

Un système de transmission d'images fixes robuste pour canaux radiomobiles sélectifs en temps et en fréquence

Hervé Boeglen¹, Christian Chatellier², Christian Olivier² et Olivier Haeberle¹

¹Laboratoire MIPS, IUT Mulhouse, 61 rue Albert Camus, 68093 Mulhouse Cedex France

²Laboratoire SIC, Téléport 2, Bd Marie et Pierre Curie, 86962 Futuroscope Cedex France

herve.boeglen@uha.fr, chatellier@sic.sp2mi.univ-poitiers.fr

Résumé

Le but de cet article est de présenter un système de transmission d'images fixes robuste et d'établir ses performances lorsqu'il est utilisé sur un canal radiomobile sélectif en temps et en fréquence. Après une présentation du procédé WTSOM (Wavelet Transform Self-Organizing Map) et du schéma conjoint associé, nous décrivons les contraintes du canal de transmission utilisé. A partir de ces contraintes nous présentons une stratégie à deux niveaux qui va permettre d'assurer la robustesse de notre système. Le premier niveau consiste à appliquer une correction d'erreurs classique associée à une estimation de canal à partir de pilotes. Le deuxième niveau utilise une technique de restauration d'images basée sur les Equations aux Dérivées Partielles (EDP). Cette stratégie à deux niveaux nous permet d'obtenir des images de bonne qualité visuelle sur une large gamme de fréquence Doppler malgré des Taux d'Erreurs Binaires (TEB) supérieurs à 3%.

Mots clefs

Compression d'images fixes, codage conjoint source-canal, canaux radiomobiles, communications numériques.

1 Transmission robuste d'images : le codeur conjoint WTSOM/M-QAM

La motivation de notre travail provient du fait que la transmission d'images JPEG ou JPEG2000 sur des canaux fortement perturbés ($TEB > 10^{-3}$) conduit à des conséquences dramatiques en terme de rendu visuel. Pour répondre aux applications de transmission sans fil, le comité de normalisation de JPEG 2000 a créé l'extension JPWL (JPEG WIRELESS) [1] qui permet de protéger, à l'aide de différents Codes Correcteurs d'Erreurs (CCE), les informations indispensables au décodage de l'image comme l'entête par exemple. D'autres auteurs [2][3] proposent des solutions analogues associant des codes de Reed-Solomon (RS) et des Turbo Codes pour permettre la transmission efficace de ce type d'images sur des canaux de Rayleigh. Les différents auteurs proposent une analyse du PSNR de l'image reçue en fonction d'un TEB ou du rapport signal à bruit de la transmission. Ces résultats montrent clairement l'efficacité des codes utilisés, mais ils

montrent également la nécessité d'utiliser de codes à bas rendement généralement de l'ordre de 1/3.

Le codage conjoint source-canal permet, dans certain cas, d'optimiser le rapport entre protection et compression notamment lors de transmissions très bruitées. C'est dans cette démarche que nous avons développé une stratégie de codage conjoint source-canal correspondant à l'association du codeur WTSOM (Wavelet Transform Self-Organizing Map) développé au laboratoire, et d'une modulation numérique QAM. Cette application a été testée dans le cadre d'une transmission d'images sur canal ionosphérique à fort TEB et a fait l'objet d'une revue à paraître prochainement [4].

La première étape de notre codeur consiste à appliquer une décomposition en ondelettes (Daubechies (9,7)) sur trois niveaux. L'opération de quantification consiste à appliquer une quantification vectorielle sur les sous-bandes les plus informatives. Lors de cette étape, nous utilisons l'algorithme Self-Organizing Map de Kohonen qui génère des dictionnaires dont la topologie assure à des vecteurs, proches en terme de distance Euclidienne, de correspondre à des indices voisins dans le dictionnaire. Ce codage nous permet d'obtenir des taux de compression de 0,3 bpp pour des images à niveau de gris et de 0,6 bpp pour des images couleur. L'organisation topologique des dictionnaires est alors utilisée pour définir un mapping optimisé des éléments quantifiés sur la constellation d'une modulation numérique de taille appropriée. Cette procédure assure une très bonne résistance aux erreurs de transmission [5]. C'est précisément la relation entre l'organisation du dictionnaire et le codage des symboles d'une modulation numérique qui définit le codage conjoint source-canal. La Figure 1 présente le synoptique de la chaîne de transmission décrite précédemment.

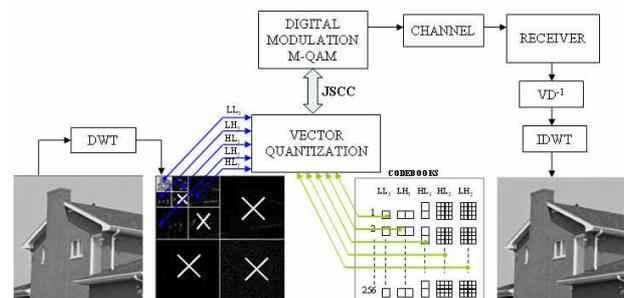


Figure 1 : Synoptique du système WTSOM

Le très bon comportement du système pour des TEB typiques de 2% sur des canaux ionosphériques nous a fait envisager son utilisation sur des canaux radiomobiles non sélectifs en fréquence où le procédé a montré une relative insensibilité aux variations de la fréquence Doppler du canal [6]. La Figure 2 qui présente l'évolution du PSNR de l'image (PSNR min, max et moyen) illustre cette caractéristique.

De plus, le TEB cible de 2% nous a permis de mettre en oeuvre des techniques de codage de canal relativement simples. En effet, seules les sous-bandes LL3 (basses fréquences) de l'image sont protégées par un code convolutif de rendement $R = 0,75$. Cela conduit à un rendement global $R = 0,8$ nettement supérieur aux applications du même type rencontrées dans la littérature.

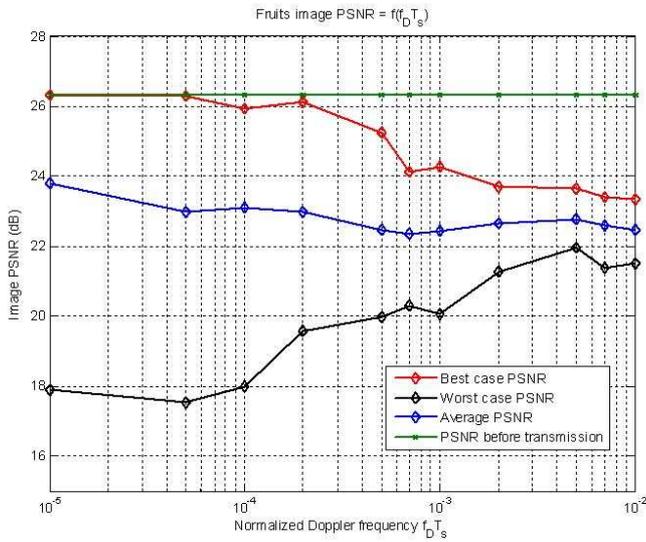


Figure 2 : PSNR en fonction de $f_D T_s$



a) Image WTSOM transmise, PSNR=26,33dB

b) Image WTSOM reçue $f_D T_s = 0,001$, SNR=17dB, TEB=2,2%, PSNR=22,8 dB

Figure 3: Transmission WTSOM sur canal de Rayleigh

L'objet du présent article est de démontrer la robustesse du système de transmission d'images WTSOM lorsqu'il est utilisé sur des canaux radiomobiles sélectifs en temps et en fréquence grâce à l'utilisation d'une combinaison originale de stratégies de minimisation des erreurs de transmission issues des communications numériques d'une part et du traitement d'images d'autre part.

2 Les contraintes du canal radiomobile sélectif en fréquence

Le canal radiomobile est décrit par sa Réponse Impulsionnelle (RI) variable en fonction du temps qui est composée d'un grand nombre d'impulsions reçues depuis N_p trajets différents :

$$\underline{h}(\tau, t) = \sum_{p=1}^{N_p} a_p e^{j(2\pi f_{D,p} \tau + \phi_p)} \delta(\tau - \tau_p) \quad (1)$$

où a_p , $f_{D,p}$, ϕ_p et τ_p représentent respectivement l'amplitude, la fréquence Doppler, la phase et le retard de propagation associés au trajet p . On suppose que ce canal est un processus stochastique stationnaire au sens large et que les différents trajets sont non corrélés. Dans ce cas, on peut montrer [7] que la description des fonctions de corrélation de la RI $\underline{h}(t, \tau)$ est suffisante pour caractériser l'évanouissement rapide du canal.

A partir de ces fonctions, on peut accéder à deux grandeurs importantes qui sont la bande de cohérence B_c et le temps de cohérence T_c du canal. La bande de cohérence B_c est donnée par [7] :

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (2)$$

où σ_τ représente l'étalement des retards. B_c représente la largeur de bande sur laquelle les caractéristiques de propagation du signal sont corrélées. Le canal est dit *sélectif en fréquence* si la largeur de bande B du signal à transmettre est plus grande que B_c .

Le temps de cohérence T_c du canal est donné par [7] :

$$T_c \approx \frac{9}{16\pi f_{D_{\max}}} \quad (3)$$

où $f_{D_{\max}}$ représente la fréquence Doppler maximale. T_c correspond à la durée pendant laquelle le canal est invariant en temps. Le canal est dit *sélectif en temps* si la durée T_s de transmission d'un symbole est plus grande que T_c .

Le modèle de canal statistique normalisé que nous utilisons est du type COST207TU [7] caractérisé par un étalement des retards $\sigma_\tau = 0,98 \mu s$. Nous nous fixons un rythme symbole de transmission $R_s = 2 \text{ Msymb/s}$ ce qui conduit à un canal sélectif en fréquence.

3 Les stratégies de communication numériques utilisées

Pour lutter contre la sélectivité fréquentielle du canal, nous utilisons la technique OFDM, bien connue, dont les paramètres sont déterminés par les équations suivantes :

$$\Delta f = B_{OFDM}/N \ll B_c \quad (4)$$

$$T_{S,MC} \ll T_c \quad (5)$$

avec N = nombre de sous-porteuses par symbole OFDM, B_{OFDM} = bande occupée par le système multiporteuse, $T_{S,MC} = N \cdot T_{S,SC}$ = Temps symbole du système multiporteuse et $T_{S,SC}$ = Temps symbole du système monoporteuse. Dans le cas du canal COST207TU les équations (2) à (5) conduisent à $N = 128$ porteuses.

De par le fait que nous utilisons des modulations cohérentes, une estimation du canal s'impose. Celle-ci est réalisée à partir de pilotes. Leur nombre et leur espacement sont déterminés par le théorème de l'échantillonnage en 2D en tenant compte de T_c et de l'étalement maximum des retards τ_{max} . On a les relations suivantes [8] :

$$f_{D\text{max}} \cdot T_{S,MC} \cdot N_t \leq 1/2 \quad (6)$$

$$\tau_{\text{max}} \cdot \Delta f \cdot N_f \leq 1/2 \quad (7)$$

N_t et N_f représentent respectivement l'espacement des pilotes dans la direction temporelle (symboles OFDM) et fréquentielle (sous-porteuses). En nous fixant $f_{D\text{max}} = 500\text{Hz}$, et en appliquant la règle définie dans [8] nous obtenons $N_t = 4$ et $N_f = 7$.

L'estimation du canal à l'endroit des pilotes est faite selon le critère des moindres carrés. La fonction de transfert $H(f,t)$ du canal est ensuite obtenue par interpolation cubique. La Figure 4 représente un exemple de fonction de transfert sur la durée de transmission d'une image WTSOM.

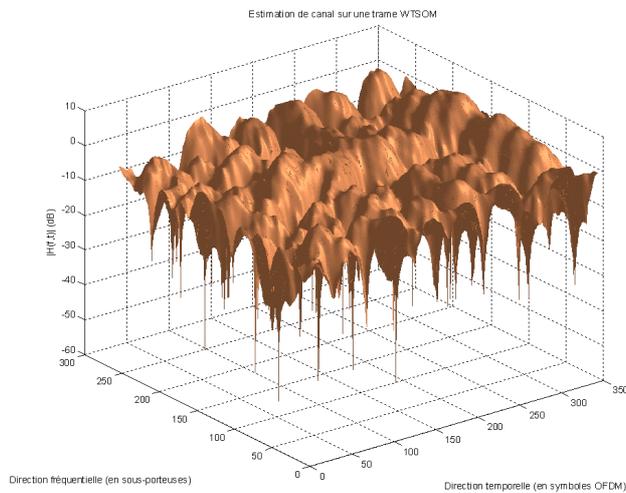


Figure 4 : Estimation de canal sur une transmission WTSOM

Pour tenir compte de l'organisation hiérarchique des informations contenues dans l'image, nous appliquons une stratégie de protection inégale contre les erreurs. Le système utilise alors deux modulations numériques QPSK et 16QAM. Les sous-bandes LL3 de l'image qui représentent l'information visuelle la plus importante sont protégées par un code correcteur d'erreurs convolutif de rendement $R=3/4$ et de longueur de contrainte $v = 6$. Pour éviter les erreurs en rafale, les données codées sont

introduites dans un entrelaceur de Forney. Le décodage est assuré par un décodeur de Viterbi à entrée souple.

4 Stratégie de traitement d'image : restauration par EDP

La méthode que nous utilisons consiste à interpoler l'information spatiale "valide" de l'image dans les zones corrompues, en prolongeant ses structures géométriques. Elle se base sur un modèle d'Equations aux Dérivées Partielles (EDP) non-linéaires du 2^{ème} ordre [10]. Soit $I(x,y) = I$ une image fixe en niveaux de gris, représentée par une fonction de $\Omega \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ qui associe au pixel $(x,y) \in \Omega$ son niveau de gris $I(x,y)$, avec Ω le support de l'image. L'EDP de régularisation de Perona-Malik [9] peut s'écrire de la façon suivante :

$$\begin{cases} \frac{\partial I(x,y,t)}{\partial t} = c_{\xi}^2 I_{\xi\xi} + c_{\eta}^2 I_{\eta\eta} \\ I(x,y,0) = I_0(x,y) \end{cases} \quad (8)$$

où I_0 est la version bruitée de I , $I_{\xi\xi}$ et $I_{\eta\eta}$ les dérivées secondes de I dans les directions ξ et η , η la direction du vecteur gradient ∇I et ξ sa direction orthogonale.

Une propriété intéressante du vecteur unitaire ξ est qu'en tout point (x,y) de l'image, celui-ci est tangent à la courbure d'un contour de l'image. Ainsi pour $c_{\eta} = 0$, nous pouvons remarquer que l'équation (8) décrit la diffusion tangentielle de l'intensité lumineuse de $I(x,y)$ le long d'un contour, durant un temps t . De façon intuitive, la direction ξ permet donc d'interpoler les structures existantes de l'image dans des zones manquantes. (cf. Figure 5.).

L'application de cette méthode nécessite toutefois de disposer d'un masque des erreurs $\chi_D(x,y)$. A l'émission, nous calculons un code CRC (Cyclic Redundancy Check) sur les sous-bandes LL3 de l'image. Ces données CRC sont protégées par le code convolutif décrit dans la partie 2. puis ajoutées à l'image à transmettre. Le récepteur construit le masque des erreurs $\chi_D(x,y)$ à partir de la vérification du CRC. Il applique alors l'algorithme de restauration dont on peut remarquer l'efficacité sur la Figure 6 b).

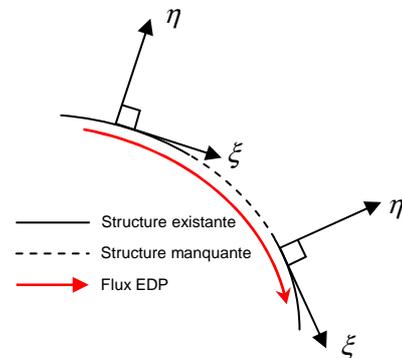


Figure 5 : Interpolation de données à l'aide d'un flux EDP



a) Image WTSOM reçue après CCE
 $f_D T_s = 3,5e-4$, SNR=15dB
 TEB=5%, PSNR=21.05dB

b) Image WTSOM reçue après restauration
 PSNR = 24,41dB

Figure 6 : Transmission WTSOM avec reconstruction

5 Résultats et conclusions

Nous avons évalué les performances de notre système sur une plage de fréquence Doppler variant de 1 à 500Hz. Les résultats sont présentés sur les figures ci-dessous. La Figure 7 représente le PSNR moyen sur 50 images transmises en fonction de la fréquence Doppler normalisée $f_D T_s$. On retrouve une caractéristique remarquable du canal radiomobile : plus la fréquence Doppler normalisée est faible et plus la durée moyenne des évanouissements est longue. Cela se traduit soit par une image transmise quasiment sans erreurs soit très dégradée.

La Figure 8 représente le gain apporté par l'algorithme de reconstruction lorsqu'il est appliqué aux images les plus dégradées de la Figure 7. On constate ainsi l'efficacité de l'algorithme de restauration qui permet un gain supérieur à 3 dB sur plus de deux décades de la fréquence Doppler normalisée. L'ensemble de ces résultats étant obtenu pour un TEB moyen de 3%.

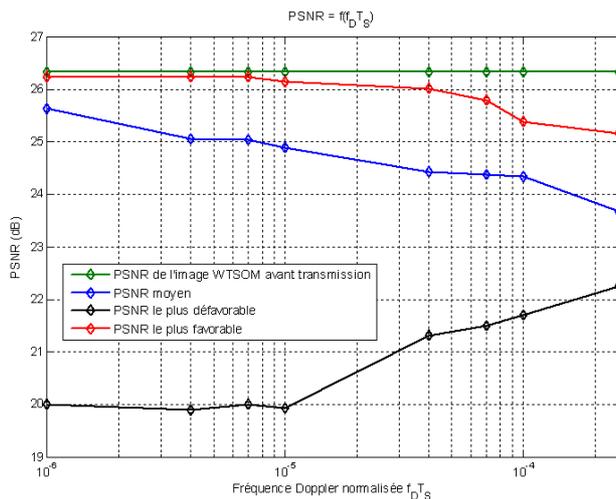


Figure 7 : Transmission WTSOM $PSNR = f(f_D T_s)$

Nous avons présenté un système de transmission d'images fixe robuste sur canal radiomobile sélectif en temps et en fréquence permettant une bonne qualité visuelle pour des TEB allant jusqu'à 5%. Ces résultats sont obtenus grâce à

un codeur de source hiérarchique robuste associé à des techniques simples de communications numériques combinées à un algorithme de restauration d'image basé sur les EDP et qui permet un gain en PSNR pouvant dépasser 4 dB. Le rendement global du système (CCE sur LL3, CCE CRC masque, pilotes) est de $R = 0,65$ soit bien supérieur à la valeur couramment rencontrée (1/3) dans les applications du même type.

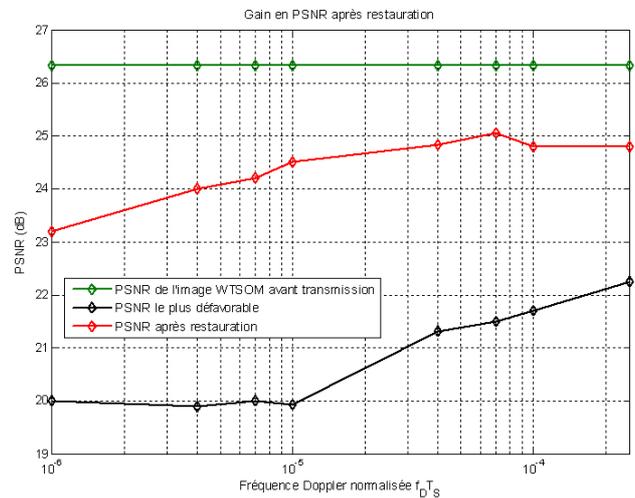


Figure 8 : Gain en PSNR apporté par la restauration

6. Références

- [1] F. Dufaux, F. Baruffa, G. Frescura, D. Nicholson, *JPWL - an extension of JPEG 2000 for wireless imaging*, IEEE ISCAS, Mai 2006.
- [2] V. Stankovic, R. Hamzaoui, and Z. Xiong, *Fast forward error protection algorithms for transmission of packetized multimedia bitstreams over varying channels*, in *Proc. IEEE Int. Conf. Communication*, Anchorage, AK, May 2003, pp. 40–44.
- [3] N. Thomos, N. Boulgouris, M. Strinzi, *Optimized transmission of JPEG2000, streams over wireless channels*, IEEE Transactions of image processing, Vol. 15, N°1, January 2006.
- [4] C. Chatellier, H. Boeglen, C. Perrine, C. Olivier, O. Haerberlé, *A robust joint source channel coding scheme for image transmission over the ionospheric channel*, ELSEVIER Signal Processing : Image Communication, à paraître
- [5] O. Aitsab, R. Pyndiah, B. Solaiman, "Joint optimization of multidimensional SOFM codebooks with QAM modulations for vector quantized image transmission", *3rd International workshop in signal/image processing*, pp. 3-6, Manchester, UK, November 1996.
- [6] H. Boeglen, C. Chatellier, O. Haerberlé, P. Bourdon, C. Olivier, *WTSOM : a robust still-image transmission scheme suitable for fading channels*, PSIP2007, January 2007.
- [7] M. Paetzold, *Mobile fading channels*, Wiley, 2002.

- [8] Hoehner P., Kaiser S., Robertson P., "Two-dimensional pilot-symbol-aided channel estimation by Wiener filtering", *ICASSP 97*, Munich, April 1997.
- [9] P. Perona, J. Malik, "Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion", *IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 12 (7)*, pp. 629-639, 1990.
- [10] P. Bourdon, C. Chatellier, B. Augereau, and C. Olivier, "A multi-resolution, geometry-driven error concealment method for corrupted JPEG color images", *EURASIP Signal processing: Image Communication 20 (7)*, pp. 681-694, August 2005.