

Auto-configuration Proactive de la Couche MAC pour les Réseaux de Capteurs Sans Fil à Trafic Variable

Julien Beaudaux
Laboratoire ICube
Université de Strasbourg,
CNRS
beaudaux@unistra.fr

Antoine Gallais
Laboratoire ICube
Université de Strasbourg,
CNRS
gallais@unistra.fr

Georgios Z.
Papadopoulos
Laboratoire ICube
Université de Strasbourg,
CNRS
gpapadopoulos@unistra.fr

Thomas Noël
Laboratoire ICube
Université de Strasbourg,
CNRS
noel@unistra.fr

English abstract

Many Wireless Sensor Networks deployments have to face bursty traffic, where packets are sent in a raw. For example, when a node is disconnected from the network or when the radio channel is unavailable for some time, nodes may have to store packets in the meantime. Then, when the sink is reachable again, it will have to send the stored packets, one directly after the other. This specific case is rarely addressed by Medium Access Control mechanisms. As this situation leads to long periods of channel occupancy, it may lead to increased delays and energy-consumption. In most deployment, the MAC layer configuration remains static (i.e. it does not vary over time) and homogeneous (i.e. identical for all nodes). Considering this, we here present BAT-MAC, a novel preamble-sampling MAC protocol specifically designed to address this issue through the introduction of heterogeneous nodes configuration in the network. BAT-MAC dynamically adapts MAC configuration depending on the actual and expected traffic load. This way, it allows nodes to deal with bursty traffic more quickly, and in an energy efficient manner. BAT-MAC can be used in combination with any preamble-sampling MAC protocol. In this paper, we evaluated it in association with X-MAC, and demonstrated that it can provide significant gains in terms of delays and energy consumption.

Résumé en français

De nombreux déploiements de réseaux de capteurs sans fil font face à un trafic en rafale, ou plusieurs paquets sont envoyés d'affilée. Par exemple, lorsque le canal radio est inaccessible pour un moment, les nœuds doivent stocker leurs mesures. Lorsque le puits est à nouveau accessible, ces

mêmes nœuds doivent envoyer les paquets stockés l'un directement après l'autre (i.e. en rafale). Ce cas spécifique est rarement adressé par les mécanismes de contrôle d'accès au médium. Comme cette situation entraîne de longues périodes d'occupation du canal radio, elle peut engendrer un accroissement des délais et de la consommation énergétique. Or, dans la majorité des déploiements, la configuration de la couche MAC est choisie statique (i.e. invariante en fonction du temps) et homogène (i.e. identique pour tous les nœuds [1]). À l'issue de ce constat, nous proposons dans le présent papier le protocole BAT-MAC, un nouveau protocole MAC à échantillonnage de canal, spécifiquement conçu pour adresser cette problématique via l'introduction d'une configuration MAC hétérogène au sein des nœuds d'un même réseau. BAT-MAC adapte dynamiquement la configuration MAC selon la charge de trafic attendue. Ainsi, il permet aux nœuds de traiter le trafic en rafales plus rapidement, de manière économe en énergie. BAT-MAC peut être combiné à n'importe quel protocole MAC à échantillonnage de canal. Dans le présent papier, nous l'avons évalué en association avec X-MAC, et démontré qu'il permettait de réaliser des gains significatifs en termes de délais et de consommation énergétique.

1. INTRODUCTION

Depuis plus d'une dizaine d'années, des réseaux de capteurs sans fil sont déployés pour satisfaire diverses applications, allant de l'étude de populations animales [2] au suivi de patients à distance [3]. Dans de nombreux cas de figure, les informations collectées doivent être envoyées en rafale. Cette situation peut se produire par exemple avec des modèles de trafic orientés événements (i.e. où les données sont envoyées à haute fréquence lorsqu'un événement déterminé par l'application est détecté), ou encore lorsque les nœuds sont amenés à stocker leurs mesures (i.e. lorsque le canal radio est occupé ou que le puits devient inaccessible), et les envoyer ultérieurement l'une à la suite de l'autre [4]. Ces cas de figure impliquent une augmentation de l'occupation du canal radio pour des périodes limitées dans le temps. Comme la plupart des protocoles de contrôle d'accès au médium ne prennent pas en considération les besoins particuliers induits par la

présence de trafic en rafale dans le réseau, des protocoles spécifiques doivent être conçus.

Nous considérons ici les protocoles MAC dits à échantillonnage de canal [1], du fait de leur passage à l'échelle aisé et de leur fonctionnement purement localisé (e.g. aucune synchronisation nécessaire). Dans ces protocoles, les nœuds du réseau s'assurent de l'émission d'un paquet leur étant destiné en échantillonnant le canal radio de manière asynchrone. Entre deux échantillonnages, ils peuvent alors éteindre leur interface radio, et ainsi réaliser des gains énergétiques. La durée séparant deux échantillonnages est dénommée LPL (pour Low-Power-Listening). Tout nœud souhaitant transmettre une information devra alors émettre un préambule de longueur supérieur au LPL, afin de s'assurer que la destination est éveillée et prête à recevoir. Alors qu'une valeur de LPL plus élevée permet aux nœuds de diminuer leur consommation énergétique, elle réduit pareillement la quantité de trafic qu'ils sont capables de traiter. Réciproquement, une valeur de LPL plus courte permet aux nœuds en bénéficiant d'être capables de traiter plus de trafic, au prix d'une consommation énergétique plus élevée.

Comme deux nœuds disposant de configurations MAC différentes peuvent s'avérer incapables de communiquer entre eux, la plupart des déploiements de réseaux de capteurs sans fil considèrent une configuration homogène (i.e. identique pour tout nœud du réseau) et statique (i.e. invariante au cours du déploiement) de cette couche. Bien qu'évitant tout partitionnement du réseau, cette solution est loin d'être idéale. En effet, les performances (e.g. délais, taux de perte) et la consommation énergétique d'un nœud dépend grandement de sa configuration MAC. Il pourrait donc être avantageux d'affecter dynamiquement à chaque nœud une configuration, selon la charge de trafic qu'il doit traiter.

Dans le présent papier, nous présentons BAT-MAC (pour Burst Adaptive Transmission MAC), un protocole MAC s'adaptant dynamiquement à la charge de trafic. BAT-MAC anticipe les variations brusques de charge de trafic et adapte la configuration MAC des nœuds concernés en conséquence. Lorsqu'un nœud transmet une information, il ajoute au paquet un champs représentant le nombre de messages qui s'ensuivront en rafale. Une fois ce message reçu, son destinataire diminue la longueur de son LPL afin de correspondre à la durée prévue de la rafale, calculée en fonction du nombre de paquets prévus et du LPL nouvellement sélectionné. Ainsi, ce nœud sera capable de traiter ce trafic plus rapidement et de manière économe en énergie. L'émetteur peut ajuster la longueur de la rafale à tout moment, en affectant la nouvelle quantité de paquets restants dans le champs dédié de son prochain message. Enfin, une fois la rafale terminée, le récepteur peut reprendre sa configuration MAC initiale.

Nous avons en outre réalisé une campagne de simulations via le simulateur Cooja [5]. Nous avons ainsi démontré que notre approche permettait de réduire la consommation énergétique tant du nœud émetteur que du récepteur en comparaison avec des réseaux configurés de manière homogène. Ce gain s'accompagne d'une réduction du délai moyen et de l'occupation du canal radio.

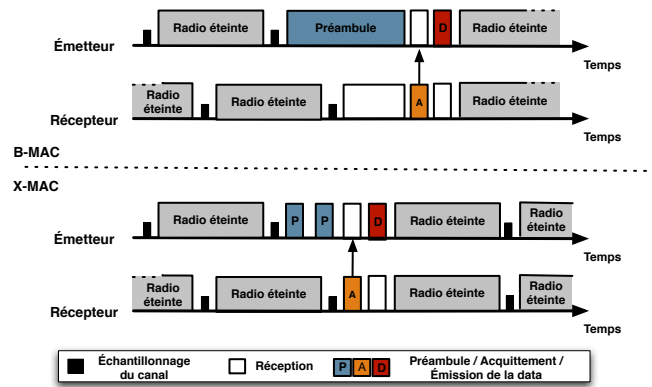


Figure 1: Les protocoles MAC à échantillonnage de canal B-MAC et X-MAC

Ce document est structuré comme suit. Nous commençons par détailler la problématique de l'auto-adaptation dans les réseaux de capteurs sans fil en Section 2, et présentons un aperçu des mécanismes existants à ce jour en Section 3. Ensuite, nous décrivons précisément le fonctionnement de BAT-MAC en Section 4. Nous fournissons alors les résultats de nos simulations concernant BAT-MAC, en les comparant à des réseaux configurés de manière homogène et statique en Section 5. Enfin, nous concluons notre travail avec quelques remarques et les travaux en perspective en Section 6.

2. ÉNONCÉ DU PROBLÈME

Une majorité des déploiements actuels de réseaux de capteurs sans fil reposent sur des protocoles MAC à échantillonnage de canal. Ces protocoles permettent de limiter la consommation énergétique des nœuds en faisant alterner des périodes d'activité et de passivité de leur radio. Les principes les régissant ont été initialement introduits par le protocole B-MAC [6]. D'autres protocoles reprirent ce mécanisme, en en améliorant le mode de fonctionnement. Notamment, X-MAC [7] permet la division du préambule en de multiples micro-trames, chacune pouvant être acquittée séparément. Les performances d'X-MAC (e.g. faible occupation du canal radio, passage à l'échelle aisé) en ont fait un des protocoles les plus populaires à ce jour. Les principes généraux régissant B-MAC et X-MAC sont illustrés dans la Figure 1.

Néanmoins, à eux seuls, ces protocoles ne permettent d'adresser efficacement qu'un trafic constant. Or, il n'est pas rare que ce dernier varie grandement au cours du déploiement. Tout particulièrement, les nœuds doivent bien souvent transmettre plusieurs messages d'affilée, en rafale. Cette situation se produit notamment lorsqu'un nœud est amené à stocker une partie de ses mesures, par exemple lorsque le canal radio n'est pas libre pour qu'il les transmette sur le moment, ou parce que le puits est momentanément injoignable [4]. Une fois cette période d'inaccessibilité du réseau passée, les mesures doivent être transmises au plus vite au puits. Cette situation se produit aussi pour les réseaux reposant sur un modèle applicatif orienté événement, où les mesures sont émises à haute fréquence lorsqu'un événement particulier défini par l'application est perçu (e.g. détection d'incendie, prédiction d'une attaque cardiaque).

Ces situations impliquent une brusque augmentation de la charge de trafic, et donc de l'occupation du canal radio. Cela a pour conséquence une diminution significative des performances du réseau (e.g. délais, consommation énergétique due à l'émission des préambules) au cours de ces rafales. En effet, les protocoles MAC existants, de par leur généralité, ne permettent pas d'adresser efficacement cette problématique. Des mécanismes spécifiques doivent donc être mis en œuvre pour anticiper cette soudaine surcharge de trafic, et s'y adapter.

3. TRAVAUX CONNEXES

Plusieurs contributions se sont attelées au problème des variations brusques de charge de trafic dans le réseau et des émissions en rafales, en introduisant une auto-configuration dynamique de la couche MAC. Voici un aperçu des solutions existantes à ce jour.

Dans [8], Merlin *et al.* présentent AADCC (pour Asymmetric Additive Duty Cycle Control), un mécanisme permettant d'apprendre la charge de trafic moyenne au cours du déploiement. Cette solution tire son inspiration des mécanismes de temporisation de 802.11, et se sert du nombre de transmissions réussies consécutives pour adapter la configuration MAC des nœuds. Précisément, lorsqu'un certain nombre de transmissions réussies successives est atteint, le LPL du nœud récepteur est augmenté de $100ms$ de façon à diminuer sa consommation énergétique. À contrario, chaque échec de transmission d'un message entraîne la diminution du LPL de $250ms$, de manière à accroître les performances locales du réseau (et notamment la charge de trafic que le nœud est capable de traiter). Cette méthode permet de s'adapter efficacement aux variations progressives de charge de trafic dans le réseau. Cependant, cette approche suppose l'émission ou la perte au préalable de plusieurs paquets afin de déclencher une auto-adaptation de la couche MAC. Elle nécessite donc un trafic en permanence, et requiert un délai élevé pour parvenir à une configuration optimale de la couche MAC.

Dans [9], Kuntz *et al.* présentent BOX-MAC (pour Burst-Oriented X-MAC), un mécanisme d'auto-adaptation de la configuration MAC spécifiquement dédié au trafic en rafales. BOX-MAC permet aux nœuds de diminuer automatiquement leur valeur de LPL lorsqu'un trafic en rafale est initié. Pour cela, un nœud voulant émettre plusieurs paquets à la suite le stipulera via un champs dédié dans son premier message. Une fois ce message reçu, le récepteur diminuera son LPL jusqu'à une valeur minimale pendant $10s$, indépendamment du nombre de messages à transmettre en rafale. Ainsi, selon la durée de la rafale, le nœud récepteur peut passer plus longtemps que nécessaire avec une faible valeur de LPL (et ainsi augmenter inutilement sa consommation énergétique), ou bien insuffisamment longtemps pour traiter la rafale dans son intégralité, et ainsi diminuer les performances pour les paquets restants. Ainsi, contrairement à BAT-MAC, BOX-MAC ne permet pas une auto-adaptation précise en fonction des variations de trafic.

pTunes [10] est un mécanisme permettant d'adapter dynamiquement la configuration MAC du réseau, en fonction de la charge de trafic courante. À chaque message émis à destination du puits sont ajoutées des informations sur

les performances locales courantes du réseau, à chaque saut parcouru par le paquet. Ainsi, le puits dispose, au fur et à mesure des réceptions de paquets, d'un état des performances du réseau en temps réel. À partir de cette information, il calcule une configuration MAC répondant au mieux aux besoins actuels du réseau, et l'affecte à l'ensemble des nœuds du réseau via la diffusion d'un message de contrôle. Cette approche permet au réseau d'obtenir les meilleures performances possibles avec une configuration homogène de la couche MAC, en adaptant cette dernière dynamiquement au cours du déploiement. Néanmoins, cette solution ne fonctionne de manière optimale que si la charge de trafic est également répartie au sein du réseau, ce qui est rarement le cas. De plus, cette approche nécessite une connaissance centralisée du réseau et une diffusion des configurations MAC à l'ensemble des nœuds, ce qui est particulièrement coûteux et peut en outre perturber le trafic applicatif.

4. FONCTIONNEMENT GÉNÉRAL DU PROTOCOLE BAT-MAC

BAT-MAC a pour objectif d'auto-configurer dynamiquement la couche MAC des nœuds du réseau, en fonction des variations de charge de trafic, et tout particulièrement des émissions en rafale. Comme nous l'avons vu précédemment, la majorité des déploiements actuels utilisant des protocoles MAC à échantillonnage de canal utilisent une configuration homogène et statique des nœuds. Cette approche empêche toute perte de connectivité dans le réseau, deux nœuds bénéficiant de configurations différentes étant possiblement incapable de communiquer. Pourtant, une configuration hétérogène de la couche MAC permettrait de mieux gérer ces changements de trafic, en augmentant les performances du réseau en cas de rafale (e.g. diminution des délais), et en privilégiant les économies d'énergie le reste du temps.

Avec BAT-MAC, nous proposons de passer d'une valeur élevée de LPL (privilégiant les économies d'énergie) à une valeur faible (privilégiant les performances du réseau) en cas de rafales. Précisément, lors de l'émission d'un message, le nœud émetteur spécifiera le nombre de paquets qui s'ensuivront lors de la rafale (0 indiquant qu'il ne s'agit pas d'une rafale). Cette valeur peut être aisément obtenue par ce nœud. Il s'agit la plupart du temps du nombre de messages stockés dans la queue au niveau applicatif, ou dans la file d'attente MAC. Le Récepteur de ce message adoptera alors une valeur de LPL faible pendant la durée prévue de la rafale, de manière à pouvoir traiter ces messages plus efficacement. Il reprendra ensuite sa valeur initiale de LPL, de manière à ne pas accroître inutilement sa consommation énergétique. Ainsi, BAT-MAC a pour objectif de réduire la consommation énergétique tant au niveau de l'émetteur (i.e. via des préambules acquittés plus rapidement lors des rafales) et du récepteur, tout en améliorant le délai des messages émis en rafale.

Initialement, le réseau est configuré de manière classique, avec une valeur de LPL élevée T_{MAX} , afin d'obtenir la durée de vie du réseau nécessaire à l'application (la principale source de consommation à faible trafic étant l'échantillonnage de canal, et donc la valeur du LPL [1]). BAT-MAC utilise alors un champs dédié dans les paquets émis, indiquant le nombre de messages à suivre en rafale, pour anticiper les brusques variations de trafic dans le réseau. Cette valeur

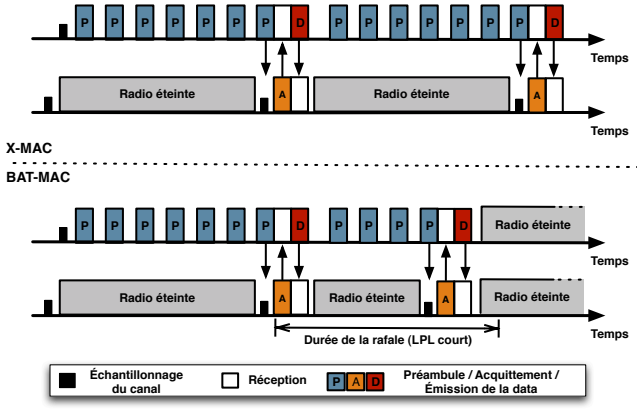


Figure 2: Fonctionnement du protocole BAT-MAC

permet, par extrapolation, de prédire la durée nécessaire au traitement de la rafale dans son ensemble (dénommée ici T_{adapt}). Pendant ce temps, le nœuds récepteur change sa valeur de LPL au profit d'une valeur minimale T_{MIN} (e.g. la configuration minimale autorisée par la radio). Cela entraîne un traitement plus efficace de la rafale, et ainsi à une diminution des délais et de la consommation énergétique au niveau du nœud émetteur, dûes à un acquiescement plus rapide des préambules. Une fois la rafale traitée, le nœud récepteur reprend sa configuration initiale. Notons qu'avec BAT-MAC, le nombre de paquets restants pour la rafale en cours peut être ajusté à tout moment en ajoutant au prochain paquet une nouvelle valeur. Le récepteur recalculera alors une nouvelle durée de rafale en conséquence. Notons ici que nous avons envisagé une diminution du LPL à une valeur minimale plutôt que sa suppression complète (i.e. passer à un mode CSMA), pour retourner à un mode de fonctionnement par LPL après la rafale. En effet, nous avons observé tant par simulation que par expérimentation qu'il existe toujours un délai de quelques millisecondes séparant deux émissions consécutives (induit par le système d'exploitation et la nécessité de vérifier que le canal radio est libre avant d'émettre). Ainsi, garder la radio active en continu lors des rafales n'a pas d'impact significatif sur les performances, mais induit une consommation énergétique nettement supérieure.

La durée de la rafale, et donc la durée pendant laquelle le récepteur devra adopter T_{MIN} comme LPL, peut être aisément calculée à partir du nombre de messages devant être envoyés lors de celle-ci et du LPL adopté dès lors (i.e. T_{MIN}). Soit LPL_{INIT} la valeur de LPL initiale, LPL_{RAF} la valeur choisie pour traiter la rafale et Paq_{RAF} le nombre de paquets à envoyer en rafale. À partir de là, on peut déduire que la rafale durera au plus :

$$T_{adapt} = LPL_{INIT} + (Paq_{RAF} - 2) \times LPL_{RAF} \times (1 + Marg_{err}) \quad (1)$$

Ici, LPL_{INIT} correspondra au temps maximum pris par le premier paquet (le temps que la radio affecte la nouvelle valeur de LPL). Nous avons aussi ajouté une marge d'erreur $Marg_{err}$ pour palier aux éventuels problèmes de transmis-

sions (e.g. pertes de paquet, mauvais échantillonnage). Cette marge d'erreur est déterminée en fonction des conditions de déploiement (e.g. perturbations du réseau, qualité du signal radio).

Le fonctionnement général de BAT-MAC est détaillé dans la Figure 2 et l'Algorithme 1.

Algorithm 1: Fonctionnement général de BAT-MAC

```

début
  tant que Réception d'un paquet P faire
    si  $P.Rafale_{taille} > 0$  alors
       $Change_{LPL}(LPL_{RAF})$  pour  $T_{adapt}$  secondes;
      Traiter(P);
    sinon
      Traiter(P);
  fin
fin

```

5. ÉVALUATION DES PERFORMANCES

BAT-MAC peut être implanté en combinaison avec n'importe quelle couche MAC à échantillonnage de canal (e.g. B-MAC, X-MAC). Dans notre évaluation, nous avons choisi X-MAC [7], du fait de ses bonnes performances théoriques, son passage aisé à l'échelle et sa grande popularité. Dans cette section, nous allons présenter les performances obtenues par notre protocole en simulation. Pour obtenir ces résultats, nous avons implanté BAT-MAC et X-MAC sur ContikiOS [11]. Nous avons alors mené une campagne d'évaluation impliquant soit BAT MAC, soit un réseau configuré de manière homogène et statique avec X-MAC (avec un LPL de 125, 250 ou 500ms). Pour ce faire, nous avons utilisé le simulateur Cooja [5].

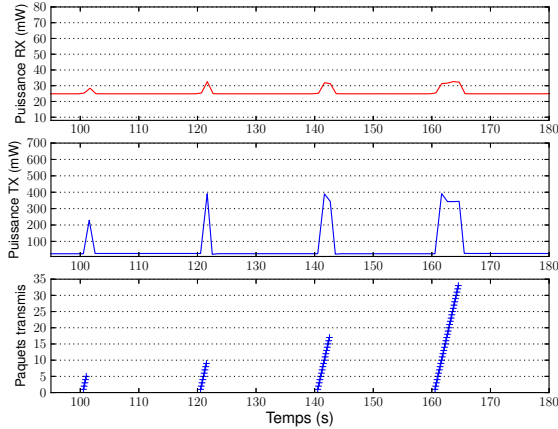
Les paramètres utilisés lors de cette campagne sont détaillés dans le Tableau 1.

Table 1: Paramètres de simulation

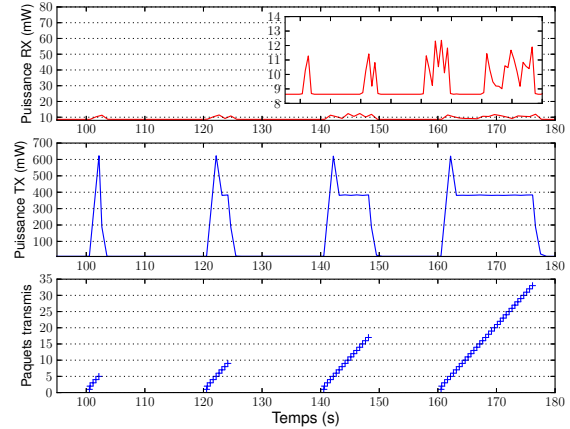
Paramètres	Valeur
Couche MAC	X-MAC BAT-MAC
LPL_{INIT}	32ms
LPL_{RAF}	500ms
$Marg_{err}$	15%
Taille des mesures	10 Octets
Modèle d'antenne	Omnidirectionnelle
Puissance de transmission	-10dBm
Retransmissions MAC	3
Durée de simulation	35minutes

5.1 Évaluation en environnement sans contention

Dans un premier temps, nous avons évalué les performances de chaque mécanisme hors de toute contention ou compétition pour le canal radio. Pour ce faire, nous avons mis en place un déploiement composé de deux nœuds. L'un d'eux joue ici le rôle d'émetteur, envoyant à intervalle régulier des paquets en rafale, alors que l'autre se chargeait simplement de les recevoir. Nous avons fait varier, à chaque itération, le



(a) X-MAC doté d'un LPL de $125ms$



(b) X-MAC doté d'un LPL de $500ms$

Figure 3: Comportement d'X-MAC face à un trafic en rafale

nombre de messages composant la rafale, de façon à évaluer l'évolution des performances selon ce paramètre.

Les résultats de ces simulations sont fournis en Figure 3 pour X-MAC et en Figure 4 pour BAT-MAC. Comme nous l'avions anticipé en Section 4, X-MAC permet de traiter efficacement le trafic (e.g. diminution des délais) avec un LPL court, ou de réaliser des économies d'énergie avec un LPL long, mais ne peut en aucun cas parvenir à un compromis entre ces deux paramètres en cas de trafic en rafale. Or, BAT-MAC permet d'obtenir des délais meilleurs que ceux obtenus avec X-MAC doté d'un LPL de $125ms$ (i.e. $0,99ms$ contre $1,11ms$ pour une rafale de 8 messages), pour une consommation énergétique moindre que celle obtenue avec X-MAC doté d'un LPL de $500ms$ (i.e. $25.64mW$ contre $83.59mW$ pour le nœud émetteur pour une rafale de 8 messages).

5.2 Évaluation en environnement avec contention

Ensuite, nous avons mis en place un réseau complet composé de 50 nœuds, répartis sur une grille de $50m \times 50m$, de façon à évaluer notre protocole dans un environnement réaliste (e.g. compétition pour le canal radio, retransmissions). Nous avons aussi mis en place un modèle de routage en Gradient centré au puits [12]. Chaque nœud est alors séparé du puits d'au plus 7 sauts, et les mesures doivent donc dans la plupart des cas être retransmis de proche en proche. Nous avons enfin implémenté un modèle applicatif orienté-temps, pour lequel une rafale de 10 messages est initiée toutes les $500ms$ par un nœud tiré au hasard dans le réseau.

Comme nous pouvons le constater dans le Tableau 2, BAT-MAC induit une consommation énergétique moyenne réduite (entre 4% et 37% en moins qu'X-MAC, selon le LPL choisi pour ce dernier), en permettant un acquittement plus rapide des préambules des messages émis en rafale. Parallèlement, comme décrit en Figure 5, BAT-MAC permet de

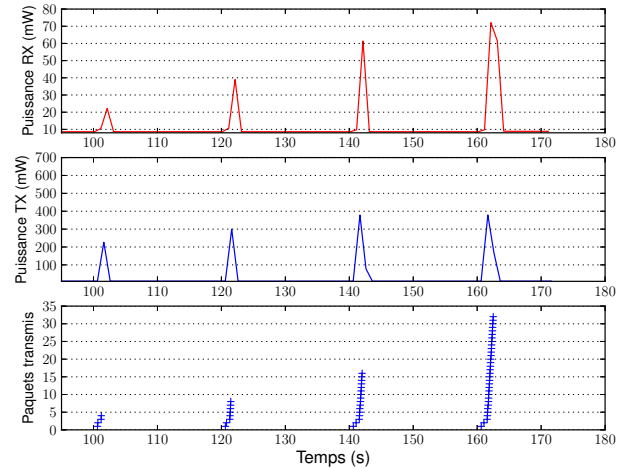


Figure 4: Comportement de BOX-MAC face à un trafic en rafale

diminuer sensiblement le délai moyen à un saut des messages transmis, en passant de $118,9ms$ dans le meilleur des cas pour X-MAC à $100,6ms$, soit une diminution de 16%.

Table 2: Consommation énergétique moyenne des nœuds du réseau

Protocole MAC considéré	Moyenne	Int. de conf. à 95%
BAT-MAC	$9.74mW$	0.07
XMAC-125	$26.06mW$	0.07
XMAC-250	$15.18mW$	0.10
XMAC-500	$10.05mW$	0.13

Ainsi, BAT-MAC permet de traiter plus efficacement les trafics en rafale, en diminuant sensiblement le délai moyen, tout en améliorant la préservation énergétique dans le réseau. Il présente donc une alternative particulièrement efficace

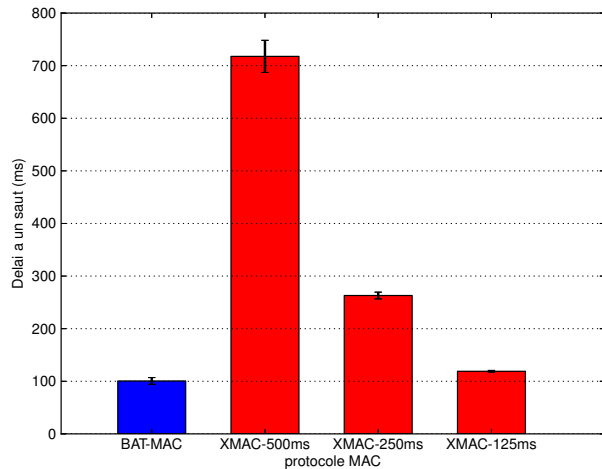


Figure 5: Délai moyen à un saut des messages transmis

pour gérer le trafic en rafale, sans nécessiter le moindre message de contrôle.

6. CONCLUSION ET ORIENTATIONS FUTURES

Nous avons proposé dans le présent papier un nouveau protocole MAC, dénommé BAT-MAC, permettant d’adapter automatiquement et dynamiquement les paramètres MAC d’un nœud en fonction des rafales de messages émises dans le réseau. Ainsi chaque nœud voulant transmettre un certain nombre de paquets en rafale indique dans un champs dédié de son prochain message ce nombre. Le récepteur, de son côté, re-configuré sa couche MAC en prenant un LPL court pendant la durée de la rafale, de façon à la traiter le plus rapidement et le plus efficacement possible. Cette durée est calculée localement en fonction du nombre de messages que composent la rafale et de la configuration MAC utilisée. Nous avons démontré que BAT-MAC permet ainsi de réduire de 16% au moins le délai moyen à un saut dans le réseau, tout en diminuant d’entre 4% et 16% la consommation énergétique moyenne des nœuds.

À l’avenir, nous envisageons de permettre à BAT-MAC d’apprendre au fur du déploiement les performances du réseau (e.g. taux de perte, délais) pour pouvoir adapter la configuration des nœuds en l’absence de trafic en rafale. Nous comptons aussi mener une campagne expérimentale sur la plateforme FIT [13] afin d’évaluer les performances de BAT-MAC dans des conditions encore plus réalistes.

7. REFERENCES

- [1] C. Cano, B. Bellalta, A. Sfaïropoulou, and M. Oliver, “Low energy operation in WSNs: A survey of preamble sampling MAC protocols,” *Computer Networks*, vol. 55, no. 15, pp. 3351–3363, 2011.
- [2] V. Dyo, S. A. Ellwood, D. W. Macdonald, A. Markham, C. Mascolo, B. Pásztor, S. Scellato, N. Trigoni, R. Wohlers, and K. Yousef, “Evolution and sustainability of a wildlife monitoring sensor network,” in *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 2010, pp. 127–140.
- [3] O. Chipara, C. Lu, T. Bailey, and G. Roman, “Reliable clinical monitoring using wireless sensor networks: Experiences in a step-down hospital unit,” in *ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys)*, 2010, pp. 155–168.
- [4] J. Beaudaux, A. Gallais, J. Montavont, and T. Noel, “Lift: Layer independent fault tolerance mechanism for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, 2011, pp. 1–5.
- [5] F. Osterlind, A. Dunkels, J. Eriksson, N. Finne, and T. Voigt, “Cross-level sensor network simulation with cooja,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Local Computer Networks*, 2006, pp. 641–648.
- [6] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile low power media access for wireless sensor networks,” in *International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys)*, 2004, pp. 95–107.
- [7] E. A. M. Buettner, G.V. Yee and R. Han, “X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks,” in *Proceedings of the 4th ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, 2006, pp. 307–320.
- [8] C. Merlin and W. Heinzelman, “Duty cycle control for low-power-listening mac protocols,” *IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC)*, vol. 9, no. 11, pp. 1508–1521, 2010.
- [9] R. Kuntz, A. Gallais, and T. Noël, “From versatility to auto-adaptation of the medium access control in wireless sensor networks,” *Journal of Parallel and Distributed Computing (JPDC)*, vol. 71, no. 9, pp. 1236–1248, 2010.
- [10] M. Zimmerling, F. Ferrari, L. Mottola, T. Voigt, and L. Thiele, “ptunes: Runtime parameter adaptation for low-power mac protocols,” in *ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, 2012, pp. 173–184.
- [11] A. Dunkels, B. Gronvall, and T. Voigt, “Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors,” in *Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, 2004, pp. 455–462.
- [12] T. Watteyne, D. B. Kris Pister, M. Dohler, and I. Aue-Blum, “Implementation of Gradient Routing in Wireless Sensor Networks,” in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom)*, 2009, pp. 1–6.
- [13] C. Burin des Rozières, G. Chelius, T. Ducrocq, E. Fleury, A. Fraboulet, A. Gallais, N. Mitton, T. Noël, and J. Vandaele, “Using SensLAB as a First Class Scientific Tool for Large Scale Wireless Sensor Network Experiments,” in *Proceedings of IFIP Networking*, vol. 6640, 2011, pp. 147–159.