

# Protocole HARQ coopératif sur des canaux non-orthogonaux

Haïfa FARÈS<sup>1</sup>, Charlotte LANGLAIS<sup>1</sup>, Sidi Ould MOHAMED<sup>1</sup>, Marion BERBINEAU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut Mines-Télécom, Télécom Bretagne, CNRS Lab-STICC UMR 3192  
Département Electronique, Technopôle Brest Iroise, CS 83818 29238 Brest Cedex 3

<sup>2</sup>Université Lille Nord de France, IFSTTAR, LEOST, F-59650 Villeneuve d'Ascq, France  
{haifa.fares, charlotte.langlais}@telecom-bretagne.eu, marion.berbineau@ifsttar.fr

**Résumé** – Dans ce papier, nous proposons d'améliorer l'efficacité de la transmission dans un système de coopération turbo codée, en appliquant un protocole de retransmission adaptatif à deux niveaux de décision et en adoptant la technique de détection multi-utilisateurs IDMA (*Interleave Division Multiple Access*) afin de pouvoir opérer en mode non-orthogonal et gagner d'avantage en efficacité. Les performances en termes de taux d'erreurs binaire et en termes d'efficacité spectrale sont évaluées par rapport au système de coopération turbo codée orthogonal original.

**Abstract** – In this paper, we exploit the limited feedback applied to the two-source turbo coded cooperation scheme to define a particular cooperative HARQ protocol, where the decision on retransmission at each node is conditioned by two levels: first by the feedback from the destination and second by the feedback from the partner node. The proposed system is studied over non-orthogonal channels. The interleaved-division multiple-access (IDMA) is used for multi-source detection. The performance are evaluated in terms of reliability (Bit error rate) and efficiency (throughput efficiency), with respect to the original orthogonal turbo coded cooperation system.

## 1 Introduction

L'avantage majeur des communications coopératives est de permettre à plusieurs sources de partager leurs antennes afin d'exploiter la diversité spatiale distribuée. La coopération turbo codée est un exemple de mise en oeuvre pratique de la coopération entre sources, qui profite à la fois de la diversité de coopération, du codage de canal et du gain du traitement turbo [1]. Dans ce système, deux sources coopèrent en transmettant soit leur propre information, soit l'information préalablement décodée de la source partenaire. Le codage utilisé fait appel à un turbo code distribué sur les deux sources. Un code CRC permet de détecter si les mots de codes sont correctement décodés ou non à chaque source. Cependant, comme tous les schémas de coopération en mode half-duplex, l'efficacité spectrale est dégradée par l'utilisation d'une phase supplémentaire allouée à la coopération. Dans [2], dans le but de réduire cette dégradation, nous avons défini un protocole de coopération adaptatif qui combine à la fois les avantages de la coopération turbo codée et des protocoles de retransmission hybride (*Hybrid Automatic Repeat Request*, HARQ) à redondance incrémentale (*Incremental Redundancy*, IR). Un des mécanismes de ce protocole consiste ainsi à supprimer la phase de coopération lorsque la destination a correctement décodé le message des deux sources. Le même objectif peut également être atteint en transmettant de manière non-orthogonale lors de la phase de coopération : les signaux des sources sont alors superposés. Dans [3], dans le contexte d'un système de coopération turbo codée, l'interférence multiaccès ainsi générée est maîtrisée grâce à la technique IDMA (*Interleave Division Mul-*

*tiple Access*). Dans ce papier, nous proposons alors d'associer le protocole de coopération adaptatif défini dans [2] à la technique IDMA autorisant une transmission non-orthogonale sur la phase de coopération, tel que défini dans [3].

## 2 Représentation du système

Nous considérons un réseau sans fil composé de deux sources  $s_1$  et  $s_2$  qui coopèrent en vue de transmettre des données statistiquement indépendantes vers une destination unique  $d$ . Les deux sources sont équipées de deux encodeurs  $C_a$  et  $C_b$  dont les rendements respectifs sont  $R_a$  et  $R_b$ .

Dans ce qui suit, nous décrivons brièvement le protocole de la coopération turbo codée en absence d'HARQ et en mode non-orthogonal sur la phase de coopération, tel que décrit dans [3]. Le chronogramme du protocole est donné dans la Figure.1. Ce protocole est composé de deux phases de transmission: une première phase, appelée phase de diffusion et une seconde, appelée phase de coopération. Afin de limiter la complexité des sources, une transmission en mode half-duplex est choisie. Ainsi, pendant la première phase de transmission, les sources sont contraintes à transmettre sur des canaux orthogonaux en optant pour la technique d'accès multiple par répartition temporelle (*Time Division Multiple Access*, TDMA). Durant la phase de coopération les deux sources peuvent transmettre simultanément. La séparation des signaux repose sur la technique IDMA, où chaque source est différenciée grâce à un entrelaceur qui lui est propre. Sans perte de généralité, nous nous concentrons sur les informations générées au noeud  $s_1$ , avec  $s_2$  appelé parte-

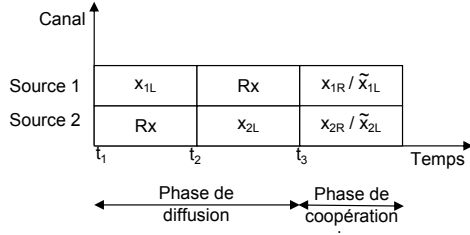


FIG. 1: Le temps de transmission est divisé en deux phases: une phase de diffusion orthogonale (deux slots de temps pour chaque source) et une phase de coopération non-orthogonale (un slot de temps unique alloué aux deux sources).

naire. La transmission des données  $u_{iL}$ , de longueur  $K$  bits, est effectuée sur deux slots de temps, appelés aussi phases [1]:

1. Dans la première phase, la source  $s_1$  encode  $u_{1L}$  par  $C_a$  en  $x_{1L}$ , un mot de code de longueur  $N_a = K/R_a$  bits. En raison de la nature du canal sans fil, deux versions bruitées de  $x_{1L}$ ,  $y_{1L}^d$  et  $y_{1L}^{s_2}$ , sont présentes, respectivement, à la destination et au partenaire.
2. A la deuxième phase,  $u_{1L}$  est alors entrelacé puis encodé par  $C_b$  en  $x_{2R}$ , de longueur  $N_b = K/R_b$  bits. Si le décodage au niveau de la source  $s_2$  a échoué, ce noeud fonctionne dans le mode de transmission (non-coopératif). L'information locale à la source  $s_2$ ,  $u_{2L}$ , est alors entrelacée puis encodée par  $C_b$  en  $\tilde{x}_{2L}$ . Durant cette deuxième phase, une opération similaire est également effectuée au niveau de la source  $s_1$ . Ainsi, nous définissons les vecteurs  $x_{1R}$ ,  $\tilde{x}_{1L}$  et  $\tilde{y}_{1L}^d$ . Notez que  $x_{2L} = \tilde{x}_{1L}$  et  $x_{1R} = \tilde{x}_{2L}$ . Comme la phase de coopération correspond à une transmission non orthogonale, le signal reçu à la destination est la superposition des deux vecteurs  $x_1 = \tilde{x}_{1L}/x_{1R}$  et  $x_2 = \tilde{x}_{2L}/x_{2R}$ , où  $x_i$  véhicule soit  $x_{iR}$ , l'information relayée, soit  $\tilde{x}_{iL}$ , une nouvelle version de l'information locale. La séparation des deux utilisateurs est assurée grâce à l'utilisation de deux entrelaceurs différents, chacun propre à une source donnée et d'un récepteur itératif de type IDMA. Le signal reçu à la destination est donné par

$$y_{sd}^{coop} = h_{s_1d}c_1 + h_{s_2d}c_2 + n_{sd} \quad (1)$$

où  $c_1 = \pi_{s_1}(x_1)$  et  $c_2 = \pi_{s_2}(x_2)$  avec  $\pi_{s_1}$  et  $\pi_{s_2}$  les entrelaceurs propres aux sources  $s_1$  et  $s_2$ , respectivement.  $h_{s_i d}$  est le gain du canal, qui suit une distribution de Rayleigh de moyenne nulle et de variance  $\sigma = E[h_{s_i d}]$  et constant au cours de la transmission d'un paquet  $u_{1L}$ , à savoir, sur toutes les phases de transmission.  $n_{sd}$  est un bruit blanc additif gaussien de densité spectrale de puissance  $N_0$ . Nous notons par  $\gamma_{s_i d} = E_s/N_0$  le rapport signal-à-bruit (RSB) du canal  $s_i$ -d, où  $E_s$  est l'énergie du signal reçu. Des définitions similaires de  $h_{s_i s_j}$ ,  $n_{s_i s_j}$  et  $\gamma_{s_i s_j}$  sont obtenues pour les canaux inter-sources.

L'ensemble du mot de code, généré pendant les deux phases, est de longueur  $N = N_a + N_b$  et de rendement  $R = K/N$ . Le paramètre  $\alpha = N_a/N$ , appelé niveau de coopération, donne la

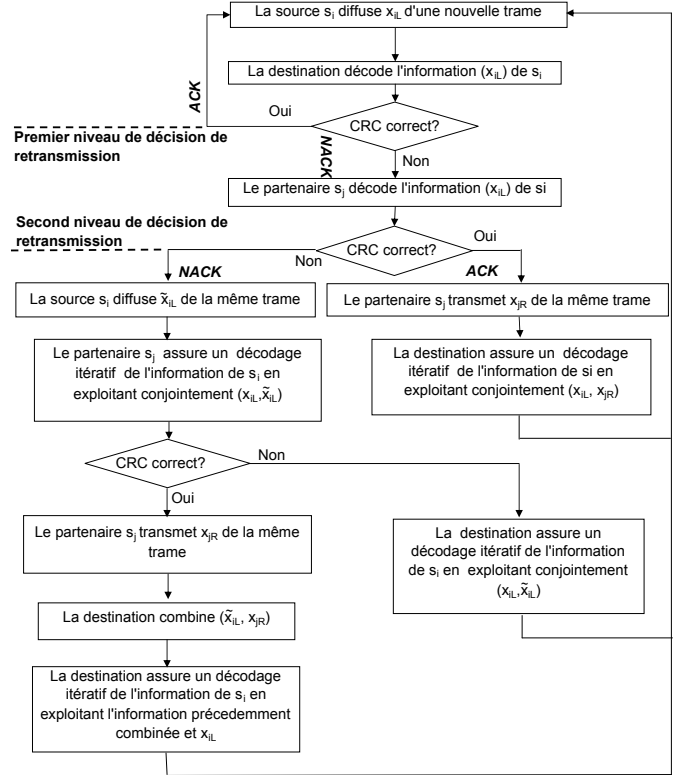


FIG. 2: Organigramme simplifié du protocole HARQ coopératif du point de vue de la source  $s_i$ .

contribution de la transmission directe par rapport à la totalité des  $N$  symboles de canal transmis durant les deux phases [1].

### 3 Description du protocole HARQ coopératif non-orthogonal

Dans cette section, nous décrivons le système complet, composé du protocole de coopération turbo codée, d'un mécanisme de retransmission à deux niveaux, qui est explicité dans la suite de cette section, et d'un mode de transmission non-orthogonal, avec superposition des signaux, lors de la phase de coopération. Ce système est appelé protocole HARQ coopératif en mode non-orthogonal. L'objectif du protocole de retransmission coopératif étudié dans ce papier, est double : premièrement, augmenter l'efficacité spectrale du système en évitant les transmissions inutiles ; deuxièmement, améliorer les performances en termes de taux d'erreurs en renforçant les liens radios critiques [2]. Ce protocole de retransmission fonctionne à deux niveaux grâce à un lien retour entre les 3 noeuds du système. Dans un premier temps, les messages d'acquiescement en provenance de la destination doivent être analysés afin de juger de l'utilité de la phase de coopération. Ce premier niveau de décision évite des utilisations du canal non justifiées lorsque les paquets sont correctement décodés à la destination lors de la phase de diffusion. Dans un deuxième temps, si des acquitte-

ments négatifs ont été envoyés à la fois par la destination et par les deux sources, une phase de retransmission entre les deux sources (perçue aussi par la destination) s'avère aussi nécessaire avant d'accomplir la phase de coopération. L'objectif de ce deuxième niveau de décision est d'améliorer la qualité du canal inter-source, afin de maximiser l'occurrence de la coopération entre sources. Pour illustrer ce protocole de retransmission coopératif, nous détaillons plusieurs cas de transmission (non exhaustifs):

- Cas 1 ( $\mathbf{u}_{1L}$  et  $\mathbf{u}_{2L}$  sont correctement décodés au niveau de la destination): la destination renvoie un acquittement positif (ACK) aux deux, les informant que la phase de coopération n'est plus nécessaire.
- Cas 2 ( $\mathbf{u}_{1L}$  est incorrectement décodé à la fois au niveau de la destination et de  $s_2$ ): la destination ainsi que  $s_2$  renvoient un acquittement négatif (NACK) relatifs à la trame  $\mathbf{u}_{1L}$ . Une phase de retransmission est alors allouée à  $s_1$ , qui transmet  $\tilde{\mathbf{x}}_{1L}$ .  $s_2$  essaie de décoder  $\mathbf{u}_{1L}$  en se basant sur  $\mathbf{x}_{1L}$  (reçu durant la phase de diffusion) et  $\tilde{\mathbf{x}}_{1L}$  (reçu durant la phase de retransmission). La phase de coopération est assurée par la suite.
- Cas 3 (la destination échoue à décoder correctement uniquement l'information de  $s_1$  durant la première phase): aucune information additionnelle n'est transmise pour  $s_2$ . Par conséquent,  $s_2$  n'a plus besoin de la coopération de son partenaire; et par la suite, le lien  $s_1$ -d est alloué à la source  $s_1$ .

Les cas 1 et 2 sont détaillés dans la Figure.2.

Durant la phase de coopération, la superposition des signaux des deux sources engendre de l'interférence multi-accès, qui non traitée dégraderait significativement les performances. Dans cette étude, la technique IDMA est adoptée afin de limiter voir annuler l'interférence multi-accès. Le principe clé de l'IDMA est l'utilisation d'entrelaceurs  $\pi_{s_i}$  différents pour distinguer les sources permettant une détection itérative de leurs signaux superposés à la réception. Le schéma de l'émission relatif à la fonction de transmission donnée dans la Figure.1 est décrit dans la Figure.3.a. L'IDMA est considérée comme un cas particulier de la technique CDMA (*Code Division Multiple Access*). Contrairement au CDMA, un même code d'étalement est utilisé par toutes les sources. Cependant, il a été prouvé qu'un code d'étalement n'est plus exigé si le code canal associé est à faible rendement. Dans ce papier, aucun code d'étalement n'est mis en place bien que nous utilisons un code canal à fort rendement. Ceci est dû au fait qu'une partie de l'information est déjà transmise durant la phase de diffusion et ne souffre pas de l'interférence.

### 3.1 Structure du récepteur IDMA

En se basant aussi bien sur les vecteurs reçus lors de la phase de diffusion ( $\mathbf{y}_{1L}^d$  et  $\mathbf{y}_{2L}^d$ ), que sur le vecteur  $\mathbf{y}_{sd}^{\text{coop}}$ , reçu lors de la phase de coopération et donné par l'équation (1), un estimateur élémentaire du signal (ESE) est utilisé pour échanger

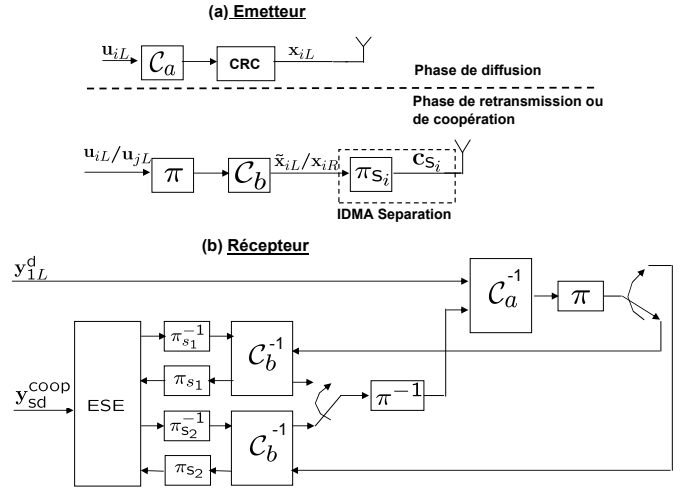


FIG. 3: Schéma du système proposé.

des informations extrinsèques entre les deux turbo-décodeurs propres à chaque source, dans un processus itératif externe. Grâce à l'utilisation d'entrelaceurs  $\pi_{s_i}$ , l'opération ESE est assurée par un algorithme de détection de faible complexité qui annule l'interférence multi-accès. L'ESE calcule l'information extrinsèque  $L_{e,ESE}$  pour la source  $s_i$  en supposant que le signal du partenaire  $s_j$  est un bruit gaussien. L'information extrinsèque  $L_{e,ESE}$  est alors utilisée comme information d'entrée pour le protocole de coopération turbo codée. Par conséquent, un processus itératif interne est effectué pour obtenir le turbo-décodage du codage distribué réalisé pour chaque source. Le schéma du récepteur relatif à la fonction de transmission donnée dans la Figure.1 est décrit dans la Figure.3.b.

## 4 Evaluation des performances

Dans cette section, nous évaluons les résultats du système proposé en termes de taux d'erreurs binaires (TEB) et d'efficacité spectrale ( $\eta$ ), appelée aussi *goodput*. En particulier, l'efficacité spectrale  $\eta$  est définie, comme dans [4], par  $\eta = \rho T$ .  $\rho$  désigne la fiabilité du système, définie comme le rapport entre le nombre de bits corrects par le nombre de bits reçus, et  $T$  est le débit du système, défini comme le rapport entre le nombre moyen de bits reçus par le nombre total de bits transmis sur le canal par unité de temps.

Comme exemple, nous considérons un code  $C_a$  convolutif de rendement  $1/2$  et de polynôme générateur  $(1, 15/13)_8$  et un code  $C_b$  convolutif de rendement  $1$  et de polynôme générateur  $(17/13)_8$ . La longueur de la trame d'information est égale à  $K = 128$  bits. Les canaux  $s_1$ -d et  $s_2$ -d sont supposés symétriques ( $\gamma_{s_1d} = \gamma_{s_2d}$ ). Les résultats en termes de TEB sont donnés en fonction de  $\gamma_{sd}^b$ , où  $\gamma^b = \gamma/R$ .  $R$  est le rendement global du système qui dépend à la fois du rendement du code canal distribué sur les phases de transmission et du nombre de slots de temps nécessaire pour la transmission (canal orthogonal ou non-orthogonal et nombre de tentatives de retransmission). Le nombre de retransmission maximum est égal à 2 pour

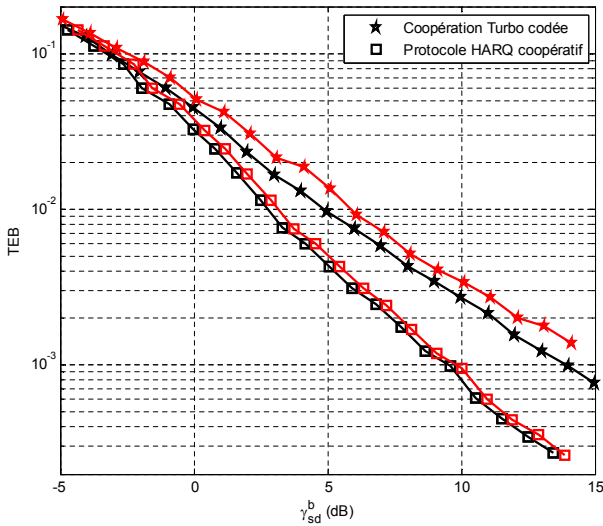


FIG. 4: Courbes de TEB pour  $\gamma_{ss}^b = 3$  dB : TDMA (courbes en noir) et IDMA (courbes en rouge).

chaque source, une demandée par le partenaire et la seconde par la destination. En particulier, pour un système turbo codé orthogonal,  $R$  est égal à  $1/3$ , ce qui correspond à 6 différents slots de temps alloués pour transmettre les informations des deux sources. D'autre part, pour un système turbo non-orthogonal, la transmission des deux trames des deux sources occupe 5 slots temporels différents; alors,  $R$  est égal à  $2/5$ . Pour le mode orthogonal, le nombre d'itérations de turbo-décodage est égal à 8. Pour le mode non-orthogonal, nous réalisons 5 itérations globales et 8 itérations internes de turbo-décodage.

Dans la Figure.4, les courbes de TEB sont données pour  $\gamma_{ss}^b = 3$  dB. En mode TDMA (courbes noires), la coopération associée au protocole HARQ proposé conduit à un gain de 2 dB pour un  $TEB = 10^{-2}$ , par rapport à la coopération turbo codée sans retransmission. En effet, un premier gain est apporté grâce à un meilleur rendement du système (moins d'utilisation du canal). Ce gain est visible par le décalage de la courbe vers la gauche. Un deuxième gain est apporté par l'amélioration de la diversité du système (pente de la courbe plus forte). La coopération, qui apporte de la diversité, a plus souvent lieu grâce à deuxième niveau de retransmission vers le partenaire.

En mode IDMA (courbes rouges), les performances de TEB sont légèrement dégradées. L'interférence multi-accès n'est pas complètement annulée par le récepteur itératif après 5 itérations. On peut cependant remarquer que la dégradation est inférieure à 0,5 dB dans le cas du protocole HARQ coopératif.

Les performances en termes d'efficacité spectrale sont données dans la Figure.5.  $\eta$  pour le cas de la coopération turbo codée orthogonale est limitée à  $1/3$  asymptotiquement. Une augmentation de cette efficacité spectrale est obtenue en transmettant de manière non-orthogonale lors la phase de coopération. Dans ce cas, l'efficacité spectrale asymptotique devient  $2/5$  (courbe rouge étoilée). De même, une amélioration de l'efficacité est notée pour le protocole HARQ coopératif en mode non-orthogonal (courbe rouge marqueurs carrés), comparative-

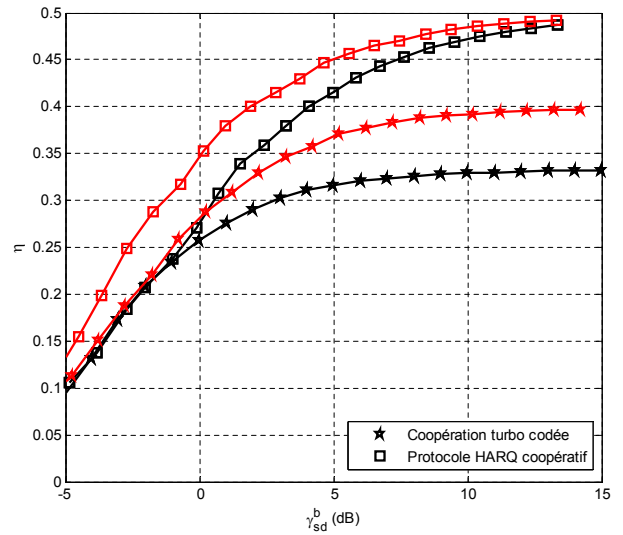


FIG. 5: Courbes d'efficacité spectrale pour  $\gamma_{ss}^b = 3$  dB : TDMA (courbes en noir) et IDMA (courbes en rouge).

ment au mode orthogonal. Par contre, la valeur asymptotique demeure inchangée puisque la transmission non-orthogonale est propre à la phase de coopération qui n'existe plus pour le protocole HARQ coopératif à fort  $\gamma_{sd}^b$ .

## 5 Conclusions

Dans ce papier, nous avons étudié deux moyens pour améliorer l'efficacité spectrale d'un système de coopération turbo codée. En premier lieu, nous avons introduit le concept de la retransmission à travers la définition d'un protocole HARQ à deux niveaux de décision. En second lieu, lors de la phase de coopération, nous avons mis en oeuvre une transmission non-orthogonale basée sur la technique IDMA et un récepteur multi-utilisateurs itératif.

## Références

- [1] T. Hunter et A. Nosratinia, *Diversity through coded cooperation*, IEEE Trans. Commun., vol. 5 (2), p. 283-289, 2006.
- [2] H. Farès, C. Langlais, A. Graell i Amat et M. Berbineau, *Two-level HARQ for turbo coded cooperation*, Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), p. 11-5, 2010.
- [3] H. Farès, S. Ould Mohamed, C. Langlais, A. Graell i Amat et M. Berbineau, *MIMO systems for turbo coded cooperation over orthogonal and non-orthogonal channels*, Proc. IEEE Int. Conf. ITS Telecommun. (ITST), p. 453-457, 2011.
- [4] F. Babich, *Performance of hybrid ARQ schemes for the fading channel*, IEEE Trans. Commun., vol. 50, p. 1882-1885, 2002.