



HAL
open science

SE-PLNC, du Network Coding à tous les étages

Raphaël Naves, Gentian Jakllari, Hicham Khalife, Vania Conan, André-Luc Beylot

► **To cite this version:**

Raphaël Naves, Gentian Jakllari, Hicham Khalife, Vania Conan, André-Luc Beylot. SE-PLNC, du Network Coding à tous les étages. 4èmes Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication (CORES 2019), Jun 2019, Saint Laurent de la Cabrerisse, France. hal-02120663

HAL Id: hal-02120663

<https://hal.science/hal-02120663>

Submitted on 6 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SE-PLNC, du Network Coding à tous les étages

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

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

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

Après avoir identifié les principaux obstacles à l'intégration du Physical-Layer Network Coding (PLNC) dans les réseaux sans-fil, nous proposons dans ce travail un nouveau cadre d'utilisation de cette technique avancée de transmission permettant d'exploiter au mieux son potentiel. Plus précisément, en combinant le Network Coding physique (PLNC) avec le Network Coding plus traditionnel de niveau paquet, nous définissons Source-Encoded PLNC (SE-PLNC), un schéma d'application du PLNC pouvant être adopté dans toute communication à plus de deux sauts. Cette utilisation du PLNC, qui tire également profit des opportunités de relayage multi-chemin rarement exploitées dans les réseaux sans fil, permet notamment de relâcher les contraintes sur le trafic qui restreignent la sphère d'application des solutions existantes. Grâce à son implantation sur un banc de test composé de plusieurs équipements radios, nous mettons en lumière la faisabilité en pratique de notre solution. Enfin, des simulations réalistes montrent que SE-PLNC permet des augmentations de débit de 30% dans des réseaux de plusieurs dizaines de nœuds.

Mots-clefs : Sans-fil, Network Coding, Radio logicielle

1 Introduction

Le Physical-Layer Network Coding (PLNC) [ZLL06] est une technique de gestion des interférences permettant à plusieurs nœuds de transmettre simultanément un paquet à une même destination. Ce concept, contraire à l'orthogonalisation en temps de communications voisines généralement prônée dans les réseaux sans-fil, a été introduit afin de doubler le débit entre deux nœuds formant un schéma Two-Way Relay Channel (TWRC) (fig. 1(c)). Dans ce scénario, les stations A et B cherchent à s'échanger un paquet à l'aide du relais R . A l'inverse des transmissions dites sans interférence, avec le PLNC, les deux sources peuvent envoyer simultanément leur paquet respectif p_1 et p_2 . En traitant les signaux superposés, le relais R est alors capable de décoder une combinaison linéaire de ces deux paquets. Typiquement, au niveau binaire, R retrouve le paquet $p_3 = p_1 \oplus p_2$, qu'il relaie aux nœuds d'extrémité dans un second intervalle de temps, profitant ainsi de la diffusion naturelle qu'offrent les transmissions sans-fil. Alors, A et B peuvent retrouver le message qui leur est destiné en retirant du paquet codé reçu leur propre contribution. Comme détaillé dans les trois configurations de la fig. 1, les gains du PLNC atteignent 100% et 50% comparés respectivement à des transmissions sans interférence, et au Network Coding de niveau paquet.

Cependant, si les gains du PLNC semblent à première vue prometteurs, ils restent intimement liés au scénario TWRC et peuvent fortement décroître en présence de topologies et de conditions de trafic différentes. Il convient alors de définir de nouvelles méthodes d'utilisation du PLNC afin de bénéficier de cette technique dans des déploiements de nœuds plus généraux. A cet effet, après avoir introduit un bref état de l'art sur le PLNC, nous présentons Source-Encoded PLNC (SE-PLNC), un nouveau schéma de PLNC qui combine les Network Coding de niveaux physique et paquet et qui tire profit des opportunités de relayage multi-chemin généralement disponibles dans les réseaux denses. Nous soulignons sa faisabilité par des résultats expérimentaux obtenus sur des vrais équipements radios. Enfin, le passage à l'échelle de notre solution est corroboré par les résultats obtenus par simulation.

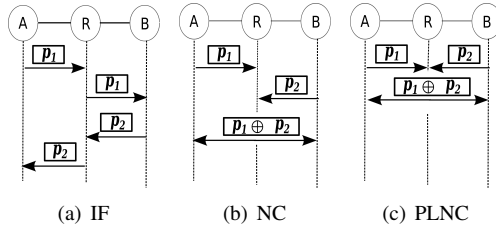


FIGURE 1: Scénario TWRC avec a) Transmissions sans interférence, b) Network-Coding de niveau paquet, c) Physical-Layer Network Coding

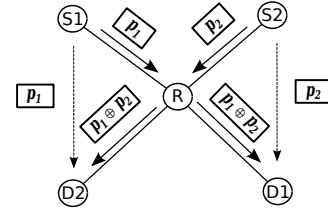


FIGURE 2: X topology scheme - PLNC avec écoute opportuniste

2 Etat de l'art

Depuis l'introduction du PLNC, plusieurs travaux ont cherché à intégrer cette technique dans des déploiements à grande échelle de réseaux sans-fil. Les simulations réalisées dans [WXAHI6] ont ainsi montré que, cette technique de transmission pouvait entraîner une augmentation de débit de 114% par rapport aux transmissions sans interférence traditionnelles. De surcroît, un nouveau schéma d'utilisation du PLNC a été introduit dans cette étude. Comme décrit à la fig. 2, ce nouveau schéma appelé "X Topology scheme" est une généralisation du simple TWRC, dans laquelle les destinations apprennent le paquet indispensable au décodage du paquet codé envoyé par le relais, grâce à de l'écoute opportuniste dans le premier slot. Si ce nouveau schéma permet de relâcher la contrainte de trafic exactement bi-directionnel indispensable au fonctionnement du PLNC TWRC, il est clair qu'il reste inefficace quand tous les flux suivent la même direction. L'étude [NKJ⁺17] a d'ailleurs confirmé que les performances du PLNC TWRC et du schéma "X topology scheme" étaient marginales dans de nombreux déploiements réalistes.

3 Source-Encoded PLNC

Considérons le scénario de la fig. 3 dans lequel une source veut envoyer un ensemble de paquets à une destination éloignée de deux sauts. Bien que ce scénario soit relativement répandu, aucune solution impliquant le PLNC et visant à augmenter le débit total n'a encore été proposée. En effet, l'absence de flux qui se croisent rend inapplicables les schémas existants d'utilisation du PLNC. Ainsi, en considérant que l'accès au canal est régulé par un protocole TDMA (Time-Division Multiple Access) et des nœuds half-duplex, le débit maximal auquel la source peut envoyer des paquets à la destination est de 1 trame tous les 2 slots. Plus précisément, en utilisant un protocole de routage classique, la source S transmet un paquet au nœud R_1 dans les slots pairs et R_1 relaie le paquet reçu jusqu'à la destination dans les slots impairs. Dans un contexte traditionnel de transmissions sans interférence, un relayage multi-chemin en sollicitant également le nœud R_2 n'est pas envisageable sachant que les 4 liens ne peuvent être actifs simultanément deux à deux.

En revanche, en autorisant le PLNC, ce relayage multi-chemin devient une option. En effet, dans le deuxième slot (fig. 3(b)), quand R_1 relaie le paquet p_1^n à la destination, la source peut également envoyer un paquet p_2^n au relais R_2 . Les deux paquets transmis entrent alors en collision au niveau de R_2 , mais ce dernier est capable, à l'aide d'un traitement de signal adapté au PLNC, de retrouver le paquet codé $r_2^c = p_1^n \oplus p_2^n$. Cependant, R_2 ne connaît pas le paquet p_1^n qu'il n'a jamais reçu (une écoute opportuniste dans le premier slot n'est pas envisageable), et ne peut donc pas décoder le paquet p_2^n . Pour pallier ce problème, nous procédons à un encodage au niveau de la source. Ainsi, au lieu d'envoyer p_2^n dans le deuxième slot, la source S transmet le paquet codé $p_2^c = p_1^n \oplus p_2^n$. Suivant les propriétés d'une opération XOR, l'expression du paquet reçu par R_2 peut être simplifiée de la manière suivante :

$$r_2^c = p_1^n \oplus p_2^c = p_1^n \oplus (p_1^n \oplus p_2^n) = p_2^n \quad (1)$$

En d'autres termes, R_2 décode directement le paquet natif qui lui est destiné. Il peut alors le relayer dans le troisième slot (fig. 3(c)), pendant que, de manière similaire, la source S envoie le paquet $p_3^c = p_2^n \oplus p_3^n$ au relais R_1 . Le débit atteint grâce à cette utilisation du PLNC, appelée Source-Encoded PLNC (SE-PLNC), est d'une trame par slot, doublant ainsi les performances obtenues avec des transmissions sans interférence.

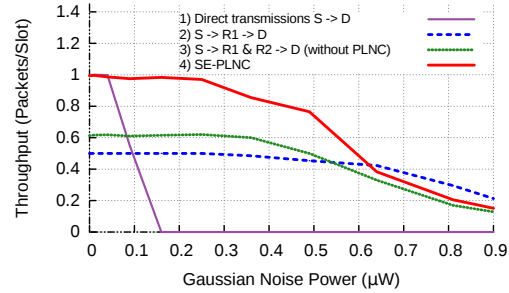
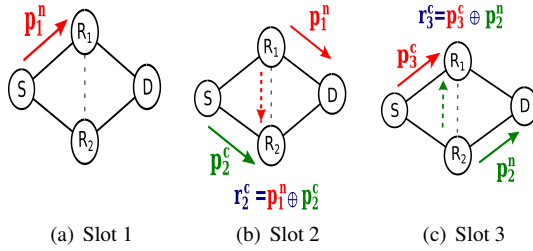


FIGURE 3: Source-Encoded PLNC - 3 slots d'illustration

FIGURE 4: Résultats expérimentaux du SE-PLNC

4 Implantation sur banc de Test

Afin d'étudier la faisabilité en pratique du schéma SE-PLNC proposé, nous l'implantons sur un banc de vrais équipements radio. Nous utilisons 4 USRP N210 (Universal Software Radio Peripherals) équipés de carte fille SBX et d'antenne GPS. Les transmissions sont dites "over the air" à la fréquence 1.8GHz.

L'ordonnancement du SE-PLNC proposé impose au nœud source de transmettre un paquet dans chaque slot à destination d'un des relais, pendant que l'autre relais transmet un paquet à la destination. Nous concevons notre trame de manière à ce que cet envoi simultané des deux données utiles soit précédé par la transmission de deux en-têtes, un par émetteur, orthogonalisés en temps. Ces en-têtes reçus sans interférence par les destinations sont notamment utiles à l'estimation de canal indispensable à la réception PLNC des deux paquets du même slot. Bien entendu cette réception PLNC, étroitement corrélée à la performance de notre schéma SE-PLNC, peut souffrir d'un mauvais alignement des signaux au niveau du relais en charge de la réception. Ainsi, nous proposons une solution de niveau MAC et une de niveau physique afin de limiter ce mauvais alignement et de réduire son impact. Premièrement, la synchronisation en temps des nœuds, nécessaire au mécanisme d'ordonnancement TDMA, est fondée sur une horloge commune obtenue grâce au signal GPS, permettant des écarts entre deux transmissions dites simultanées de l'ordre de la nanoseconde. Enfin, nous utilisons une modulation reposant sur une mise en forme OFDM du signal (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) qui permet de relâcher la contrainte d'alignement au niveau symbole à un alignement à l'intérieur du Préfixe Cyclique (CP) de chaque symbole OFDM (16 symboles dans notre implantation).

Afin d'étudier les performances du SE-PLNC, nous avons évalué le nombre de paquets reçus après 600 slots de transmission. Nous l'avons comparé au nombre de paquets reçus dans 3 scénarios de relayage avec le débit source optimal associé : 1) Transmissions source-destination directes sans utilisation des relais (débit source = 1 trame/slot), 2) Relayage classique via R_1 (débit source = 0.5 trame/slot) et 3) Relayage multi-chemin via R_1 et R_2 sans traitement du signal PLNC au niveau des relais (débit source = 1 trame/slot).

Les résultats obtenus sont présentés sur la fig. 4. Le terme en abscisse correspond à un bruit Gaussien artificiel que nous avons ajouté au nœud destination afin de perturber le signal reçu et émuler ainsi un déplacement de cet équipement, que nous n'avons pas pu tester en grandeur réelle par manque d'espace dans le laboratoire. Quand ce bruit est nul, les transmissions directes entre la source et la destination sont possibles et le débit en réception est bien d'1 trame par slot. Notre schéma SE-PLNC égale les performances de cette configuration sans relayage. En revanche, le relayage classique via R_1 est limité par son débit à la source de 0.5 trame/slot. On remarque également que le relayage multi-chemin sans PLNC souffre la comparaison avec notre SE-PLNC. En effet, la plupart des paquets reçus au niveau des relais sont perdus à cause des interférences induites par la transmission effectuée par l'autre relais. Quand le bruit ajouté à la destination augmente, les transmissions entre la source et la destination sont impossibles et le relayage devient ainsi indispensable. Pour les raisons évoquées précédemment, notre schéma SE-PLNC surpasse encore le relayage classique de 100% et le relayage multi-chemin sans PLNC de 66% en termes de débit. Enfin, quand le bruit dépasse un certain seuil, la puissance reçue des signaux émis par les relais n'est plus suffisante et les performances de tous les schémas de transmission considérés sont nulles.

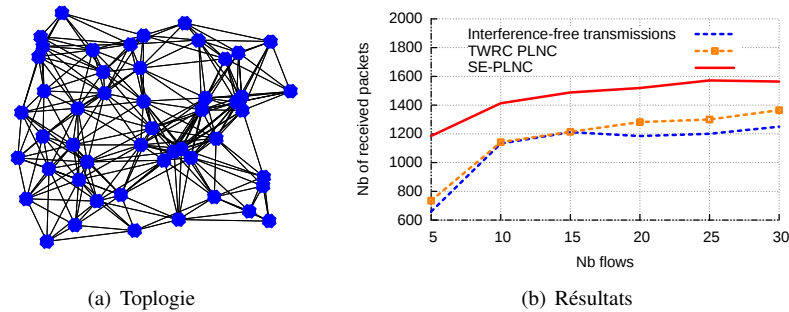


FIGURE 5: SE-PLNC dans un réseau ad-hoc a) Topologie utilisée, b) Résultats après 3000 slots de simulation

5 Intégration dans un réseau ad-hoc

Afin d'évaluer le passage à l'échelle de la solution proposée, nous intégrons notre schéma SE-PLNC au réseau ad-hoc composé de 50 nœuds présenté en fig. 5(a). Pour ce faire, nous l'associons à une méthode d'accès, s'apparentant à un protocole 802.11 qui serait slotté, dans lequel chaque slot d'envoi de paquets est précédé par une période d'allocation de canal. Très brièvement, chaque station souhaitant transmettre un paquet tente de réserver le canal dans cette période d'allocation à l'aide d'un échange traditionnel de RTS/CTS entre émetteur et destinataire. Dans le mécanisme original, les transmissions établies de la partie donnée sont alors sans interférence. Bien entendu, nous modifions très simplement cette méthode d'accès afin de détecter les opportunités de SE-PLNC et de mettre en place de telles communications. Il est important de souligner que cette adaptation n'induit aucun surcoût par rapport au protocole original.

Pour évaluer le SE-PLNC, nous faisons varier le nombre de flux établis dans le réseau de 5 à 30 et nous considérons 2000 paquets répartis entre les sources. Pour chaque nombre de flux, nous répétons 30 fois l'opération en variant les couples source-destination, et nous présentons le nombre moyen de paquets reçus par chaque destination après 3000 slots de simulation. Les résultats obtenus présentés en fig. 5(b), montrent que, quelle que soit la charge du réseau, les performances du SE-PLNC sont supérieures de 30% à celles obtenues avec des transmissions sans interférence. SE-PLNC surpasse également nettement le TWRC PLNC traditionnel. En effet, les performances de ce dernier dépendent étroitement des flux qui sont présents (nécessité d'avoir des flux bi-directionnels), alors que le SE-PLNC s'appliquant entre les paquets d'un même flux, peut être utilisé plus fréquemment.

6 Conclusion

Dans ce travail, nous avons introduit une nouvelle stratégie pour tirer profit du Physical-Layer Network Coding dans des conditions de trafic générales. Ce schéma d'utilisation, appelé Source-Encoded PLNC (SE-PLNC) qui associe Network-Coding de niveaux physique et paquet, a été testé sur un banc d'essai composé de vrais équipements radio puis simulé sur un réseau de plus grande taille. Les gains du SE-PLNC obtenus atteignent 30% dans des conditions de trafic générales et 100% dans des topologies élémentaires. Afin d'étendre la sphère d'utilisation du schéma SE-PLNC, nous prévoyons désormais de définir un protocole qui s'affranchisse de la synchronisation obtenue grâce au signal GPS.

Références

- [NKJ⁺17] R. Naves, H. Khalifé, G. Jakllari, V. Conan, and A-L. Beylot. A framework for evaluating physical-layer network coding gains in multi-hop wireless network. In *Proc. IEEE INFOCOM Conference*, 2017.
- [WXA^H16] W.Mao, X.Wang, A.Tang, and H.Qian. Anc-era : Random access for analog network coding in wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.15, No.1, pp.45 - 59, 2016.
- [ZLL06] Zhang, Liew, and Lam. Hot topic : physical-layer network coding. In *Proceedings of the ACM MobiCom conference*, 2006.