

Stratégie de Transmission avec Information Partielle dans les Réseaux Ad Hoc sans Fil

Sara BERRI^{1,2}, Samson LASAULCE², Mohammed Said RADJEF¹

¹Unité de recherche LaMOS (Modélisation et Optimisation des Systèmes) Faculté des sciences exactes, Université de Bejaia, Bejaia, 06000, Algérie

²L2S (CNRS-CentraleSupélec-Univ. Paris Sud), Gif-sur-Yvette, 91191, France

{sara.berri, samson.lasaulce}@l2s.centralesupelec.fr, radjefms@gmail.com

Résumé – Dans cet article, le dilemme de transmission de paquets est généralisé en prenant en compte la présence de fluctuations au niveau de la qualité des liens. Le dilemme de transmission de paquets est un modèle de jeu, connu très utile dans l'étude des réseaux ad hoc. Nous proposons de caractériser les meilleures performances en présence d'information partielle sur les états des canaux, et les actions des joueurs adverses. En outre, une stratégie de transmission est proposée, qui recommande aux nœuds comment adapter leurs puissances d'émission et leurs taux de transmission de paquets.

Abstract – In this paper, the well-known forwarder's dilemma is generalized by accounting for the presence of link quality fluctuations; the forwarder's dilemma is a four-node interaction model with two source nodes and two destination nodes. It is known to be very useful to study ad hoc networks. We propose to characterize the best performances in presence of partial information about the channel state (CSI), and the other player's actions. Additionally, a transmission strategy is proposed, which recommends to nodes how to adapt their transmission powers and packet transmission rate.

1 Introduction

Les nœuds d'un réseau Ad hoc communiquent selon la distance qui les sépare par deux modes : soit directement quand ils sont dans la même portée de transmission, soit en utilisant d'autres nœuds mobiles comme des relais pour acheminer les paquets vers la destination. Ce second mode nécessite alors la collaboration des nœuds du réseau pour permettre l'acheminement du trafic. Cependant, ceci n'est pas dans leur intérêt en raison de la consommation d'énergie, qui réduit ainsi la durée de vie de leur batterie. Ainsi, un mécanisme de stimulation qui encourage les nœuds à offrir ce service aux autres nœuds est nécessaire. Une façon formelle d'étudier ce types de mécanismes est d'utiliser la théorie des jeux. Les auteurs de [1] ont proposé un modèle d'interaction à quatre nœuds (illustré par la Figure 1), qui est très simple mais efficace, et s'est avéré très important dans la littérature des réseaux ad hoc. Cependant, ce modèle n'est pas adapté pour tenir compte des fluctuations possibles au niveau des liens sans fil du réseau. De plus, il ne permet pas d'étudier la façon dont un nœud transmet ses propres paquets, les seules actions à choisir sont liées aux paquets des voisins. Enfin, les modèles de jeux répétés utilisés dans la littérature [2] ne permettent pas d'étudier le scénario important où les nœuds disposent d'information partielle. L'objectif de ce travail est alors de fournir un modèle général qui inclut tous ces aspects. Une autre contribution consiste en la proposition d'un mécanisme qui permet de stimuler la coopération entre

les nœuds, il se repose sur les principes de réputation et les crédits [3]. La stratégie de transmission proposée permet à un nœud d'adapter ses niveaux de puissance d'émission et le taux de transmission de paquets aux fluctuations des liens, et aux actions des autres nœuds. A travers des simulations, la stratégie proposée s'avère être nettement plus performante que d'autres stratégies telle que GTFT [4].

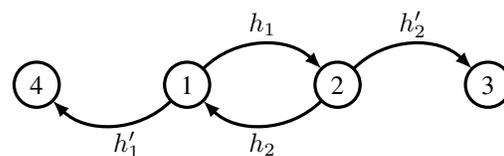


FIGURE 1 – Le modèle d'interaction à 4 nœuds considéré.

2 Modélisation du réseau

Dans cette section, nous proposons de modéliser le problème de transmission de paquets de manière plus générale que [1]. Ainsi, nous supposons que la qualité des quatre liens fluctue au fil du temps. Plus précisément, nous supposons une loi d'atténuation par bloc pour les gains des quatre canaux (voir Figure 1), c'est-à-dire que chaque gain du canal est supposé être constant durant un bloc ou lors de l'envoi d'un paquet et varie

d'un bloc à un autre d'une manière i.i.d.. L'interaction entre les nœuds sources 1 et 2 est alors modélisée sous forme d'un jeu de transmission de paquet défini comme suit :

$$\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \{\mathcal{A}_i\}_{i \in \mathcal{N}}, \{u_i\}_{i \in \mathcal{N}}), \quad (1)$$

où :

- $\mathcal{N} = \{1, 2\}$ représente l'ensemble des joueurs, qui correspondent aux deux nœuds sources ;
- $\mathcal{A}_i = \mathcal{P}_i^2$ est l'ensemble des actions du joueur $i \in \mathcal{N}$. $a_i = (p_i, p'_i)$, p_i et p'_i sont les puissances utilisées pour l'envoi des propres paquets et les paquets du voisin, respectivement. Elles sont supposées appartenir à des ensembles discrets : $\mathcal{P}_i = \mathcal{P}'_i = \mathcal{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_L\} = \{P_{\min}, \dots, P_{\max}\}$, $|\mathcal{P}_i| = |\mathcal{P}'_i| = |\mathcal{P}| = L$.
- u_i est la fonction d'utilité du joueur $i \in \mathcal{N}$:

$$u_i(a_0, a_1, a_2) = \varphi(\text{RSB}_i) - \alpha(p_i + p'_i), \quad (2)$$

où : $a_0 = (h_1, h'_1, h_2, h'_2)$ est l'état global du canal ; $\mathcal{H}_i = \mathcal{H}'_i = \{h_{\min}, \dots, h_{\max}\}$, avec $|\mathcal{H}_i| = |\mathcal{H}'_i| = |\mathcal{H}| = H$; $\alpha \geq 0$ permet d'assigner plus ou moins d'importance à la consommation d'énergie ; la fonction φ est une fonction d'efficacité de la communication supposée croissante et située dans $[0, 1]$; RSB_i est le rapport signal sur bruit du nœud source i :

$$\text{RSB}_i = \frac{p_i h_i p'_{-i} h'_{-i}}{\sigma^2}, \quad (3)$$

σ^2 est la variance du bruit et $-i$ représente l'autre nœud source.

Le modèle original du jeu à une étape de [1] peut être obtenu en supposant que φ est fixe, p'_i binaire, et p_i ainsi que tous les gains des canaux sont constants.

3 Jeu de transmission de paquets répété et région des utilités réalisables

Les nœuds sont supposés interagir au cours de $T \geq 1$ étapes. Durant chaque étape $t \in \{1, \dots, T\}$, les gains des canaux sont supposés fixes tandis que les réalisations sont supposées i.i.d. d'une étape à une autre. Dans cette section, nous introduisons le jeu répété sous forme stratégique, défini par le triplet suivant :

$$\bar{\mathcal{G}} = (\mathcal{N}, \{\Sigma_i\}_{i \in \mathcal{N}}, \{U_i\}_{i \in \mathcal{N}}), \quad (4)$$

où :

- Σ_i est l'ensemble de toutes les stratégies de transmission possibles du nœud $i \in \mathcal{N}$, notées σ_i . La décision d'un nœud consiste à choisir une distribution de probabilité sur son ensemble d'actions possibles, et sa connaissance est en termes des états globaux des canaux et des actions choisies par l'autre nœud source. Nous supposons qu'un nœud $i \in \mathcal{N}$, a accès à un signal associé à l'état a_0 noté $s_i \in \mathcal{S}_i$, $|\mathcal{S}_i| < \infty$. À l'étape t , l'observation $s_i(t) \in \mathcal{S}_i$ correspond donc à l'image qu'un nœud i a sur

l'état global du canal $a_0(t)$. D'autre part, en termes d'actions observées, on suppose qu'un nœud $i \in \mathcal{N}$ a une observation imparfaite, il a accès à un signal $y_i \in \mathcal{Y}_i$, $|\mathcal{Y}_i| < \infty$. Ces signaux sont supposés être le résultat de structures d'observation sans mémoire [6] dont les probabilités conditionnelles sont notées par Υ_i , et Γ_i , respectivement :

$$\Gamma_i(y_i | a_0, a_1, a_2) = \Pr[Y_i = y_i | (A_0, A_1, A_2) = (a_0, a_1, a_2)],$$

$$\Upsilon_i(s_i | a_0) = \Pr[S_i = s_i | A_0 = a_0]. \quad (5)$$

La raison pour laquelle nous faisons distinction entre les observations s_i et y_i provient des hypothèses faites en termes de causalité. En effet, pratiquement parlant, il est pertinent de supposer qu'un nœud a accès aux réalisations passées de s_i au sens large, à savoir $s_i(1), \dots, s_i(t)$ à l'étape t . Cependant, seules les réalisations passées au sens strict $y_i(1), \dots, y_i(t-1)$ sont supposées être connues à l'étape t . Sinon, cela signifierait qu'un nœud aurait accès à l'image de son action actuelle et celles des autres avant qu'elles ne soient choisies.

Une stratégie de transmission σ_i se compose d'une séquence de fonctions définies comme suit :

$$\sigma_{i,t} : \begin{array}{l} \mathcal{S}_i^t \times \mathcal{Y}_i^{t-1} \rightarrow \Delta(\mathcal{P}^2) \\ (s_i^t, y_i^{t-1}) \mapsto \pi_i(t), \end{array} \quad (7)$$

- $s_i^t = (s_i(1), \dots, s_i(t))$, $y_i^{t-1} = (y_i(1), \dots, y_i(t-1))$;
- $\Delta(\mathcal{P}^2)$ représente l'ensemble des distributions de probabilité sur l'ensemble \mathcal{P}^2 ;
- $\pi_i(t)$ est la distribution de probabilité utilisée par le nœud source i à l'étape t pour générer son action $(p_i(t), p'_i(t))$.

- La fonction d'utilité à long terme du nœud $i \in \mathcal{N}$ est :

$$U_i(\sigma_1, \sigma_2) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \delta^t \mathbb{E}[u_i(A_0(t), A_1(t), A_2(t))]. \quad (8)$$

où : $0 < \delta < 1$ est le facteur d'actualisation.

Un des principaux objectifs de ce papier est d'exploiter la formulation ci-dessus pour définir un système de transmission efficace de manière globale pour les nœuds sources. Pour cela, nous allons caractériser la région des utilités à long terme pour le problème considéré. Lorsque T est supposé être grand, le processus aléatoire associé à l'état du système $A_0(1), A_0(2), \dots, A_0(T)$ est i.i.d. et la structure d'observation donnée par $(\Upsilon_1, \Upsilon_2, \Gamma_1, \Gamma_2)$ est sans mémoire, certains résultats récents peuvent être exploités pour caractériser la région des utilités réalisables du jeu répété considéré et de définir des stratégies de transmission efficaces. Une distribution conjointe $Q(a_0, a_1, a_2)$ est réalisable à la limite $T \rightarrow \infty$ si et seulement si elle peut être factorisée comme suit :

$$Q(a_0, a_1, a_2) = \sum_{v, s_1, s_2} \rho(a_0) P_V(v) \times \Upsilon(s_1, s_2 | a_0) \times P_{A_1 | S_1, V}(a_1 | s_1, v) P_{A_2 | S_2, V}(a_2 | s_2, v), \quad (9)$$

où : ρ est la distribution de probabilité de l'état du canal ; Υ est la probabilité conditionnelle conjointe qui définit la structure d'observation supposée ; $V \in \mathcal{V}$ est une variable aléatoire auxiliaire ou loterie prouvée être en mesure d'améliorer les performances en général (voir [5] pour plus de détails). En exploitant ce résultat, une paire de gains espérés (U_1, U_2) est dite réalisable si elle s'écrit comme $(\mathbb{E}_Q(u_1), \mathbb{E}_Q(u_2))$ telle que Q se factorise comme la relation (9). En utilisant un argument de partage de temps, la région des utilités réalisables devrait être convexe. Par conséquent, la frontière de Pareto de la région des utilités peut être obtenue en maximisant l'utilité pondérée suivante :

$$W_\lambda = \lambda \mathbb{E}_Q(u_1) + (1 - \lambda) \mathbb{E}_Q(u_2), \quad (10)$$

par rapport à Q , et ce pour chaque $\lambda \in [0, 1]$. Dans (9), ρ et Υ sont donnés. Ainsi, W_λ doit être maximisé par rapport au triplet $(P_{A_1|S_1,V}, P_{A_2|S_2,V}, P_V)$. Dans cet article, nous limitons notre attention à l'optimisation de $(P_{A_1|S_1,V}, P_{A_2|S_2})$ pour une loterie fixe P_V . Dans ce contexte, le problème d'optimisation devient un problème bilinéaire, qui peut être résolu en utilisant des techniques appropriées, cependant la convergence globale n'est pas vérifiée. Ainsi, Afin de garantir la convergence et gérer le problème de complexité, nous proposons d'exploiter la dynamique de meilleure réponse séquentielle [7].

4 Stratégie de transmission proposée

L'objectif principal de cette section est de déterminer des stratégies de transmission efficaces globalement. Ici, l'efficacité globale est mesurée en termes de bien-être social, à savoir, en termes de la somme $U_1 + U_2$. La stratégie de transmission que nous proposons comporte trois composantes :

1. Un point de la région d'utilité obtenu en appliquant la dynamique de meilleure réponse séquentielle avec $\lambda = 0.5$ et $|\mathcal{V}| = 1$. Ceci fournit une distribution de probabilité notée π_i^* .
2. Appliquer le principe de réputation [2]. Au cours de chaque étape de jeu, les nœuds échangent un certain nombre de paquets noté K (généralement grand). L'accès qu'ont les nœuds sources aux réalisations du signal y_i pour chaque paquet pourrait être exploité pour évaluer la réputation de l'autre nœud à l'étape t . Dans cette section, nous supposons une structure d'observation particulière Γ_1, Γ_2 , adaptée au problème de transmission de paquets considéré dans les réseaux ad hoc. Nous supposons que le signal y_i est binaire : $y_i \in \{\text{NT}, \text{T}\}$. Soit $\epsilon \in [0, 1]$ un paramètre qui représente la *probabilité d'une détection erronée*. Si un nœud i choisit l'action $a^{\min} = (P_{\min}, P_{\min})$ (resp. toute autre action de \mathcal{P}_i^2), le nœud $-i$ reçoit le signal NT (resp. T), avec la probabilité $1 - \epsilon$. Le nœud $-i$ perçoit l'action NT (resp. Transmettre T) alors que l'action Transmettre T (resp. Ne pas Transmettre NT) a été choisie par le nœud i . En utilisant ces notations, le nœud

i peut calculer la réputation du nœud $-i$ comme suit :

$$R_{-i}(t) = \frac{(1 - \epsilon)|\{y_i = \text{T}\}| + \epsilon|\{y_i = \text{NT}\}|}{K}, \quad (11)$$

où $|\{y_i = \text{T}\}|$ et $|\{y_i = \text{NT}\}|$ sont le nombre d'occurrences de l'action Transmettre et Ne pas Transmettre parmi les K paquets, respectivement.

3. L'idée des crédits virtuels est supposée être mise en œuvre de manière similaire que les travaux antérieurs [3]. La récompense et le coût que nous proposons sont définis ci-dessous. Notons par $m_i(t) \geq 0$ le crédit du nœud i à l'étape t .

La stratégie de transmission est définie comme suit :

$$\sigma_{i,t}^*(s_i^t, y_i^{t-1}) = \begin{cases} \pi_i^*(t) & \text{si } t=0 \text{ ou } m_i(t) < \mu, \\ \hat{\pi}_{-i}(t-1) & \text{sinon,} \end{cases} \quad (12)$$

où :

- le crédit $m_i(t)$ évolue comme suit :

$$m_i(t) = m_i(t-1) + \beta < \pi_i(t-1), e_k > - \beta \nu_i(t-1), \quad (13)$$

$\beta \nu_i(t-1)$ représente le coût virtuel du nœud i quand le taux d'arrivée de ses paquets est $\nu_i(t-1)$, avec $\beta \geq 0$; $< >$ représente le produit scalaire ; e_k est le $k^{\text{ème}}$ vecteur de la base canonique \mathbb{R}^{2L} , toutes les composantes sont égales à 0 à l'exception de la $k^{\text{ème}}$ composante qui est égale à 1. L'indice k est donné par l'indice de l'action $a_i^*(t) = f_i^*(s_i(t))$;

- $\mu \geq 0$ est un paramètre fixé qui représente le niveau de coopération des nœuds. Une condition suffisante sur μ et β afin de garantir que les nœuds possèdent toujours suffisamment de crédits est que $\mu \geq 2\beta$ doit être vérifiée ;
- la distribution $\hat{\pi}_{-i}(t-1)$ est construite comme suit :

$$\hat{\pi}_{-i}(t-1) = R_{-i}(t-1)\pi_i^*(t) + [1 - R_{-i}(t-1)]\pi^{\min}, \quad (14)$$

avec $\pi^{\min} = (1, 0, 0, \dots, 0) \in \mathbb{R}^{2L}$ représente l'action pure $a^{\min} = (P_{\min}, P_{\min})$.

En utilisant le principe de déviation à une étape, le profil de stratégies (σ_1^*, σ_2^*) défini par (12) peut être démontré être un équilibre parfait en sous jeu de $\bar{\mathcal{G}}$ sous une certaine condition.

5 Evaluation des performances

Nous considérons un réseau $1000m \times 1000m$ contenant 50 nœuds, placés d'une manière aléatoire, chacun transmettant 2paquets/s . Le rayon de transmission des nœuds est fixé à $150m$. Nous avons implémenté la stratégie proposée, et afin d'évaluer ses performances la stratégie GTFT a été également implémentée. GTFT est une stratégie qui adopte une règle de décision de type tit-for-tat classique sans prendre en compte la possibilité d'existence d'un signal associé à la réalisation de l'état des canaux. La simulation dure $1000s$, dont la durée de chaque intervalle est $50s$.

Concernant les paramètres du jeu, ils sont comme suit. Le paramètre $\alpha = 10^{-2}$. La variance $\sigma^2 = 0.1$. Les ensembles de niveaux de puissance possibles sont définis par : $\forall i \in \{1, 2\}, \mathcal{P}_i = \mathcal{P}'_i, L = 10, P_{\min} = 0, P_{\max} = 10$ W. L'incrément de la puissance s'effectue de manière uniforme sur une échelle dB, à partir de la puissance positive minimale qui est égale à 10 mW. Les ensembles des gains des canaux possibles sont définis par : $\forall i \in \{1, 2\}, \mathcal{H}_i = \mathcal{H}'_i : H = 10, h_{\min} = 0.04, h_{\max} = 10$, et l'incrément est égale à $\frac{10-0.04}{10}$. Les différentes moyennes des gains des canaux sont données par : $(\bar{h}_i, \bar{h}'_i, \bar{h}_{-i}, \bar{h}'_{-i}) = (1, 1, 1, 1)$. La fonction d'efficacité de communication est : $\varphi(x) = e^{-\frac{x}{g}}$.

La Figure 2, représente la région des utilités réalisables sous diverses hypothèses d'information. La courbe supérieure continue représente la frontière de Pareto obtenue lors de la mise en œuvre de la stratégie de transmission proposée et ce lorsque : $\forall i \in \mathcal{N}, s_i = a_0 = (h_1, h'_1, h_2, h'_2)$. La courbe discontinue correspond à $s_i = (h_i, h'_i)$. Il est intéressant de constater que la perte qu'engendre le passage d'information globale à information locale est relativement faible. Cela montre qu'il est possible d'implémenter une stratégie de transmission distribuée sans trop sacrifier la performance globale. En l'absence d'informations (c'est-à-dire $s_i = \text{constant}$), la perte encourue est plus importante. En effet, la courbe en pointillés (obtenue en choisissant pour chaque $\lambda \in [0, 1]$ le meilleur profil d'action en termes d'utilité pondérée espérée (10)) montre que le gain en termes d'utilité ou du bien-être social lorsque l'on passe de $s_i = \text{constant}$ à $s_i = a_0$ est d'environ 10%.

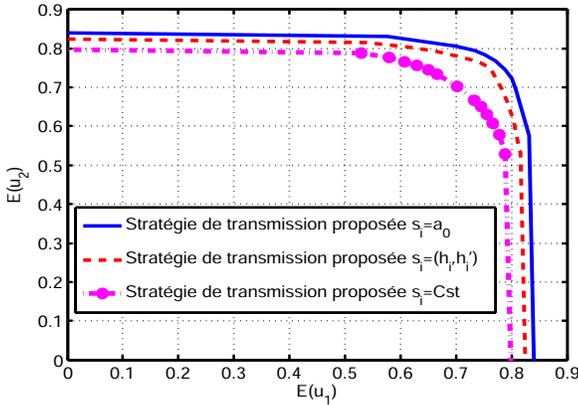


FIGURE 2 – Région des utilités réalisables pour différents scénarios d'information : $s_i = a_0, s_i = (h_i, h'_i)$, et $s_i = \text{constant}$.

La Figure 3 représente l'évolution du taux de transmission de paquets pour la stratégie proposée et GTFT. Après une certaine période, les performances de la stratégie proposée se stabilisent. La figure montre que la stratégie proposée est mieux que GTFT en termes de taux de transmission de paquets. Au début, une perte d'efficacité est observée pour la stratégie proposée, car les nœuds coopératifs punissent les nœuds égoïstes. Ceci n'est pas le cas de GTFT en raison du paramètre de générosité introduit g .

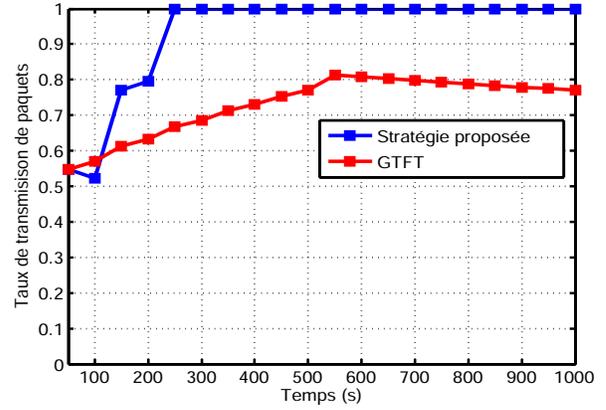


FIGURE 3 – L'évolution du taux de transmission de paquets dans le temps.

6 Conclusion

Ce travail généralise le modèle du dilemme de transmission de paquets [1] en prenant en compte les fluctuations des gains des canaux. De plus, nous proposons un mécanisme permettant de stimuler la coopération entre les nœuds, qui se repose sur la réputation et les crédits. Les résultats obtenus montrent des gains significatifs.

Références

- [1] M. Félegyházi et J.P. Hubaux. *Game Theory in Wireless Networks : A Tutorial*. EPFL technical report, LCA-REPORT-2006-002, Feb. 2006.
- [2] J.J. Jaramillo et R. Srikant. *A Game Theory Based Reputation Mechanism to Incentivize Cooperation in Wireless Ad Hoc Networks*. Ad Hoc Networks, vol. 8, no. 4, pp. 416-429, 2010.
- [3] L. Buttyán et J. P. Hubaux. *Enforcing Service Availability in Mobile Ad Hoc WANs*. Proc. IEEE/ACM MobiHOC, Boston, Aug. 2000.
- [4] R. Axelrod, et J. Wu. *How to Cope with Noise in the Iterated Prisoner's Dilemma*. The Journal of Conflict Resolution, vol. 39, pp. 183-189, 1995.
- [5] B. Larrousse, S. Lasaulce, et M. Wigger. *Coordinating Partially-Informed Agents over State-Dependent Networks*. Proc. IEEE ITW, Jerusalem, Israel, Apr-May. 2015.
- [6] A. El Gamal et Y. Kim. *Network Information Theory*. Cambridge University Press, 2011.
- [7] S. Lasaulce et H. Tembine. *Game Theory and Learning for Wireless Networks : Fundamentals and Applications*. Academic Press, Elsevier, pp. 1-336, Oct. 2011, ISBN 978-0123846983.