

La puissance du crowdsensing au service de la durée de vie des réseaux IoT urbains

Géraldine Texier, Valérie Issarny

▶ **To cite this version:**

Géraldine Texier, Valérie Issarny. La puissance du crowdsensing au service de la durée de vie des réseaux IoT urbains. ALGOTEL 2019 - 21èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications, Jun 2019, Saint Laurent de la Cabrerisse, France. hal-02118074

HAL Id: hal-02118074
https://hal.science/hal-02118074

Submitted on 2 May 2019

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.

La puissance du crowdsensing au service de la durée de vie des réseaux IoT urbains

Géraldine Texier[1] et Valérie Issarny[2]

[1] *IMT Atlantique / IRISA / UBL, France; first.lastname@imt-atlantique.fr*
[2] *Inria, France; first.lastname@inria.fr*

Le déploiement à grande échelle d'infrastructures de capteurs dans nos villes permet une meilleure gestion de l'espace urbain en offrant de nouvelles applications telles que la surveillance de la pollution, la gestion de l'énergie et des déchets, etc. En raison de contraintes environnementales, les capteurs sont souvent alimentés par pile. L'utilisation d'une communication convergecast réduit considérablement la durée de vie du réseau IoT urbain. Nous proposons donc d'équilibrer l'acheminement du trafic à l'intérieur du réseau pour mieux répartir la consommation d'énergie. Nous définissons un programme linéaire qui calcule un routage maximisant la durée de vie des infrastructures IoT. En outre, nous pensons que le réseau IoT urbain doit tirer parti de la puissance de la foule, ce qui conduit à combiner l'infrastructure avec les capacités de détection des smartphones des citoyens. Nous intégrons le déchargement d'une partie du trafic généré par l'infrastructure fixe vers des dispositifs mobiles de crowdsensing. Nous mettons en évidence les principales caractéristiques de cette coopération. L'évaluation de notre solution sur une topologie réaliste montre que nous sommes capables d'augmenter d'un facteur 7 la durée de vie de l'infrastructure IoT urbaine.

Mots-clefs : IoT, WSN, Routage, Puits mobiles

1 Introduction

Depuis de nombreuses années, nos villes sont devenues intelligentes en déployant des infrastructures urbaines de capteurs et de nouveaux services tels que l'éclairage intelligent, la surveillance de la pollution environnementale, la gestion de l'énergie et des déchets, et plus encore. Dans ces infrastructures urbaines IoT, les capteurs sont en général interconnectés par un réseau de capteurs sans fil (WSN) dont le puits collecte et transmet les mesures vers un serveur à travers l'Internet. Le protocole de routage RPL (IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks) construit et maintient les adjacences des nœuds du WSN grâce à la construction distribuée d'un graphe acyclique dirigé orienté destination (DODAG) qui interconnecte les capteurs. Un capteur choisit un parent préféré pour transmettre ses données vers le puits de manière convergecast. En raison de fortes contraintes de déploiement, les capteurs sont souvent alimentés par pile, ce qui limite la durée de vie de l'ensemble des réseaux IoT. Ces infrastructures sont dédiées au suivi à long terme d'un quartier de la ville mais sont moins adaptées à l'expérience des citoyens. L'amélioration des capacités de détection des smartphones a permis la mise en place de campagnes de mesure par la foule (crowdsensing). Nous pensons que les infrastructures IoT urbaines et les capacités de mesure des citoyens doivent être combinées pour améliorer la pertinence des données et augmenter la durée de vie des infrastructures. Cet article propose deux mécanismes complémentaires pour prolonger la durée de vie des infrastructures urbaines en adaptant le routage du trafic. Tout d'abord, nous proposons d'améliorer l'équité de la consommation énergétique des capteurs en équilibrant le relayage des données dans le WSN. Ensuite, nous proposons de soulager les nœuds du WSN les plus sollicités en déchargeant une partie de leur trafic vers des smartphones effectuant déjà du crowdsensing par ailleurs. Nous formulons un problème de routage optimal pour la durée de vie du WSN et le programme linéaire correspondant, défini comme un problème max-min calculant un plan de routage pour maximiser la durée de vie du réseau. Nous évaluons la combinaison de ces deux mécanismes par simulation sur un réseau réaliste et montrons comment une utilisation plus équilibrée des ressources peut prolonger la durée de vie de l'IoT urbain. Ce travail a été publié dans les actes de la conférence LANMAN'2018 [TI18], nous en proposons ici un résumé étendu.

2 La symbiose entre l'infrastructure IoT et le crowdsensing

Les infrastructures IoT urbaines sont dédiées à la surveillance à long terme de zones bien délimitées, mais elles ne donnent pas vraiment d'indication sur l'expérience observée en continu par l'utilisateur, contrairement aux campagnes de crowdsensing reposant sur une application dédiée [†] pour transformer un smartphone en un appareil de mesure capable de transmettre ses relevés à un serveur par sa connectivité Internet (en 4G, 3G, LTE, ou même 2G). Outre une connaissance plus précise des phénomènes physiques urbains, nous avons la conviction que la coopération entre l'infrastructure IoT et les dispositifs de crowdsensing peut augmenter la durée de vie de l'infrastructure. Nous évaluons l'intérêt pour le WSN de décharger une partie de son trafic vers des smartphones de crowdsensing désireux d'offrir un service de transfert (appelés *puits mobiles*). Dans la littérature, les solutions proposées pour améliorer l'efficacité énergétique des WSN comprennent l'utilisation d'une métrique de routage qui représente l'énergie disponible des nœuds et la minimisation de la consommation moyenne d'énergie en favorisant les voies ayant le budget énergétique le plus élevé [ITN15]. Cependant, l'utilisation d'une métrique très dynamique entraine une grande instabilité de routage. Une autre possibilité, à la croisée des travaux de recherche sur les réseaux tolérants aux délais (DTN), des réseaux et des systèmes distribués, est de réduire le relayage grâce à un puits mobile se déplaçant dans le réseau pour recueillir les données [MK16]. Bien qu'à l'exception de Bluetooth Low Energy, la plupart des smartphones n'intègrent pas les principales interfaces supportées par WSN (comme zigbee ou 802.15.4), nous considérons que cela va évoluer avec le temps pour être techniquement possible à l'avenir. L'utilisateur ayant installé une application de crowdsensing, il a obtenu les informations de sécurité nécessaires pour soumettre ses données au serveur et peut bénéficier d'une confiance raisonnable.

3 Modélisation du déchargement du WSN vers des smartphones

L'infrastructure IoT urbaine, représentée par un graphe dirigé $G_I = (\mathcal{N}_I, \mathcal{E}_I)$, où $\mathcal{N}_I$ est composé d'un ensemble C de capteurs et d'un puits s, et $\mathcal{E}_I$ est l'ensemble des liaisons sans fil. La mesure de crowdsensing s'effectue en milieu urbain, les smartphones des utilisateurs se déplacent de façon contrainte le long des rues. L'idée n'est pas de les forcer à passer par des lieux précis pendant qu'ils recueillent des données mais d'identifier un ensemble fini $\mathcal{M} = \{m_1, ..., m_n\}$ de localisations sur leur trajet où ils sont susceptibles de s'arrêter suffisamment longtemps pour collecter des données du WSN (comme par exemple des arrêts de bus ou des passages piétons). A partir du rayon de communication r_m des puits mobiles et de la topologie du WSN, nous pouvons déterminer la liste des capteurs capables de communiquer avec un puits mobile présent en m_i et la quantité de données qu'il est capable de transférer. Par conséquent, nous construisons le graphe $G = (\mathcal{N}, \mathcal{E})$ avec $N = N_I \cup \mathcal{M}$ et $\mathcal{E}$ l'union de ces adjacences potentielles et de $\mathcal{E}_I$.

Nous formulons un problème de routage optimal basé sur l'équilibrage de trafic qui maximiserait la durée de vie du réseau, définie par le temps écoulé entre sa première activation et le moment où au moins un des capteurs est à court d'énergie. Cette définition, la plus contraignante, pourrait être assouplie dans des travaux futurs en permettant au réseau de vivre alors qu'une quantité de K des capteurs sont sans vie. La durée de vie d'un capteur est définie par le nombre de jours pendant lesquels il parvient à transférer la quantité q_t de transmissions de données quotidiennes au serveur. Le puits du WSN s est branché au secteur et a une énergie infinie ($e(s) = 0$). Un smartphone est alimenté par batterie, il dispose d'une quantité d'énergie E_m suffisante pour ne pas être pénalisé lors de la réception/émission d'une donnée. Par souci de simplicité, nous considérons qu'un puits mobile a la même capacité de transmission pour tous ses voisins, cependant un capteur peut utiliser un protocole différent pour envoyer des données à un puits mobile, nous représentons le coût induit comme un coût de connexion e_c. Nous utilisons ce modèle énergétique pour évaluer l'impact des différentes stratégies de routage sur la durée de vie du WSN.

La **première stratégie** (nommée s1SPF) évalue l'impact de l'algorithme du plus court chemin (SPF) sur la durée de vie du réseau. La **seconde stratégie** (s1LB) évalue l'impact de l'équilibrage du trafic sur la durée de vie du WSN. La **troisième stratégie** (s1mn) intègre à la fois l'équilibrage du trafic et la présence de puits mobiles. Nous calculons à la fois pour chaque capteur la quantité de trafic à envoyer vers chacun de ses parents et la quantité de données qu'il devrait transmettre à un smartphone pour prolonger la durée

†. par exemple Ambiciti (`http://ambiciti.io/`)

max $min(l_d)$
subject to

$$\sum_{j\in N_{out}(i)} \varphi_{dij} - \sum_{j\in N_{in}(i)} \varphi_{dji} = 0,\ \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in C \quad (1a)$$

$$\sum_{j\in N_{out}(i)} \varphi_{dij} = 0,\ \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in \mathcal{M} \cup \{s\} \quad (1b)$$

$$\sum_{j\in N_{out}(s_d)} \varphi_{dij} \geq l_d * Q \quad (1c)$$

$$e_t * \sum_{d\in\mathcal{D}} \Big(\sum_{j\in N_{out}(i)} \varphi_{dij} + \sum_{j\in N_{in}(i)} \varphi_{dji} \Big) + \sum_{k\in N_{out}(i)} (e_m * \varphi_{dik} + e_c) \leq E,\ \forall j \in C, \forall k \in \mathcal{M} \quad (1d)$$

$$\sum_{d\in\mathcal{D}} \nu_d \geq 0 \quad (1e)$$

$$\varphi_{dij} \geq 0,\ \forall d \in \mathcal{D}, \forall i, j \in N \quad (1f)$$

Name	Description
$G = (\mathcal{N}, \mathcal{E})$	le graphe orienté représentant le réseau avec $\mathcal{N}$ l'ensemble des nœuds et $\mathcal{E}$ l'ensemble des liens
C	l'ensemble des capteurs
$\{s\}$	le puits du WSN
$\mathcal{M}$	l'ensemble des puits mobiles
$N_{in}(i)$	l'ensemble des voisins envoyant du trafic vers i
$N_{out}(i)$	l'ensemble des voisins recevant du trafic de i
$\mathcal{D}$	l'ensemble des demandes (s_d, t_d)
l_d	la durée de vie en jour d'une demande d
φ_{dij}	le flux de demande d envoyé de i à j
ν_d	le volume de la demande d
Q	la quantité totale de donnée produite en un jour
E	le budget énergétique d'un capteur
e_t	l'énergie pour qu'un capteur émette ou reçoive une donnée
e_m	l'énergie pour transmettre une donnée à un puits mobile
e_c	l'énergie pour se connecter à un puits mobile
s_d	la source pour la demande d

TABLE 1: LP formulation

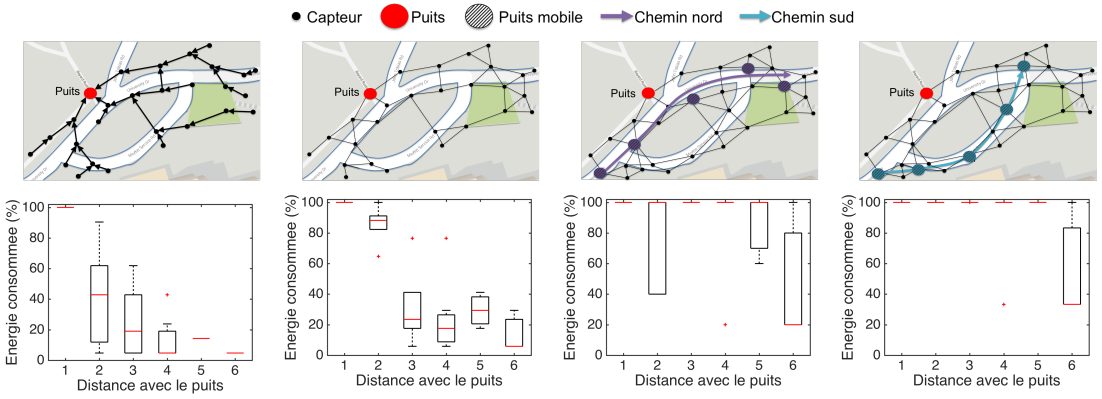
de vie de l'infrastructure. Le puits mobile, en mouvement, ne peut collecter du trafic que lorsqu'il est présent dans une des localisations m_i, il est alors considéré comme un noeud du réseau ayant une capacité de transmission limitée. Les nœuds WSN échangeant des messages RPL pour maintenir le DODAG et les adjacences quelle que soit la stratégie de routage choisie, nous n'incluons pas le coût induit par ce trafic.

Nous formulons le problème comme un problème de routage de flux qui maximise la durée de vie du réseau. La fonction objectif considère la demande d avec la plus petite durée de vie l_d. Nous formulons ce problème max-min comme un programme linéaire (LP), présenté dans la table 1, qui trouve un plan de routage maximisant la durée de vie du réseau avec les contraintes suivantes. (1a) assure la conservation du flux lors du relayage du trafic. (1b) indique que le trafic est transmis au serveur par le puits s ou par l'un des puits mobiles. (1c) exprime la durée de vie du réseau en jours, tandis que (1d) calcule l'énergie nécessaire à un capteur pour envoyer son trafic et transmettre celui de ses voisins soit à ses parents soit à un puits mobile.

La résolution du LP donne la quantité de flux que chaque nœud doit envoyer à ses voisins (dont les puits mobiles) sans traiter de l'ordonnancement de ces échanges. Le plan de routage calculé peut être mis en œuvre avec l'algorithme présenté dans [TI18] pour envoyer en priorité le trafic vers un puits mobile s'il est présent dans la localisation m_i, jusqu'à ce que le quota de trafic soit atteint. S'il n'y a pas de puits mobile présent en m_i, il peut les envoyer à un capteur parent en appliquant le plan de routage.

Nous avons évalué les stratégies par simulations sur une topologie fictive mais réaliste composée de 27 capteurs et d'un puits. Ces capteurs génèrent un trafic journalier d'une donnée par minute. Ils sont alimentés par une pile AA de capacité 2500 mAh et consomment $e_{sleep} = 2\mu A$ en mode sommeil. L'émission ou la réception d'une donnée par l'infrastructure consomme $e_t = 50mA$ et $e_m = 100mA$ par un puits mobile (cela comprend l'émission de la donnée, le coût de connexion au puits mobile et le surcoût induit par l'utilisation d'une technologie différente). La troisième stratégie équilibre la charge et intègre cinq positions possibles pour des puits mobiles se déplaçant le long d'une route Nord (s1mn5N) ou Sud (s1mn5S) (voir figure 1).

La figure 1 montre la durée de vie des capteurs en fonction de leur distance par rapport au puits s du WSN. Avec la première stratégie (s1SPF), un nœud transmet un nombre de paquets lié à la profondeur de son sous-arbre entrainant une durée de vie du réseau légèrement inférieure à 5 ans. Les voisins de s ont épuisé leur énergie alors que 70% de l'énergie totale du réseau reste inutilisée. L'équilibrage du trafic (s1LB) permet d'étendre la vie du réseau d'un an (23%) grâce à une meilleure utilisation de l'énergie des nœuds à deux sauts de s. L'ajout de puits mobile permet de multiplier la durée de vie du réseau pour atteindre 20 ans si les puits mobiles se déplacent le long de la route nord (s1mnN) ou 33 ans lorsque les puits mobiles empruntent la route sud (s1mnS). Le déchargement du trafic vers des puits mobiles a évité aux nœuds proches du puits d'utiliser leur énergie pour relayer les données. Cela montre l'influence du choix de position pour les puits mobiles. La figure 1 confirme une meilleure sollicitation des nœuds car seuls les feuilles du WSN ont



1 : SPF (s1SPF) | 2 : Load Balancing (s1LB) | 3N : avec puits mobiles au nord (s1mnN) | 3S : avec puits mobiles au sud (s1mnS)

FIGURE 1: Sensor lifetime analysis

encore de l'énergie lorsque l'on place les puits mobiles près des feuilles. Les données les plus coûteuses à collecter dans le WSN sont alors déchargées au plus tôt vers les puits mobiles, économisant l'énergie des nœuds parents qui sont par conséquent à même d'effectuer des mesures plus longtemps.

4 Conclusion

La coopération des infrastructures urbaine IoT et le crowdsensing permet d'obtenir des mesures représentant réellement les conditions expérimentées par les citoyens. En raison des contraintes de déploiement, les capteurs d'infrastructure sont en général alimentés par pile et disposent d'une durée de vie limitée alors que les smartphones utilisés pour le crowdsensing disposent d'un budget énergétique plus facile à renouveler. Nous pensons qu'une interaction plus étroite serait bénéfique et recommandons de décharger une partie des données des capteurs fixes sur les smartphones faisant du crowdsensing (agissant comme des puits mobiles) pour économiser l'énergie des nœuds les plus sollicités dans l'infrastructure IoT. Nous avons proposé le calcul d'un plan de routage qui maximise la durée de vie de l'infrastructure grâce à un programme linéaire. Nous montrons que notre stratégie, basée sur l'équilibrage du trafic et l'introduction de puits mobiles, prolongerait considérablement la durée de vie du réseau. Dans ce travail préliminaire, nous avons utilisé un modèle énergétique simple, en considérant un coût de transport uniforme. A l'avenir, nous envisageons de mettre en œuvre un modèle plus réaliste pour la consommation d'énergie des capteurs en fonction de la distance entre les nœuds. De plus, nous n'avons pas considéré de retransmissions en cas de perte de données lors des transmissions. Notre solution de routage à répartition de charge nécessite de transformer le mécanisme de routage traditionnel en un routage proportionnel entre les parents des capteurs, ce qui pourrait être utilisé pour atténuer l'impact de défaillances temporaires. Enfin, nous n'avons pas considéré les problèmes techniques de communication entre les capteurs et les smartphones utilisés pour le crowdsensing. Ces études futures nous permettront d'affiner la stratégie de routage du capteur.

Références

[ITN15] Oana Iova, Fabrice Theoleyre, and Thomas Noel. Using multiparent routing in rpl to increase the stability and the lifetime of the network. *Ad Hoc Networks*, 29 :45–62, 2015.

[MK16] Abbas Mehrabi and Kiseon Kim. Optimal transmission period for improved sink-based data collection in energy harvesting wireless sensor networks. In *Communications (ICC), 2016 IEEE International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2016. bibtex : mehrabi_optimal_2016.

[TI18] Géraldine Texier and Valérie Issarny. Leveraging the power of the crowd and offloading urban iot networks to extend their lifetime. In *LANMAN 2018 : IEEE International Symposium on Local and Metropolitan Area Networks*, 2018.