



MODULATIONS CODEES ADAPTEES AU FADING DE RAYLEIGH: PERFORMANCES SUR CANAL HF IONOSPHERIQUE

P. PITTET ET D. PIREZ

THOMSON-CSF, Division RGS, Service Traitement du Signal, 66 rue du Fossé Blanc, 92231 Gennevilliers

RESUME

Dans le cadre du développement de modems H.F. très haut débit, des modulations codées en treillis ont été associées à deux formes d'ondes modem parallèle cohérent. Les performances obtenues sur des liaisons Cholet-Paris et Djibouti-Paris, à des débits utiles s'étageant entre 2700 et 4800 bits par seconde montrent l'efficacité de ces techniques sur canal réel.

ABSTRACT

To develop high data rate H.F. modems, some Trellis Coded Modulations have been used with coherent multitone modem waveforms. Performances on Cholet-Paris and Djibouti-Paris links, with user's data rates from 2700 to 4800 bits/s, show the efficiency of those techniques on H.F. Channel.

I. INTRODUCTION

La propagation sur canal H.F. ionosphérique est caractérisée par des phénomènes de trajets multiples et des évanouissements ou "fading" sur les signaux reçus.

Afin d'autoriser des liaisons haut débit sur ce type de canal (débits utiles supérieurs à 2400 bits/s), il est nécessaire d'utiliser une forme d'onde modem performante associée à un codage de canal efficace (bonne protection de l'information sans augmentation de la bande de transmission [1]).

Le codage de canal est obtenu par l'utilisation de modulations codées en treillis optimisées suivant des critères de diversité et de produit de distance[2].

Le modem parallèle considéré réalise une estimation de la fonction de transfert du canal permettant un décodage cohérent des modulations codées en treillis.

Il n'est pas possible d'envisager en permanence des liaisons haut débit sur canal H.F., la qualité des liaisons évoluant beaucoup en cours de transmission. C'est pourquoi, un critère d'adaptativité en débit basé sur les bornes de Chernoff est considéré. Il semble être pertinent et devrait permettre de gouverner les procédures de changement de débit

Tout d'abord, les formes d'ondes et les modulations codées employées ainsi que le critère d'adaptativité seront décrits, puis des résultats obtenus sur canal réel seront présentés et interprétés.

II. MODEM PARALLELE COHERENT

Les formes d'ondes modem parallèle sont caractérisées par leur faible vitesse de modulation. Elles ont l'avantage d'avoir une faible complexité de mise en œuvre.

Le signal émis se présente comme une suite de trames constituées d'une somme de sinusoïdes (sous porteuses). Ces sous porteuses sont espacées d'un écart fréquentiel assurant leur orthogonalité sur la durée d'analyse (cette durée est inférieure à la durée de la trame du fait de l'ajout d'un temps de garde).

Des sous porteuses de référence (connues du récepteur) sont insérées dans les trames, et permettent un échantillonnage direct de la fonction de transfert du canal[6].

La vitesse de variation du canal étant relativement lente, le nombre de porteuses de référence nécessaires pour un échantillonnage correct du canal, représente pour les formes d'ondes considérées le quart du nombre total de sous porteuses.

Les deux formes d'ondes utilisées lors des essais permettent de véhiculer 1355 et 1600 symboles utiles par seconde et seront appelées respectivement PAR1 et PAR2 dans la suite.

III. LES MODULATIONS CODEES



Afin d'obtenir un codage de canal efficace, il faut l'optimiser pour le canal H.F. ionosphérique. Pour pouvoir modéliser ce dernier par un canal de rayleigh, c'est à dire par un canal diffus sans mémoire, il est nécessaire d'entrelacer les symboles de modulation. Sous ces conditions, il est possible de majorer le taux d'erreurs binaires, à fort rapport signal à bruit [2]:

$$TEB \leq \sum_{x \in C} \sum_{x' \in C} a(x,x') p(x) \left(\frac{E_s}{4N_0} \right)^{-L'} \prod_{n \in \eta} \frac{1}{|x_n - x'_n|^2}$$

avec

x, x' deux séquences de symboles

$\eta = \{ n \mid x_n \neq x'_n \}$

$L' = \text{Card}(\eta)$

$p(x)$ probabilité d'émettre la séquence x

$a(x,x')$ nombre de bits erronés lorsqu'on choisit x au lieu de x'

Le comportement asymptotique du TEB est gouverné par les chemins x, x' associés à $L_m = \text{Min}_{x,x'}(L')$ et parmi ceux-ci, par ceux dont le produit des distances d_p est minimal ($d_p = \prod |x_n - x'_n|^2$).

L'_m est appelé longueur effective ou diversité de la modulation codée. De plus, on peut montrer [3] que lorsque la diversité est importante, les performances deviennent directement liées à la distance libre d_1 (distance euclidienne minimale accumulée le long d'un chemin d'erreur).

Pour la recherche de modulations codées adaptées au canal de rayleigh, il convient de rechercher celles qui maximise la diversité L'_m et parmi celles-ci celles qui maximise d_p et d_1 .

Ainsi, les modulations codées utilisées pour les essais répondent à ces critères d'optimalité[3][4][5][7]. Il s'agit de quatre modulations codées utilisant des codeurs convolutifs systématiques de longueur de contrainte sept (treillis à 64 états, offrant un bon compromis complexité/performances) et permettant de véhiculer 2 ou 3 bits utiles par symbole de modulation.

Leurs caractéristiques sont les suivantes:

- MOD1 -> codeur [R=2/3, K=7], 8PSK $L'_m=4$
- MOD2 -> codeur [R=2/4, K=7], 16QAM $L'_m=6$
(voies I et Q codées séparément)
- MOD3 -> codeur [R=3/4, K=7], 16PSK $L'_m=3$
- MOD4 -> codeur [R=3/4, K=7], 16QAM $L'_m=3$

Les performances de ces différentes modulations codées sur canal de rayleigh simulé sont présentées sur les figures fig.1 et fig.2.

Leur décodage est effectué par un algorithme de Viterbi

Les simulations en fading de rayleigh, montrent

l'apport des modulations codées étudiées: pour un taux d'erreurs binaires de 10^{-3} , le gain en rapport signal à bruit de cette technique est supérieur à 10 dB par rapport aux schémas non codés équivalents. De plus, les modulations codées 16QAM s'avèrent être plus performantes que les modulations codées MPSK, à condition toutefois de disposer d'informations de canal.

IV. CRITERE D'ADAPTATIVITE

Les liaisons haut débit sur canal H.F. doivent pouvoir gérer une adaptativité en débit pour profiter au mieux des modulations codées (bonne fiabilité de transmission) et assurer le meilleur débit d'information possible sur l'ensemble de la liaison. C'est pourquoi, nous étudions un critère de débit critique basé sur l'intégration des bornes de Chernoff, défini pour une constellation à M états par :

$$R_0(\tau) = - \log_2 \left[\frac{1}{T} \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \frac{1}{1+SB(t)(x_i-x_j)^2} dt \right]$$

(T peut être pris égal à la durée d'entrelacement).

R_0 donne le nombre maximal de bits d'information qu'il est possible de véhiculer par symbole, pour une constellation donnée, et pour les conditions de propagation rencontrées (rapport signal à bruit SB(t) estimé par le modem). Cette valeur limite serait atteinte à condition de disposer du codage optimal.

IV. ESSAIS SUR CANAL REEL

Les différentes associations forme d'onde/modulation codée offrent quatre débits utilisateurs:

- 2711 bits/s (PAR1 avec MOD1 ou MOD2)
- 3200 bits/s (PAR2 avec MOD1 ou MOD2)
- 4067 bits/s (PAR1 avec MOD3 ou MOD4)
- 4800 bits/s (PAR2 avec MOD3 ou MOD4)

La chaîne de transmission est résumée dans le schéma fig.3.

Pour les essais réalisés sur signaux réels, la durée d'entrelacement est de l'ordre de la minute et permet de lutter contre des "trous" de fading n'excédant pas la seconde (bon fonctionnement de l'algorithme de Viterbi).

Le signal basse fréquence du récepteur H.F. est stocké sur cassette D.A.T., le démodulation étant réalisée en temps différé.

Les performances obtenues pour les différentes

liaisons, au sens du taux d'erreurs binaires, sont présentés dans les tableaux fig.4 et fig.5 (l'entrelacement permet de lutter contre un fading de 1Hz).

Les rapports signaux à bruit estimés par le modem sont de l'ordre 15 dB sur Cholet-Paris et d'environ 10dB sur Djibouti-Paris.

Pour illustrer l'évolution de la qualité de transmission en cours de liaison, des symboles virtuels de 9 bits associés en blocs de 511 symboles ont été formés. Le profil des courbes représentant le nombre de symboles erronés par bloc, traduit ces évolutions et peut être mis en relation avec le profil d'évolution du critère d'adaptativité en débit. La figures fig.6 montre l'intérêt du critère d'adaptativité étudié par rapport au critère de rapport signal à bruit (on notera la présence d'un artéfact sur la courbe de rapport signal à bruit dû à une estimation de bruit très faible).

V. SYNTHÈSE

Les essais réalisés ont mis en évidence la possibilité de transmissions à haut débit sur canal H.F.

En effet, les conditions de canal rencontrées sur les liaisons Cholet-Paris ont permis des transmissions à un débit utile de 4800 bits/s. De plus, pour 86% des transmissions effectuées (d'une durée globale de 7 heures), le taux d'erreurs binaires obtenu est inférieur à 10^{-3} , pour des débits utilisateurs variant entre 2700 et 4800 bits/s.

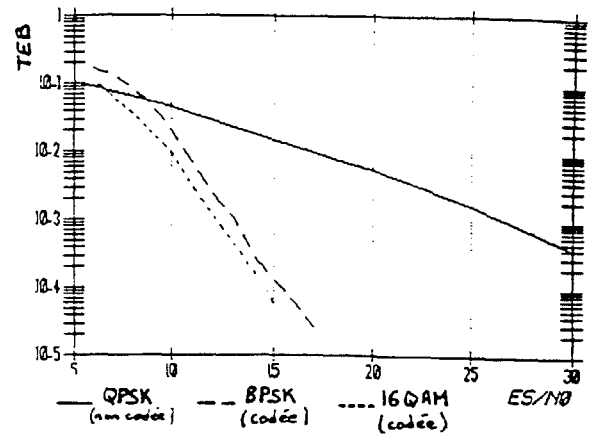
D'autre part, l'intérêt des modulations codées par rapport au schéma classique a été confirmé en pratique par comparaison, dans le même canal de la 8PSK codée et de la QPSK non codée pour une même liaison Cholet-Paris, le taux d'erreurs binaires est de $3.5E-3$ dans le cas de la modulation codée 8PSK, il est de $4.8E-5$ avec la QPSK non codée).

En ce qui concerne les conditions de propagation sur Djibouti-Paris, elles ont permis des liaisons à 2700 et 3200 bits/s.

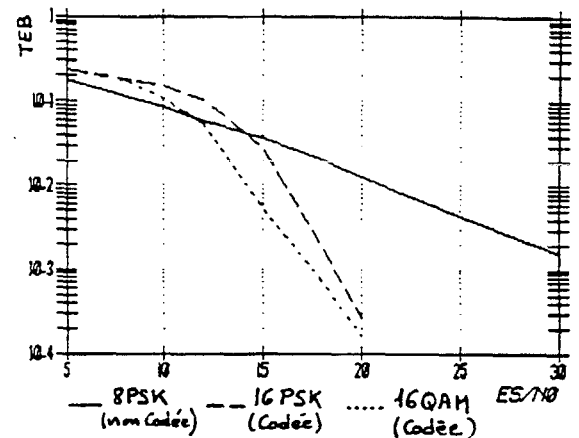
De plus, les informations de canal délivrées par le modem sont suffisamment fines pour ne pas remettre en cause la supériorité des modulations codées 16QAM vis à vis des modulations codées MPSK.

Le critère d'adaptativité présenté semble être pertinent pour gouverner l'adaptativité en débit. Il sera toutefois nécessaire pour définir la procédure de changement de débit, de l'évaluer sur un grand nombre de liaison.

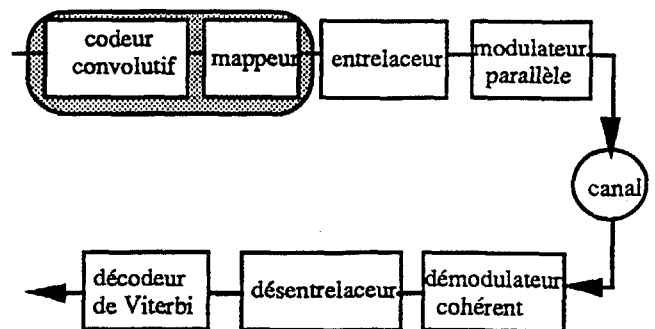
Pour finir, il est important de noter que les essais présentés ci-dessus n'ont pas de valeur statistique, cependant ils montrent la faisabilité de transmissions H.F. hauts débits.



- fig.1 modulations d'efficacité 2 bits/s/Hz - Performances simulées sur canal de Rayleigh



- fig.2 modulations d'efficacité 3 bits/s/Hz - Performances simulées sur canal de Rayleigh



- fig.3 chaîne de transmission -

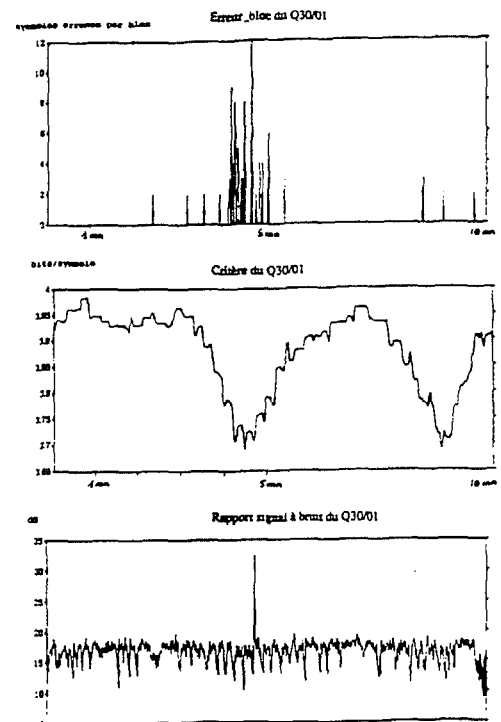


Debit	forme d'onde	TEB	durée liaison
2711	MOD1 PAR1	4.9E-3	09min.00s
		4.9E-5	11min.30s
		4.8E-5	12min.20s
		1.0E-4	11min.30s
		5.8E-5	11min.30s
	MOD2 PAR1	4.0E-5	11min.30s
3200	MOD1 PAR2	1.1E-2	11min.30s
		< 7E-7	08min.13s
		< 6E-7	09min.05s
		< 5E-7	11min.30s
	MOD2 PAR2	3.0E-5	10min.00s
		1.5E-5	10min.00s
4067	MOD3 PAR1	8.0E-2	11min.30s
		2.6E-3	11min.30s
		7.3E-4	07min.14s
		2.9E-3	11min.30s
		1.4E-3	11min.30s
		9.5E-4	11min.30s
	MOD4 PAR1	1.9E-4	11min.30s
		7.7E-5	04min.10s
		2.2E-4	11min.30s
		7.4E-4	11min.30s
		3.3E-4	11min.30s
		1.3E-2	11min.30s
4800	MOD3 PAR2	2.0E-3	09min.00s
		4.3E-4	07min.36s
		8.2E-3	09min.00s
		3.1E-4	11min.30s
		9.4E-4	11min.30s
		3.0E-4	11min.30s
	MOD4 PAR2	3.3E-4	09min.58s
		4.3E-4	11min.30s
		7.2E-5	11min.30s

- fig.4 liaison Cholet-Paris -

Debit	forme d'onde	TEB	durée liaison
2711	MOD1 PAR1	7.2E-4	11min.30s
	MOD2 PAR1	6.5E-4	11min.30s
3200	MOD1 PAR2	1.9E-3	09min.30s
		6.0E-4	09min.30s
	MOD2 PAR2	3.9E-4	10min.00s
		4.4E-3	10min.00s
4067	MOD3 PAR1	1.9E-2	11min.30s
	MOD4 PAR1	5.9E-4	11min.30s
4800	MOD4 PAR2	1.9E-2	11min.30s
		2.0E-1	11min.30s

-fig.5 liaison Djibouti-Paris -

- fig.6 Evolution d'une liaison Cholet-Paris-
modulation codée 16QAM, débit utile 4800 bits/s

Références:

- [1] UNGERBOECK
"Trellis Coded Modulation with redundant signal sets" (I&II)
IEEE Communication Magazine n°25 02/1987
- [2] DIVSALAR-SIMON
"The design of trellis coded modulation M P S K for fading channels: performances criteria & set partition for optimum code design"
IEEE Tr. on Communications Vol.38 09/1988
- [3] DU-VUCETIC
"New MPSK trellis code for fading channels"
Electronics Letters 02/08/1990 Vol. 26 n°16
- [4] DU-VUCETIC
"New 16QAM trellis code for fading channels"
Electronics Letters 06/06/1991 Vol. 27 n°12
- [5] SCHLEGEL-COSTELLO
"Bandwith efficient coding for fading channels: code construction and performance analysis"
IEEE JSA in communications Vol.7 n°9 12/1989
- [6] PIREZ-GOMBAULT
"Modem parallèle cohérent pour transmissions de données haut débit en H.F. "
13ème colloque GRETSI 1991 Juan-les-pins
- [7] LEFLOCH-HELARD
"Démodulation cohérente du système de transmission multiporteuses COFDM dans un canal radiomobile"
13ème colloque GRETSI 1991 Juan-les-pins