



# Exploitation de la diversité par relayage dans les réseaux de capteurs sans fils

Anya Apavatjrut, Claire Goursaud, Katia Jaffrès-Runser, Cristina Comaniciu, Jean-Marie Gorce

## ► To cite this version:

Anya Apavatjrut, Claire Goursaud, Katia Jaffrès-Runser, Cristina Comaniciu, Jean-Marie Gorce. Exploitation de la diversité par relayage dans les réseaux de capteurs sans fils. Maria Gradinariu Potop-Butucaru et Hervé Rivano. 12èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques de Télécommunications (AlgoTel), 2010, Belle Dune, France. 2010. <inria-00479520>

**HAL Id: inria-00479520**

**<https://hal.inria.fr/inria-00479520>**

Submitted on 4 May 2010

**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.

# Exploitation de la diversité par relayage dans les réseaux de capteurs sans fils

Anya Apavatjirut<sup>1</sup> and Claire Goursaud<sup>1</sup> and Katia Jaffrès-Runser<sup>1</sup> and Cristina Comaniciu<sup>2</sup> and Jean-Marie Gorce<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*CITI laboratory, INSA de Lyon, France*

<sup>2</sup>*WNET, Stevens Institute of Technology, New Jersey, USA*

---

Il est reconnu que la diversité permet de fiabiliser la transmission de données. Dans cet article, nous proposons d'exploiter la diversité dans un réseau de capteurs utilisant les codes fontaine LT avec différentes techniques de relayage. Contrairement à une transmission traditionnelle, chaque capteur participe activement à la transmission des informations. Les algorithmes de relayage que nous proposons sont basés sur une opération XOR entre les paquets codés reçus par le relai. Nous montrons que ces algorithmes apportent un gain de performance tout en conservant une complexité algorithmique basse pour convenir aux ressources limitées des capteurs.

**Keywords:** code LT, code fontaine, algorithmes de relayage, réseau de capteurs

---

## 1 Introduction

Dans un réseau sans fil, la diversité est utilisée pour compenser les pertes de paquets. Cette diversité peut être réalisée temporellement, fréquemment ou spatialement. Récemment, une technique qui consiste à relayer une combinaison XOR des paquets présents dans le tampon d'un relai a été proposée dans [WTG08] pour le codage Random Linear (RL). Or, pour un réseau de capteurs, l'utilisation de code RL n'est pas souhaitable du fait de la complexité de décodage qui est élevée. Nous proposons dans cet article l'utilisation du code Luby Transform (LT) qui a une complexité de décodage beaucoup plus faible. D'autre part, l'apport de ce code sur la consommation d'énergie et le délai de transmission a été montré dans [AGG09]. Enfin, la capacité dans un canal à relais des codes LT est proche de la capacité optimale de Shannon [CM07].

L'article [GS08] a proposé une méthode de transmission coopérative pour les LT, où chaque relai agit comme un codeur indépendant. Ainsi, les paquets reçus sont considérés comme des données brutes même si elles ont déjà été codées plusieurs fois. A la réception, le décodage doit enlever successivement toutes les couches de codage. En conséquence, cette technique est trop complexe pour les réseaux de capteurs.

L'idée proposée dans [WTG08] pour les codes RL est plus intéressante. Cependant, en appliquant cette stratégie au codage LT, la performance est dégradée. Ceci provient du fait que l'opération XOR modifie la distribution du degré des paquets et conduit à une inefficacité dans le décodage. Dans ce papier, nous proposons plusieurs solutions à ce problème. Nous analysons ensuite les avantages et les inconvénients de chaque solution proposée. Nous démontrons que la stratégie de relayage doit réaliser un compromis entre la diversité et l'efficacité du décodage.

## 2 Codes Fontaine

Les codes fontaine font partie de la famille des codes correcteurs d'erreur. Cependant, contrairement aux codes correcteurs d'erreur classiques, le nombre de paquets codés peut-être potentiellement infini. Ainsi, la transmission de paquets codés peut se poursuivre jusqu'à ce que le destinataire puisse décoder les paquets. Pour cela, la quantité de paquet reçus est légèrement supérieure à l'information initiale du fait de la redondance du code. L'intérêt du code fontaine est qu'il s'adapte au canal et permet de réduire considérablement l'utilisation du canal de retour. Nous considérons dans ce papier le code LT dont l'algorithme de codage et décodage est détaillé ci-dessous.

## 2.1 Algorithme de codage

L'information à transmettre est divisée en  $K$  fragments de même taille. Le paquet codé est construit à partir de combinaisons XOR aléatoires des fragments. Le nombre de fragments contenus dans un paquet est appelé "degré du paquet". Ce degré suit la loi de "Robust Soliton" [Lub02] qui tend à maximiser la répartition d'information dans les paquets codés tout en permettant un décodage rapide et peu complexe.

## 2.2 Algorithme de décodage

Le processus de décodage commence dès que le destinataire reçoit suffisamment de paquets à décoder. La technique de décodage que nous considérons dans ces travaux est basé sur "Belief Propagation Decoding (BP)", c'est à dire le décodage par Propagation de Croyance. En effet, le codage LT a été conçu tout particulièrement pour pouvoir utiliser ce décodage BP. Lors de ce décodage, tous les paquets de degré un sont considérés comme décodés. Ainsi, à l'aide des fragments déjà décodés, le décodeur réduit itérativement le degré des paquets codés jusqu'à ce que tous les fragments soient connus. La complexité de calcul du décodage BP est de l'ordre de  $O(K \ln(K))$ .

## 3 Stratégies de relayage

Dans ce papier, nous considérons que le routage a déjà été réalisé : la source envoie ses données codées LT à travers un lien multi-saut. Un paquet d'acquiescement est transmis par la destination une fois qu'elle a reçu et décodé toutes les données. Nous supposons que le canal de retour est parfait.

Dans un schéma traditionnel, lorsqu'une source veut transmettre l'information à travers un certain nombre de nœuds relais, les stratégies 1 et 2 sont généralement appliquées :

- **Stratégie 1 : Transmission saut-à-saut** : chaque relai décode totalement et ré-encode les informations avant de les relayer. Avec cette méthode, bien que le nombre de retransmissions ainsi que la consommation d'énergie soient optimisés, la transmission souffre d'un fort délai et nécessite de grosses capacités de calcul dans les relais.
- **Stratégie 2 : Relayage passif** : Les relais retransmettent les paquets au fur à mesure de leur réception. Le processus de décodage ne se fait qu'au nœud destinataire. Cependant, en cas d'échec, la retransmission doit s'effectuer depuis la source, ce qui est inefficace du point de vue énergétique.

Dans cette dernière stratégie, quand le relai ne reçoit pas de paquet, il attend simplement le paquet suivant et n'utilise pas l'intervalle temporel qui lui a été attribué. Les stratégies que nous proposons ont pour but d'utiliser cet intervalle pour augmenter la fiabilité de la transmission des paquets déjà reçus. Pour cela, quand un paquet n'est pas reçu, le relai envoie une combinaison des paquets présents dans son buffer. Ceci peut optimiser l'allocation temporelle d'un lien radio et réduire le délai total de transmission.

- **Stratégie 3 : Réémission** : le dernier paquet reçu est transmis.
- **Stratégie 4 : Réémission des paquets XORés entre R paquets** : Chaque relai transmet une combinaison XOR entre les  $R$  derniers paquets reçus dès qu'un l'intervalle de temps est disponible. Or, comme la combinaison XOR entre 2 paquets génère souvent un paquet de degré plus élevé, l'efficacité du processus de décodage est perturbé par manque de paquets de degré 1.

Le cœur de notre contribution réside en la définition de stratégies permettant à la fois de diversifier la transmission XOR tout en préservant la distribution de Robust Soliton des degrés des paquets. Nous proposons les stratégies suivantes comme amélioration de la stratégie 4.

- **Stratégie 5 : Réémission des paquets XORés à degré prédéfini** : chaque relai crée un paquet selon l'algorithme 1 de façon à obtenir un paquet avec un degré conforme à la loi de Robust Soliton. Le principe de cette technique consiste à tirer un degré  $d$  selon la loi de Robust Soliton, puis le relai combine aléatoirement les paquets contenus dans son buffer, pour obtenir un paquet résultant dont le degré est le plus proche possible de  $d$ .
- **Stratégie 6 : Réémission probabiliste des paquets XORés à degré prédéfini** : En pratique, il est difficile avec l'algorithme 1 d'obtenir des paquets de faible degré lorsqu'on dispose d'un buffer de taille limitée. En conséquence, la distribution en sortie ne suit pas toujours la loi de Robust Soliton. L'algorithme 2 propose donc une amélioration qui favorise la transmission des paquets de faible degré.

---

**Algorithme 2** : Opération XOR paramétrique

---

<pre><i>p</i> ← dernier paquet reçu du buffer <i>d</i> ← degré défini par la loi de Robust Soliton <i>i</i> ← 0 <b>tant que</b> <i>i</i> &lt; <i>maxround</i> <b>faire</b>   <i>prand</i> ← choisi aléatoirement dans le buffer   <i>pxor</i> ← <i>p</i> XOR <i>prand</i>   <b>si</b> degré(<i>pxor</i>) est plus proche de <i>d</i> que degré(<i>p</i>)   <b>alors</b>     <i>p</i> ← <i>pxor</i>     <b>si</b> degré(<i>pxor</i>) = <i>d</i> <b>alors</b>       quitter     <b>fin si</b>   <b>fin si</b>   <i>i</i> ← <i>i</i>+1 <b>fin tant que</b></pre>	<pre><i>p</i> ← dernier paquet reçu du buffer <i>Pxor</i> ← probabilité de XOR <b>si</b> degré(<i>p</i>) = 1 ou 2 <b>alors</b>   <b>si</b> rand([0,1]) ≤ <i>Pxor</i> <b>alors</b>     appliquer l'algorithme 1   <b>sinon</b>     retransmettre sans XOR   <b>fin si</b> <b>sinon</b>   appliquer l'algorithme 1 <b>fin si</b></pre>
---	--

---

## 4 Résultats de simulations

Nous considérons un réseau linéaire, caractérisé par une probabilité d'erreur paquet (PER) fixe et uniforme pour tous les liens. Nous évaluons les performances en termes de nombre total de paquets transmis par la source avant que la destination ne puisse décoder l'information. Ceci peut être utilisé pour mesurer la consommation d'énergie et le délai de transmission. Un entête binaire de taille  $K$ , indiquant les fragments contenus dans le paquet est ajouté à chaque paquet. Dans le relais, l'opération XOR est appliquée afin que l'entête soit également mis à jour.

### 4.1 Mesure de la diversité

La diversité est introduite dans une transmission quand l'information est transmise de façon redondante afin de maximiser la probabilité de réception de toute l'information en présence d'erreurs. Pour estimer la diversité introduite par la recombinaison des paquets dans les relais, nous allons comptabiliser le nombre de paquets émis par la source nécessaire au décodage de tous les fragments au niveau du récepteur. Plus cette quantité est faible, plus la diversité est importante, car l'information a été mieux répartie dans les paquets au moment du relayage. On ne peut pas mesurer la diversité avec un décodeur BP car on obtient une surestimation du nombre de paquets transmis par la source du fait de la contrainte supplémentaire du décodeur sur les degrés 1. Pour mesurer précisément la quantité d'information indépendante contenue dans les paquets reçus, on utilise la technique générale et optimale de décodage "Maximum Likelihood Decoding (ML)", c'est à dire le décodage par Vraisemblance Maximale. Cette technique permet de décoder n'importe quel code en résolvant un système linéaire. Ainsi, on mesure exactement le nombre de paquets nécessaires à la transmission de la quantité d'information initiale sans le biais introduit par le décodage simplifié BP.

### 4.2 Résultats

Les figures 1 et 2 représentent le nombre de paquets transmis en fonction du nombre de sauts pour le décodage ML et BP respectivement. Nous présentons nos résultats pour une probabilité d'erreur élevée pour mettre en évidence l'impact de notre stratégie de relayage. Nos paramètres sont : PER = 0.6, taille du buffer = 100, maxround = 100, pour un code LT ( $K=100$ ,  $\delta = 0.5$ ,  $C=0.03$ ). Notons que le résultat du scénario 1 "Transmission saut-à-saut" correspond à la borne inférieure.

Le décodage ML permet de mesurer le nombre de paquets nécessaire à la transmission de toute l'information. Ainsi, selon la figure 1, on observe bien que l'opération XOR dans les relais apporte bien la diversité escomptée. Plus le nombre de paquets combinés simultanément est grand, plus la transmission est robuste. Dans le cas du décodage BP, on constate une dégradation des performances par le décodage BP. Ceci provient de la modification de la distribution des degrés des paquets par les opérations XOR.

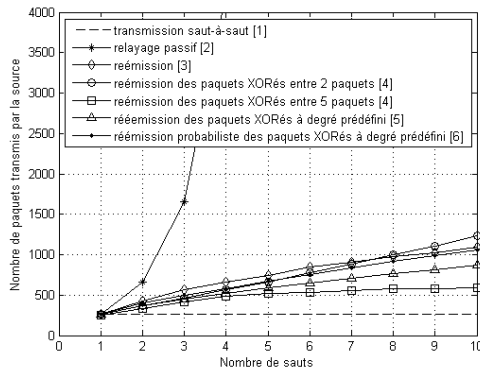


FIGURE 1: Résultats pour le décodage ML

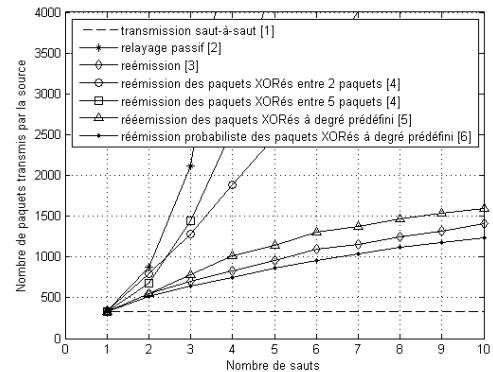


FIGURE 2: Résultats pour le décodage BP

A fortiori, ce serait la stratégie 5 qui cherche à obtenir des paquets combinés respectant la distribution de Robust Soliton qui devrait avoir les performances les meilleures. Or, c'est la stratégie 6 qui préserve le mieux cette loi et produit ainsi un décodage plus efficace. Ceci est dû à la taille limitée de la mémoire tampon des capteurs. Dans ce cas, il est difficile de créer des paquets de faible degré avec l'algorithme 1. Nous avons déterminé par simulation que les performances optimales pour la stratégie 6 sont obtenues pour  $P_{xor}=0.2$ . Ainsi, avec le décodage BP, notre technique de relayage est plus performante que les autres schémas de relayage car elle fournit une diversité optimale tout en préservant au mieux la loi de distribution des degrés.

## 5 Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé de nouvelles stratégies de relayage utilisant les codes fontaines pour exploiter la diversité dans les réseaux de capteurs sans fil. Notre travail est basé sur le codage LT qui est adapté aux réseaux de capteurs grâce à sa faible complexité de codage/décodage. Nous avons montré la nécessité de réaliser un compromis entre la diversité des paquets reçus et l'efficacité du décodage. Nous avons proposé une nouvelle stratégie de relayage qui a permis de préserver la distribution du degré des paquets encodés après une opération XOR, ce qui est un paramètre primordial pour que le processus de décodage se poursuive correctement. Nos résultats de simulation ont confirmé la supériorité de notre algorithme sur les autres stratégies de relayage.

## Références

- [AGG09] A. Apavatjirut, C. Goursaud, and J. M. Gorce. Impact des codes fontaine sur la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs avec prise en compte d'une couche mac réaliste. In *GRETSI*, 2009.
- [CM07] J. Castura and Y. Mao. Rateless coding for wireless relay channels. In *IEEE transactions on wireless communications*, volume 6, pages 1638–1642, 2007.
- [GS08] R. Gummadi and R. S. Sreenivas. Relaying a fountain code across multiple nodes. In *IEEE Information Theory Workshop*, pages 149–153, 2008.
- [Lub02] M. Luby. LT codes. In *The 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, pages 271–280, 2002.
- [MMYZ07] A. F. Molisch, N. B. Mehta, J. S. Yedidia, and J. Zhang. Performance of fountain codes in collaborative relay networks. In *IEEE Transactions on Wireless Communications*, volume 6, pages 4108–4119, 2007.
- [WTG08] H. Wicaksana, S. H. Ting, and Y. L. Guan. Spectral efficient half duplex relaying for fountain code with wireless network coding. In *ICC Workshops*, 2008.