

Évaluation des gains du Physical-Layer Network Coding dans les réseaux ad-hoc

Raphaël Naves^{1,2}, Hicham Khalifé¹, Gentian Jakllari², Vania Conan¹, André-Luc Beylot²

¹Thales Communications & Security, France - Email: name.surname@thalesgroup.com

²IRIT-INP/ENSEEIH, France - Email: name.surname@enseeiht.fr

Dans ce travail, nous nous intéressons aux performances du Physical-Layer Network Coding (PLNC) dans des réseaux sans fil multi-sauts à grande échelle*. Si les performances de cette technique avancée de communication, autorisant plusieurs transmissions simultanées vers une même destination, ne sont plus à prouver sur des petites topologies, son utilité dans de grands réseaux ad-hoc reste à démontrer. Dans cette étude, nous présentons une méthode permettant d'évaluer précisément les gains du PLNC dans des scénarios de déploiement réalistes. Les résultats obtenus indiquent qu'une utilisation efficace du PLNC permet une augmentation des débits d'environ 30% par rapport aux transmissions traditionnelles sans interférence.

Mots-clefs : Réseaux sans fil, Physical-Layer Network Coding, Scheduling, Optimisation

1 Introduction

Dans les réseaux sans fil traditionnels, la gestion des interférences constitue un enjeu majeur. Dans le but d'éviter les collisions entre paquets, des mécanismes sont généralement mis en place afin d'orthogonaliser les communications en espace, en temps, en fréquence ou en code. Néanmoins, les récents progrès apportés au niveau de la couche physique ont démontré que cette orthogonalisation des transmissions n'était pas toujours indispensable. Le Physical-Layer Network Coding (PLNC) permet notamment à deux émetteurs de transmettre simultanément leur paquet respectif à une destination commune [ZLL06]. Cette solution a d'ailleurs été proposée afin d'augmenter le débit d'une communication Two-Way Relay Channel (TWRC)[KGK07]. Dans ce scénario, présenté sur la Figure 1, deux nœuds, A et B , cherchent à s'envoyer un paquet au travers d'un relais R . Contrairement aux transmissions sans interférence, le PLNC autorise les deux nœuds à transmettre leur paquet p_1 et p_2 simultanément dans le premier slot. Les signaux s'additionnent au niveau physique et le relais R est capable de retrouver une combinaison linéaire au niveau binaire des deux paquets transmis. Classiquement, R parvient à décoder un paquet p_3 qui est le résultat d'une opération XOR entre p_1 et p_2 . Dans le deuxième slot, R envoie alors ce paquet p_3 aux nœuds d'extrémité en utilisant le broadcast naturel des transmissions sans fil. A la réception de ce paquet, les nœuds A et B sont alors en mesure de retrouver le paquet qui leur est destiné en effectuant une opération XOR entre le paquet reçu et celui qu'ils ont eux-mêmes transmis dans le premier slot. Dans ce scénario simple, le gain du Physical-Layer Network Coding est de 100% par rapport aux transmissions classiques sans interférences, et de 50% par rapport au Network Coding traditionnel.

Alors que la majorité des études se sont focalisées sur de petites topologies [XW16], nous nous intéressons dans ce travail aux performances du PLNC dans de grands réseaux sans fil multi-sauts. Pour cela, nous avons tout d'abord défini une méthode permettant d'évaluer précisément les gains du PLNC dans des déploiements réalistes. Les résultats obtenus nous ont ensuite conduits à adapter l'utilisation traditionnelle du PLNC dans les cas où celle-ci se révèle inefficace.

*. Ce travail est une version courte de l'article "A Framework for Evaluating Physical-Layer Network Coding Gains in Multi-hop Wireless Networks" accepté à la conférence IEEE INFOCOM 2017

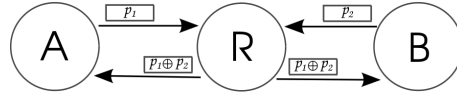


FIGURE 1: The Two-Way Relay Model (TWRC) - 2 steps (time-slots) illustration

2 Description de notre méthode d'évaluation des gains du Physical-Layer Network Coding traditionnel

2.1 Singularités introduites par le Physical-Layer Network Coding

Le premier objectif de notre travail est d'évaluer, dans des réseaux multi-sauts à grande échelle, les gains du PLNC présenté dans le scénario TWRC. Pour cela, nous considérons un réseau ad-hoc traditionnel modélisé par un graphe, dans lequel un ensemble de flux (couples source-destination) sont établis. Si la source et la destination d'un flux ne sont pas voisins, les messages sont alors relayés par les autres nœuds du réseau au travers d'un routage statique prédéfini. Nous nous plaçons dans un contexte TDMA dans lequel les nœuds partagent une horloge commune et les transmissions sont programmées dans des intervalles (slots) de temps particuliers.

Afin d'évaluer les gains du PLNC, nous comparons les résultats du problème classique de débit minimum maximal (dit "max-min") avec et sans PLNC. Plus précisément, nous cherchons à déterminer le débit maximal atteignable du flux ayant le débit le plus bas parmi l'ensemble des flux établis. Pour les transmissions traditionnelles, nous ré-implantons la méthode présentée dans [JPPQ03]. En présence de transmissions PLNC, nous adaptons cette méthode aux singularités introduites par ce nouveau mode de transmission.

Nous définissons dans un premier temps un nouveau modèle d'interférence. En effet, les solutions traditionnelles appelées "Protocol Model" et "Physical Model" illustrent le fait qu'une transmission ne peut se faire sans erreur que si la destination ne reçoit qu'un seul signal. Clairement, le principal concept du PLNC étant d'autoriser plusieurs communications simultanées vers un même récepteur, ces modèles ne sont plus adaptés. Désormais, une destination D peut assurer la réception de deux signaux en provenance de S_1 et S_2 simultanément si les rapports Signal sur Bruit (SNR) respectent les conditions suivantes :

$$SNR_{S_1}(D) = \frac{P(S_1,D)}{\sum_{k \neq 1} P(S_k,D) + N} > \beta \quad \left| \quad SNR_{S_2}(D) = \frac{P(S_2,D)}{\sum_{k \neq 2} P(S_k,D) + N} > \beta$$

où $P(A,B)$ représente la puissance reçue en B du signal envoyé par A , N le bruit thermique et β le seuil de SNR acceptable.

Contrairement à la réception d'une transmission sans interférence, il est important de souligner que la destination n'est pas capable de décoder individuellement les paquets en provenance de S_1 ni de S_2 . Quand une transmission PLNC est effectuée, la destination retrouve uniquement le paquet codé correspondant à une opération XOR entre les deux paquets initiaux.

Ce nouveau modèle d'interférence permet d'identifier l'ensemble des transmissions pouvant être actives à l'intérieur d'un même slot de temps. Néanmoins, l'ajout du PLNC nécessite de prendre quelques précautions au niveau de l'ordonnancement, comme illustré dans le scénario TWRC. Afin de s'assurer que le nœud A peut décoder le paquet initial émis par B , le paquet codé relayé par R ne doit pas être à son tour impliqué dans une transmission PLNC. Cela donnerait naissance à un paquet codé avec un troisième paquet et A ne pourrait pas nécessairement posséder assez d'information pour retrouver le paquet envoyé par B . En empêchant un paquet codé d'être impliqué dans une transmission PLNC, nous assurons à chaque destination d'être en capacité de décoder les paquets reçus.

2.2 Algorithme de calcul de débit minimum maximal

Afin de résoudre le problème de débit minimum maximal, nous estimons tout d'abord un max-min atteignable, constituant une borne inférieure à la valeur cherchée. Pour cela nous identifions chaque élément TWRC de notre réseau. Un élément TWRC est composé des liens partagés par deux flux bidirectionnels

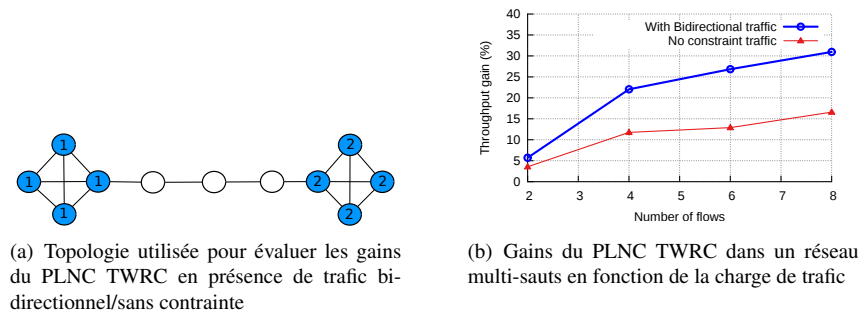


FIGURE 2: Evaluation des gains du PLNC TWRC

reliant 3 nœuds consécutifs. Ils correspondent aux opportunités d'effectuer des transmissions PLNC. L'algorithme de base introduit dans [JPPQ03] nous permet alors de déterminer des ensembles de liens pouvant être actifs simultanément. Des transmissions peuvent coexister si chaque transmission respecte le modèle d'interférence qui lui est associé. Ainsi, les liens faisant partie d'un élément TWRC doivent satisfaire le modèle d'interférence adapté au PLNC tandis que les transmissions sans interférence sont soumises au traditionnel "Physical Model".

Les ensembles de transmissions pouvant coexister sont ensuite ajoutés à un programme linéaire qui maximise le débit minimum de l'ensemble des flux en maximisant les périodes d'activité de chaque lien. Le programme linéaire défini veille également à la conservation de flux des paquets initiaux non-codés (respectivement de paquets codés). Chaque relais d'un flux reçoit et transmet la même quantité de paquets non-codés (respectivement de paquets codés). Ces conditions assurent à chaque destination de recevoir tous les paquets émis par la source correspondante. Les règles d'ordonnancement décrites précédemment garantissent, quant à elles, aux destinations la possibilité de décoder les paquets codés reçus.

La recherche des liens actifs simultanément étant un problème NP-complet, la débit minimal obtenu n'offre pas la garantie d'être la valeur maximale recherchée. Nous en calculons alors une borne supérieure en déterminant l'ensemble de cliques du graphe, c'est-à-dire des ensembles de liens ne pouvant pas être actifs deux à deux. L'identification de ces cliques détermine une limite à la période d'activité de chaque lien, ce qui, intégré à notre programme linéaire, fournit une borne supérieure au max-min recherché.

En identifiant suffisamment d'ensembles de transmission pouvant coexister et de cliques, on constate un rapprochement de nos deux bornes qui conduisent à l'optimum.

2.3 Évaluation des gains

Afin d'évaluer les gains du PLNC dans un réseau multi-saut, nous nous intéressons tout d'abord à la topologie présentée sur la Figure 2(a), dans laquelle deux clusters de 4 nœuds chacun sont connectés par un ensemble de 3 relais. Dans un premier scénario, nous forçons un trafic bidirectionnel entre les 2 clusters : à chaque flux établi entre un nœud du cluster 1 et un du cluster 2 répond un flux dans l'autre sens. Nous faisons varier le nombre de flux établis dans le réseau et présentons les gains du PLNC sur la Figure 2(b) (courbe bleue). Pour chaque nombre de flux, nous faisons varier les couples source-destination et nous indiquons la moyenne des gains obtenus. On remarque que ces gains dépassent 30% en présence de 8 flux (4 flux bidirectionnels). En effet, les éléments TWRC se multiplient et les possibilités de déclencher des transmissions PLNC augmentent à leur tour.

Dans un second scénario, nous avons relâché les contraintes de bidirectionnalité du trafic. Chaque nœud (y compris les relais) peut être source ou destination d'un flux. De manière identique, la courbe rouge de la Figure 2(b) présente les gains moyens obtenus en faisant varier les couples source-destination. Les résultats sont moins bons que ceux obtenus en présence de trafic bidirectionnel. En effet, le nombre d'éléments TWRC diminue et par conséquent les opportunités de transmissions PLNC se font plus rares.

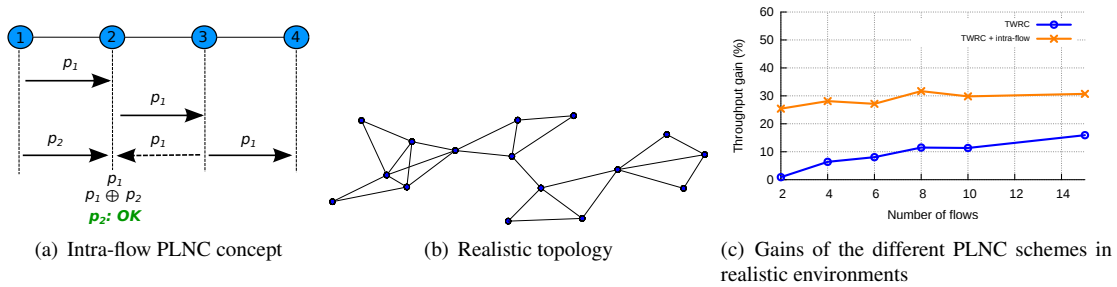


FIGURE 3: PLNC intra-flux : concept et évaluation des gains

3 Physical-Layer Network Coding intra-flux

Les observations précédentes soulignent la nécessité de repenser le PLNC traditionnel afin de l'intégrer aux réseaux sans fil multi-sauts. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés au PLNC intra-flux, évoqué dans [KGK07]. Contrairement au PLNC introduit dans le scénario TWRC, cette utilisation du PLNC ne nécessite pas de modèle de trafic particulier. Dans ce scénario, le relais d'un flux multi-saut mémorise les paquets qu'il transmet aux nœuds suivants. Ce relais est alors capable de décoder un paquet qui lui est destiné si celui-ci est impliqué dans une transmission PLNC avec un paquet qu'il a déjà reçu (Figure 3(a)).

En intégrant le PLNC intra-flux à notre algorithme et en adaptant notre programme linéaire aux nouvelles contraintes, nous pouvons ainsi évaluer les performances du PLNC intra-flux dans des réseaux multi-sauts. Pour cela, nous choisissons la topologie irrégulière présentée sur la Figure 3(b). Dans ce réseau constitué de 16 nœuds, aucune contrainte n'est imposée au modèle de trafic. Nous avons fait varier la charge de trafic (nombre de flux établis) du réseau en simulant pour chaque charge plusieurs couples source-destination différents. Les résultats obtenus (Figure 3(c)) confirment que les gains du PLNC TWRC seul restent marginaux, par manque de trafic bidirectionnel. En revanche, l'ajout du PLNC intra-flux permet en moyenne une augmentation du débit d'environ 30% quelle que soit la charge du réseau.

4 Conclusion

Dans cette étude, nous avons évalué les gains du Physical-Layer Network Coding (PLNC) dans des réseaux sans fils multi-sauts à grande échelle. Alors que la plupart des travaux avaient étudié cette technique de communication dans des scénarios simples, nous avons présenté une méthode permettant de déterminer les performances du PLNC dans des déploiements de nœuds plus ambitieux. Pour cela, nous avons défini un nouveau modèle d'interférence et nous avons formalisé le problème d'ordonnancement dans un réseau multi-saut comme un problème d'optimisation. Les résultats obtenus dans le cas simple d'une utilisation "Two-Way Relay Channel" du PLNC nous ont amené à adapter ce PLNC traditionnel afin de l'intégrer efficacement aux réseaux ad-hoc. Nous avons alors ajouté le PLNC intra-flux à notre solution et les résultats ont montré que cette technique permet une augmentation significative des débits dans des scénarios de déploiement réalistes.

Références

[JPPQ03] Jain, Padhye, Padmanabhan, and Qiu. Impact of interference on multi-hop wireless network performance. In *Proceedings of the MobiCom Conference*, 2003.

[KGK07] Katti, Gollakota, and Katabi. Embracing wireless interference : Analog network coding. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM conference*, 2007.

[XW16] X.Wang and W.Mao. Analog network coding without restrictions on superimposed frames. *IEEE Transactions on Networking*, Vol.24, No.3, pp.788 - 805, 2016.

[ZLL06] Zhang, Liew, and Lam. Hot topic : physical-layer network coding. In *Proceedings of the ACM MobiCom conference*, 2006.