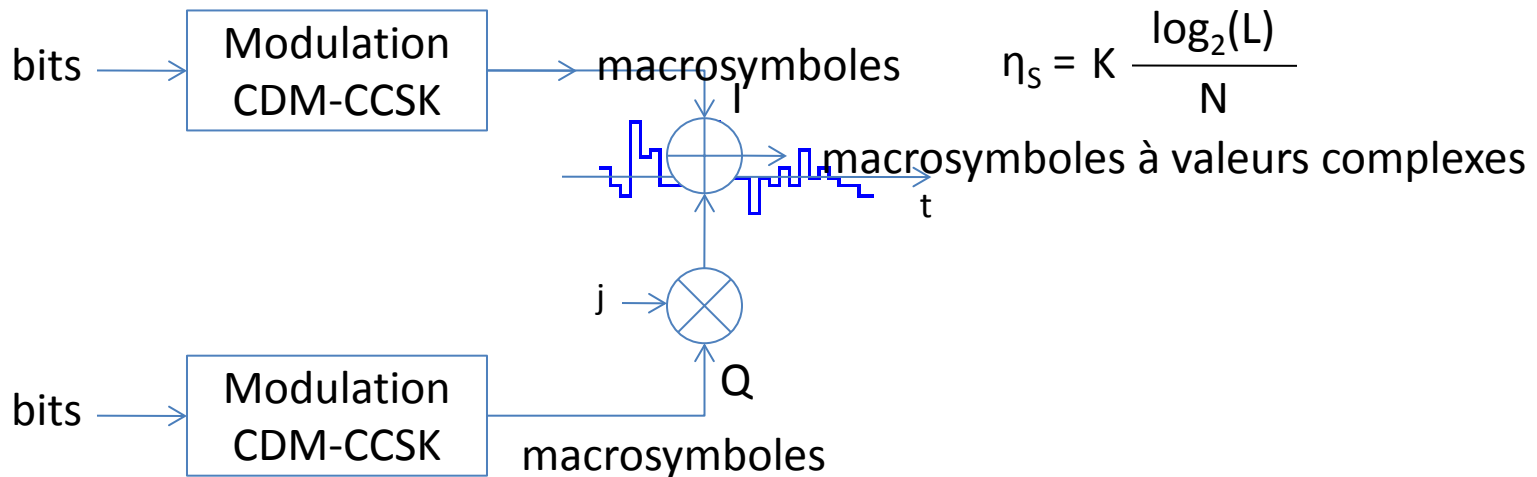


Sommaire

1. Introduction
2. Approche monoporteuse: forme d'onde CDM-CCSK
 - Etude à faible charge: $K \ll N$ ou $L \ll N$
 - Etude à forte charge
3. Approche multiporteuse: forme d'onde MC-CSK
4. Forme d'onde et codage canal
5. Conclusions et perspectives

Forme d'onde CDM-CCSK – Efficacité spectrale à faible charge

- Doublement de l'efficacité spectrale grâce à une modulation des macrosymboles en quadrature



- Démodulation cohérente en réception:

$$\eta_s = 2 \frac{K \log_2(L)}{N}$$

Forme d'onde CDM-CCSK – Efficacité en puissance à faible charge

Dérivation d'une approximation sur les performances en termes de

- Taux d'Erreur Macrosymbole (TEM)
- Taux d'Erreur Bit (TEB)

TEM = probabilité qu'un macrosymbole détecté soit faux i.e. qu'au moins une séquence parmi les K qui le composent soit erronée.

Hypothèse:

A fort rapport signal à bruit, en cas d'erreur de détection sur un macrosymbole, la probabilité d'avoir une seule séquence fausse, parmi les K transmises dans ce macrosymbole, domine

Forme d'onde CDM-CCSK – Efficacité en puissance à faible charge

- Le TEM dépend de la probabilité d'erreur au niveau séquence
- Les erreurs de détection au niveau séquence ont lieu entre deux séquences d'une même matrice C_i relative à un flux
- La méthode d'attribution des séquences garantit que les L séquences d'une matrice C_i sont équidistantes avec $d^2 = d_{min}^2 = 2(N+1)$

On en déduit:

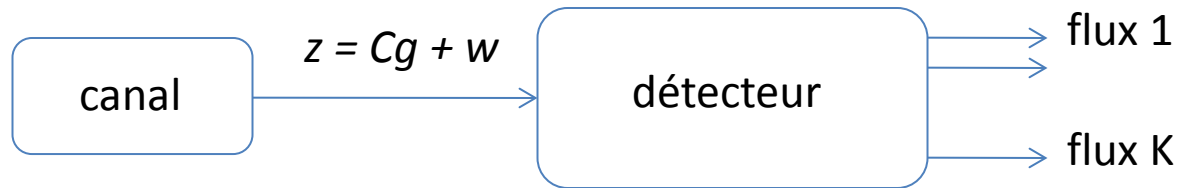
- une approximation du taux d'erreur macrosymbole:

$$AP_{TEM} = LK Q\left(\frac{d_{min}}{2\sigma}\right)$$

- une approximation du taux d'erreur binaire:

$$AP_{TEB} = \frac{2(L-1)}{\log_2 L} Q\left(\frac{d_{min}}{2\sigma}\right)$$

Forme d'onde CDM-CCSK – Détection à faible charge



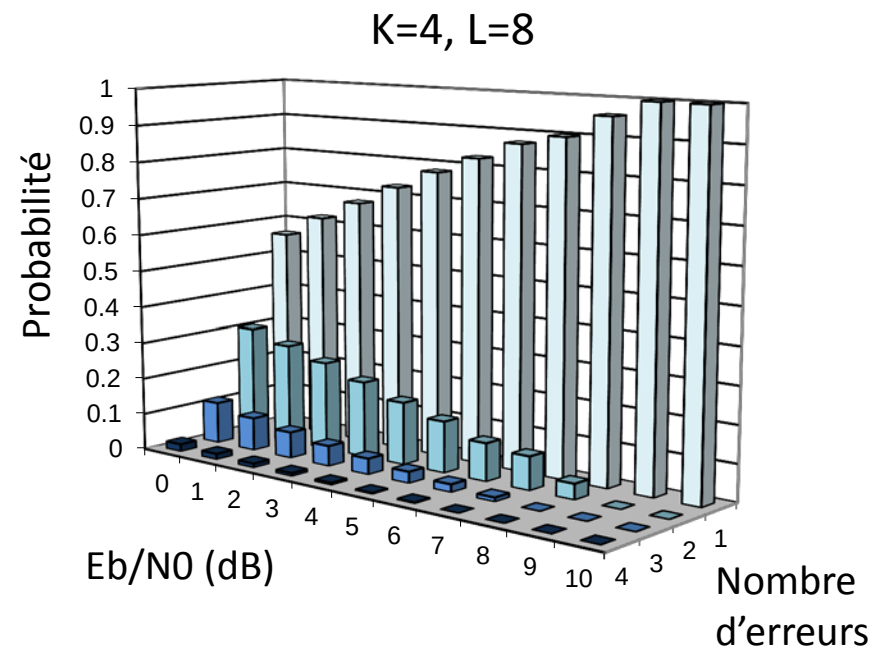
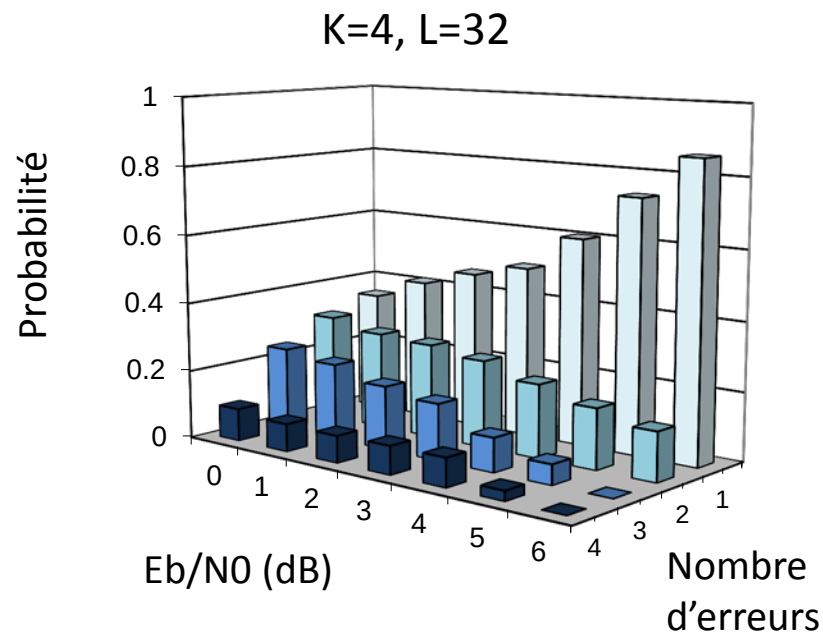
- Une détection flux par flux est limitée par les interférences
- Adoption d'une détection jointe des flux avec un estimateur optimal au sens du maximum de vraisemblance
- La détection consiste à retrouver le vecteur g transmis connaissant la matrice C définissant le système: $\hat{g} = \arg \min_{\tilde{g}} \|z - C\tilde{g}\|$
- Elle est implémentée
 - avec du décodage sphérique si $LK \leq N$
 - avec du décodage sphérique généralisé si $LK > N$
- Complexité du décodage sphérique
 - Exponentielle à faible SNR: $L^{\gamma K}$, $\gamma \approx 1$
 - Diminue avec l'augmentation du rapport signal à bruit, $\gamma \ll 1$

Forme d'onde CDM-CCSK – Résultats

Validation de l'hypothèse sur le nombre d'erreur à fort SNR, séquence de longueur $N = 31$

Hypothèse:

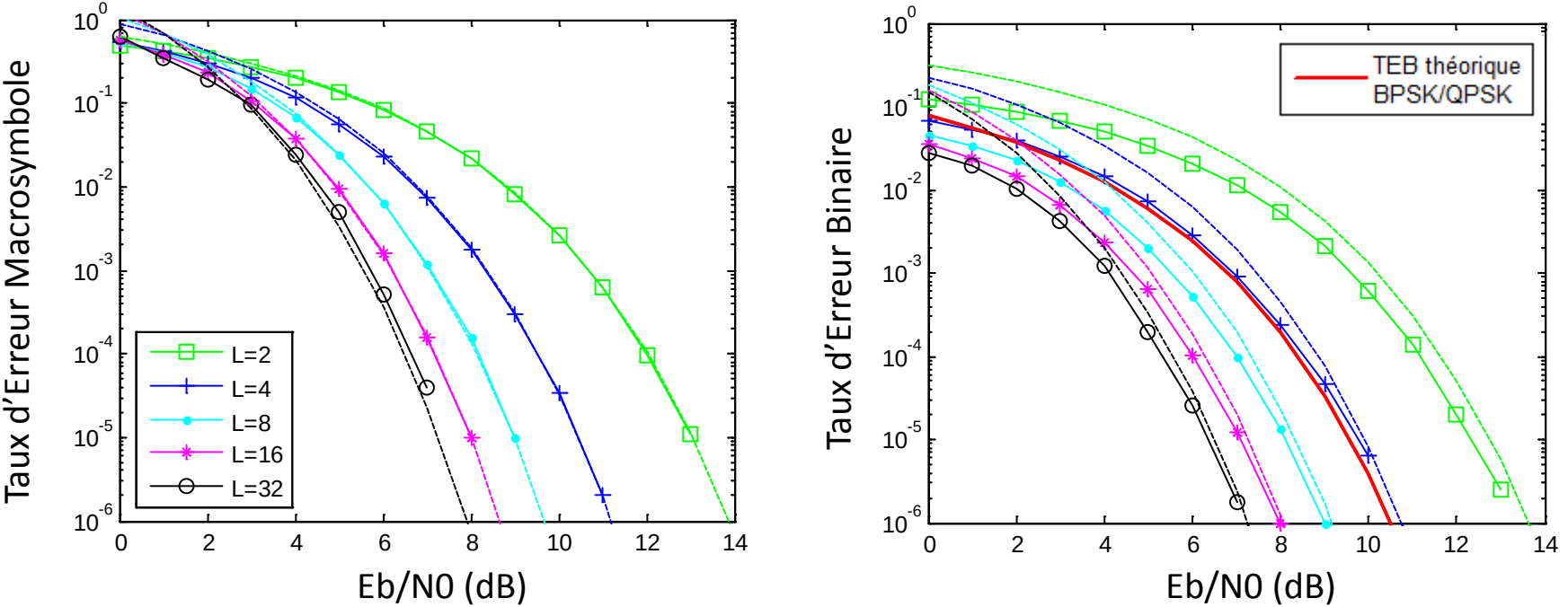
A fort rapport signal à bruit, en cas d'erreur de détection sur un macrosymbole, la probabilité d'avoir une seule séquence fausse, parmi les K transmises dans ce macrosymbole, domine



Forme d'onde CDM-CCSK – Résultats

Taux d'erreur simulés et comparaison à l'approximation proposée pour N=31 et K=4

Simulation en trait plein et approximation en pointillé



N=31, K=4	L=2	L=4	L=8	L=16	L=32	BPSK	QPSK
η_s (bit/s/Hz)	0.26	0.52	0.77	1.03	1.29	1	2

Sommaire

1. Introduction
2. Approche monoporteuse: forme d'onde CDM-CCSK
 - Etude à faible charge
 - Etude à forte charge: $K \rightarrow N$, $L \rightarrow N$
3. Approche multiporteuse: forme d'onde MC-CSK
4. Forme d'onde et codage canal
5. Conclusions et perspectives

Forme d'onde CDM-CCSK à forte charge

Contraintes liées à la charge

- La complexité du détecteur devient limitante même avec le décodage sphérique
- L'unicité des motifs de macrosymboles n'est plus garantie

Propositions

- Cas d'étude pour une plus faible longueur de séquences: $N = 7$
- Sélection des motifs de macrosymboles
- Définition d'un nouvel alphabet composé de M macrosymboles uniques
- Chaque macrosymbole de l'alphabet code $\log_2 M$ bits



- Nouvelle approche monoflux
- La démodulation consiste à retrouver le macrosymbole de l'alphabet qui a été transmis
- Détecteur optimal au sens du maximum de vraisemblance: $\hat{y} = \arg \min_{\tilde{y}} \|z - \tilde{y}\|^2$

Forme d'onde CDM-CCSK – Efficacité à forte charge

Efficacité spectrale:

- Dépend de la taille M de l'alphabet
- Doublée grâce à la modulation des macrosymboles en quadrature

$$\eta_s = 2 \frac{\log_2(M)}{N}$$

Efficacité en puissance

- Dans le nouvel alphabet, les macrosymboles ne sont pas équidistants
- On ne considère que les plus proches voisins en termes de distance, $d = d_{\min} = \sqrt{2(N+1)}$
- Les plus proches voisins ne diffèrent que d'une séquence dans leur construction
- Nombre moyen de bits différents entre un macrosymbole et ses plus proches voisins: $\overline{N_{NN}}$

$$AP_{TEB} = \overline{N_{NN}} Q\left(\frac{d_{\min}}{2\sigma}\right)$$

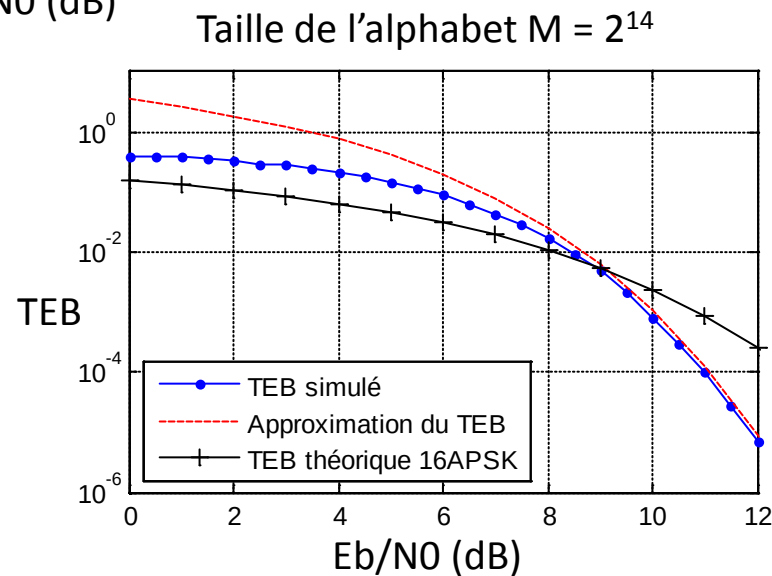
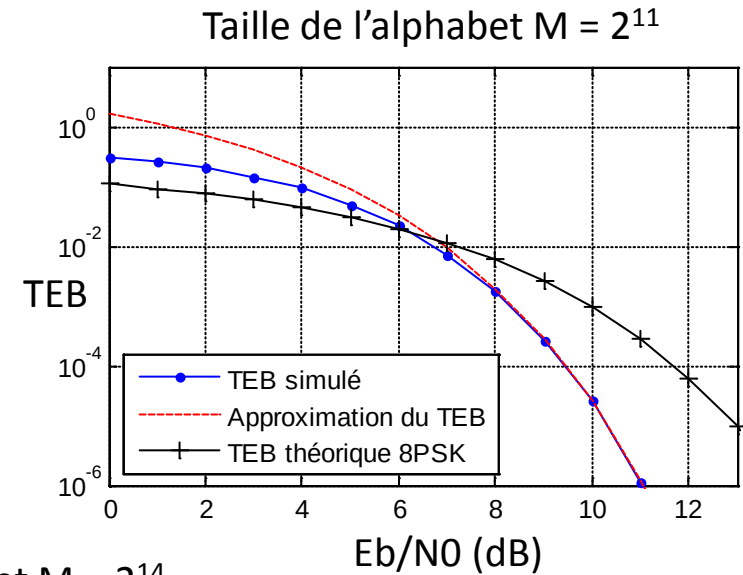
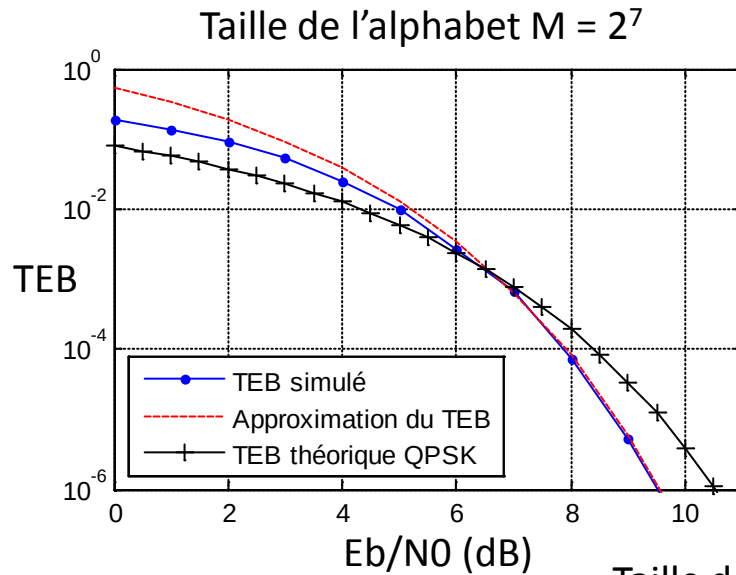
Forme d'onde CDM-CCSK – Résultats de simulations

- Séquences de longueur $N=7$
- Sélection des motifs uniques à partir des macrosymboles définis par un système CDM-CCSK multiflux avec $K=7$ flux multiplexés et $L=8$ séquences par flux
- On isole $M=49752$ motifs uniques

Charges retenues pour simulation et comparaison

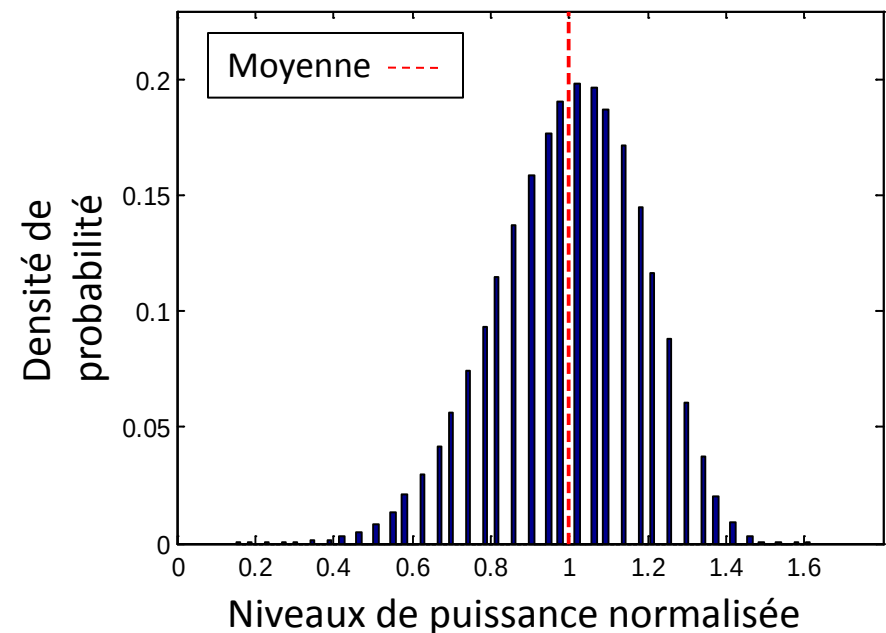
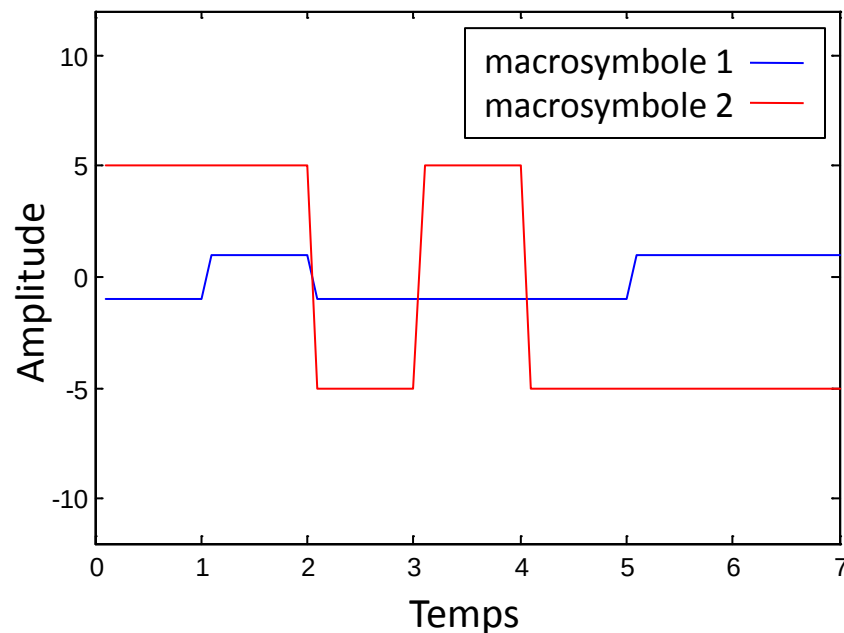
Charge	η_s (bit/s/Hz)	Modulation équivalente
$M=2^7$	2	QPSK (DVB-S/DVB-S2)
$M=2^{11}$	$3.14 \approx 3$	8-PSK (DVB-S2)
$M=2^{14}$	4	16-APSK (DVB-S2)

Forme d'onde CDM-CCSK – Résultats de simulations



Forme d'onde CDM-CCSK – Variations de la puissance

- La forme d'onde CDM-CCSK présente de fortes variations de puissance d'un macrosymbole à l'autre



- La dispersion autour de la puissance moyenne implique un recul important en entrée des amplificateurs pour réduire les distorsions non-linéaires
- Perte d'efficacité en puissance

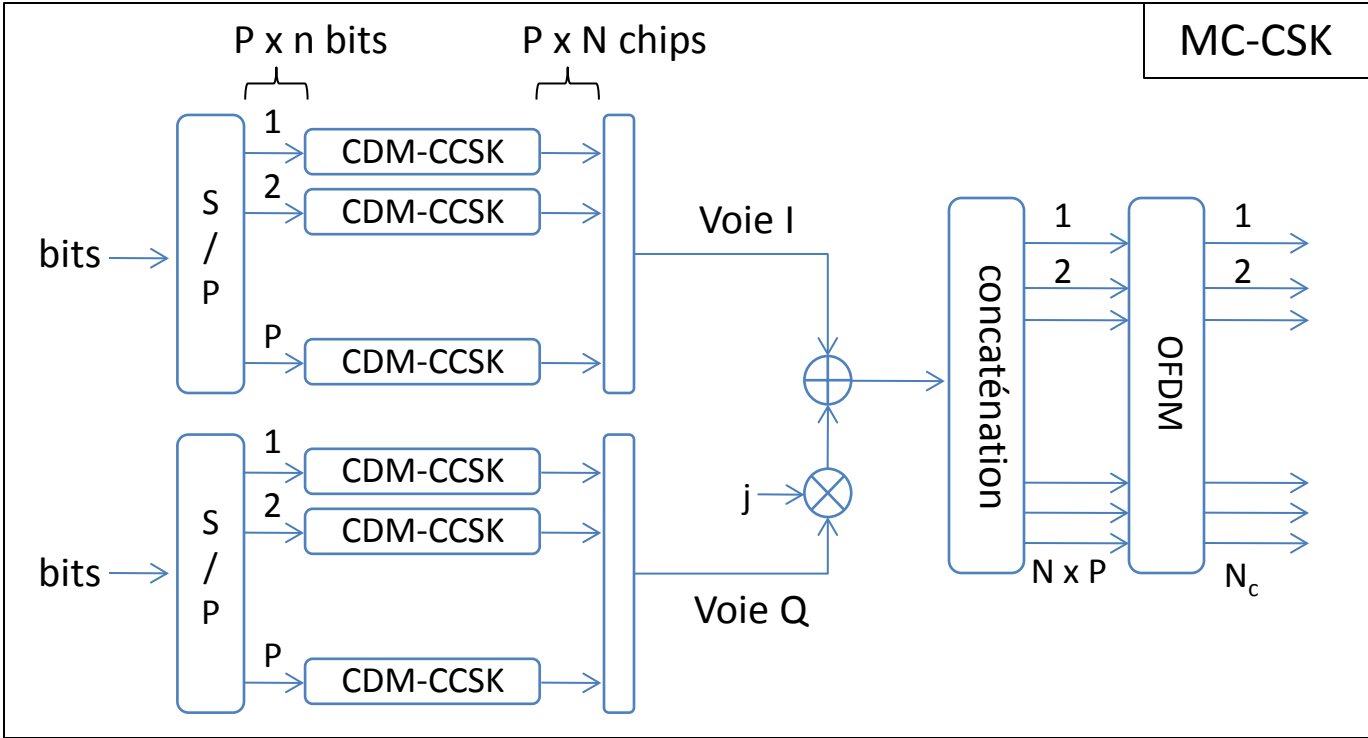
Sommaire

1. Introduction
2. Approche monoporteuse: forme d'onde CDM-CCSK
- 3. Approche multiporteuse: forme d'onde MC-CSK**
4. Forme d'onde et codage canal
5. Conclusions et perspectives

Variation de la puissance des macrosymboles

Solution proposée: la concaténation de P macrosymboles et leur transposition sur les N_c porteuses d'un modulateur OFDM définissant la forme d'onde MC-CSK

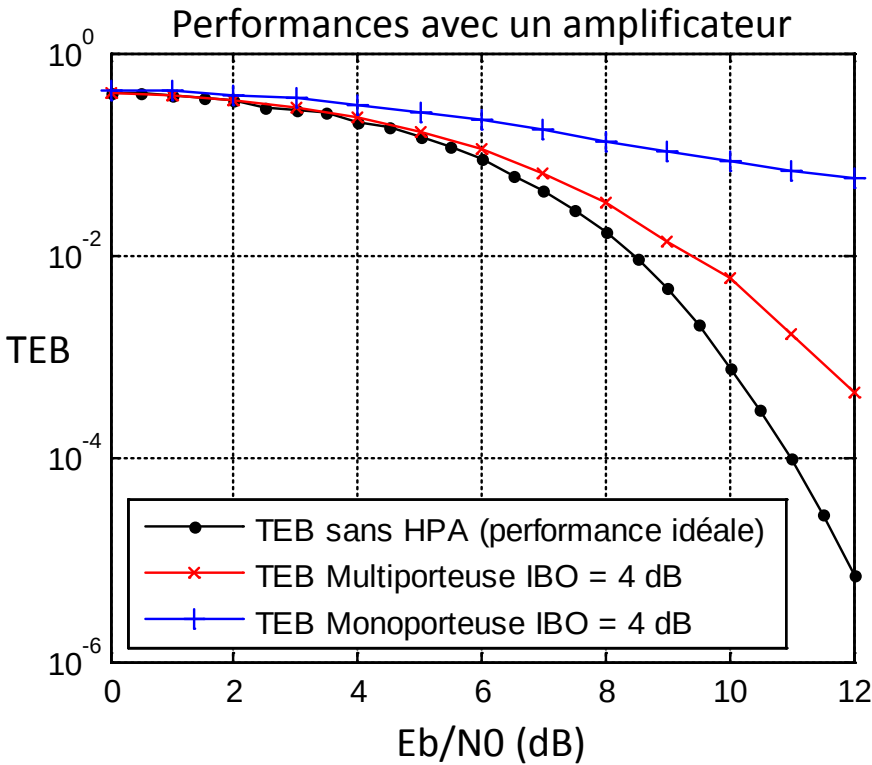
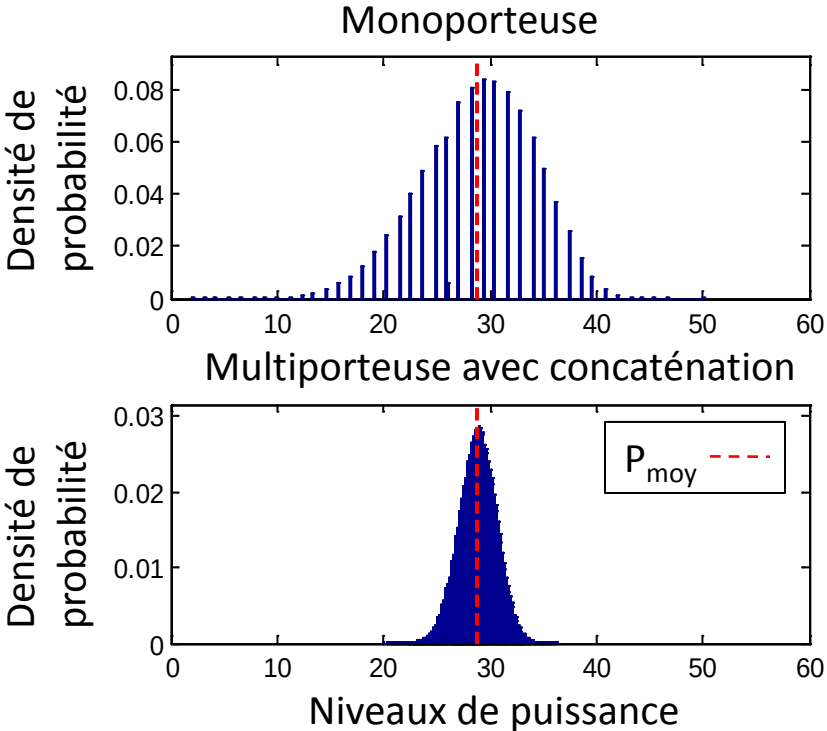
- Réduction de la variation de la puissance moyenne par symbole OFDM
- Augmentation du gain en efficacité spectrale par rapport à une monoporteuse



Variation de la puissance des macrosymboles

La concaténation

- réduit d'un facteur P la variance de la puissance moyenne d'un symbole OFDM
- réduit le TEB dans une chaine avec amplificateur pour une même valeur de recul en entrée



Variations de l'enveloppe complexe d'un signal multiporteuse

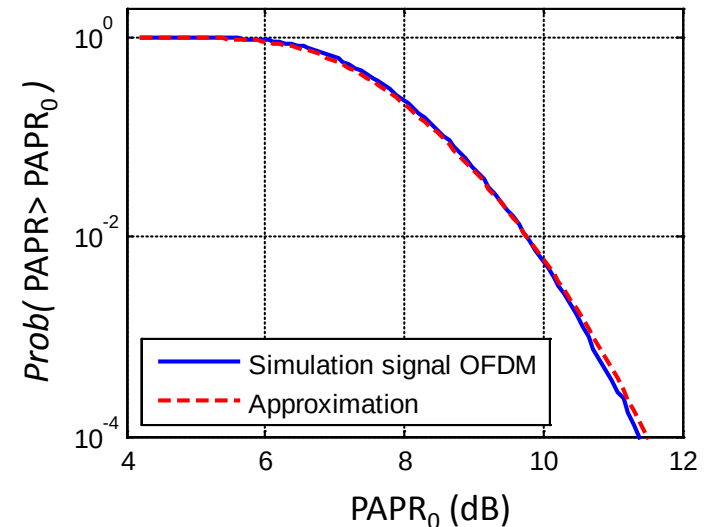
- Le format MC-CSK stabilise la puissance des symboles OFDM mais:
 - ⇒ les signaux multiporteuses présentent de fortes variations d'enveloppe
 - ⇒ le rapport puissance crête/puissance moyenne varie en conséquence

- Expression d'un symbole OFDM: $s_l[n] = \sum_{k=0}^{N_c-1} S_l(k) e^{j2\pi \frac{kn}{L_0 N_c}}$

- Définition du Peak-to-Average-Power Ratio (PAPR): $PAPR\{s_l[n]\} = \frac{\max_{0 \leq n \leq L_0 N_c - 1} [|s_l[n]|^2]}{P_{moy}}$

- Approximation de la distribution du PAPR [1]:

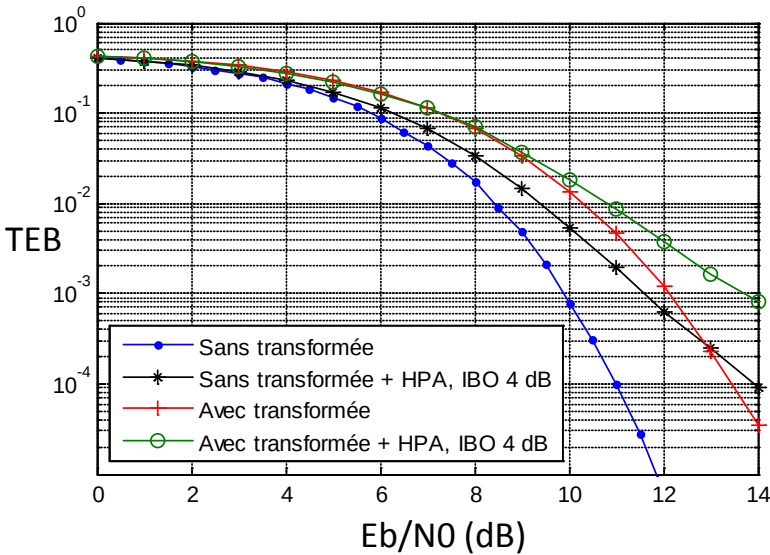
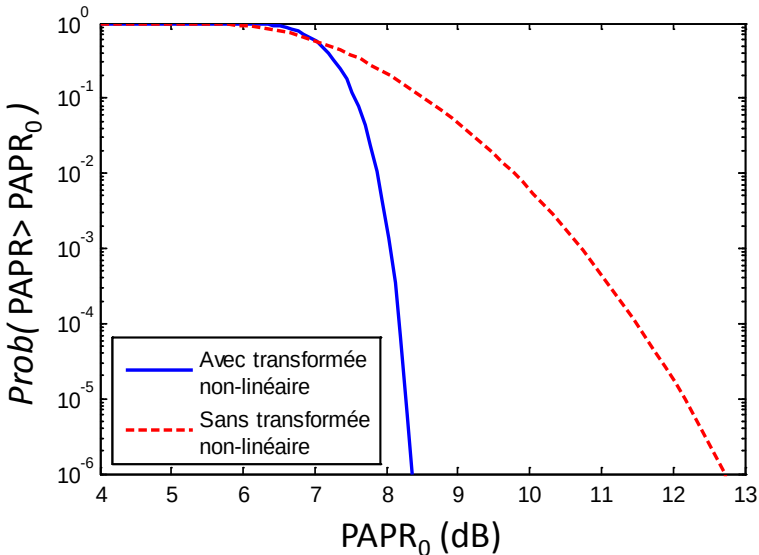
$$Prob(PAPR > \gamma) \approx 1 - \exp\left\{-N_c e^{-\gamma} \sqrt{\frac{\pi}{3}} \ln(N_c)\right\}$$



[1] S. Wei, D.L. Goeckel and P.E. Kelly. A modern extreme value theory approach to calculate the distribution of the PAPR in OFDM systems. In *Communications, ICC 2002*

Technique de réduction du PAPR

- Thème de recherche important $\Rightarrow$ Nombreuses techniques disponibles
- Choix d'une technique peu complexe, sans perte d'efficacité spectrale ni augmentation de la puissance du signal $\Rightarrow$ Transformée non-linéaire [2]: $C(x) = \sqrt{6}\sigma \left[1 - \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \right]$

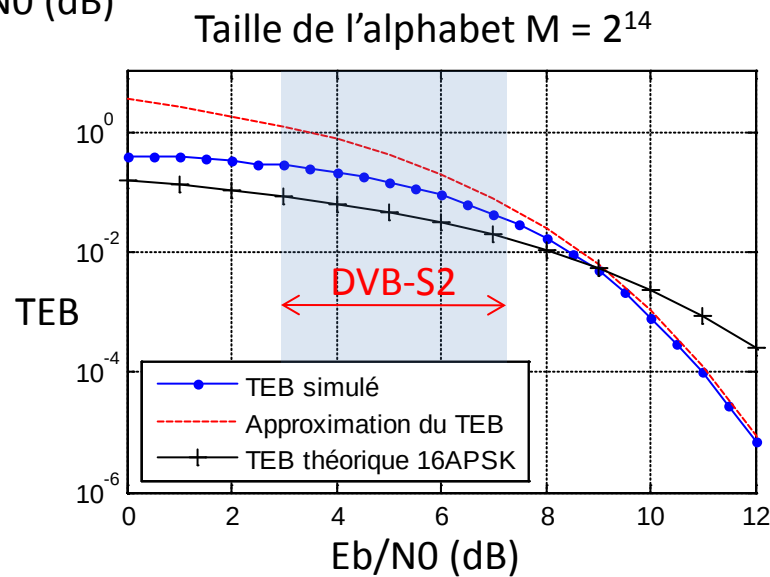
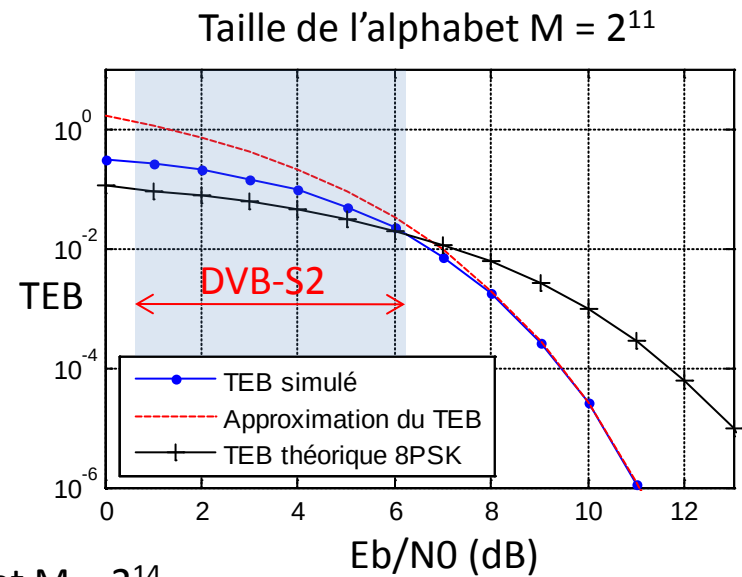
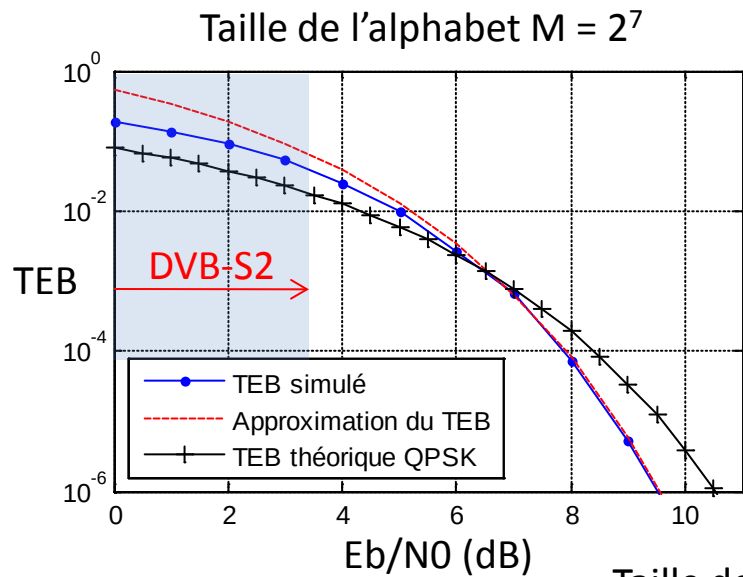


[2] T. Jiang and G. Zhu. Nonlinear companding transform for reducing PAPR of OFDM signals. *Broadcasting, IEEE Transactions on, ICC 2002*

Sommaire

1. Introduction
2. Approche monoporteuse: forme d'onde CDM-CCSK
 - Etude à faible charge
 - Etude à forte charge
3. Approche multiporteuse: forme d'onde MC-CSK
4. Forme d'onde et codage canal
5. Conclusions et perspectives

Comparaison des performances non codées avec le standard DVB-S2

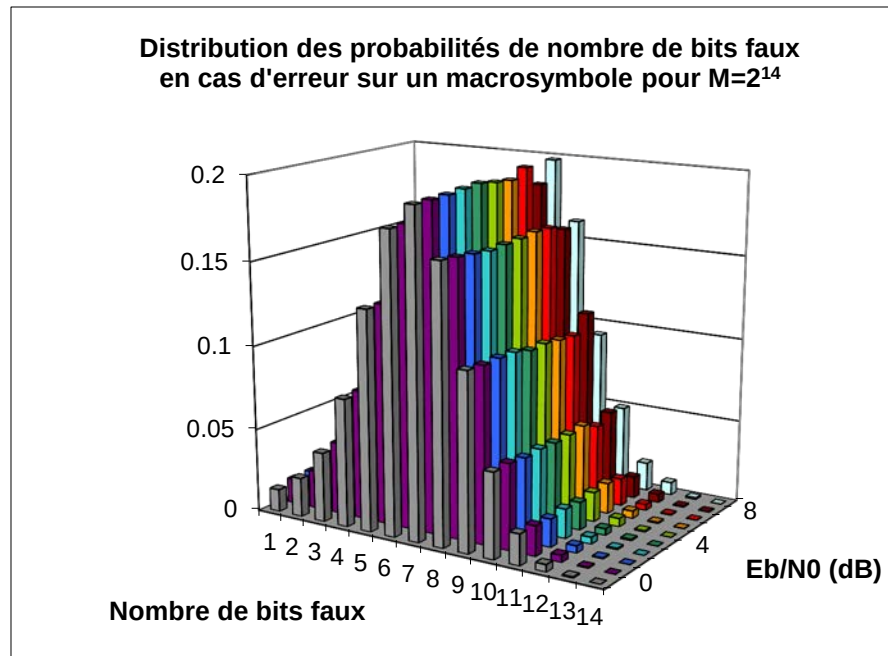


Analyse d'un code adapté à la forme d'onde

- La forme d'onde MC-CSK module les bits sur des macrosymboles de N chips

⇒ Utilisation de codes par bloc

- Statistique d'erreur au niveau bit en cas d'erreur au niveau macrosymbole



⇒ Une erreur macrosymbole = plusieurs bits faux

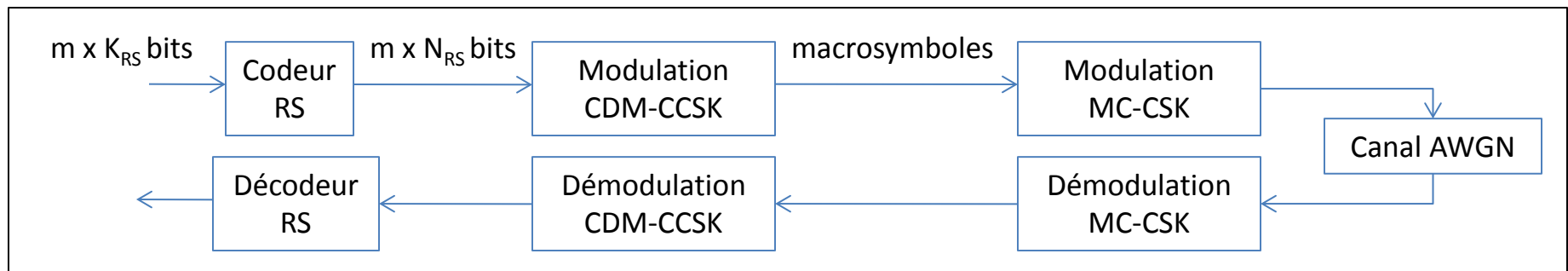
⇒ Codes efficaces pour la gestion de paquets d'erreur

⇒ Codes par bloc non binaires

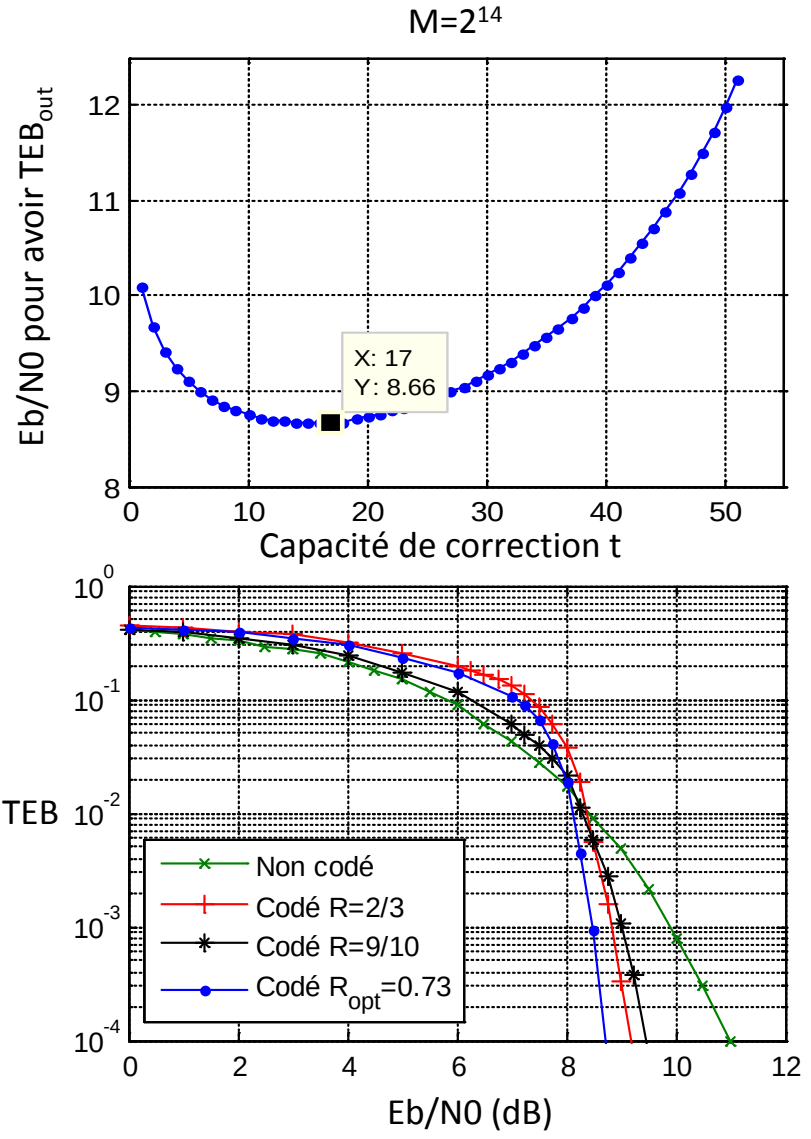
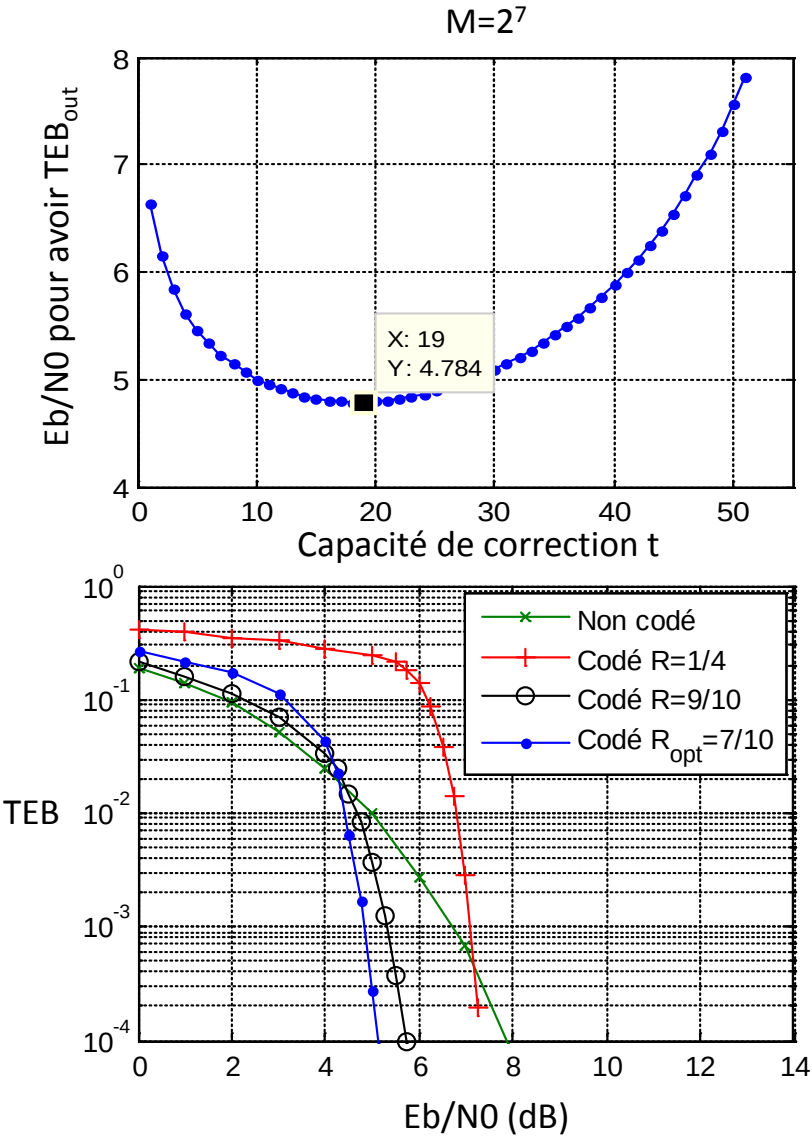
- Reed-Solomon (RS)
- Low-Density Parity-Check Non Binaire (NB-LDPC)

Codage Reed-Solomon

- Les codes RS sont utilisés en communications mobiles ou par satellite, diffusion TV, ...
- Un symbole RS = m bits, un macrosymbole = nombre entier de symboles RS
- Approche monoflux offre une plus grande efficacité spectrale
un macrosymbole module $\log_2 M$ bits $\rightarrow \log_2 M \equiv 0 [m]$
- Choix d'un code court pour limiter la complexité: $m = 7, N_{RS} = 127$
 - Pour $M = 2^7$, un macrosymbole = un symbole RS
 - Pour $M = 2^{14}$, un macrosymbole = deux symboles RS
- Optimisation du rendement pour une longueur de mot de code fixée

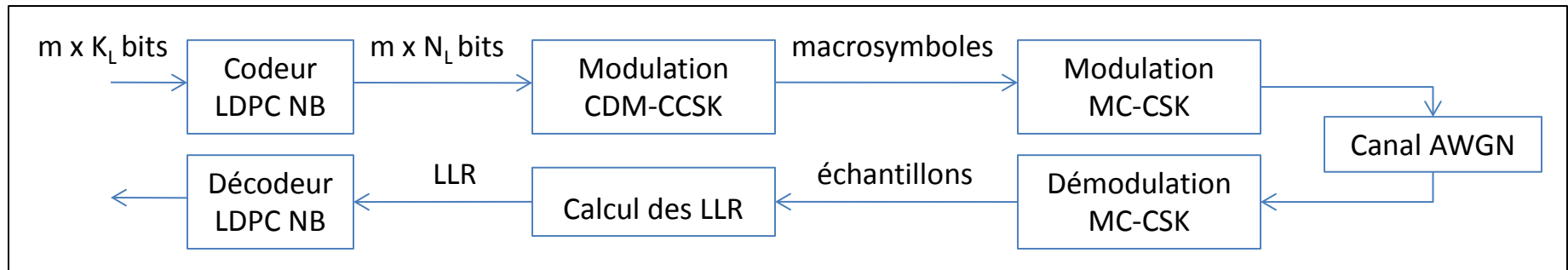


Codage Reed-Solomon – Résultats

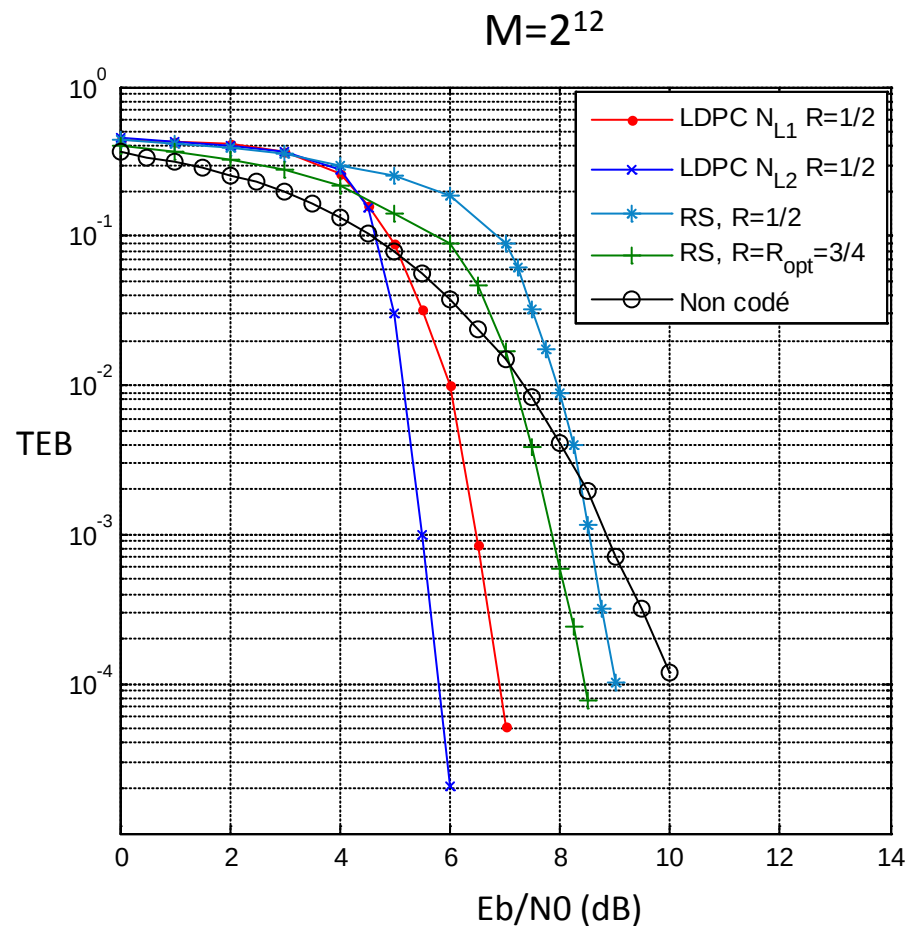
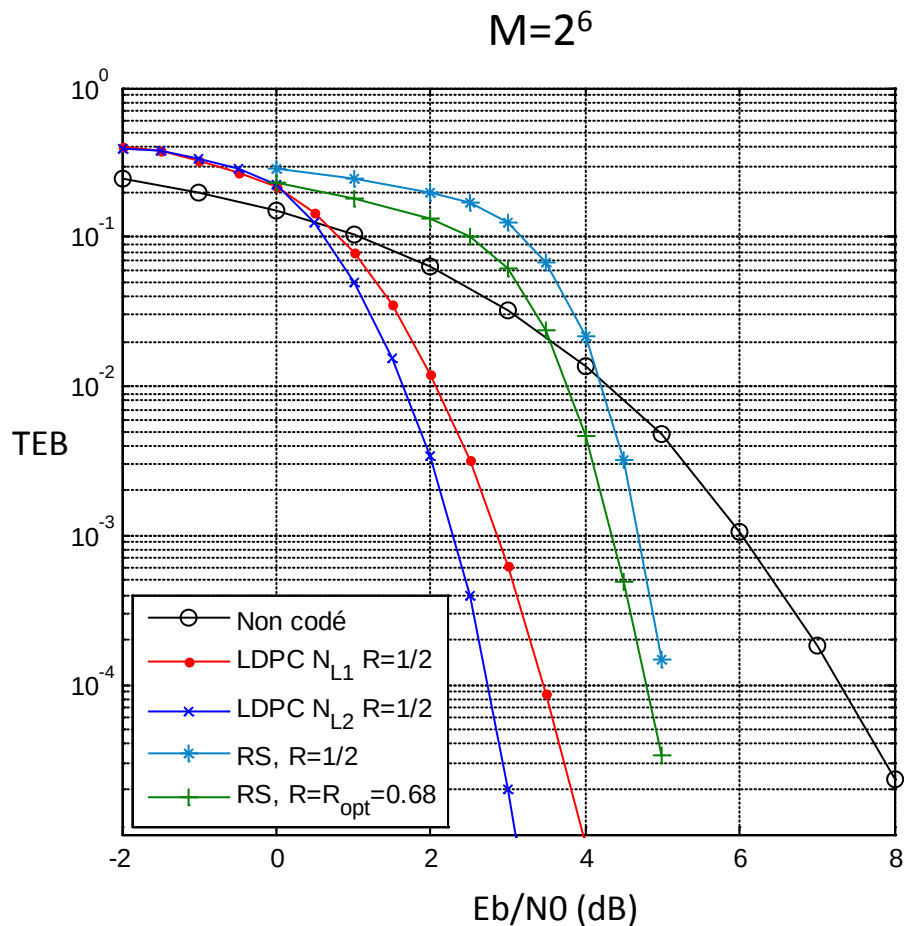


Codes Low-Density Parity-Check (LDPC)

- Codes en bloc linéaires à faible densité, binaires: Gallager (62), non binaires: MacKay (96)
- Code LDPC binaire utilisé dans la norme DVB-S2
- Codes LDPC non binaires disponibles dans GF(64) => 6 bits par symbole de codage
- Longueur des mots de code: $N_{L1}=16$ et $N_{L2}=384$, Rendement $R=1/2$
- Choix de nouvelles tailles d'alphabet
 - $M=2^6$, un macrosymbole = un symbole LDPC
 - $M=2^{12}$, un macrosymbole = deux symboles LDPC
- Décodage souple impliquant le calcul de Log Likelihood Ratio (LLR)
- Algorithme de décodage: *Extended-Min-Sum*, sous-optimal à complexité réduite



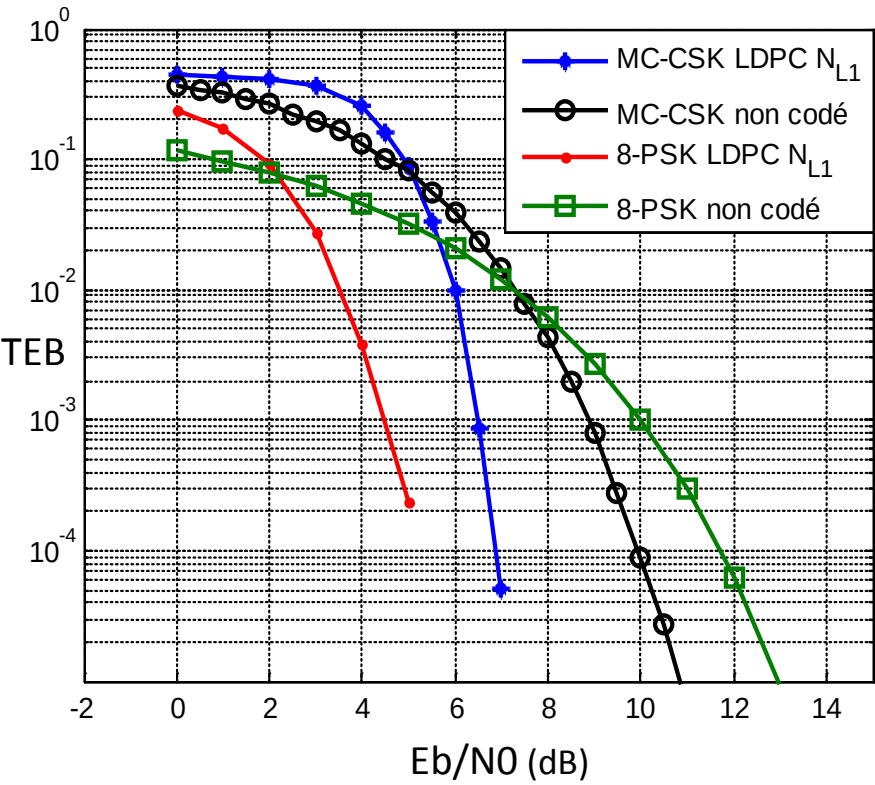
Codes Low-Density Parity-Check Non Binaires – Résultats



Longueur des mots de code: $N_{L1} = 16$
 $N_{L2} = 384$

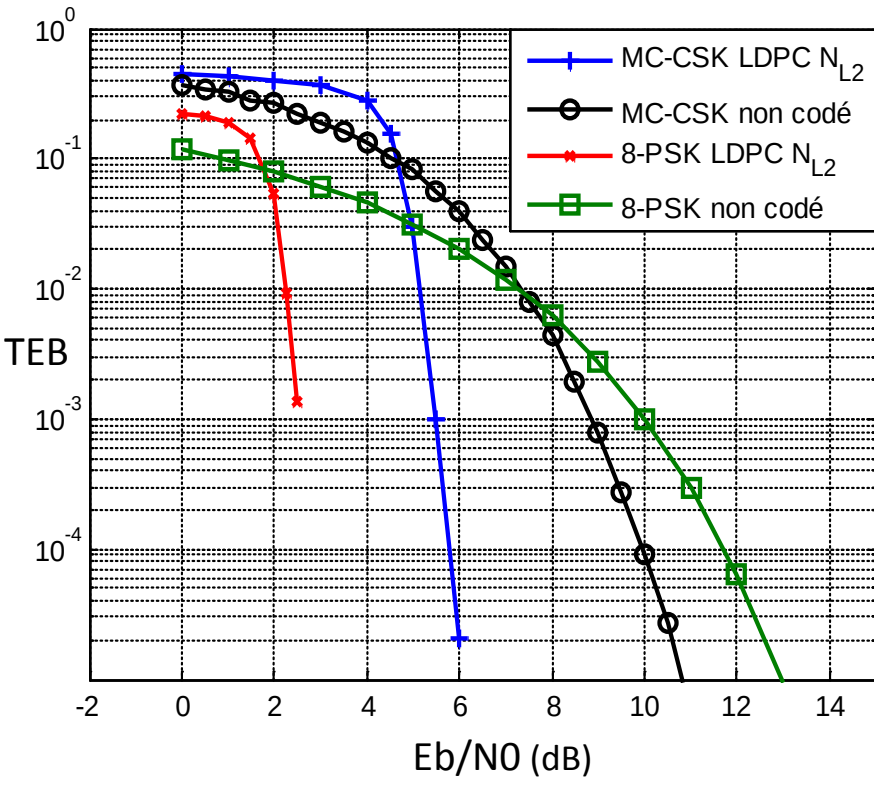
Codes Low-Density Parity-Check Non Binaires – Résultats

M=2¹²



Longueur des mots de code

$N_{L1} = 16$
 $N_{L2} = 384$



MC-CSK M=2 ¹²	$\eta_s = 3.4 \text{ bit/s/Hz}$
8-PSK	$\eta_s = 3 \text{ bit/s/Hz}$

Sommaire

1. Introduction
2. Approche monoporteuse: forme d'onde CDM-CCSK
 - Etude à faible charge
 - Etude à forte charge
3. Approche multiporteuse: forme d'onde MC-CSK
4. Forme d'onde et codage canal
5. Conclusions et perspectives

Contributions de la thèse

Dans un contexte de limitations des ressources (bande, puissance) et d'augmentation des besoins en termes de débits

- Une forme d'onde multiporteuse MC-CSK offrant
 - À faible charge, une amélioration de l'efficacité en puissance avec l'augmentation de l'efficacité spectrale
 - À forte charge et efficacité spectrale équivalente, une amélioration de l'efficacité en puissance à partir d'un certain rapport signal à bruit par rapport à des modulations existantes
- Une étude analytique des performances pour chaque configuration de charge
- Une proposition de codage canal adapté à la forme d'onde MC-CSK basé sur des codes par bloc non binaires

Conclusions

- Les performances non codées de la forme d'onde MC-CSK pour une faible longueur de séquence sont meilleures par rapport aux modulations de la norme DVB-S2 à partir d'un certain SNR. Mais la comparaison n'est pas avantageuse aux points de fonctionnement spécifiés dans la norme.
- La structure de la forme d'onde favorise l'application d'un codage par bloc non binaire.
- L'augmentation de la taille des séquences utilisées est nécessaire pour améliorer le compromis entre efficacité spectrale et efficacité en puissance.
- Les limitations introduites par la taille des séquences et la charge du système dépendent aujourd'hui des capacités de calcul disponibles.
- L'évolution très probable à moyen et long terme des transmissions par satellite vers un partage des canaux entre plusieurs porteuses rendra la contrainte sur la variation du PAPR des signaux moins discriminante.

Perspectives

- La recherche d'une famille de séquences d'étalement plus adaptée aux besoins du multiplexage
- L'étude plus large des techniques de réduction du PAPR en vue d'une amélioration de l'efficacité en puissance globale de la forme d'onde MC-CSK
- La poursuite de l'étude du codage canal avec d'autres caractéristiques de code (taille du code, rendement, taille du corps de Galois) et la concaténation de codes

Questions?