

UNIVERSITE PARIS-SUD

ÉCOLE DOCTORALE
Sciences et Technologie de l'Information, des Télécommunications
et des Systèmes
Laboratoire des Signaux et Systèmes

DISCIPLINE : PHYSIQUE

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue le 10/06/2014

par

Anna VANYAN

EXTENSION AND ANALYSIS OF HYBRID ARQ SCHEMES IN
THE CONTEXT OF COOPERATIVE RELAYING

SYNTHÈSE EN FRANÇAIS

Composition du jury :

Directeur de thèse :

Co-encadrante de thèse :

Rapporteurs :

Président du jury :

Membres invités :

Pierre DUHAMEL

Francesca BASSI

Jean-Francois HÉLARD

Charly POUILLAT

Philippe CIBLAT

Aude HERRY

Directeur de la recherche CNRS, Fellow IEEE

Professeur, ESME Sudria

Directeur de la recherche, INSA Rennes

Professeur, INP ENSEEIHT Toulouse

Professeur, TELECOM Paris Tech

Tagattitude

RÉSUMÉ LONG DE LA THÈSE EN FRANÇAIS

Introduction

Récemment l'intérêt dans la recherche a considérablement augmenté vers les techniques du codage des réseaux, qui permettent d'utiliser efficacement la bande passante, ce qui a été démontré par Ahlswede [1]. Dans ce travail les auteurs décrivent une technique simple, qui rassemble le flux de données provenant de différents noeuds en un seul paquet, ce qui conduit à la réduction de la bande passante utilisée par le système. La technique utilisée dans l'article mentionné ci-dessus consiste en une simple opération binaire qui s'appelle *exclusive-OR* (XOR) [2]. Cette exemple a été démontré sur un réseau *butterfly*, Figure 1. Comme il est représenté par la figure, le système *butterfly* se compose d'une source qui émet deux bits différents (b_1 et b_2) à deux récepteurs: t_1 et t_2 . Nous pouvons voir qu'en effectuant XOR entre les deux flux de données au noeud de relais 3, on peut réduire le nombre d'intervalles de temps nécessaires pour envoyer les deux messages à leur destinataires.

Tandis que la plupart des articles dans la littérature est axée sur l'atteinte d'un meilleur *débit de multidiffusion* et/ou d'une meilleure capacité [3–6], une autre direction a été prise par d'autres auteurs, qui consiste à augmenter le gain de diversité [7–12]. Une approche pratique a été exploitée dans [5, 6] en proposant de nouvelles architectures pour les réseaux sans fil (par exemple, COPE, MIXIT, ANC [6]), en présentant des algorithmes polynomiaux pour le codage et le décodage, [13]. Dans [13] Koetter et Médard ont montré que les codes avec une simple structure linéaire sont suffisantes pour atteindre la capacité dans le problème de multidiffusion. D'autres types de codage de réseau proposent de mélanger les données sur le niveau de symbole [14], ou d'utiliser la modulation analogique sans synchronisation entre les signaux parasites et en l'appliquant à des software radios [15], ou en utilisant les codes de réseau aléatoires [16, 17].

Les auteurs de [7–9] ont souligné, qu'afin d'obtenir des gains de diversité dans les

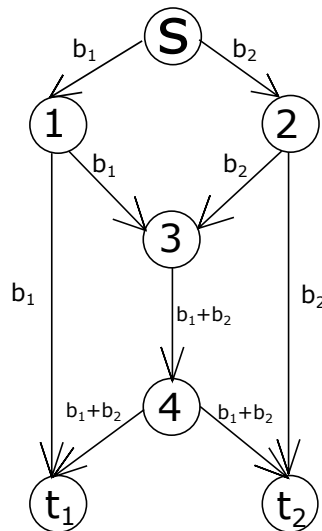


Figure 1: Butterfly network graph representation

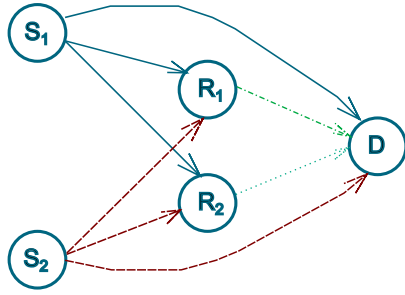


Figure 2: Réseau coopératif multi-utilisateur multi-relais. Les différents styles de ligne (et couleurs) indiquent les intervalles de temps. Dans les premiers 2 intervalles de temps S_1 transmet le data à R_1 , R_2 et D . Dans la deuxième intervalle de temps S_2 transmet le data à R_2 , R_1 et D . Dans le troisième intervalle de temps R_1 transmet D , et au quatrième R_2 D .

réseaux coopératifs, l'opération binaire XOR n'est pas optimale, et que les codes de blocs linéaires non-binaires peuvent aider à obtenir les gains de diversité souhaités.

Dans [9] les auteurs considèrent que l'on appelle le **codage de réseau généralisé et dynamiques**, (Generalized Dynamic Network Codes, GDNC). Leur travail a été motivé par [8], où les gains de diversité ont été atteints pour un programme de coopération multi-utilisateur à l'aide de **des codes de réseau dynamiques**, (Dynamic Network Codes, DNC). Dans [8] le système se compose de M utilisateurs qui agissent comme relais. Chacun des utilisateurs dispose de données indépendantes à transmettre à la destination, et dans le premier intervalle de temps les données de tous les noeuds sont envoyées en mode broadcast à l'autre et à la station de base. Du deuxième jusqu'au m -ième intervalle de temps les utilisateurs transmettent $M - 1$ combinaisons linéaires non binaires des données qui sont reçues à la station de base. Le travail [8] montre que l'utilisation des codes de réseau linéaires non binaires atteint mieux la diversité que celle des codes de réseau linéaire binaires. Dans [9] les auteurs étendent l'idée de DNC à celle de GDNC, en permettant les utilisateurs d'envoyer plusieurs paquets originaux au lieu d'un; et plusieurs paquets codés au lieu d'un. En faisant cela, ils ont de plus d'observations, et sont capables d'atteindre un meilleur taux et une meilleure diversité, que ceux de DNC.

Cependant, les auteurs de [10–12] ont prouvé qu'il est en effet possible d'atteindre des gains de diversité en utilisant l'opération XOR simple défini au corps de Galois, F_2 . Le choix du corps F_2 permet de maintenir la complexité de calcul du système très basse et peut être appliquée à la protection d'erreur inégale dans les réseaux de relais coopératif multi-relais multi-utilisateurs, [10, 11, 18].

Dans [10–12] les auteurs ont étudié les effets de codage de réseau binaire dans les réseaux de relais coopératifs, et ont obtenu la probabilité moyenne d'erreur de bit (ABEP) au niveau de la couche physique (PHY), en utilisant des approximations afin d'obtenir des estimations asymptotiquement serrées.

Le modèle de réseau qui est considéré dans [10–12], est consisté en deux sources, deux relais, et une destination comme illustré sur la figure (2).

Les auteurs font l'assumption que le relais ne vérifie pas si les bits qu'il reçoit des

sources sont correctes ou non. Dans [10] les auteurs obtiennent les ABEPs pour les canaux idéaux entre les sources et les relais, alors que dans [11] ils dérivent les ABEPs pour des canaux réalistes entre les sources et les relais. En outre, dans tous ces travaux, les auteurs considèrent quatre scénarios, qui représentent les cas suivants :

1. les relais envoient les observations directs des bits d'information qu'ils ont reçus de la part des sources S_1 et S_2
2. les deux relais effectuent une opération XOR sur les bits d'information qu'ils ont reçus de la part des sources S_1 et S_2 , avant de les envoyer à la destination
3. l'un des relais envoie la version des bits d'information codé avec un XOR, et l'autre relai envoie la version non- codée. D'une telle manière les auteurs munissent une protection d'erreur inégale pour l'une des sources.

Ces approches diffèrent en fonction des données que le relais envoie. Une brève description de chacun de ces scénarios est résumé ci-dessous.

Scénario 1: R_1 et R_2 envoient les données des sources d'information S_1 et S_2 la destination dans des intervalles de temps orthogonaux. En d'autres termes, R_1 envoie l'observation de b_1 ; et R_2 envoie l'observation de b_2 .

Scénario 2: R_1 et R_2 envoient les bits d'information qui viennent des sources S_1 et S_2 codés avec le codage de réseau à la destination dans des intervalles de temps orthogonaux. L'opération XOR binaire est utilisé pour introduire un codage de réseau. En d'autres termes, le relais envoie $b_1 \oplus b_2$.

Scénario 3: R_1 envoie la version codée des observations de b_1 et b_2 ; et R_2 envoie l'observation directe de b_1 . Dans ce cas l'information de la source S_2 est plus protégée, que celle de la source S_1 .

Scénario 4: R_1 envoie l'observation directe de b_1 ; et R_2 envoie la version codée des observations de b_1 et b_2 . Dans ce cas l'information de la source S_1 est plus protégée, que celle de la source S_2 .

Tous ces scénarios sont évalués en fonction de la probabilité moyenne d'erreur de bit d'information pour chaque source. De plus, ils considèrent les trois types de décodeurs à la destination : a) MDD, b) H-MLD, et c) S-MLD [10–12].

Motivation de la thèse et contributions

Inspiré par ces travaux, cette thèse a pour l'objectif d'obtenir une technique simple pour analyser les réseaux de relais coopératifs avec plusieurs noeuds, et avec des retransmissions. L'innovation de ce travail consiste à développer une analyse qui sera utile pour des protocoles de relais cooperatifs avec les schémas HARQ et multiples noeuds dans le réseau. Nous avons réuni les techniques du codage convolutif (FEC), les techniques de retransmissions (ARQ), du codage de réseau (le cas échéant) dans un contexte des réseaux cooperatifs. Nous avons développé un outil basé sur la machine à états finis afin d'analyser

les schémas avec plusieurs noeuds. Nous démontrons dans cette thèse que l'approche conventionnelle n'est plus efficace, quand le nombre des noeuds dans le réseau augmente : même pour les schémas coopératifs les plus simples, qui consistent en trois noeuds, les expressions sont assez compliquées, alors que la machine à états finis, si les états sont bien définis, nous permet d'obtenir les performances dans une manière simple et algorithmique. Puis nous démontrons que pour le schéma avec deux sources, l'analyse devient trop compliquée même si on utilise la machine à états finis. Par conséquent, nous prouvons qu'il est possible de réduire le nombre de la machine à états finis en définissant un protocole équivalent, basé sur le principe probabiliste.

En outre nous effectuons l'optimisation du protocole probabiliste pour le schéma non-coopératif et coopératif, et nous démontrons que le protocole probabiliste obtient des meilleures performances que le protocole déterministe.

De plus, notre recherche est faite dans un contexte énergétiquement juste, dans le sens que toutes les comparaisons et évaluations des performances tiennent en compte la consommation d'énergie par un bit d'information reçu avec succès.

Avant de passer à la section suivante, nous allons introduire les définitions des métriques qui seront dérivées et considérées pour chaque système considéré dans cette thèse. Les définitions sont génériques et peuvent être appliquées aux schémas multi-source multi-relais, et aux schémas 1-source-1-destination.

Le taux d'erreur de trame ou Frame Error Rate (FER)

$$\text{PER} = \frac{\text{nombre de trames erronées appartenant à la source } i}{\text{nombre total de trames transmises pour la source } i \text{ de la destination et du relais (le cas échéant)}} \quad (1)$$

Le taux d'erreur de paquet ou Packet Error Rate (PER)

$$\text{PER} = \frac{\text{nombre de paquets erronés appartenant à la source } i}{\text{nombre total de paquets transmises pour la source } i \text{ de la destination et du relais (le cas échéant)}} \quad (2)$$

Le délai par un paquet/fragment

$$\bar{T} = \frac{\text{nombre de trames (ou paquets) transmises appartenant à la source } i}{\text{nombre de trames (ou paquets) générés à la source } i} \quad (3)$$

Le délai par un paquet/fragment reçu avec succès

$$\bar{S} = \frac{\text{nombre de trames (ou paquets) transmises appartenant à la source } i}{\text{nombre de trames (ou paquets) correctement reçues et appartenant à la source } i} \quad (4)$$

L'efficacité qui tient en compte la redondance introduite par les retransmissions et par le taux du codage au niveau de la couche PHY, η_{gen}

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{\text{nombre de bits d'information appartenant à la source } i \text{ correctement décodés}}{\text{nombre totale de bits codés transmises de la destination et du relais (le cas échéant)}} \quad (5)$$

L'efficacité qui tient en compte seulement la redondance introduite par les retransmissions, η_{ARQ}

$$\eta_{\text{ARQ}} = \frac{\text{nombre de bits d'information appartenant à la source } i \text{ correctement décodés}}{\text{nombre totale de bits d'information transmises de la destination et du relais (le cas échéant)}} \quad (6)$$

Les dérivations d'une métrique pour une analyse énergétiquement juste

Dans la littérature les comparaisons entre les schémas sans et avec retransmissions sont effectuées en utilisant le ratio entre l'énergie par symbole transmis et la variance du bruit (SNR) en tant que l'unité de mesure. Cependant, dans les schémas (H)ARQ, la consommation d'énergie pour la réception correcte d'un symbole est amplifiée grâce aux retransmissions redondantes du même symbole. Cela signifie que la méthode conventionnelle des évaluations en fonction de SNR ne donne pas des comparaisons justes entre ces deux types de schémas. Pour cette raison dans le deuxième chapitre de cette thèse nous dérivons une métrique qui tient en compte ce fait. Nous appelons cette métrique le *vrai SNR*. Afin d'analyser les résultats obtenus en fonction du vrai SNR, nous effectuons des évaluations de performances des schémas suivants: HARQ, STBC-ARQ et ARQ. Les schémas STBC consistent en la transmission des données à partir de multiples antennes en utilisant le codage *Space-Time Block Codes*. Dans cette thèse nous considérons deux antennes au niveau de l'émetteur et une antenne au niveau du récepteur. La destination reçoit la somme des signaux des toutes les antennes d'émission. Afin d'être en mesure de décoder les symboles originaux, il faut que le canal reste constant pendant les deux intervalles de temps consécutifs. La matrice de codage STBC utilisée dans cette thèse correspond à celle d'Alamouti [19] et est représenté ci-dessous

$$G = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix}, \quad (7)$$

où $(\cdot)^*$ est l'opérateur de la conjugaison complexe, et les termes x_i sont les symboles envoyés des deux antennes.

L'analyse théorique des performances QoS des systèmes de transmission HARQ et STBC-ARQ est basée sur les résultats dans [2, 20, 21]. Nous sommes intéressés par la dérivation des performances QoS au niveau de la couche IP : le taux d'erreur de paquet (PER), le délai, et l'efficacité. Afin d'évaluer ces métriques, nous aurons besoin de calculer le taux d'erreur de bit d'information (BER) au niveau de la couche physique (PHY), car elles sont exprimées en fonction de ce dernier. Pour le système STBC-ARQ le BER peut être calculé en utilisant l'expression bien connue dans la littérature [19]. Néanmoins, pour les schémas dans lesquels les expressions théoriques n'existent pas, nous utiliserons les résultats de simulation. L'expression de BER pour STBC-ARQ au niveau de la couche PHY est donc

$$\text{BER}_{\text{STBC}} = p^2 (1 + 2(1 - p)), \quad (8)$$

où $p = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2}{\frac{E_s}{N_0}}\right)^{-1/2}$, et $\frac{E_s}{N_0}$ est l'énergie dépensée par le symbole transmis. Le BER_{HARQ} doit être évalué par simulation, pour chaque taux de codage, R_c . La proba-

bilité d'une erreur dans un FRAG est notée par le terme π , et défini comme la probabilité d'avoir incorrectement reçu un FRAG au niveau de la destination après une transmission.

$$\pi = 1 - (1 - \text{BER})^{L_{\text{FRAG}}} . \quad (9)$$

Le terme π^{N_S} donc définit le taux d'erreur de trame au niveau de la couche MAC, soit le fragment n'a pas pu être décodé après l'expiration du nombre maximale de transmissions.

Le taux d'erreur de paquet au niveau de la couche IP (Packet Error Rate, PER) est défini comme le nombre moyen des paquets non décodables sur le récepteur au niveau de la couche IP. Un paquet IP est considéré comme non décodé dès que l'un de fragments appartenant à ce paquet est rejetée au niveau de la couche MAC. Le PER est donc exprimée par

$$\text{PER} = 1 - (1 - \pi^{N_S})^{N_{\text{FRAG}}} . \quad (10)$$

Le nombre moyen de transmissions d'un fragment, \bar{T} , est évaluée par

$$\bar{T}_{\text{MAC}} = \sum_{k=1}^{N_S} k (1 - \pi) \pi^{k-1} + N_S \pi^{N_S} \quad (11)$$

Le premier terme dans Eq. ((11)) exprime le nombre moyen de transmissions d'un *fragment reçu avec succès*. Le délai au niveau de la couche IP, n est définie comme la moyenne nombre de transmissions de fragments associés à un paquet IP décodée avec succès. Son expression est définie par

$$\bar{S}_{\text{IP}} = N_{\text{FRAG}} \left(\sum_{k=1}^{N_S} k \frac{(1 - \pi) \pi^{k-1}}{1 - \pi^{N_S}} \right) . \quad (12)$$

L'efficacité η est défini comme le ratio entre le goodput au niveau de la couche MAC et le débit au niveau de la couche PHY ¹. Elle exprime le nombre moyen d'utilisations de canal, nécessaires pour une réception réussie d'un bit d'information à la destination, mesurant ainsi le coût de la stratégie de protection d'erreur inter-couche. Une petite valeur de η indique que le système introduit une grande quantité de redondance (le codage d'information *et* les retransmissions des fragments) afin de protéger l'information. Il est facile de vérifier que l'efficacité generale η_{gen} prend la forme suivante

$$\eta_{gen} = \rho R_c \frac{(1 - \pi^{N_S})}{\bar{T}} , \quad (13)$$

où ρ est un coefficient qui tient en compte la redondance introduite par les en-têtes et par le CRC dans une trame, et R_c est le taux de codage convolutive ($R_c = 1$ pour le schéma STBC-ARQ).

Les performances des deux systèmes sont évaluées par les comparaisons de la qualité de service: PER, \bar{S} , qui sont habituellement exprimés en fonction d'énergie moyenne dépensée

¹Le *goodput* au niveau de la couche MAC signifie le nombre moyen de bits d'information (*ie* appartenant à des fragments au niveau de la couche MAC) correctement reçus par l'unité de temps. Le *débit* au niveau de la couche PHY signifie le nombre moyen de bits d'information transmis sur le canal par l'unité de temps.

par symbole, $\frac{E_s}{N_0}$. Cette quantité, cependant, n'est pas une métrique exhaustive pour analyser les systèmes considérés, étant donné qu'elle ne permet pas de calculer l'énergie moyenne dépensée par symbole pour les schémas avec retransmissions. Par conséquent, nous définissons une nouvelle métrique, $\bar{\frac{E_s}{N_0}}$, comme l'énergie moyenne dépensée par le système afin de transmettre un symbole correctement à la destination. Elle est exprimée par :

$$\frac{\bar{E}_s}{N_0} = \frac{E_s}{N_0} \frac{1}{\eta_{gen}}, \quad (14)$$

Conception et analyse de protocole avec une machine à états fini

Dans le troisième chapitre de cette thèse nous développons des outils d'analyse du système pour les réseaux de relais coopératifs. Nous utilisons la machine à états finis afin d'obtenir les performances QoS du système. Nous avons choisi d'effectuer l'analyse du système en utilisant cette méthode, parce qu'elle est plus efficace que l'approche combinatoire. Cela devient crucial dans le cas avec plusieurs noeuds. D'abord nous appliquons cet outil au réseau le plus simple qui se compose de trois noeuds: une source, un relais et une destination. Puis nous compliquons le schéma en rajoutant plusieurs noeuds et nous démontrons l'utilisation de la machine à états finis afin d'analyser les performances de protocole. Nous utilisons également le *vrai SNR* dérivé plus tôt, pour les évaluations dans le contexte énergétiquement juste.

Rappelons qu'une machine à états finis est un modèle de calcul mathématique, utilisé pour la description d'un système. Les systèmes à états finis peuvent être modélisés par les *machines de Mealy* ou par les *machines de Moore* qui sont des automates finis avec sortie. Dans les machines de Mealy, les actions (sorties) sont liées aux transitions, tandis que dans les machines de Moore, les actions sont liées aux états. En d'autres termes, une machine à états finis se compose d'états, d'entrées et de sorties.

Nous commençons par le développement d'une machine à états finis pour le schéma le plus simple, qui consiste en une source et une destination. Nous démontrons qu'il est possible d'obtenir toutes les métriques d'évaluation des performances du système en utilisant cette technique. Ces résultats sont validés par des simulations Monté-Carlo et par des expressions théoriques décrites plus tôt, dans le deuxième chapitre de cette thèse.

Afin d'obtenir les résultats analytiques nous représentons la machine à états finis avec une matrice de transition d'état, ce qui nous permet de calculer les probabilités stationnaires. Grâce à ce calcul, nous évaluons le taux d'erreur de trame, le délai, et l'efficacité.

0.0.1 Description de protocole avec une source et une destination

Pour le système avec une source et une destination, le protocole est assez simple: la source transmet son message et attend un accusé de réception de la part de la destination. Si le message a été reçu avec succès, la source transmet un nouveau message. Sinon, la source retransmet le message qui n'a pas été reçu, jusqu'à la réception réussie ou jusqu'à l'expiration du crédit des retransmissions.

Nous considérons un canal de Rayleigh avec le bruit Gaussien. Le signal est modulé selon la constellation BPSK. Chaque trame au niveau de la couche MAC consiste en L_{FRAG} bits d'information. La source possède un compteur A , qui est incrémenté chaque fois que

Le nombre de l'état	La définition de l'état
S_1	$W_{t-1} = \text{ACK}, A_t = 1$
S_2	$W_{t-1} = \text{NACK}, A_t = 2$
S_3	$W_{t-1} = \text{NACK}, A_t = 3$
...	...
S_N	$W_{t-1} = \text{NACK}, A_t = N$
S_{N+1}	$W_{t-1} = \text{NACK}, A_t = 1$

Table 1: La numérotation d'états de la machine à états finis pour le schéma avec une source et une destination

la source (re)transmet le message actuel. Au début de la procédure de transmission d'un nouveau message ce compteur a une valeur égal à 1. Le compteur peut donc prendre l'une des valeurs suivantes: $\{1, \dots, N\}$. Le succès ou l'échec d'une transmission est dénoté par la variable K , qui prend la valeur $K = \text{ACK}$ si la transmission a été réussie, et $K = \text{NACK}$ dans le cas opposé.

La machine à états finis qui décrit le schéma de transmission de ce protocole est représentée par la figure ??.

Definition des états

Chaque état dans la machine à états finis est associé à une probabilité de transition vers un autre état. La matrice stochastique (aussi appelée matrice de Markov) est une matrice où chaque élément P_{ij} représente la transition de l'état i vers l'état j . La somme des éléments de chaque ligne est égale à 1.

Notre définition d'un état est la suivante : le pair (le nombre de la transmission actuelle, le dernier accusé de réception) = (A_t, W_{t-1}) . Les indices t et $t - 1$ signifient l'intervalle de temps actuel et l'intervalle de temps précédent, respectivement. On remarque, que grâce à l'organisation du protocole, l'état avec un numéro de transmissions $1 < A_t \leq N$ peut être visité seulement si la dernière transmission a échoué, c'est-à-dire $W_{t-1} = \text{NACK}$. Par conséquent, les états $(A_t = a, W_{t-1} = \text{ACK})$ pour $a \in \{2, \dots, N\}$ n'existent pas.

- L'état $(A_t = 1, W_{t-1} = \text{ACK})$ représente la première transmission d'un nouveau FRAG, qui commence après avoir reçu avec succès le FRAG précédent.
- L'état $(A_t = 1, W_{t-1} = \text{NACK})$ représente la première transmission d'un nouveau FRAG, qui commence après ne pas avoir reçu le FRAG précédent.

Le nombre totale d'états est égale à $N + 1$. Leur numérotation est faite selon le tableau 1.

L'évaluation des probabilités de transition

Les transitions dépendent de l'état actuel et du résultat W_t (c'est-à-dire le résultat de la transmission actuelle A_t).

De l'état ($A_t = 1, W_{t-1} = *$)

Les états S_1 et S_{N+1} peuvent aller à S_1 en cas d'une transmission réussie et à S_2 en cas d'une transmission échoué.

$$\begin{aligned} P_{1,1} &= P_{2,1} = P(W_t = 1) = (1 - \pi), \\ P_{1,2} &= P_{2,3} = P(W_t = 0) = \pi \end{aligned} \quad (15)$$

De l'état ($A_t = a, W_{t-1} = \text{NACK}$), $1 < a < N$)

N'importe quel état S_i ($A_t = a, W_{t-1} = \text{NACK}$) avec $1 \leq a \leq N$ peut aller à l'état S_1 en cas d'une transmission réussie $W_t = \text{ACK}$, et à l'état $i + 1$ ($A_t = a + 1, W_{t-1} = \text{NACK}$) si la transmission précédente a échoué.

$$\begin{aligned} P_{a,1} &= P(W_t = 1) = (1 - \pi), \\ P_{a,a+1} &= P(W_t = 0) = \pi \end{aligned} \quad (16)$$

De l'état ($A_t = N, W_{t-1} = \text{NACK}$)

L'état S_N peut aller ou à l'état S_1 (si la dernière transmission du FRAG a été réussie) ou à l'état S_{N+1} (si la dernière transmission du FRAG a échoué).

$$\begin{aligned} P_{N,1} &= P(W_{t-1} = \text{ACK}) = (1 - \pi), \\ P_{N,N+1} &= P(W_{t-1} = \text{NACK}) = \pi \end{aligned} \quad (17)$$

La matrice de probabilités de transition prend deon la forme suivante:

$$P = \begin{pmatrix} 1 - \pi & \pi & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 - \pi & 0 & \pi & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 - \pi & 0 & 0 & \pi & 0 & \dots & 0 \\ 1 - \pi & 0 & 0 & 0 & \pi & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 - \pi & \pi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Afin d'évaluer les performances QoS du système nous allons utiliser le vecteur propre de la matrice de probabilités de transition avec la valeur propre 1.

Taux d'erreur de trame Afin de trouver le taux d'erreur de trame nous allons utiliser les états suivants de la machine à l'états finis: l'état où le système transmet un nouveau FRAG après avoir reçu avec succès le FRAG précédent, et l'état où le système transmet un nouveau FRAG après ne pas avoir reçu le dernier FRAG. Le taux d'erreur de trame est égal à la moyenne de la probabilité de transmettre un nouveau FRAG après ne pas avoir reçu le dernier FRAG. On dénote la probabilité stationnaire d'être dans l'état i par p_i . Le FER est donc représenté par

$$\text{FER} = \frac{p_{N+1}}{p_1 + p_{N+1}} \quad (19)$$

Average number of transmitted FRAGs per successful FRAG The average number of transmitted FRAGs per successful FRAG for this cooperative scenario is defined as the average number of transmitted FRAGs from the source and the relay, in order to successfully receive one FRAG:

$$\begin{aligned}
\bar{S} &= \sum_{i=1}^N i \cdot P(i \text{ transmissions} | \text{FRAG est réussie}) \\
&= \sum_{i=1}^N i \cdot \frac{P(\text{d'être en état 1} | i\text{-th transmission})}{P(\text{d'être en état 1})} \\
&= \sum_{i=2}^N i \cdot \frac{(1-\pi)p_i}{p_1} + (1-\pi) \frac{p_1 + p_{N+1}}{p_1} \tag{20}
\end{aligned}$$

Nombre moyen de trames transmises L'expression du nombre moyen de trames transmises est représentée par

$$\bar{T} = \bar{S} \frac{p_1}{p_1 + p_{N+1}} + N \frac{p_{N+1}}{p_1 + p_{N+1}} \tag{21}$$

Nombre moyen de trames transmises par une trame réussie Le nombre moyen de trames transmises par une trame réussie est égal au nombre moyen de trames transmises afin de recevoir correctement une trame

$$\begin{aligned}
\bar{S} &= \sum_{i=1}^N i \cdot P(i \text{ transmissions} | \text{FRAG est réussie}) \\
&= \sum_{i=1}^N i \cdot \frac{P(\text{d'être en état 1} | i\text{-ème transmission})}{P(\text{d'être en état 1})} \\
&= \sum_{i=2}^N i \cdot \frac{(1-\pi)p_i}{p_1} + (1-\pi) \frac{p_1 + p_{N+1}}{p_1} \tag{22}
\end{aligned}$$

Nous démontrons que les expressions obtenues sont en parfait accord avec les expressions combinatoires, et les simulations de Monté-Carlo.

Dans une manière assez similaire, nous avons étudié le schéma avec une source, un relais et une destination; le schéma avec deux sources, un relais et une destination. Pour chacun de ces schémas nous avons démontré que l'analyse combinatoire devient très compliquée et il faut la refaire chaque fois que le protocole change. En outre, nous avons remarqué que avec l'augmentation du nombre des noeuds dans le réseau, et avec l'augmentation du nombre des retransmissions, l'analyse devient de plus en plus compliqué même si on utilise cette technique basée sur les machines à l'états finis.

De plus, pour chacun de ces schémas de relais coopératifs, nous avons défini et étudié deux protocoles différents. Ces protocoles diffèrent en termes du comportement du relais et de la distance source-relais : un protocole est assez simple à réaliser, mais il y a de

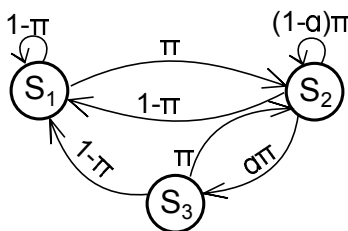


Figure 3: Machine à états finis pour le schéma avec une source et une destination $S_1 = (W_{t-1} = 0)$, $S_2 = (W_{t-1} = 0, J_{t-1} = 1)$, $S_3 = (W_{t-1} = 0, J_{t-1} = 0)$

compromis dans les performances, et l'autre protocole est plus difficile à réaliser, mais il donne des meilleures performances.

Réduction du nombre des états de la machine à états finis

Dans la quatrième chapitre de cette thèse nous avons réduit le nombre des états dans la machine à états finis, et nous démontrons que cette approche simplifie l'analyse pour les schémas plus grandes. Pour cette raison-là nous avons redéfini le protocole, en retrouvant une protocole équivalent.

Dans ce résumé nous allons démontrer sur le schéma avec une source et une destination, qu'il existe un protocole équivalent à celui de la chapitre trois. Ce protocole est basé sur un principe probabiliste, ce qui nous permet d'obtenir des meilleures performances que celles du protocole déterministe. Cela est expliqué par le fait que le protocole probabiliste est plus optimale.

Le protocole probabiliste pour le schéma le plus simple est défini comme suite : si la première transmission de la trame est échouée, une deuxième transmission sera attribué dans une manière déterministe. Si cette deuxième transmission échoue, la t -ème transmission est attribué avec une probabilité $(1 - \alpha)$. Afin de concevoir cette règle, nous définissons une variable aléatoire J_t^S qui prend les valeurs dans l'intervalle $\{0, 1\}$, et $P(J_t^S = 1) = (1 - \alpha)$. En d'autres termes, cette variable détermine si la source est autorisée de transmettre pour la t -ème fois.

La machine à l'états finis pour ce protocole est représentée par trois états décrits ci-dessous :

État S_1 : $S_1 = (W_{t-1} = 1)$ est associé à la première transmission d'un nouveau FRAG après avoir recu le FRAG précédent avec succès.

État S_2 : $S_2 = (W_{t-1} = 0, J_{t-1} = 0)$ est associé à la retransmission du FRAG actuel après qu'il n'a pas été recu dans la première et deuxième transmission

État S_3 : $S_3 = (W_{t-1} = 0, J_{t-1} = 1)$ est associé à la première transmission d'un nouveau FRAG après ne pas avoir recu le FRAG précédent.

La machine à états finis est représentée par la Fig. 3.

Les transitions entre les états dépendent du résultat de la transmission, W_t , et de la réalisation de J_t . Les probabilités de transition pour cette machine sont évaluées par :

$$P_{i \rightarrow 1} = P(W = 1) = (1 - \pi), \quad i \in \{1, 2, 3\} \quad (23)$$

où le terme π dénote la probabilité d'une erreur dans la transmission d'un FRAG sur le canal source-destination, et il est évalué en utilisant Eq. (9).

Les états S_1 et S_3 peuvent aller à l'état S_2 après un échec d'une transmission:

$$P_{i \rightarrow 2} = P(W = 0) = \pi, \quad i \in \{1, 3\} \quad (24)$$

L'état S_2 peut aller à S_3 , si $W_t = 0$ et $J_t = 0$; et il peut rester en lui-même si $W_t = 0$ et $J_t = 1$.

$$\begin{aligned} P_{2 \rightarrow 2} &= P(W_t = 0, J_t = 1) = \pi(1 - \alpha), \\ P_{2 \rightarrow 3} &= P(W_t = 0, J_t = 0) = \pi\alpha \end{aligned} \quad (25)$$

Ainsi, la matrice prend la forme suivante :

$$P = \begin{pmatrix} 1 - \pi & \pi & 0 \\ 1 - \pi & (1 - \alpha)\pi & \alpha\pi \\ 1 - \pi & \pi & 0 \end{pmatrix} \quad (26)$$

En dénotant la la probabilité stationnaire d'être en état i par p_i , nous obtenons le FER :

$$\text{FER} = \frac{p_3}{p_1 + p_3} \quad (27)$$

Nous avons également évalué le terme α , qui prend la forme suivante:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{P(A_t = N | 1 \leq A_{t-1} \leq N - 1)}{P(A_t = N, 1 \leq A_{t-1} \leq N - 1)} \\ &= \frac{P(A_t = N | 1 \leq A_{t-1} \leq N - 1)}{P(A_t = N)} \\ &= \frac{P(A_t = N)}{\sum_{i=2}^N P(A_t = i)} \\ &= \frac{\pi^{(N-1)}}{\sum_{i=2}^N \pi^{(i-1)}} \end{aligned} \quad (28)$$

Dans une manière similaire toutes les autres métriques ont été obtenues, et comparées à celles du protocole déterministe.

Nous avons également optimisée les performances du protocole probabiliste. Nous avons effectué cette procédure pour le schéma du relais coopératif, et les résultats que nous avons obtenu ont montré que le protocole probabiliste est meilleur que le protocole déterministe en fonction des performances QoS, et en fonction de la complexité de la machine à l'états finis. Les résultats que nous avons obtenu permettent de les appliquer pour des réseaux du relais coopératifs, et d'avoir un outil d'analyse assez simple.

Conclusions et Perspectives

Cette thèse a pour but d'obtenir un outil pour analyser les réseaux coopératifs sans fil et d'étudier les performances QoS en utilisant les techniques HARQ et codage de réseau. Nous avons commencé par les études des réseaux simple dans le but de démontrer qu'il est possible d'obtenir les métriques de QoS en utilisant la machine à l'états finis. Puis nous avons défini deux protocoles différents pour les réseaux coopératifs avec trois noeuds. Nous démontrons que le relais peut être utile seulement dans le cas si le protocole est bien défini, et le décodeur du côté de la destination est adapté aux conditions du canal.

Néanmoins, on peut voir que même pour le schéma coopératif le plus simple, la machine à l'états finis devient compliquée. Puis on montre que la complexité augmente pour le schéma avec deux sources, en effectuant l'étude des deux protocoles déterministes pour ce schéma. La machine à l'états finis immense, et rend la complexité de calcul très élevée. On arrive à classifier les états en utilisant un algorithme, mais il est pratiquement difficile de calculer les métriques QoS.

Afin de surmonter cette difficulté, nous développons une nouvelle stratégie probabiliste, qui nous permet d'avoir une machine à l'états finis très petite. D'abord nous faisons une démonstration sur les schémas non-coopératifs. Appart d'être simple à implémenter, cette approche est plus efficace. Sur cet exemple nous avons montré que le protocole probabiliste obtient les meilleures performances que le protocole déterministe.

Puis nous avons montré que ces conclusions sont vraies pour le schéma coopératif le plus simple. Nous effectuons l'optimisation des performances, en prouvant que le protocole est meilleur et dans le sens des métriques, et dans le sens de la complexité de calcul.

De plus, toutes les comparaisons entre les schémas avec et sans retransmissions sont faites dans un contexte énergétiquement juste.

En outre, les zones de goodput réalisables sont calculées pour différents code rate, et sont optimisées. Il est ainsi possible de déterminer la meilleure combinaison de transmissions crdit et les taux de codage à la source et au relais.

On peut approfondir les études dans ce domaine, en commençant par d'autres protocoles pour les réseaux avec trois noeuds, afin de trouver quel protocole probabiliste sera plus efficace. Puis on peut poursuivre le chemin en rajoutant plusieurs noeuds, pour trouver le nombre de relais le plus optimale, qui permettra d'obtenir les meilleures performances, en gardant la dépense d'énergie au niveau le plus bas possible.

De plus, les études peuvent être poursuivi en examinant l'effet de plusieurs antennes au niveau de l'émetteur. Normalement, on doit obtenir des gains de diversité. Cependant, il est possible d'obtenir ces derniers en utilisant seulement une antenne sur chaque côté du système, grâce au relais.

Une autre direction peut être prise, afin d'étudier l'effet de la distance entre la source, le relais et la destination.

Enfin, il est possible d'examiner l'effet du taux de code convolutif sur les performances, pour les différents types de modulation pour les canaux réalistes, avec le canal d'acquiescement non-idéal.