

Etude de structures d'entrelacement canal adaptées à la diffusion vidéo par voie terrestre

Ronald GARZON BOHORQUEZ, Charbel ABDEL NOUR, Catherine DOUILLARD

Institut Mines-Télécom; Télécom Bretagne,
CNRS Lab-STICC UMR 6285 Technopôle Brest Iroise,
CS 83818 29238 Brest cedex 3
Université Européenne de Bretagne, France

ronald.garzonbohorquez@telecom-bretagne.eu, charbel.abdelnour@telecom-bretagne.eu
catherine.douillard@telecom-bretagne.eu

Résumé – Dans les systèmes de diffusion numérique terrestre de dernière génération, tels que DVB-T2, la fonction d'entrelacement canal est réalisée sous la forme d'une concaténation d'entrelaceurs élémentaires. Chacune de ses composantes est dédiée à un type de diversité spécifique (par exemple temporelle, fréquentielle). Une mauvaise interaction entre les différents entrelaceurs élémentaires peut induire des pertes de performance du système. D'autre part, la multiplication du nombre d'entrelaceurs dans la chaîne de transmission entraîne plusieurs mémorisations successives des données, la mémoire correspondante représentant un part non négligeable de la surface et de la consommation des équipements, en réception notamment. Grâce à la réduction du nombre d'entrelaceurs dans la chaîne de transmission, la structure d'entrelacement canal est simplifiée et la complexité matérielle peut être réduite. De plus, les entrelaceurs proposés permettent d'améliorer les performances du système dans le cas de transmission sur canaux sélectifs en fréquence et/ou variant dans le temps et présentant des phénomènes d'effacement.

Abstract – In cutting-edge terrestrial broadcast systems, such as the second generation digital video broadcast DVB-T2, the channel interleaving function is composed of a concatenation of elementary interleavers. Each of these interleaver components is dedicated to a specific type of diversity (e.g., time, frequency). A bad interaction between channel interleaver components can cause a degradation of the overall system performance. Furthermore, the implementation of several interleaver components requires successive data storage, which represents a considerable part of the silicon area and of the power consumption, particularly in reception. By reducing the number of interleaver components in the transmission chain, the structure of the channel interleaving is simplified and the system complexity can be reduced. In addition, the proposed interleavers show improved performance compared to the set of DVB-T2 channel interleavers, especially for transmissions over frequency and/or time selective propagation channels with erasures.

1 Introduction

Les systèmes de transmission numériques récents font de plus en plus appel à des fonctions d'entrelacement (*interleavers*) pour tirer parti du pouvoir de correction du codage canal. En effet, de nombreux canaux de transmission présentent un effet mémoire : les erreurs arrivent par paquets plutôt que de manière indépendante. Dans ce contexte, la fonction d'entrelacement canal a pour rôle de disperser les erreurs le plus uniformément possible. Dans le système de diffusion terrestre européen de deuxième génération DVB-T2, la chaîne de transmission contient trois composantes d'entrelacement canal [1] : un entrelaceur cellulaire (CI), un entrelaceur temporel (TI) et un entrelaceur fréquentiel (FI). Nous appellerons par la suite entrelaceur T2 l'entrelaceur canal regroupant ces trois composantes. L'implémentation de chacun de ces entrelaceurs introduit une latence additionnelle dans la chaîne de transmission et requiert une certaine quantité de mémoire. D'autre part, une mauvaise interaction entre les différents entrelaceurs élémentaires peut induire des pertes de performance du système. En effet, chaque composante est dédiée à un type de diversité spécifique, mais leurs interactions potentielles n'ont pas été prises en compte lors du développement du standard [1, 2]. Aussi

proposons-nous dans cet article une nouvelle méthode de conception de l'entrelaceur canal, basée sur l'optimisation conjointe des propriétés de distance spatiale ou *span* dans les domaines temporel et fréquentiel.

2 Description de l'entrelacement canal du standard DVB-T2

Les différents éléments de la chaîne de transmission DVB-T2, allant du codage correcteur d'erreurs au modulateur OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) sont présentés en figure 1 [1, 3].

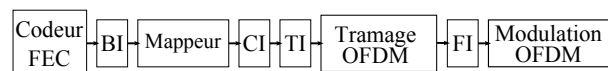


FIG. 1 – Chaîne de transmission DVB-T2.

Les données à transmettre sont codées initialement par un code BCH suivi d'un code *low density parity-check* (LDPC). Avant le codage bits à symbole (ou *mapping*) de la constellation, les bits de chaque mot de code sont brassés par le biais d'un entrelaceur bit (BI) [4]. Ensuite, les symboles de constel-

lation, encore appelés cellules dans le jargon DVB-T2, sont entrelacés par le CI. Puis le TI effectue un entrelacement colonne-ligne sur les différents mots de code qui composent la trame OFDM, constituée de NT symboles répartis sur NF porteuses. Finalement le FI réalise un entrelacement en fréquence sur chacun de ces symboles.

3 Méthode de conception pour entrelaceur canal

3.1 Critères de conception

Un entrelaceur canal performant doit permettre au récepteur de profiter des diversités temporelle et fréquentielle introduites par le code correcteur d'erreurs et l'OFDM. Pour ce faire, nous avons identifié comme essentielle lors de la conception de l'entrelaceur l'optimisation de ses propriétés de dispersion en temps et fréquence. Une implémentation possible de l'entrelaceur canal est montrée en figure 2. L'entrelaceur canal lit les cellules à partir des adresses i , $i = 0 \dots NT \times NF - 1$ de la trame OFDM d'entrée, et les écrit aux adresses $\Pi(i)$ dans la trame OFDM de sortie.

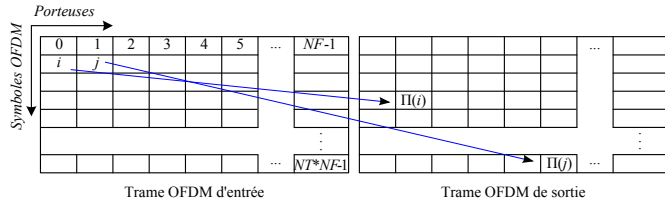


FIG. 2 – Représentation de l'entrelaceur canal sur la trame OFDM.

Les $spans$ temporel S_t et fréquentiel S_f minimaux associés à la cellule d'adresse i sont définis dans [5, 6] comme :

$$S_t(i) = \min_{j \neq i} [|t_i - t_j| + |t_{\Pi(i)} - t_{\Pi(j)}|] \quad (1)$$

$$S_f(i) = \min_{j \neq i} [|f_i - f_j| + |f_{\Pi(i)} - f_{\Pi(j)}|] \quad (2)$$

où t_u et f_u représentent les indices du symbole OFDM et de la porteuse de la cellule d'adresse u . La qualité d'un entrelaceur canal peut être évaluée en traçant les histogrammes de $span$ dans les domaines temporel et fréquentiel. Deux critères de conception de l'entrelaceur canal s'appuyant sur ces propriétés de $span$ peuvent être définis. Le premier critère consiste à maximiser les valeurs minimales des $spans$ temporel et fréquentiel, afin de casser efficacement les paquets d'erreurs en temps et en fréquence. D'autre part, on cherchera à minimiser le nombre de couples de cellules avec un $span$ faible, autrement dit la multiplicité.

3.2 Fonction d'entrelacement

Afin de réduire la complexité de la génération des adresses de l'entrelaceur canal, nous avons appliqué les critères d'optimisation décrits en section 3.1 sur une loi de permutation régulière, définie par :

$$\Pi(i) = P \times i \bmod NC \quad (3)$$

où NC représente le nombre total de cellules contenues dans une trame OFDM et P est la période de l'entrelaceur, qui doit être première avec NC afin d'assurer la bijectivité de la fonction d'entrelacement. P est calculé à partir des deux paramètres P_t et P_f , qui représentent les périodes équivalentes de l'entrelaceur dans les domaines temporel et fréquentiel, par :

$$P = P_t \times NF + P_f \quad (4)$$

La trame OFDM étant composée de NT symboles OFDM, les valeurs P_t éligibles sont les périodes d'entrelacement régulier permettant de maximiser la valeur minimale de $span$ pour un vecteur de taille NT . Une démarche similaire permet de trouver les valeurs P_f vis à vis du $span$ pour un vecteur de taille NF . Dans un second temps, parmi les valeurs de P obtenues à partir des différents couples (P_t, P_f) sélectionnés, sont retenues celles conduisant aux valeurs les plus élevées du $span$ temporel et fréquentiel dans la trame OFDM complète. La démarche de conception peut donc suivre les étapes suivantes :

Algorithme 1 Sélection de P

1. Identifier les candidats pour P_t comme étant les valeurs premières avec NT comprises entre 1 et $NT - 1$.
2. Identifier les meilleurs candidats pour P_t comme étant les valeurs qui maximisent la valeur minimale de $span$ d'un entrelaceur régulier dans un vecteur de taille NT .
3. Effectuer deux étapes similaires à 1. et 2. afin de choisir les candidats pour P_f par rapport au nombre de porteuses NF .
4. Calculer les différentes valeurs de P à l'aide de (4) avec les couples de valeurs P_t et P_f retenues. Choisir comme candidats pour P les valeurs qui sont premières avec NC .
5. Identifier les meilleurs candidats pour P comme étant les valeurs qui maximisent la valeur minimale de $span$ temporel et fréquentiel sur la trame OFDM.

4 Application au système de transmission DVB-T2

4.1 Conception de l'entrelaceur

Nous avons appliqué les critères définis précédemment dans la conception des entrelaceurs canal dans le cas d'une trame OFDM DVB-T2 composée de $NT=357$ symboles OFDM transmis sur $NF=1705$ porteuses (cellules QPSK, TI de longueur 100 ms). Premièrement, les meilleurs candidats pour P_t et P_f ont été identifiés. A titre d'exemple les candidats pour P_f retenus sont ceux permettant d'obtenir un $span$ minimum de 57 dans la figure 3. Deuxièmement, les meilleures valeurs de P ont été identifiées dans la trame OFDM conduisant aux valeurs de P et de $spans$ temporel et fréquentiel indiquées dans le tableau 1.

Dans un deuxième exemple d'application nous avons traité le cas d'une trame OFDM DVB-T2 composée de $NT=892$ symboles OFDM transmis sur $NF=1705$ porteuses (cellules QPSK, TI de longueur 250 ms). L'optimisation suivant les critères dé-

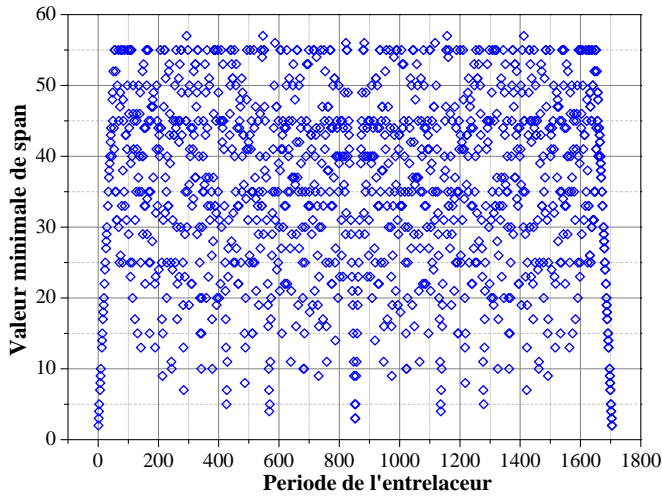


FIG. 3 – Périodes possibles pour un entrelaceur régulier dans un vecteur de taille $NF=1705$.

TAB. 1 – Valeurs de P retenues pour $NT=357$ et $NF=1705$, avec S_f minimum de 57 et multiplicité 588693.

P	S_t min/Multiplicité
40627	23/97862
40373	23/182698
284188	23/203740

finis précédemment a conduit aux valeurs de P et de *spans* temporel et fréquentiel indiquées dans le tableau 2.

TAB. 2 – Valeurs de P retenues pour $NT=892$ et $NF=1705$, avec S_f minimum de 57 et multiplicité 1470908.

P	S_t min/Multiplicité
483927	40/1082892
661247	38/655872
992017	38/704550

D'après [5], les valeurs de *span* minimal admettent pour bornes supérieures $\sqrt{2 \times NT}$ et $\sqrt{2 \times NF}$ en temps et en fréquence soit, dans le cas des exemples traités précédemment, 26 et 58 pour un TI de longueur 100 ms et 42 et 58 pour un TI de longueur 250 ms. Les entrelaceurs proposés présentent des valeurs de *span* proches de ces bornes (voir tableaux 1 et 2). En revanche, une analyse de l'entrelaceur T2, constitué des trois composantes CI, TI et FI, montre que le *span* minimum peut avoir des valeurs très faibles pour certaines tailles de trame OFDM. Pour les deux exemples cités précédemment, des valeurs de *span* minimales de 0 et de 1, en temps et en fréquence respectivement, ont été observées. Ces faibles valeurs sont dues à une mauvaise interaction entre les entrelaceurs élémentaires et peuvent entraîner des pertes de performance du système lors de conditions de transmissions sévères, où le code correcteur d'erreurs est amené aux limites de son pouvoir de correction.

4.2 Interaction avec l'entrelaceur bit

Les bits corrélés dans un mot de code LDPC peuvent être définis comme les bits qui sont connectés au même nœud de vérification de parité. Le rôle de l'entrelaceur bit (BI) est d'assurer que les bits corrélés soient distribués dans des symboles de la constellation (cellules) différents. Pour assurer une bonne interaction entre les entrelaceurs canal proposés et le BI, les bits corrélés doivent être distribués dans des cellules différentes et voisines. Ensuite, ces cellules sont étalées en temps et en fréquence par l'entrelaceur canal assurant que les bits corrélés ne seront placés ni dans la même cellule ni dans des cellules voisines. Dans notre cas d'étude, le mot de code a une taille de 16 200 bits avec des cellules QPSK et un rendement de codage 2/3. Pour ces paramètres, le BI du standard DVB-T2 distribue les bits corrélés dans des cellules différentes et éloignées dans la trame [2], ce qui n'est pas adapté aux entrelaceurs canal proposés. Afin d'identifier les bits corrélés dans le mot de code nous avons utilisé l'entrelaceur de bits de parité et la matrice d'entrelacement colonne-ligne du BI défini pour le cas des cellules 16-QAM. Les bits corrélés sont alors placés sur une même ligne comme indiqué sur la figure 4. Finalement, les bits corrélés ne sont plus lus du bloc ligne par ligne, mais de façon à les distribuer dans des cellules voisines.

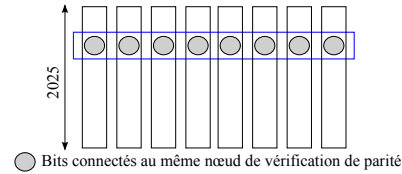


FIG. 4 – Matrice d'entrelacement colonne-ligne.

5 Etude des performances

Les performances des entrelaceurs proposés dans les deux cas étudiés (longueur de TI 100ms et 250 ms) ont été évaluées et comparées à celles de l'entrelaceur T2, sur les canaux de transmission P1 (Rayleigh, figure 5) et TU6 (canal en milieu urbain typique à 6 coefficients, figure 6) définis dans [2]. Nous avons de plus considéré un scénario de transmission avec un effacement régulier de 15% des porteuses. Ce type d'effacement peut être causé par des sources de bruit artificiel, par exemple un système d'allumage moteur [7]. Les simulations ont été effectuées avec les paramètres suivants : code LDPC de taille 16 200 bits (taille codée), rendement de codage 2/3, 50 itérations de décodage avec l'algorithme somme-produit [8], constellation QPSK, taille FFT de 2k et intervalle de garde 1/4. Pour des simulations sur le canal mobile TU6, la fréquence Doppler maximale a été fixée à 166.7 Hz.

Les figures 5 et 6 montrent que les performances en termes de taux d'erreurs binaires (TEB) du premier entrelaceur régulier dans les deux cas étudiés sont assez proches du T2 sur des canaux sans effacements. Néanmoins, lorsque la trame OFDM est soumise à un motif d'effacement régulier, les entrelaceurs proposés affichent des gains atteignant 0.5 et 0.8 dB sur les ca-

naux TU6 et P1 respectivement. Bien que l'incrément en longueur d'entrelacement temporelle du T2 permette au système de profiter d'une plus large diversité temporelle et d'atteindre une amélioration en terme de TEB (voir figure 6), le gain obtenu avec l'entrelaceur proposé est maintenu lorsque la trame OFDM est soumise à un motif d'effacement régulier. L'entrelaceur proposé montre ainsi tout son intérêt dans des conditions de transmissions particulièrement difficiles.

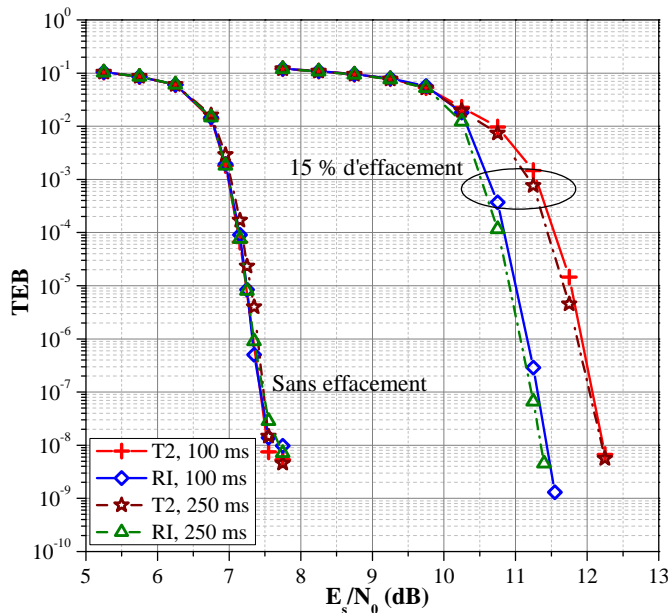


FIG. 5 – Comparaison des performances de l'entrelaceur régulier proposé et de l'entrelaceur DVB-T2 sur canal P1.

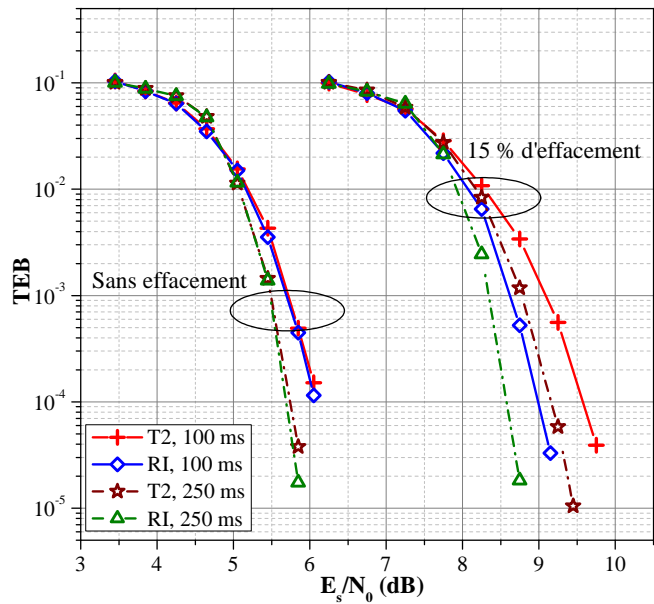


FIG. 6 – Comparaison des performances de l'entrelaceur régulier proposé et de l'entrelaceur DVB-T2 sur canal TU6.

6 Conclusion

Une nouvelle méthode de conception d'entrelaceurs canal a été présentée. Cette méthode est basée sur l'optimisation conjointe des propriétés de *span* de l'entrelaceur en temps et en fréquence. Les simulations effectuées ont montré que les entrelaceurs proposés permettent d'améliorer les performances du système de transmission DVB-T2 lorsque la trame OFDM est soumise à un motif d'effacement régulier. D'un autre côté, la simplification de la structure d'entrelacement canal permet de mieux maîtriser les paramètres de conception et peut apporter des gains en complexité matérielle.

Références

- [1] ETSI, "Digital video broadcasting (DVB) : frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)," EN 302 755 (V1.3.1), April 2012.
- [2] —, "Digital video broadcasting (DVB) : implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)," TS 102 831 (V1.2.1), August 2012.
- [3] M. Mendicute, I. Sobrón, L. Martínez, and P. Ochandiano, "DVB-T2 : new signal processing algorithms for a challenging digital video broadcasting standard," in *Digital Video*. Croatia : InTech, 2010, pp. 185–206.
- [4] T. Yokokawa, M. Kan, S. Okada, and L. Sakai, "Parity and column twist bit interleaver for DVB-T2 LDPC codes," in *Turbo Codes and Related Topics, 5th International Symposium on*, 2008, pp. 123–127.
- [5] S. Crozier, "New high-spread high-distance interleavers for turbo-codes," in *Proceedings of the 20th Biennial Symposium on Communications, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, May 2000*, pp. 3–7.
- [6] C. Berrou, Y. Saouter, C. Douillard, S. Kerouedan, and M. Jezequel, "Designing good permutations for turbo codes : towards a single model," in *Proc. IEEE International Conference on Communications, (ICC'04)*, vol. 1. IEEE, Jun. 2004, pp. 341–345.
- [7] J. Lago-Fernandez and J. Salter, "Modelling impulsive interference in DVB-T : Statistical analysis, test waveforms and receiver performance," in *BBC R&D White Paper WHP 080*, April 2004. [Online]. Available : <http://downloads.bbc.co.uk/rd/pubs/whp/whp-pdf-files/WHP080.pdf>
- [8] F. Kschischang, B. Frey, and H.-A. Loeliger, "Factor graphs and the sum-product algorithm," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 47, no. 2, pp. 498 – 519, feb 2001.