

# Une méthode simple de turbo estimation de source en décodage conjoint source-canal

Marion JEANNE<sup>1</sup>, Valérian MANNONI<sup>2</sup>, Pierre SIOHAN<sup>2</sup> \*

<sup>1</sup>INRIA Rennes

Campus universitaire de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex, France

<sup>2</sup>France Télécom, RESA/BWA

4, rue du Clos Courtel, B.P. 59, 35512 Cesson-Sévigné Cedex, France

marion.jeanne@irisa.fr, valerian.mannoni@francetelecom.com

pierre.siohan@francetelecom.com

**Résumé** – Le principe du décodage conjoint source-canal (DCSC) est d'utiliser des connaissances *a priori* sur la source afin de réduire les taux d'erreur au décodeur en exploitant la redondance résiduelle de la source compressée. Le plus souvent les auteurs supposent que les statistiques de la source sont parfaitement connues du décodeur. Nous proposons ici une méthode simple d'estimation de ces statistiques dans le cas de sources codées en longueur variable. Des simulations, réalisées avec un turbo code, illustrent la convergence de l'estimateur et la possibilité d'atteindre les limites de performance de cette méthode de DCSC.

**Abstract** – The basic principle of joint source-channel decoding is to use *a priori* source knowledge in order to reduce the error rates at the decoder side taking advantage of the residual redundancy left in the compressed source. More often authors assume that the source statistics are perfectly known by the receiver. Here, we propose a simple estimation method of these statistics in the case of variable length encoded sources. Simulations carried out with a turbo code illustrate the estimator convergence as well as the possibility to reach the performance limits of this JSCD method.

## 1 Introduction

Le décodage conjoint source-canal (DCSC) apparaît de plus en plus fréquemment en tant que solution alternative à la technique de décodage conventionnel dite séparée, ou tandem. Dans la présente étude, nous nous intéressons au DCSC pour une source codée en longueur variable. Cette situation intéressante en terme de compression correspond cependant à un cas plus critique pour la transmission. De fait de nombreuses techniques de DCSC de codes à longueur variables (CLV) ont été proposées ces dernières années [1]. Un de leurs points communs est la nécessité de s'appuyer sur la structure du codeur CLV et de ses statistiques pour améliorer les performances globales du décodeur dans des conditions de transmission données. Le plus souvent les auteurs supposent que ces statistiques sont exactement connues au décodeur. En pratique cela n'est pas le cas dans grand nombre d'applications en raison du coût en débit nécessaire pour les transmettre, qui est encore plus particulièrement important pour les sources non-stationnaires.

Ce problème d'estimation d'une source CLV est abordé dans [2] avec une méthode d'estimation non paramétrique. Les auteurs se placent dans un contexte de décodage souple source et utilisent une technique de type BCJR [3] pour le calcul des probabilités stationnaires d'une source sans mémoire. Dans [4] l'estimation est de type Baum-Welch et s'insère dans un schéma de DCSC de type turbo avec échange d'informations extrinsèques à chaque itération entre décodeur canal et décodeur source. A noter aussi qu'une méthode paramétrique est proposée dans

[5], elle montre la difficulté d'obtenir un modèle à la fois suffisamment simple et précis pour représenter des phénomènes réels dès qu'ils sont un peu complexes, en l'occurrence il s'agit de coefficients CLV associés aux vecteurs-mouvement d'un codeur vidéo.

Dans notre étude le but initial est d'obtenir, comme dans [4], une méthode générique applicable à des sources avec ou sans mémoire que l'on code en CLV. Toutefois, par rapport à [4], où le décodeur source repose sur une variante du décodage BCJR appliqué sur un treillis bit-symbole à grand nombre d'états, nous souhaitons ici limiter la complexité. Nous considérons alors un schéma de transmission où le train binaire résultant du codeur CLV est protégé par un turbo code et une méthode de DCSC de type décodage canal aidé par la source (DCAS) [6]. Toutefois, au lieu de supposer comme en [6] que la statistique de la source est parfaitement connue au récepteur, nous proposons de l'estimer dans la boucle de turbo décodage.

En section 2 nous rappelons le principe de la méthode DCAS et nous y décrivons le module proposé pour la turbo estimation de la statistique de la source. La section 3 illustre les capacités de convergence de notre méthode d'estimation et les performances du décodeur DCAS correspondant.

## 2 Le décodage canal aidé par la source

### 2.1 Principe du DCSC par contrôle de la source

L'objectif en DCAS est d'améliorer le décodage du code canal par l'utilisation au niveau bit d'une information source  $a$

\* Cette étude a été réalisée dans le cadre du réseau NewCom.

*a priori* calculée, pour une structure de CLV donnée, à partir des probabilités d'occurrences des symboles source [6]. Ceci est effectué en établissant une bijection entre l'arbre du CLV et le treillis du code correcteur d'erreur. Par rapport à un schéma tandem, les gains de performance du décodeur sont en relation directe avec la redondance résiduelle de la source.

La figure 1 donne un exemple d'un arbre CLV, où l'ensemble  $\mathcal{C} = \{c^1, c^2, \dots, c^C\}$  représente les symboles source. Chaque symbole  $c^j \in \mathcal{C}$  s'écrit comme  $c^j = [c^j(1), \dots, c^j(i), \dots]$  où  $c^j(i)$  est le  $i^{\text{ième}}$  bit du mot de code représentant le symbole  $c^j$  (soit par exemple  $c^5 = [1, 1]$ ).

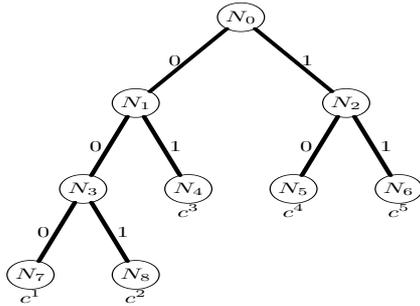


FIG. 1 – Arbre d'un CLV.

La chaîne de communication avec le décodeur DCAS est présentée à la figure 2. Le canal considéré ici est le canal à Bruit Additif Blanc Gaussien (BABG). Le module d'estimation source (cf. 2.2) nécessite un décodage canal itératif. Ici, comme dans [6], nous utilisons un turbo code avec, pour générer les informations extrinsèques (Ext), un algorithme de décodage sous optimal (Max-Log-MAP) par rapport au BCJR mais aussi moins complexe. Au niveau source le fait de réaliser un décodage dur des CLV se traduit aussi par une réalisation de complexité moindre que celle résultant d'un décodage souple source effectué sur un treillis [4].

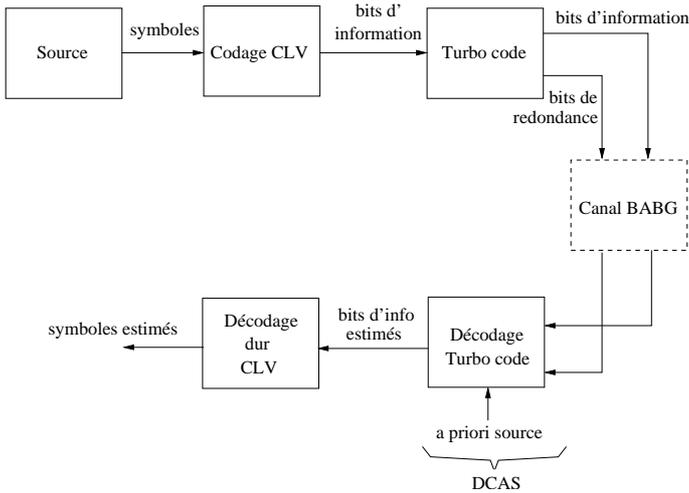


FIG. 2 – Chaîne de transmission en décodage conjoint source canal.

## 2.2 Turbo-estimation de la statistique de la source

La figure 3 détaille la structure du décodeur canal contrôlé par la source avec turbo-estimation des statistiques de cette

dernière. L'objectif du turbo-estimateur est ici de calculer, pour chacun des symboles source, les probabilités d'occurrences stationnaires pour une source sans mémoire et aussi celles de transitions pour une source markovienne. Ainsi chaque itération de ce turbo-estimateur se compose de 4 étapes. La première étape consiste à décider des bits d'information à partir des probabilités *a posteriori* (APPs) en sortie du second décodeur canal. La table de CLV fournit la séquence de symboles source résultante. La réalisation d'un histogramme permet ensuite d'estimer pour chaque symbole le nombre transmis ou encore, en gardant en mémoire la trace du symbole précédent ayant été décodé, le nombre correspondant à chaque couple successif de symboles. Finalement, à partir de cet histogramme, nous calculons les probabilités stationnaires et, si nécessaire, celles de transition entre symboles. Pour le cas stationnaire, l'estimation de la probabilité d'occurrence du  $n^{\text{ième}}$  symbole à l'itération  $l$  de décodage  $\hat{P}^{(l)}(c^n)$  s'écrit :

$$\hat{P}^{(l)}(c^n) = \frac{N_{S_{dec}}^{(l)}(c^n)}{N_{S_{dec}}^{(l)}}, n = 1, \dots, C \quad (1)$$

où  $N_{S_{dec}}^{(l)}$  désigne le nombre total de symboles source décodés à l'itération  $l$  et  $N_{c^n}^{(l)}$  le nombre de symboles  $c^n$  décodés à cette même itération. Après avoir déterminé à l'itération courante la statistique de la source, il suffit maintenant de calculer les probabilités de branche de l'arbre du CLV afin de réaliser la conversion symbole-bit de la figure 3. Ce calcul de probabilités estimées peut s'effectuer de manière similaire à celui décrit en [6] pour des probabilités supposées connues exactement. Nous posons  $I_k^j = \{n \in \mathbf{N} | \forall i < k, c^n(i) = c^j(i)\}$  comme étant l'ensemble des indices de tous les mots de code possédant les mêmes  $k - 1$  premiers bits que le mot de code  $c^j$ . Par convention, nous fixons  $I_1^j = \{1, \dots, C\}$ . Les probabilités estimées du symbole  $c^j$  et celle du bit  $c^j(i)$  seront notées respectivement  $\hat{P}(c^j)$  et  $\hat{P}(c^j(i))$ . La probabilité de chaque branche de l'arbre représentant le code CLV (correspondant chacune à une probabilité binaire) peut être exprimée à l'aide des probabilités des symboles source (ici estimées) et par exploitation de la structure de l'arbre. L'estimation à l'itération  $l$  de la probabilité de chaque branche dans le cas d'une source sans mémoire peut s'exprimer, pour  $k > 1$ , par la relation suivante :

$$\hat{P}^{(l)}(c^j(k) | c^j(1), \dots, c^j(k-1)) = \frac{\sum_{n \in I_k^j | c^n(k) = c^j(k)} \hat{P}^{(l)}(c^n)}{\sum_{n \in I_k^j} \hat{P}^{(l)}(c^n)} \quad (2)$$

Si les symboles source présentent une relation markovienne d'ordre 1, les calculs des différentes probabilités binaires doivent être revus en considérant chaque symbole comme un symbole précédent possible, soit :

$$\forall c^m \in \mathcal{C}, \hat{P}^{(l)}(c^j(k) | c^j(1), \dots, c^j(k-1), c^m) = \frac{\sum_{n \in I_k^j | c^n(k) = c^j(k)} \hat{P}^{(l)}(c^n | c^m)}{\sum_{n \in I_k^j} \hat{P}^{(l)}(c^n | c^m)} \quad (3)$$

Ensuite, tel que présenté dans [6], ces probabilités, *a priori* binaires relatifs à la source, interviennent dans le calcul des APPs et de l'extrinsèque du premier décodeur canal.

A l'itération suivante de turbo décodage on recommence ce processus, ce qui permet d'affiner l'estimation des probabilités

des symboles de la source, et donc les *a priori* source utilisés dans le turbo décodage. L'initialisation des probabilités symboles est effectuée en supposant que tous les symboles sont équiprobables.

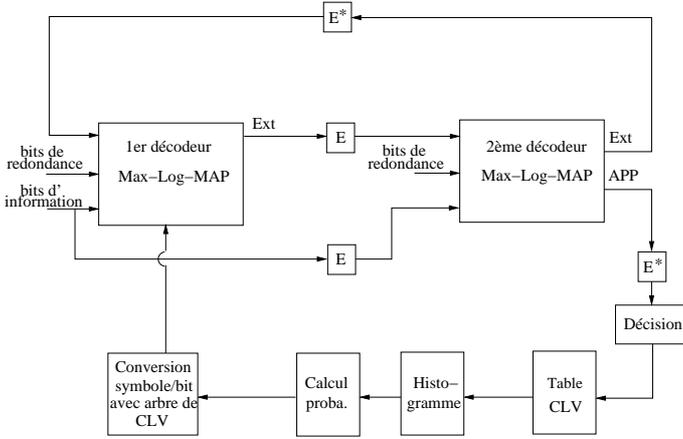


FIG. 3 – Turbo décodage conjoint source-canal avec estimation de la source.

### 3 Résultats de simulation

Dans toutes nos simulations, pour limiter la propagation des erreurs nous avons construit des paquets de  $M \times M$  bits. Ces données sont protégées par un turbo code poinçonné de rendement  $1/2$ , dont l'entrelaceur ligne-colonne ( $E$ ) est également de taille  $M \times M$ . Ce code est formé par une concaténation parallèle de deux codeurs convolutifs systématiques et récursifs de même polynôme générateur égal à  $(1 + D + D^2 + D^4)/(1 + D^3 + D^4)$ . Dans un premier temps nous présentons une étude de convergence du turbo-estimeur. Ensuite nous illustrons ses performances en transmission.

#### 3.1 Etude de convergence

L'étude de convergence a pour but d'évaluer la capacité du turbo-estimeur proposé à fournir des estimations sans biais et suffisamment précises. Pour ce faire, nous considérons une source Gauss-Markov de coefficient de corrélation 0,9 obtenue par une quantification uniforme avec 4 symboles (GM4) et nous nous intéressons à l'estimation des 16 probabilités de transition. La qualité de cette estimation va naturellement fortement dépendre de la taille de bloc (et donc d'entrelaceur) car elle influe à la fois sur les statistiques générées et sur les performances du turbo code.

Les simulations ont été effectuées pour différentes tailles d'entrelaceur, en générant un minimum de 15625 blocs et en se plaçant à un taux d'erreur symbole (TES) constant de  $10^{-3}$ . Ainsi, la figure 4 montre, pour le symbole  $c^2$ , l'évolution au cours des itérations de décodage de l'écart quadratique moyen (EQM) entre la probabilité estimée à l'itération  $l$ , que l'on note  $\hat{P}^{(l)}(c^2|c^2)$ , et la probabilité effectivement générée par bloc de taille  $M \times M$ , notée  $P_M(c^2|c^2)$ . On peut considérer que ces courbes obtenues pour le symbole  $c^2$ , tel que  $P(c^2|c^2) =$

0.6467, sont représentatives de celles obtenues pour l'ensemble des symboles. Comme attendu l'estimation de la statistique de la source s'affine avec les itérations, cependant quelle que soit la taille du bloc elle présente un biais par rapport à la probabilité réellement générée. On note également que ce biais est d'autant plus faible que la taille du bloc est importante.

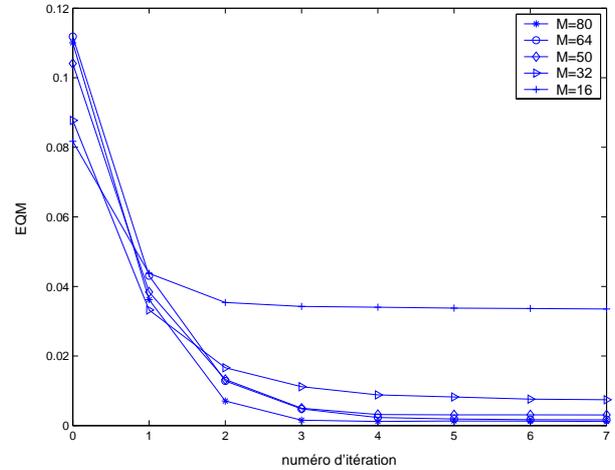


FIG. 4 – Evolution de l'EQM (pour  $c^2$ ) au cours des itérations de décodage entre les probabilités estimée et générée pour différentes tailles de bloc ( $M \times M$ ).

Sur la figure 5, nous avons représenté en fonction de la taille du bloc les EQM entre, d'une part,  $P_M(c^2|c^2)$  et  $P(c^2|c^2)$  puis, d'autre part, entre  $P_M(c^2|c^2)$  et  $\hat{P}^{(7)}(c^2|c^2)$ . Nous observons alors que le biais entre la statistique théorique et celle réellement générée s'amenuise avec l'augmentation de la taille du bloc. En effet plus la taille du bloc est conséquente plus un bloc de symboles sera représentatif de la statistique théorique. Notons également, avec la courbe en trait continu, que la turbo estimation permet de s'approcher très précisément de la valeur de probabilité effectivement générée. Ce dernier résultat illustre aussi l'intérêt de réaliser une estimation de la source au récepteur même dans le cas où l'on dispose d'un modèle théorique de la statistique de source.

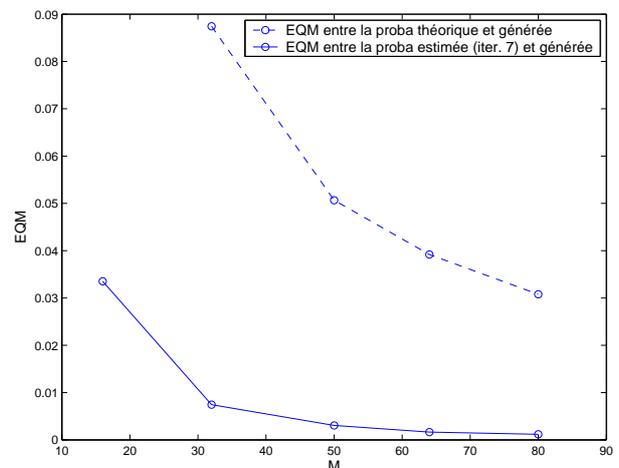


FIG. 5 – Evolution de l'EQM (pour  $c^2$ ) en fonction de la taille du bloc  $M \times M$  entre la probabilité théorique et celle générée et entre la probabilité estimée à l'itération 7 et la probabilité générée.

### 3.2 Etude des performances

En pratique un système de DCAS va fonctionner, soit en utilisant un modèle théorique de la statistique de source, soit en l'estimant. Dans nos simulations, nous comparons ces deux possibilités avec le schéma tandem pour deux sources de nature différente. Nous reprenons la source théorique GM4 et nous introduisons une source réelle correspondant aux CLV produits par un codeur vidéo MPEG-4 lors du codage des coefficients DC de luminance des images Intra (I) de la séquence Foreman. La redondance résiduelle relative, écart normalisé, noté  $\rho_r$ , entre la longueur moyenne de symboles et l'entropie de la source est plus élevée pour la source GM4 ( $\rho_r = 0,45$ ) que pour la source DC à 16 symboles également supposée markovienne ( $\rho_r = 0,16$ ). L'entrelaceur ligne-colonne retenu est tel que  $M = 64$ . Les courbes correspondantes en TES en fonction du Rapport Signal à Bruit (RSB), exprimé par la quantité ( $E_b/N_0$ ), sont représentées aux figures 6 et 7.

Avec un gain en RSB de l'ordre de 1,3 dB pour un  $TES=10^{-2}$ , la figure 6 montre à nouveau l'intérêt des méthodes de DCSC par rapport à la solution tandem. A partir de l'itération 3, elle confirme également l'avantage, déjà noté lors de l'étude de convergence, de la turbo estimation en comparaison de l'utilisation du modèle théorique.

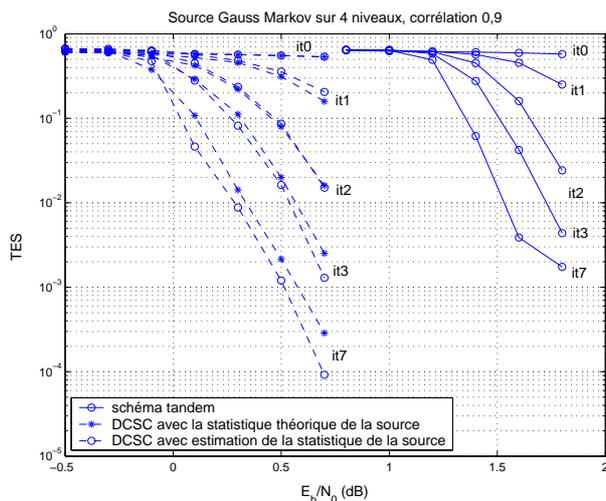


FIG. 6 – TES pour les 3 systèmes de décodage turbo de la source GM4 à différentes itérations de décodage.

Pour la source de coefficients DC issus de la séquence Foreman, nous considérons que la statistique théorique est constituée à partir des probabilités (stationnaires et de transitions) obtenues sur toute la séquence des 150 images codées en intra. La figure 7 montre qu'à nouveau le DCSC permet une amélioration par rapport au décodage tandem. Le gain en RSB, au mieux de l'ordre de 0,35 dB pour un  $TES=10^{-2}$ , est toutefois moindre qu'avec la source GM4, ce qui peut s'expliquer par la plus faible valeur de  $\rho_r$ . Une autre différence est liée à la moins bonne performance du module de turbo estimation qui se traduit pas une perte de 0,1 dB par rapport à l'utilisation des statistiques théoriques (connaissance parfaite de la source). Par rapport à la source GM4, cette perte provient vraisemblablement de la plus grande quantité d'informations à estimer, avec les  $16 \times 16$  (au lieu des  $4 \times 4$ ) termes de probabilités de transition pour une même taille d'entrelaceur. Toutefois, les courbes

à  $E_b/N_0$  donné montrent que des faibles écarts en RSB peuvent se traduire par des variations importantes du TES et donc avoir un fort impact sur les séquences vidéo MPEG-4 reconstruites.

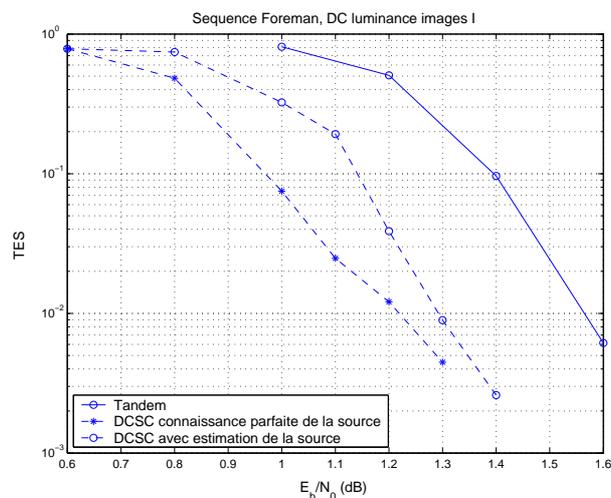


FIG. 7 – TES à l'itération 7 pour les 3 systèmes de décodage turbo et la source de CLV de luminance intra obtenue pour la séquence Foreman.

## 4 Conclusion

Nous avons proposé une technique simple pour l'estimation de statistiques de sources codées en longueur variable. Cet estimateur peut s'intégrer en particulier dans des procédures de DCSC où le décodeur canal est itératif. Les études de convergence ont montré l'avantage de la turbo estimation, par rapport à l'utilisation de modèles théoriques de probabilité, en particulier lorsque les blocs de données sont de faible taille. Dans tous les cas, source théorique ou réelle, la turbo estimation permet d'améliorer les performances en transmission par rapport au schéma tandem.

## Références

- [1] C. Guillemot and P. Siohan. Joint source-channel decoding of variable length codes with soft information : A survey. *JASP*, 6 :906–927, June 2005.
- [2] J. Wen and J. D. Villasenor. Utilizing soft information in decoding of variable length codes. In *Proc. of DCC*, Snowbird, USA, March 1999.
- [3] L. R. Bahl, J. Cocke, F. Jelinek, and J. Raviv. Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate. *IEEE Trans. on Information Theory*, pages 284–287, March 1974.
- [4] C. Weidmann and P. Siohan. Décodage conjoint source-canal avec estimation en ligne de la source. In *CORESA'03*, Lyon, France, January 2003.
- [5] A. H. Murad and T. E. Fuja. Joint source-channel decoding of variable length encoded sources. In *Proc. of ITW*, pages 94–95, Killarney, Ireland, June 1998.
- [6] M. Jeanne, J-C. Carlach, and P. Siohan. Joint source channel decoding of variable length codes for convolutional codes and turbo codes. *IEEE Trans. on Communications*, 53(1) :10–15, January 2005.