



**HAL**  
open science

## Sélection opportuniste des cluster heads dans des réseaux hétérogènes basse consommation

Nour El Hoda Djidi, Matthieu Gautier, Antoine Courtay, Olivier Berder

► **To cite this version:**

Nour El Hoda Djidi, Matthieu Gautier, Antoine Courtay, Olivier Berder. Sélection opportuniste des cluster heads dans des réseaux hétérogènes basse consommation. Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication, Sep 2020, Lyon, France. hal-02874969

**HAL Id: hal-02874969**

**<https://hal.science/hal-02874969>**

Submitted on 19 Jun 2020

**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.

# *Sélection opportuniste des cluster heads dans des réseaux hétérogènes basse consommation*

Nour El Hoda Djidi et Matthieu Gautier et Antoine Courtay et Olivier Berder

*Université de Rennes, IRISA, France*

---

Les objets connectés utilisant la norme LoRaWAN peuvent réduire leur consommation d'énergie en quittant leur état de veille uniquement pour envoyer leurs données. Cependant, cette technique induit une latence forte de la liaison descendante qui n'est pas compatible avec les applications contraintes en latence comme le contrôle à distance ou celles utilisant des actuators. Afin de surmonter ce compromis entre la consommation d'énergie et la latence, nous proposons dans cet article un protocole MAC exploitant une architecture de réseau hétérogène composée de radio longue portée LoRaWAN et de radio courte portée utilisant la wake-up radio à très faible consommation. Grâce à cette nouvelle architecture de réseau et au protocole MAC approprié, la latence peut être réduite tout en maintenant ou même en augmentant l'efficacité énergétique. Pour un cluster composé de dix nœuds, des gains simultanés de 3.33 et de 2.11 peuvent être obtenus respectivement en latence et en consommation d'énergie.

**Mots-clés :** Internet des Objets, Réseaux de capteurs sans fil, LoRa, Wake-up Radio, Protocole MAC

---

## 1 Introduction

Les réseaux étendus à faible puissance (LPWAN) ont un énorme intérêt pour les applications de l'Internet des objets qui requièrent une faible consommation d'énergie et des communications à longue portée. LoRaWAN est un des réseaux LPWAN dans lequel les terminaux (ED) utilisent LoRa comme couche physique pour communiquer avec les passerelles dans une topologie de réseau en étoile. Il existe différentes classes (A, B et C) définies dans cette norme pour lesquelles un compromis est requis entre la consommation d'énergie et la latence pour les communications en voie descendante. En outre, la Wake-up Radio (WuR) constitue une autre solution prometteuse pour permettre une consommation d'énergie ultra faible et une latence minimale mais pour les communications à courte portée.

Les fonctionnalités de la WuR et LoRa étant a priori orthogonales, des architectures réseaux combinant les deux technologies ont été proposées dans [AAGM<sup>+</sup>18] permettant d'atteindre à la fois une efficacité énergétique et une faible latence. Les auteurs ont considéré une topologie en étoile avec un nœud central appelé Cluster Head (CH) utilisant LoRa classe C qui gère les messages reçus de la passerelle destinés à d'autres ED du même cluster équipés de WuR et de transceivers LoRa en classe A. L'inconvénient de cette architecture est que le CH fonctionne en classe C et donc sa consommation d'énergie est très élevée. D'un autre côté, la classe A est une solution prometteuse pour une faible consommation d'énergie, à condition que sa latence élevée inhérente en liaison descendante soit contrebalancée à l'aide d'autres nœuds du cluster.

Dans ce travail, un nouveau protocole MAC exploitant le mécanisme de sélection opportuniste du CH est présenté, où tous les ED sont équipés de LoRa classe A et de WuR. Les ED tirent profit les uns des autres, c'est-à-dire que chaque ED devient de manière opportuniste un CH pendant ses fenêtres de réception, donnant la possibilité de recevoir et de relayer des commandes de la passerelle destinées à d'autres nœuds. Grâce à cette architecture, une faible consommation d'énergie et une faible latence peuvent être obtenues.

Le reste de cet article est structuré comme suit. Dans la section 2, l'architecture du réseau et le protocole MAC sont présentés. Un modèle analytique est détaillé dans la section 3. Dans la section 4, nous présentons et discutons les résultats analytiques avant de conclure dans la section 5.

## 2 Architecture du réseau hétérogène et le protocole MAC

Dans le réseau hétérogène proposé, chaque ED est équipé de deux modules de communication. Le premier module est un SX1267 de Semtech, capable de gérer les modulations LoRa, GFSK et OOK. Cet émetteur-récepteur permet donc de basculer entre différentes modulations. La modulation OOK est utilisée pour transmettre une commande sous la forme d'une balise de réveil (Wub) pour une communication à courte portée (SR), tandis que la classe LoRa A est utilisée pour les communications à longue portée (LR). Le deuxième module est une WuR conçue par [MJS<sup>+</sup>16].

L'architecture réseau est illustrée sur la Figure 1. Dans cette architecture, les nœuds sont organisés en clusters dans lesquelles tous les ED peuvent communiquer entre eux à l'aide de SR. Située à une grande distance de quelques kilomètres du cluster, la passerelle collecte les données des ED et envoie éventuellement des commandes aux ED à l'aide des communications LR. Les ED, en classe A, passent la plupart de leur temps en état de sommeil et ne se réveillent que pour envoyer des données ou lorsqu'ils reçoivent une interruption de la WuR. Le protocole MAC est illustré sur la Figure 2. Lorsqu'un ED transmet des données à l'aide de LoRa, il devient un CH opportuniste pour recevoir des commandes (CMD) de la passerelle destinées à un autre nœud appelé nœud cible. Ensuite, le CH opportuniste transmet cette commande en utilisant les communications SR. Cette commande est transmise sous forme d'un Wub contenant l'adresse du nœud cible et la commande elle-même qui sera reçu par la WuR du nœud cible. Plus de détails sur ce nouveau protocole sont reportés dans [DCG<sup>+</sup>20].

Comme ce scénario conduit à des gains de performances intéressants en termes de latence et d'énergie par rapport à la norme LoRaWAN classe A, il peut s'adapter à de nombreuses applications telles que le bâtiment intelligent dans lequel la passerelle souhaite demander des mesures au nœud cible. De plus, il peut s'adapter à des applications dans lesquelles la passerelle doit envoyer des commandes telles que la synchronisation ou la modification du débit de la prochaine liaison montante du nœud cible.

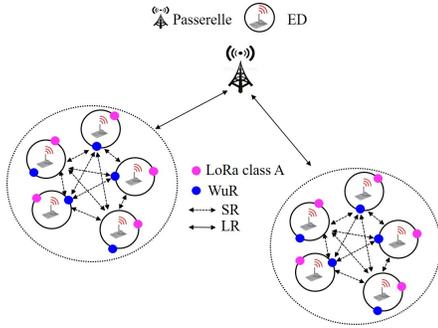


FIGURE 1: L'architecture du réseau LoRa-WuR

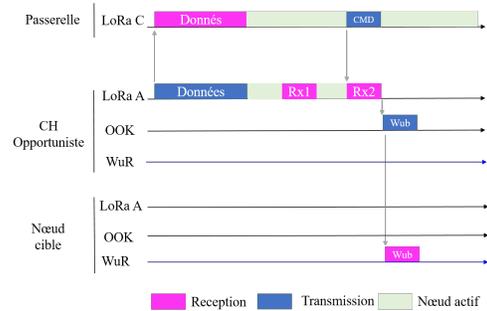


FIGURE 2: Protocole MAC LoRa-WuR

## 3 Modèles analytiques de la latence et de la consommation

Un cluster de  $N$  nœuds est considéré et nous supposons que chaque nœud transmet à un moment différent avec un taux  $\lambda$ . En raison du faible débit de données et de la courte longueur des paquets Wub, nous supposons donc qu'aucune collision ne se produit.

Lorsque seule la classe A est utilisée, la passerelle attend une transmission de voie montante d'un ED avant d'envoyer une commande. Le temps d'attente moyen pour atteindre un nœud cible est alors  $\frac{1}{2\lambda}$  [AAGM<sup>+</sup>18]. Dans ce cas, la latence moyenne  $L_{LoRa}^A$  de l'envoi de la commande par la passerelle est :

$$L_{LoRa}^A = \frac{1}{2\lambda} + l_{cmd}, \quad (1)$$

avec  $l_{cmd}$  le temps requis pour la transmission de la commande en utilisant LoRa.

Lorsque le protocole LoRa-WuR est utilisée, la latence moyenne  $L_{LoRa-WuR}$  de la transmission de commande à un ED, dépend du nombre de nœuds dans le cluster et s'exprime par :

$$L_{LoRa-WuR} = \frac{1}{2N\lambda} + l_{cmd} + l_{wur}, \quad (2)$$

avec  $l_{wur}$  le temps de la transmission des paquets en utilisant la communication SR (i.e. la transmission du Wub) qui est égal à  $\frac{L_{wub}}{R_{wub}}$ , avec  $L_{wub}$  la longueur du Wub (bits) et  $R_{wub}$  le débit binaire du Wub (bits/s).

Nous supposons qu'à chaque liaison montante, il y a une liaison descendante, et donc la puissance consommée moyenne d'un ED due à une communication de liaison descendante notée  $P_{LoRa}^A$  est :

$$P_{LoRa}^A = e_{cmd}^L \lambda, \quad (3)$$

avec  $e_{cmd}^L$  le coût énergétique de la réception d'une commande de la passerelle utilisant LoRa.

Lorsque le protocole LoRa-WuR est considéré, nous supposons qu'à chaque liaison descendante, une commande est envoyée au nœud cible, et donc la puissance consommée moyenne d'un ED due à la communication en liaison descendante utilisant le protocole LoRa-WuR  $P_{LoRa-WuR}$  est exprimée comme :

$$P_{LoRa-WuR} = (e_{cmd}^{wurx} N \lambda + (1 - N \lambda l_{wur}) P^{wur}) + (e_{cmd}^L + e_{cmd}^{wurx}) \lambda, \quad N \geq 2, \quad (4)$$

avec  $e_{cmd}^{wurx}$  et  $e_{cmd}^{wurx}$  les coûts énergétiques pour recevoir et traiter le Wub par la WuR, et pour transmettre la commande par le CH opportuniste en utilisant la communication SR, respectivement.  $P^{wur}$  est la puissance consommée par la WuR lorsqu'elle est en écoute continue du canal.

## 4 Résultats analytiques

Dans cette section, les résultats analytiques sont présentés et discutés. Nous avons mesuré le courant consommé de la plateforme décrite dans [MAAG<sup>+</sup>17] en utilisant un analyseur de puissance DC Keysight N6705B et les mesures sont données dans la Table 1. De plus, les paramètres LoRa sont également indiqués,  $SF$ ,  $CR$  et  $BW$  étant respectivement le facteur d'étalement, le taux de codage et la bande passante. Payload est la taille de la commande/données.

TABLE 1: Valeurs des paramètres utilisés pour l'évaluation analytique

Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
$SF$	9	$P^{wur}$	1.83 $\mu$ W	$\lambda$	$\frac{1}{3600}$ Hz	$e_{cmd}^{wurx}$	2.19 mJ
$CR$	$\frac{4}{6}$	$R_{wub}$	1 kbps	Payload	5 bytes	$e_{cmd}^{wurx}$	4.5 $\mu$ J
$BW$	250 kHz	$L_{wub}$	2 bytes	$l_{cmd}$	50 ms	$e_{cmd}^L$	21.05 mJ

La Figure 3 montre la latence moyenne de la communication de liaison descendante d'un ED en fonction du nombre de nœuds variant de 1 à 100. On peut voir que la latence moyenne d'un ED lors de l'utilisation du protocole LoRa classe A ne dépend pas du nombre de nœuds. A l'opposé, en utilisant le protocole proposé LoRa-WuR, la latence est réduite avec le nombre de nœuds utilisés dans le cluster.

Pour montrer le compromis entre la consommation d'énergie et la latence, la Figure 4 représente la puissance consommée moyenne en liaison descendante d'un nœud en fonction de la latence pour les deux protocoles. Pour le cas de LoRa classe A, le taux de paquet de transmission  $\lambda$  est varié de  $\frac{1}{3600}$  Hz à  $\frac{1}{36}$  Hz, tandis que pour LoRa-WuR il est fixé à  $\frac{1}{3600}$  Hz et le nombre de nœuds varie de 2 à 100. La consommation moyenne de la WuR est également indiquée, montrant qu'elle est négligeable par rapport à la consommation moyenne totale du nœud lors de l'utilisation du protocole LoRa-WuR. En outre, on peut voir que pour le même taux de transmission pour les deux protocoles, fixé à  $\frac{1}{3600}$  Hz, la latence lors de l'utilisation du protocole LoRa classe A atteint 1800 s tout en consommant en moyenne 5.8  $\mu$ W. Cependant, cette latence peut être réduite lorsque LoRa-WuR est utilisé en fonction du nombre de nœuds. Lorsque 10 nœuds sont utilisés par exemple, la latence est réduite jusqu'à 10 fois mais la consommation moyenne est multipliée par 1.4. Afin d'obtenir la même latence pour les approches LoRa classe A et LoRa-WuR, par exemple 100 s, lors de l'utilisation du protocole LoRa classe A le taux de paquet de transmission doit être plus élevé, ce qui induit une consommation 12.7 fois plus importante comparée au protocole LoRa-WuR. Pour diminuer la latence et la consommation moyenne lors de l'utilisation du protocole LoRa-WuR, le taux de paquet transmis doit être réduit par rapport à LoRa classe A. On peut observé que lorsqu'il est égal à  $\frac{1}{3600}$  Hz en

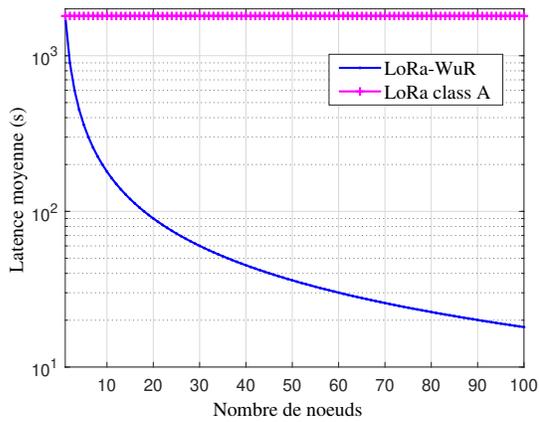


FIGURE 3: Latence moyenne en voie descendante en fonction du nombre de nœuds.

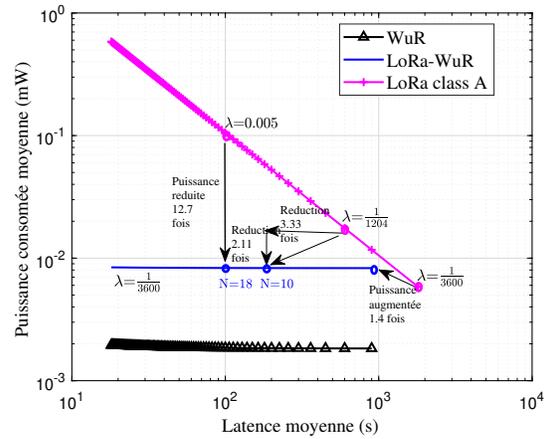


FIGURE 4: Puissance consommée moyenne en fonction de la latence.

utilisant LoRa-WuR, et  $\frac{1}{1204}$  Hz en utilisant LoRa class A, la consommation moyenne avec LoRa-WuR est réduite d'un facteur de 2.11 et la latence est réduite jusqu'à 3.33 fois lorsque 10 nœuds sont utilisés. Il y a un compromis à faire lors de l'utilisation du protocole LoRa-WuR, soit réduire considérablement la latence en fonction du nombre de nœuds présents dans le cluster mais en augmentant la consommation d'énergie moyenne 1.4 fois, ou réduire à la fois la consommation d'énergie et la latence, mais en utilisant un taux de paquet de transmission réduit par rapport au protocole LoRa classe A.

## 5 Conclusion

Cet article présente un nouveau protocole MAC qui combine LoRa et la communication courte portée exploitant les WuR. Les nœuds LoRa saisissent l'opportunité les uns des autres, et chacun peut devenir de manière opportuniste un cluster head pendant ses fenêtres de réception. Le cluster head opportuniste peut alors recevoir de la passerelle des commandes destinées à d'autres nœuds exploitant la communication à courte portée toujours active. L'architecture proposée s'adapte parfaitement aux applications qui nécessitent à la fois une faible consommation d'énergie et une faible latence. Nous avons démontré analytiquement que la latence est réduite avec plus de nœuds présents dans le cluster tout en maintenant une faible énergie.

Les travaux futurs se concentreront sur un modèle probabiliste qui inclut la probabilité d'envoyer la commande au nœud cible, et le protocole sera implémenté et testé expérimentalement pour valider ses performances.

## Références

- [AAGM<sup>+</sup>18] Fayçal Ait Aoudia, Matthieu Gautier, Michele Magno, Mickaël Le Gentil, Olivier Berder, and Luca Benini. Long-short range communication network leveraging LoRa™ and wake-up receiver. *Microprocessors and Microsystems*, 56 :184–192, 2018.
- [DCG<sup>+</sup>20] Nour El Hoda Djidi, Antoine Courtay, Matthieu Gautier, Olivier Berder, and Michele Magno. Opportunistic Cluster Heads for Heterogeneous Networks Combining LoRa and Wake-up Radio. *EWSN workshop (AWAKE)*, pages 200–205, 2020.
- [MAAG<sup>+</sup>17] Michele Magno, Fayçal Ait Aoudia, Matthieu Gautier, Olivier Berder, and Luca Benini. WU-LoRa : An energy efficient IoT end-node for energy harvesting and heterogeneous communication. In *DATE*, 2017.
- [MJS<sup>+</sup>16] Michele Magno, Vana Jelicic, Bruno Srbinovski, Vedran Bilas, Emanuel Popovici, and Luca Benini. Design, Implementation, and Performance Evaluation of a Flexible Low-Latency Nanowatt Wake-Up Radio Receiver. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12(2) :633–644, 2016.