

Impact des Codes Fontaine sur la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs avec prise en compte d'une couche MAC réaliste

ANYA APAVATJRUT, CLAIRE GOURSAUD, JEAN-MARIE GORCE

Laboratoire CITI

INSA Lyon, Bâtiment Claude Chappe, 6 avenue des Arts, 69621 Villeurbanne Cedex, France

anya.apavatjrut@insa-lyon.fr, claire.goursaud@insa-lyon.fr, jean-marie.gorce@insa-lyon.fr

Résumé - Nous étudions, dans cet article, l'impact de codes fontaine sur la consommation d'énergie dans un réseau de capteurs. Cette influence a déjà été étudiée mais dans des réseaux exploitant la diffusion naturelle des réseaux sans fils, et sans tenir compte de la fiabilité du processus d'acquiescement. Dans cet article, nous considérons le cas d'une couche MAC réaliste, où l'acquiescement peut être perdu. Nous montrons d'une part que les liens utilisant les codes fontaines sont plus efficaces face à la perte d'acquiescement que les liens sans codage ; et d'autre part que l'utilisation des codes fontaines permet de réduire la consommation d'énergie même sur une liaison point à point.

Abstract - In this paper, we study the impact of fountain codes on power consumption in wireless sensor network. This topic has been studied earlier but is limited in wireless network without studying the impact of higher level of protocol stacks. In this paper, we propose to study the advantage of digital fountain codes with a realistic MAC protocol when lost may occur during acknowledgement transmission procedure. The results show that fountain codes not only reduce the amount of acknowledgement sequences required which is advantageous in half-duplex channel environment, it also reduces power consumption even within one point-to-point radio channel.

1 Introduction

Un réseau de capteurs est un système constitué de nœuds radios spatialement distribués dont le but est de détecter et transmettre des informations. Chaque capteur est autonome et possède une durée de vie limitée, liée à la taille de sa batterie. Dans ce contexte, l'énergie est une ressource critique qui peut être économisée en minimisant le nombre de paquets émis.

Dans les réseaux de capteurs, les collisions qui entraînent la perte de paquets induisent une augmentation du nombre de transmissions. En particulier, la perte des paquets d'acquiescements engendre des retransmissions parfaitement inutiles. S'affranchir des paquets d'acquiescement peut donc permettre de réduire cette surcharge d'émission. Les codes fontaines [1] peuvent être utilisés car ils possèdent la particularité de pouvoir fonctionner avec un acquiescement global, transmis lorsque l'ensemble des paquets a été correctement décodé. En revanche, les codes fontaines génèrent un sur-débit, (dû principalement à la redondance introduite), qui augmente la consommation d'énergie. Le bilan énergétique pour les codes fontaines n'est donc pas immédiat et mérite d'être évalué. Ceci a été étudié dans [2] pour une application de diffusion dans les réseaux de capteurs. Dans [3], l'énergie est évaluée pour la transmission point à point via des relais coopératifs parallèles. Cependant, ces études tentent d'évaluer la performance globale du système et seule la couche physique (PHY) est considérée.

Nous proposons donc dans cet article, de présenter le cas d'une liaison point à point, en considérant les couches MAC (Medium Access Control) et PHY, afin d'évaluer si les codes fontaines permettent un gain en

énergie consommée, et dans quelles proportions. Pour cela, dans la section suivante, nous évaluons théoriquement la consommation d'énergie pour un lien radio donné avec et sans codage. Après validation de notre étude théorique à l'aide d'un simulateur, nous montrons dans la section 3 que les codes fontaines permettent de réduire l'énergie consommée. Enfin, nous élargissons cette étude à une topologie de réseau en étoile.

2 Étude théorique de la consommation d'énergie en présence de codes fontaine

2.1 Introduction aux « codes fontaine »

Les codes fontaine font partie de la famille des codes correcteurs d'erreurs. Cependant, contrairement aux codes correcteurs d'erreurs classique de type RS (Reed Solomon), ces codes ont potentiellement un rendement infini. Ainsi, la transmission de paquets codés peut se poursuivre jusqu'à la réception complète de l'information, quelque soit le nombre de paquets perdus.

Dans cet article, nous utilisons la famille de code fontaine « LT » (Luby Transform) qui est introduit dans [3] et qui possède un algorithme de codage/décodage simple. Le codage consiste à combiner aléatoirement des fragments parmi les K fragments à transmettre. Pour cela, la première étape consiste à tirer selon la loi de « Robust Soliton » le nombre de paquets « d » appelé « degré du paquet ». Cette loi tend à maximiser la répartition d'information dans les paquets codés et conserve la capacité de décodage. Ensuite, la deuxième étape consiste à tirer aléatoirement d paquets parmi les K fragments à transmettre et les combiner avec des opérations XOR.

Le processus de décodage utilise la méthode BP (Belief Propagation ou propagation de croyance) qui est basé sur le fait que les paquets de degré 1 peuvent être considérés comme décodés. Ainsi, à l'aide des paquets déjà décodés, le décodeur réduit itérativement le degré de paquets codés, jusqu'à ce que tous les fragments soient décodés. La quantité de paquets nécessaire pour pouvoir décodage sans erreur est de l'ordre de $K' = K + \varepsilon$, où ε est le taux de redondance du codage.

Il a été montré que ε est égal approximativement à $\sqrt{K} \ln(K/\delta)$ pour une probabilité de succès de $1 - \delta$. On peut noter que l'ordre d'arrivée des paquets n'a pas d'impact sur le décodage. Le mécanisme de codage et décodage est détaillé dans [3,4].

2.2 Modélisation d'un lien radio

Nous modélisons la qualité de la transmission par la probabilité de lien radio qui dépend du taux d'erreur par paquet :

$$\text{Problie}_{\text{rayleigh}}(\gamma) = 1 - \text{PER}_{\text{rayleigh}}(\gamma) \quad (1)$$

A un instant donné, le taux de perte par paquet est constant et prend la forme :

$$\text{PER}(\gamma) = 1 - (1 - \text{BER}(\gamma))^{N_b} \quad (2)$$

Où BER est le taux d'erreur par bit, γ le rapport signal sur bruit et N_b la taille de chaque paquet envoyé.

Cependant, en présence d'évanouissement dans un canal de Rayleigh, cette expression varie instantanément et cette variation suit la distribution de Rayleigh de la forme $p(\gamma|\bar{\gamma}) = \frac{1}{\bar{\gamma}} * e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}}$ avec $\bar{\gamma}$ le rapport signal sur bruit moyen par bit

Le taux d'erreur par paquet en moyen dans le canal de Rayleigh devient donc :

$$\text{PER}_{\text{rayleigh}}(\bar{\gamma}) = \int_{\gamma=0}^{\infty} \text{PER}(\gamma) \cdot (p(\gamma|\bar{\gamma})) d\gamma \quad (3)$$

A partir des équations (2) et (3), nous pouvons en déduire la probabilité de lien radio :

$$\begin{aligned} \text{Problie}_{\text{rayleigh}}(\bar{\gamma}) &= \int_{\gamma=0}^{\infty} (1 - \text{BER}(\gamma)^{N_b}) \\ &\cdot (p(\gamma|\bar{\gamma})) d\gamma \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 Modèle de la consommation d'énergie vue du réseau

Nous supposons que les nœuds capteurs appartenant au même réseau sont répartis uniformément et peuvent éventuellement, dans une transmission donnée, être une source, destination ou relais. Nous pouvons calculer la consommation d'énergie globale du réseau, qui peut permettre de déduire la durée de vie d'un réseau capteur à partir de la consommation calculée.

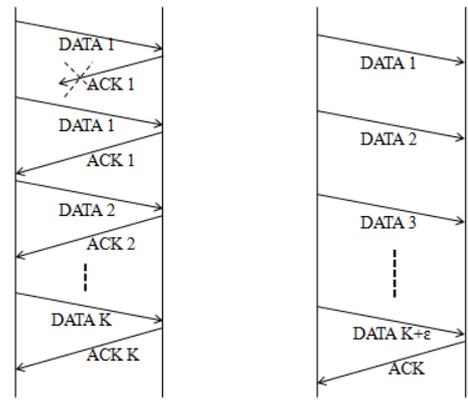


Figure 1 : Comparaison de mécanismes d'acquittement pour les transmissions sans et avec codage

Selon [5], l'énergie consommée pour la transmission d'un paquet peut être décomposée sous la forme :

$$E_p = E_{tx} + E_{rx} + E_{ack} \quad (5)$$

avec E_{tx} , E_{rx} et E_{ack} l'énergie consommée pour respectivement envoyer, recevoir et acquitter un paquet.

Nous considérons dans cet article le cas d'une communication à un saut de transmission. Nous voulons comparer le cas sans codage et avec codage. Supposons que le nœud A veuille envoyer K fragments au nœud B. Dans le cas sans codage, pour chaque fragment envoyé, A retransmet le paquet jusqu'à ce que l'acquittement soit reçu (fig.1). Dans le cas où les fragments sont codés avec le codage LT, A envoie un nombre illimité de paquets codés. Lorsque B a pu décodage avec succès, il suffit d'un seul acquittement de B pour mettre fin à la transmission.

On peut noter que le nombre de paquets de donnée que l'on a besoin d'envoyer dans le cas avec codage LT est supérieur que dans le cas sans codage. Nous pouvons calculer l'énergie consommée pour envoyer ces paquets en se basant sur ces deux cas d'études.

Cas 1 : l'acquittement est toujours transmis avec succès ($\text{Problie}_{\text{ack}} = 1$).

En se basant sur la décomposition de (5), nous déduisons que l'énergie consommée pour envoyer K paquets avec ou sans codage, sur un lien radio ayant une probabilité de lien $\text{Problie}_{\text{data}}$ peut être exprimée ainsi:

$$E_{p_{\text{sanscodage}}} = K \cdot \left(\frac{E_{tx} + E_{rx}}{\text{Problie}_{\text{data}}} + E_{ack} \right) \quad (6)$$

$$E_{p_{\text{avec codage}}} = (K + \varepsilon) \cdot \left(\frac{E_{tx} + E_{rx}}{\text{Problie}_{\text{data}}} \right) + E_{ack} \quad (7)$$

Cas 2 : l'acquittement peut être perdu ($\text{Problie}_{\text{ack}} < 1$).

Lorsque la perte d'acquittement se produit dans le cas sans codage, le processus de retransmission doit être effectué pour chaque paquet non acquitté. La consommation d'énergie pour envoyer ces K paquets devient :

(8)

$$E_{p_{\text{sanscodage}}} = \left(\frac{1}{\text{Problen}_{\text{ack}}} \right) \cdot K \cdot \left(\left(\frac{E_{\text{tx}} + E_{\text{rx}}}{\text{Problen}_{\text{data}}} \right) + E_{\text{ack}} \right) \quad (8)$$

Dans le cas avec codage LT, la transmission se poursuit jusqu'à réception de l'acquittement final:

$$E_{p_{\text{avec codage}}} = (K + \varepsilon - 1) * \left(\frac{E_{\text{tx}} + E_{\text{rx}}}{\text{Problen}_{\text{data}}} \right) + \left(\frac{1}{\text{Problen}_{\text{ack}}} \right) \cdot \left(\left(\frac{E_{\text{tx}} + E_{\text{rx}}}{\text{Problen}_{\text{data}}} \right) + E_{\text{ack}} \right) \quad (9)$$

Rq: $\text{Problen}_{\text{ack}}$ est différent de $\text{Problen}_{\text{data}}$ car nous tenons compte du fait que les tailles N_b de paquets d'acquittement et de données sont différentes.

3 Etude d'une liaison point à point

Nous avons validé notre étude théorique à l'aide du simulateur WSNET [6]. Pour cela, nous avons considéré le standard ZigBee IEEE802.15.4[7] avec une modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying). L'accès au canal est géré par la méthode CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Nous considérons la consommation d'énergie du capteur CC1100 de Texas Instrument [8], avec $E_{\text{tx}} = \frac{N_b}{R} \cdot (P_{\text{txElec}} + \alpha \cdot P_t)$, $E_{\text{rx}} = \frac{N_b}{R} \cdot (P_{\text{rxElec}})$ et $E_{\text{ack}} = (P_{\text{txElec}} + P_{\text{rxElec}} + \alpha \cdot P_t) \cdot T_{\text{ack}}$, dont les valeurs des paramètres sont fournies dans le tableau 1.

En terme de complexité de calcul, le processus de codage introduit des opérations mathématiques de type XOR, qui génère une complexité d'encodage d'ordre $O(\log(K/\delta))$. La consommation pour le processus de calcul est faible et peut être négligée par rapport à la consommation d'énergie nécessaire pour la transmission radio. Cependant, nous notons quelques surcoûts liés à l'utilisation d'un algorithme de codage. Le premier surcoût provient de l'accroissement de la taille des paquets envoyés pour contenir les informations supplémentaires du processus de codage (c'est-à-dire l'information permettant de savoir quels fragments sont contenus dans le paquet codé reçu). Dans notre cas d'étude, la taille des paquets envoyés dans le cas sans codage est de 130 octets contre 144 octets dans le cas avec codage. Nous soulignons également le surcoût lié au nombre de paquets nécessaires pour pouvoir décoder sans erreur qui est de l'ordre de $K' = K + \varepsilon$, comme précisé précédemment dans la section 2.1.

En se plaçant dans la même configuration et en utilisant les valeurs des paramètres dans tableau 1, nous évaluons sur la Fig 2, la consommation d'énergie nécessaire pour la transmission de $K=10$ paquets d'information pour les 4 cas précédents (les courbes correspondent aux valeurs théoriques, et les symboles aux résultats de simulation). Nous pouvons constater

que dans le cas 1, le sur-débit lié au codage (ε) est plus consommateur d'énergie que le gain induit. Cependant, dans le cas réel (cas 2), plus la distance est importante (donc plus le lien est dégradé), plus l'utilisation de code LT s'avère intéressante. En effet, la perte d'acquittement induit une retransmission. Or, dans le cas sans codage, cela peut se produire pour chaque paquet, tandis que pour les LT, tout se passe comme si seul le dernier paquet pouvait être retransmis. Ainsi, lorsqu'un cas réaliste est considéré, pour une même quantité d'information échangée, les LT deviennent moins gourmands en énergie que le cas sans codage.

Le niveau de puissance d'émission ayant une incidence sur l'énergie consommée, nous avons cherché, (Fig 3), la puissance d'émission permettant de minimiser la consommation d'énergie avec et sans codage, pour le cas 2. Nous constatons que la puissance d'émission optimale est à 15 dBm et à cette puissance d'émission, les LT permettent de réduire la consommation d'énergie d'environ 20% par rapport au cas sans codage. Ainsi, bien que les codes fontaines aient été conçus à l'origine (et actuellement considérés dans les travaux de recherche) pour une application de diffusion, ces codes permettent aussi de réduire la consommation d'énergie pour une liaison point à point pour la transmission avec acquittement.

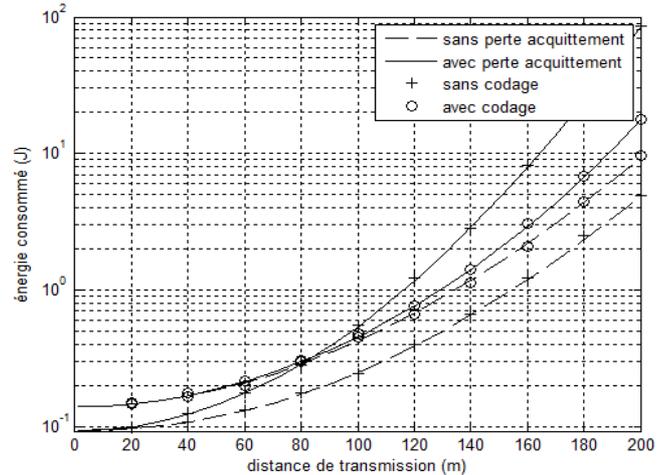


Figure 2 : Consommation d'énergie pour $P_t=10$ dBm, $K=10$

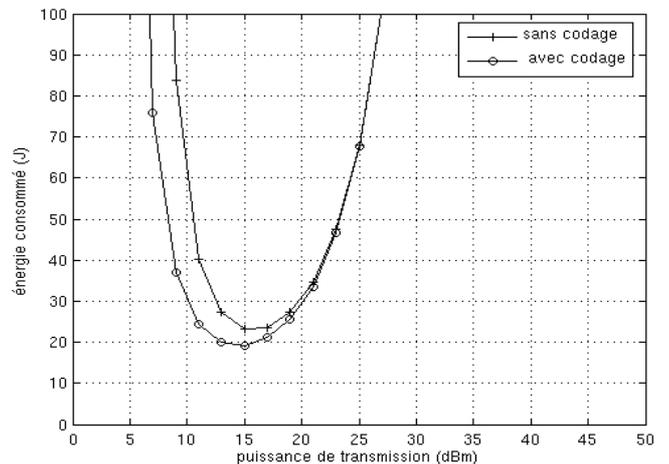


Figure 3 : Consommation d'énergie pour $d=100$ m, $K=1000$

Tab 1 : Paramètres de simulation

Symbole	Description	Valeur
Paramètre de simulateur WSNET selon standard 802.15.4 [7]		
Pt	Puissance de transmission	10 dBm
No	Bruit blanc	-111 dBm/Hz
R	Débit de transmission	20Kbit/s
F	Fréquence porteuse	868 MHz
Nb	Nombre de bits par paquet	130 octets (sans codage), 144 octets (avec codage)
Paramètre de chipset CC1100 [8]		
PtxElec	Puissance d'émission	82.89 mW
PrxElec	Puissance de réception	38.88 mW
PidleElec	Puissance au repos	4.32 mW
Paramètre de codage LT		
K	Nombre de paquets encodés	10
C	Paramètre de la loi Robust Soliton	0.1
δ	Paramètre de la loi Robust Soliton	0.5

4 Etude d'une topologie en étoile

Pour compléter cette étude, nous nous intéressons à la performance du codage lorsque le nombre de nœuds présents dans le réseau augmente. Nous considérons le cas d'un réseau de capteurs où plusieurs sources veulent transmettre leurs données simultanément au puits (fig.4). Nous supposons que les sources sont uniformément réparties à une distance de 150m du puits. Sur la fig.5, nous traçons l'évolution de la consommation d'énergie en fonction du nombre de sources actives. Nous constatons que lorsque le nombre de sources augmente, l'énergie consommée augmente. Ceci est dû à la perte de paquets due à l'expiration de délai de backoff selon le principe du protocole CSMA/CA, ainsi qu'à la consommation due à l'écoute du canal qui augmente proportionnellement au trafic du réseau. Cependant, on peut observer qu'un réseau utilisant les codes fontaines est plus robuste à l'augmentation du nombre de sources. En effet, les codes fontaines permettent de réduire le nombre d'acquittements transmis et ceci entraîne moins de collisions.

5 Conclusion et perspectives

Cet article présente une évaluation du gain énergétique lié à l'utilisation des codes fontaines, pour une liaison point à point, en considérant des paramètres réalistes de couche MAC et PHY. Nous avons montré que la prise en compte de la couche MAC et de ses imperfections est importante pour l'évaluation des performances des codes fontaines. Dans ce cas, nous montrons que, pour une quantité d'information donnée, les LT sont plus efficaces, même pour une liaison à un saut et permettent de réduire l'énergie consommée, et donc d'accroître la durée de vie des capteurs.

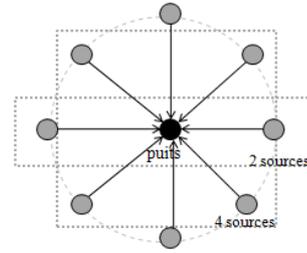


Figure 4 : Réseau avec topologie en étoile

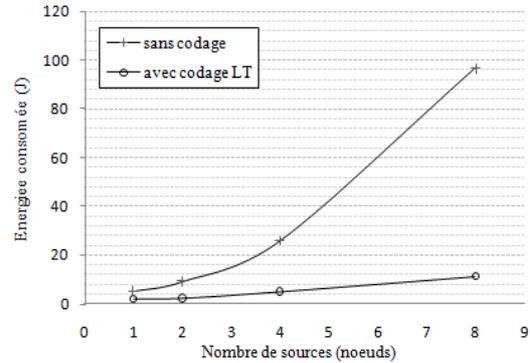


Figure 5 : La consommation d'énergie pour envoyer un paquet pour la transmission avec les différents nombres de source

De plus, en présence d'un grand nombre de nœuds capteurs dans le réseau, ce codage est très avantageux pour réduire l'impact des collisions pour les transmissions avec acquittement.

Dans nos futurs travaux, nous étendrons cette étude aux transmissions multi-sauts et dans le cas de transmissions multi-flux qui introduisent des collisions et donc une augmentation des pertes de paquets même à fort SNR.

6 Références

- [1] M. Luby, «LT codes», Proc. Of the 43rd Annual IEEE Symposium on the Foundations of Computer Sciences (STOC), 2002, pp. 270-280
- [2] M. Busse, T. Haenselmann and W. Effelsberg, «Energy-Efficient Data Dissemination for Wireless Sensor Networks», IEEE Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, March 2007, pp.301 - 306
- [3] A F. Molisch, N B. Mehta, J S. Yedidia and J. Zhang , «Cooperative relay networks using fountain codes», IEEE Globecom, Nov 2006, pp.1 - 6
- [4] D. Mackay, «Information Theory, Interference and Learning Algorithms», Cambridge University Press
- [5] R. Zhang, J-M Gorce and K. Jaffrès-Runser, «Energy-delay bounds analysis in wireless multi-hop networks with unreliable radio links», Research Report INRIA, RR6598
- [6] E. Ben Hamida et G. Chelius et J.M. Gorce, «Scalability versus Accuracy in Physical Layer Modeling for Wireless Network Simulations», 22nd ACM/IEEE/SCS Workshop (PADS 2008), juin 2008
- [7] «IEEE standard 802.15.4a-2007», cité 4 février 2009, <http://www.ieee.org>
- [8] «Single-Chip Low Cost Low Power RF-Transceiver (Rev.C) », cité 4 février 2009