

# Compression adaptative pour les réseaux de capteurs sans fil

Corentin LAVAUD, Antoine COURTAY, Matthieu GAUTIER, Olivier BERDER

Univ Rennes, CNRS, IRISA, 6 rue de Kerampont, 22300 Lannion, France

{corentin.lavaud,antoine.courtay,matthieu.gautier,olivier.berder}@irisa.fr

**Résumé** – Afin de diminuer l'énergie des transmissions dans les réseaux de capteurs sans fil, une compression des données est utilisée. Cependant, l'efficacité de la compression dépend des caractéristiques des données. L'algorithme ANSC (Adaptive Near Sensor Compressing) proposé permet d'extraire les caractéristiques pertinentes des données et de sélectionner la meilleure compression en tenant compte à la fois du coût énergétique de la compression et de la transmission. La puissance d'émission est également adaptée dynamiquement pour atteindre une qualité de service spécifique. ANSC est évalué sur une plate-forme dédiée aux réseaux de capteurs corporels et montre un gain d'énergie allant jusqu'à 49% par rapport à une transmission complète.

**Abstract** – In order to reduce transmission energy costs in wireless sensor networks, data compression is used. However, the effectiveness of compression depends on the characteristics of the data. The proposed Adaptive Near Sensor Compressing (ANSC) algorithm extracts pertinent characteristics of the data and selects the best compression, taking into account the energy costs of both compression and transmission. The transmission power is also dynamically adapted to achieve a specific quality of service. ANSC is evaluated on a platform dedicated to wireless body area networks and shows an energy gain of up to 49% compared to a complete transmission.

## 1 Introduction

Un réseau de capteurs sans fil (WSN) est généralement contraint en énergie. Les nœuds étant idéalement conçus pour être déployés une seule fois, l'optimisation de la consommation électrique de ces dispositifs est cruciale. La communication radio [1] étant la partie la plus consommatrice d'un nœud, la réduction de la consommation peut être obtenue par l'utilisation du mode veille des composants [2], par l'optimisation du protocole pour réduire le nombre d'échanges de données [3] et par l'adaptation de la puissance de transmission (Tx) [4].

Une autre approche est de réduire la quantité des données en exploitant les capacités de calcul du nœud. Des techniques de compression peuvent être utilisées afin de réduire la taille des données et donc la consommation de la radio. Cependant, les ressources limitées des nœuds en terme de puissance de calcul et de taille de la mémoire obligent l'adaptation des algorithmes de compression existants aux contraintes des WSN [5].

Dans les WSN, l'efficacité énergétique de la compression va dépendre du type des données, de la quantité de données et de la distance entre les nœuds. Dans cet article, l'algorithme ANSC (Adaptive Near Sensor Compressing) combine l'adaptation de la puissance de transmission et de la compression. ANSC exploite les caractéristiques de consommation énergétique de la plate-forme matérielle et les propriétés (taille et type) des données à envoyer pour choisir automatiquement le meilleur schéma de compression et la puissance de transmission. Trois schémas de compression sont considérés : sans compression et les compressions de type Huffman et Bitpacking [6]. Ces compressions sont choisies car elles sont sans perte, rapides à calculer et nécessitent peu de mémoire.

Le reste de ce document est organisé comme suit. La Section 2 présente les modèles énergétiques des compresseurs et de la transmission. La Section 3 est consacrée à l'algorithme ANSC. Dans la Section 4, l'évaluation des performances d'ANSC sur un réseau de capteurs corporels (WBAN) est proposée, puis des conclusions et des perspectives sont présentées dans la Section 5.

## 2 Modèles énergétiques

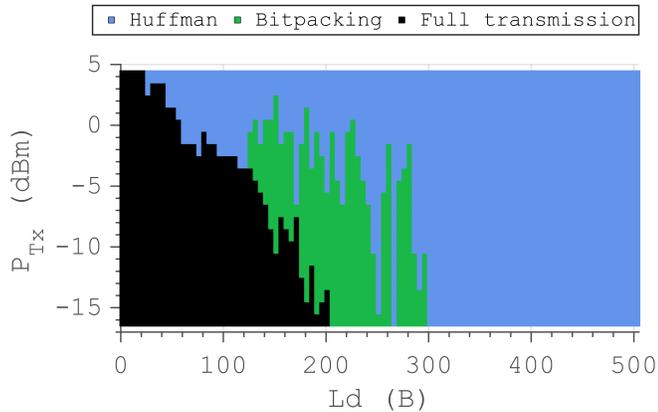
La modélisation énergétique repose sur deux composants : le transmetteur radio et le processeur de calcul. Les autres composants (e.g. les capteurs) sont considérés comme ayant une dépense énergétique fixe.

### 2.1 Modélisation de la compression

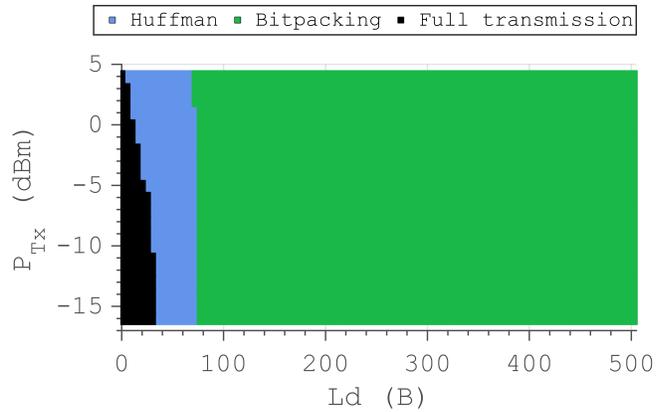
Prédire le comportement des algorithmes de compression est une tâche très difficile. Afin d'être plus efficace, les prédictions du taux de compression et du temps de compression sont approximées en fonction de caractéristiques pertinentes. Les modèles du comportement des compresseurs sont générés par des mesures expérimentales sur un sous-ensemble des cas d'utilisation. L'énergie utilisée pour une compression est :

$$E_{\text{compression}} = P_{\text{CPU}} \cdot T_c, \quad (1)$$

avec  $P_{\text{CPU}}$  la consommation du processeur et  $T_c$  le temps nécessaire pour compresser les données. La consommation d'énergie du processeur  $P_{\text{CPU}}$  est considérée comme constante (sauf en mode veille) et est mesurée lorsque le processeur effectue un calcul en virgule flottante.



(a) Carte avec des données de variance élevée.



(b) Carte avec des données de variance faible

FIGURE 1 – Cartes d'efficacité énergétique des compresseurs.

## 2.2 Modélisation de la transmission

L'estimation du coût énergétique d'une transmission radio est une tâche facile, elle nécessite de connaître la puissance de transmission  $P_{Tx}$ , la longueur de trame et un modèle de la radio. Cette dernière partie est spécifique au matériel et nécessite des mesures expérimentales pour créer un modèle précis :

$$E_{radio} = P_{send} \cdot T_{send} = f_1(P_{Tx}) \cdot f_2(Ld, br), \quad (2)$$

avec  $f_1()$  et  $f_2()$  deux fonctions qui donnent respectivement la consommation de puissance réelle  $P_{send}$  en fonction de  $P_{Tx}$  et la durée  $T_{send}$  de la trame en fonction de la longueur des données  $Ld$  et du débit en baud  $br$ .  $f_1()$  et  $f_2()$  doivent être déterminées expérimentalement.

L'énergie totale utilisée pour une transmission est :

$$E_{tot} = E_{radio} + E_{compression}. \quad (3)$$

Dans le cas où aucune compression n'est utilisée,  $E_{compression}$  est égale à zéro.

## 3 Algorithme ANSC

Si les conditions de fonctionnement (emplacement, type de données et longueur de trame) des nœuds sont figées et parfaitement connues à la conception, le meilleur compresseur est choisi à la conception et est ensuite toujours utilisé. Toutefois, dans certains cas (par exemple pour des nœuds mobiles ou des nœuds à plusieurs capteurs), la longueur et le type de données à transmettre peuvent évoluer dans le temps. Dans ces cas, un système adaptatif est nécessaire pour sélectionner en temps réel le meilleur schéma de compression.

### 3.1 Influence du type et de la taille des données sur l'énergie totale

Trois schémas différents sont utilisés : un compresseur Huffman, un compresseur Bitpacking et un autre sans

compression (Full transmission). Le codage de Huffman remplace un mot par un code dont la longueur dépend de l'entropie des données. La compression Bitpacking calcule la dynamique d'un paquet de données pour supprimer les éléments nuls inutiles.

La Figure 1 donne le schéma le plus économe en énergie pour différentes tailles de données  $Ld$  et différentes puissances de transmission  $P_{Tx}$ . Pour chaque configuration (i.e. un couple  $Ld$  et  $P_{Tx}$ ), les trois schémas ont été exécutés sur un nœud réel et l'énergie totale a été mesurée (en considérant les coûts de calcul et de transmission). Ensuite, le schéma le moins consommateur est indiqué par sa couleur respective sur la carte. De plus, deux types de données sont évalués : la Figure 1a pour des données à variance élevée et la Figure 1b pour des données à variance faible.

Avec les compresseurs utilisés, des données à variance élevée sont moins compressibles que des données à variance faible. Pour les petites longueurs de données et les faibles  $P_{Tx}$ , les compresseurs ne sont pas suffisamment performants pour compenser leur coût de fonctionnement. À l'inverse, pour des données plus volumineuses et des plus grandes puissances de transmission, la compression peut améliorer la consommation totale d'énergie. Un système adaptatif est donc nécessaire afin de sélectionner le meilleur compresseur en fonction des données et de la puissance de transmission.

### 3.2 Choix d'un compresseur efficace en énergie

L'algorithme d'adaptation de la puissance et de sélection du compresseur est donné en Figure 2. Pour être efficace, l'algorithme doit analyser les données et sélectionner le meilleur schéma en utilisant le moins d'énergie possible. Ainsi, des extractions de caractéristiques pertinentes (leur choix sera donné dans la Section 4.2) sont utilisées pour estimer rapidement le taux de compression et, avec les modèles d'énergie, estimer précisément la consommation

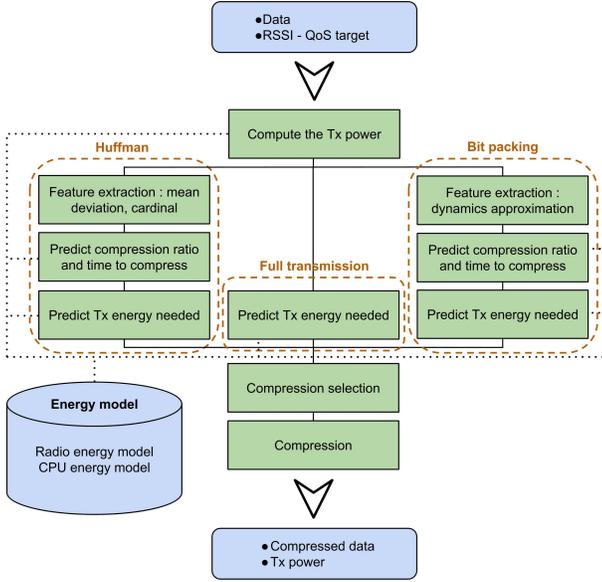


FIGURE 2 – Vue d’ensemble de l’algorithme ANSC.

énergétique totale. Le schéma de compression sélectionné est celui consommant le moins d’énergie. L’estimation de l’énergie du système est effectuée pour chaque paquet envoyé, permettant une adaptation rapide.

## 4 Résultats expérimentaux

### 4.1 Architecture du nœud WBAN

L’algorithme ANSC a été implémenté sur les nœuds WBAN Zyggie développés à l’IRISA [7]. Un nœud Zyggie intègre un microcontrôleur ARM Cortex-M4 32 bits et un transmetteur radio IEEE 802.15.4 ATMEGA256RF. Le capteur principal est une unité de mesure inertielle (IMU). Ce capteur génère différents types de données en fonction de son utilisation, nécessitant différents compresseurs.

### 4.2 Génération des modèles et extraction de caractéristiques

Pour pouvoir sélectionner le bon schéma sur une architecture spécifique, ANSC prédit le comportement du compresseur pour chaque type de données. L’algorithme utilise des modèles de compression définis par des mesures expérimentales sur des données réelles et des interpolations.

L’extraction des caractéristiques pour Bitpacking consiste en une estimation de la dynamique  $C_w$  des données. Une analyse rapide du paquet de données est effectuée. Un taux de compression est alors estimé permettant de calculer la longueur en sortie du compresseur  $L_{C_{\text{Bitpacking}}}$  :

$$L_{C_{\text{Bitpacking}}} = Ld \cdot \frac{C_w}{\alpha_1}. \quad (4)$$

Le temps de compression est linéaire en raison du fonctionnement très simpliste de l’algorithme :

$$T_{C_{\text{Bitpacking}}} = Ld \cdot C_w \cdot \alpha_2. \quad (5)$$

La prédiction de Huffman est plus complexe. Elle nécessite l’extraction d’éléments plus complexes tels que l’écart type et le cardinal, et un modèle analytique utilisant une fonction sigmoïde symétrique est utilisée. Ce type de courbe permet un ajustement plus précis que la courbe polynomiale qui est utilisée pour l’estimation de Bitpacking au détriment d’un temps de calcul supplémentaire. La capacité de compression peut être approximée avec la longueur des données  $Ld$ , le cardinal de ces données  $Card$ , l’écart type  $\sigma$  et les constantes calculées :

$$L_{C_{\text{Huffman}}} = \frac{Ld}{\beta_1 + \frac{\beta_2}{1 + \left(\frac{Ld}{\beta_3}\right)^{\beta_4}}} \cdot \frac{\sigma^{\beta_5}}{Card^{\beta_6}} + 1. \quad (6)$$

Enfin, le temps de calcul est défini en fonction du rapport de compression  $\frac{Ld}{L_{C_{\text{Huffman}}}}$  et de la taille des données  $Ld$  :

$$T_{C_{\text{Huffman}}} = \frac{Ld}{\beta_7 + \frac{\beta_8}{1 + \left(\frac{Ld}{\beta_9}\right)^{\beta_{10}}} \cdot \frac{Ld}{L_{C_{\text{Huffman}}}}}. \quad (7)$$

Ces estimations dépendent à la fois de l’architecture matérielle utilisée et de l’implémentation logicielle. Ces estimations ne sont pas parfaitement exactes, mais elles sont suffisantes pour pouvoir choisir le schéma le plus efficace.

### 4.3 Mesures réelles sur la plate-forme WBAN

Quatre schémas de transmission ont été mis en œuvre sur notre plate-forme Zyggie : une transmission complète (i.e. sans compression), les compresseurs Huffman et Bitpacking et l’algorithme ANSC. Pour l’équité de l’évaluation, les données utilisées pour évaluer les algorithmes sont différentes de celles utilisées pour créer les différents modèles.

La Figure 3 montre la consommation totale d’énergie  $E_{\text{tot}}$  pour différentes tailles de données  $Ld$  avec une puissance de transmission fixe  $P_{\text{Tx}}$  (à -16,5 dBm). Comme le montre la figure, une compression n’est pas utile pour une petite quantité de données et il est préférable d’envoyer directement les données sans aucune modification. Le surcoût énergétique de l’algorithme ANSC est compensé par son adaptabilité. Il choisit le schéma de transmission complète pour les petits  $Ld$  et passe à Huffman puis à Bitpacking lorsque la compression conduit à une consommation d’énergie totale inférieure (la Figure 1b a été générée avec le même type de données). Dans cette configuration, la réduction d’énergie maximale est d’environ 49 % pour des grandes tailles de données, par rapport à une transmission complète.

La Figure 4 montre l’adaptabilité par rapport à la distance entre les nœuds (i.e. une variation de  $P_{\text{Tx}}$  pour

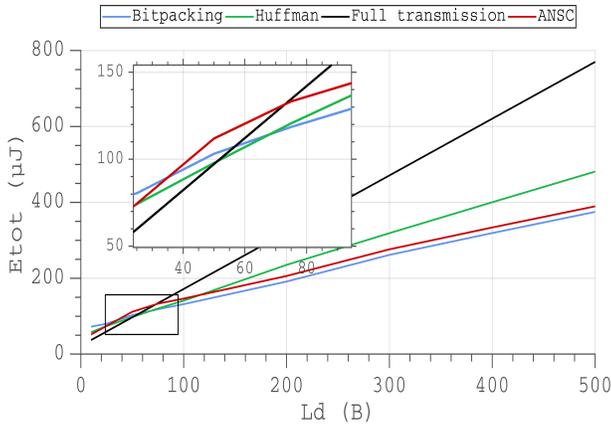


FIGURE 3 – Énergie totale à  $P_{Tx}$  (-16,5 dBm) pour différents  $L_d$ .

respecter une QoS cible). Deux jeux de données différents issus d'un nœud Zyggie ont été utilisés. Ces deux jeux de données (*Zyggie moving* et *Zyggie idle*) sont issus du même capteur mais ont des statistiques différentes (selon leur cas de fonctionnement), le jeu *Zyggie idle* a une variation faible alors que le *Zyggie moving* a une variation plus forte.

Comme la taille des données est la même pour les deux jeux de données, les deux courbes de transmission complète sont identiques. Les deux ensembles de données de Zyggie ont une capacité de compression différente. L'ensemble *Zyggie moving* est moins compressible (plus de bits devront être envoyés par radio) et les courbes bleues montre une consommation  $E_{tot}$  supérieure autres jeux de données. Dans le pire des cas, la réduction d'énergie est d'environ 23% sur les données *Zyggie moving* et le meilleur cas est de 45% sur une trame de données *Zyggie idle* de 210 B. Le meilleur algorithme pour les données *Zyggie idle* est Bitpacking, alors que Huffman est plus adapté aux données *Zyggie moving*. Ce changement de meilleur schéma est bien réalisé par ANSC. Globalement, le changement de la puissance de transmission a moins d'influence sur le choix du schéma que le type de données.

## 5 Conclusion

Dans cet article, plusieurs techniques de compression ont été testées sur des données WSN afin d'évaluer leur capacité à réduire la consommation d'énergie de la radio. Dans la plupart des cas, il n'existe pas de technique de compression efficace quelque soit le jeu de données WSN et le choix d'une technique dépend des types de données, de la quantité de données et de la distance entre les nœuds. L'algorithme adaptatif proposé ANSC choisit la technique la plus économe en énergie en utilisant un modèle de prédiction et adapte également dynamiquement la puissance de transmission. ANSC a été validé dans un cas d'utilisation réel sur un WBAN montrant une économie d'énergie allant

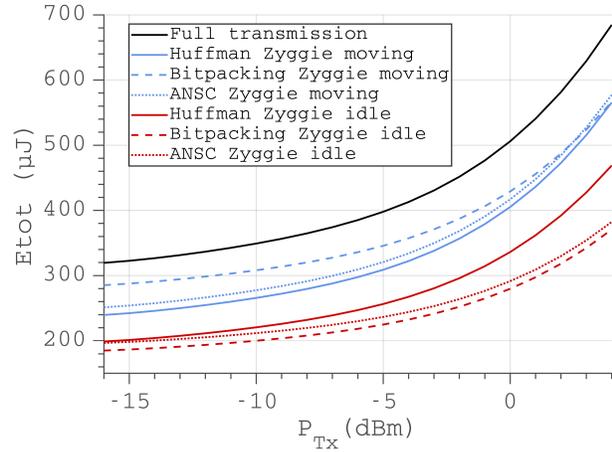


FIGURE 4 – Énergie totale à  $L_d$  fixe (210 B) pour différents  $P_{Tx}$  et différents ensembles de données WSN.

jusqu'à 49% par rapport à une transmission complète.

## Références

- [1] J. Reason and J. Rabaey, "A Study of Energy Consumption and Reliability in a Multi-hop Sensor Network," *ACM Mobile Computing and Communications Review (SIGMOBILE)*, vol. 8, no. 1, pp. 84–97, jan 2004.
- [2] G. Anastasi, M. Conti, and M. D. Francesco, "Extending the Lifetime of Wireless Sensor Networks Through Adaptive Sleep," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 5, no. 3, pp. 351–365, aug 2009.
- [3] J. Chang and L. Tassiulas, "Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks," in *IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, vol. 1,
- [4] M. Alam, O. Berder, D. Menard, and O. Sentieys, "On the Energy Savings of Adaptive Transmit Power for Wireless Sensor Networks Radio Transceivers," in *International Conference on Architecture of Computing Systems (ARCS)*, vol. 1, Feb 2013, pp. 1–6.
- [5] C. Sadler and M. Martonosi, "Data Compression Algorithms for Energy-constrained Devices in Delay Tolerant Networks," in *International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, Oct 2006, pp. 265–278.
- [6] J. Kim, J. Kim, and C. Kyung, "A lossless embedded compression algorithm for high definition video coding," in *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, June 2009, pp. 193–196.
- [7] A. Courtay, M. L. Gentil, O. Berder, A. Carer, P. Scarlatt, and O. Sentieys, "Zyggie : A Wireless Body Area Network platform for indoor positioning and motion tracking," in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, May 2018, pp. 1–5.