

Routage et déploiement spontané dans les réseaux de capteurs mobiles sans fil

Kévin Huguenin

ENS Cachan / IRISA

Kevin.Huguenin@irisa.fr

Anne-Marie Kermarrec

INRIA Rennes - Bretagne Atlantique

Anne-Marie.Kermarrec@inria.fr

Éric Fleury

ENS Lyon / INRIA Grenoble - Rhône Alpes

Eric.Fleury@inria.fr

I. INTRODUCTION

Les réseaux de capteurs sans fil constituent une puissante plate-forme de travail distribuée en interaction avec le monde physique dont le large spectre applicatif s'étend de la surveillance environnementale à la détection d'intrusion. Le déploiement géographique est un point clé dans la conception de tels systèmes dans la mesure où il détermine à la fois la *connectivité* et la *couverture* du réseau. Ces deux caractéristiques reflètent la qualité du réseau en ceci qu'elles décrivent sa capacité d'une part à faire circuler les informations, que ce soient des instructions dans le cas d'acteurs ou des mesures dans le cas de capteurs, et d'autre part sa capacité à interagir avec le monde extérieur. Le problème du déploiement optimal (c.-à-d. utilisant le nombre minimum de capteurs) assurant la couverture totale d'une zone donnée tout en garantissant la connectivité du réseau a été largement étudié ces dernières années [1], donnant lieu à des configurations basées sur des motifs géométriques simples. Cependant, une telle solution nécessite une phase de calcul préliminaire et ne spécifie pas comment établir un chemin entre deux entités du réseau.

Les progrès de la robotique ont permis la conception de réseaux de capteurs sans fil embarqués sur des unités mobiles dont le mouvement est contrôlé par l'application exécutée par ces derniers. Dans de tels systèmes les notions de connectivité et de couverture ne suffisent plus à décrire l'efficacité du réseau dans la mesure où les entités le composant peuvent se déplacer pour transmettre un message ou mesurer/agir en un point donné de la région d'intérêt. Introduire une mobilité contrôlée dans les réseaux de capteurs sans fil soulève donc les questions suivantes : comment aiguiller un message d'une entité du réseau à une autre ? Comment spécifier à n'importe quelle entité d'effectuer une mesure à un point donné ? Est-il nécessaire de déployer initialement et manuellement, ou en utilisant la mobilité au moyen d'un algorithme éventuellement distribué [2], les capteurs dans la région d'intérêt ? Autrement dit, est-ce qu'un algorithme de routage exploitant la mobilité ne permettrait pas, sous certaines conditions, de déployer automatiquement et de manière réactive et adaptative les capteurs selon les besoins de l'application ?

Nos recherches actuelles se concentrent sur l'étude théorique et expérimentale des propriétés de convergence d'un algorithme de routage simple exploitant la mobilité des entités du réseau. A partir de cet algorithme, on extrait les conditions, à la fois sur le protocole d'aiguillage et sur le nombre d'entités, nécessaires à la convergence de la position des capteurs vers

une configuration spatiale assurant une couverture totale de la région d'intérêt tout en garantissant la connectivité et ce quel que soit le déploiement initial. Une fois le processus d'auto-organisation spontanée étudié, on en réalise une analyse de performance expérimentale et on s'intéresse aux aspects pratiques permettant une utilisation réelle de ce procédé.

II. ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX MOBILES

On s'intéresse à un type de routage spécifique aux réseaux de capteurs : la mesure à la demande. Lorsque l'application exécutée sur l'une des entités du réseau nécessite une mesure à un point de la zone d'intérêt, une requête de mesure est envoyée de sorte qu'un capteur (sans préférence) dans le réseau la satisfasse. Les algorithmes géographiques, basés sur

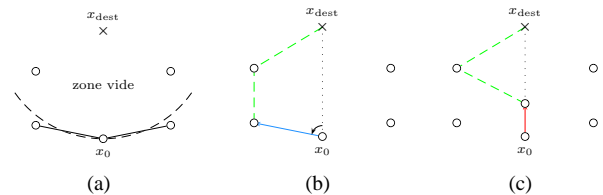


FIGURE 1. Illustration d'une zone vide dans un réseau de capteurs sans fil. (a) L'entité x_0 est plus proche de x_{dest} que ses voisins empêchant le routage glouton d'opérer. (b) Principe des algorithmes de routage géographique basés sur le contournement des zones vides par les bords (flèches bleues). (c) Utilisation de la mobilité pour *traverser* la zone vide (flèches rouges). Les lignes vertes pointillées dénotent les messages transmis de manière gloutonne.

les coordonnées des points de mesure, répondent tout à fait à la demande d'une telle application et ont été largement étudiés ces dix dernières années donnant naissance par exemple à GPSR. Ces algorithmes fonctionnent pour la plupart en deux phases : lorsque l'entité en charge du message a un voisin plus proche de la destination qu'elle ne l'est elle-même, elle lui transmet le message. Autrement le message est propagé le long des bords de la zone vide (voir Figure 1). Par opposition, un algorithme exploitant la mobilité fera bouger le capteur à l'intérieur de la zone vide jusqu'à trouver un voisin plus proche. Dans la suite, on considère un algorithme qui déplace les capteurs en ligne droite en direction de la destination jusqu'à en rencontrer un plus près ou pouvoir effectuer la mesure lui-même. On considère également, pour l'analyse théorique, un modèle de disque de même rayon pour les communications et les mesures.

III. ANALYSE THÉORIQUE

Du fait des diverses applications de mesure à la demande, l'étude de la convergence de la configuration du réseau présente un intérêt tant en une qu'en deux dimensions ; le premier reflétant par exemple la détection d'intrusion à travers une frontière [3] et le second la surveillance environnementale d'un parc naturel. Dans ces cas, les déploiements optimaux gloutons (c.-à-d. assurant une couverture totale tout en garantissant la connectivité par un routage glouton, et ce avec un minimum d'entités) sont :

- Une subdivision régulière du segment sur lequel sont déployés les entités. Soit un nombre minimal d'entités de $\lceil \ell/R \rceil - 1$ où ℓ est la longueur du segment et R le rayon de mesure/communication.
- Un maillage hexagonal de la région d'intérêt. Soit un nombre minimal d'entités de $\lceil 4R^2\sqrt{3}/9A \rceil$ où A est la surface de la région.

Dans le cas unidimensionnel, l'analyse théorique se base sur l'existence d'une suite finie de messages de probabilité non-nulle et indépendante de la configuration courante faisant converger le réseau vers la configuration optimale (stable, puisque tout le routage ne nécessite plus de mouvement) dès lors que le nombre de capteurs est suffisant.

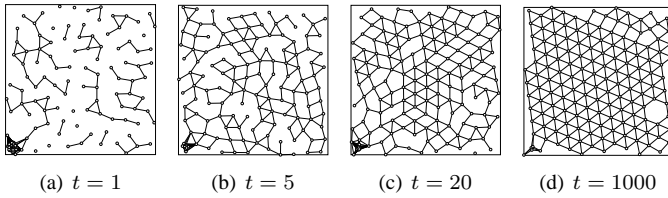


FIGURE 2. Évolution de la topologie du réseau au cours du temps.

En deux dimensions la convergence repose sur le fait que deux entités ne peuvent s'approcher de moins d'une certaine distance proche du rayon de communication tendant ainsi à former des motifs triangulaires (voir Figure 2) de côté R . La configuration finale obtenue utilise donc une fois et demie plus de capteurs que la configuration hexagonale optimale.

IV. ANALYSE EXPÉRIMENTALE DES PERFORMANCES (2D)

Bien que l'étude théorique de l'algorithme de routage assure la convergence du système à partir d'une fois et demie le nombre requis de capteurs en deux dimensions, l'analyse expérimentale permet d'observer la vitesse de convergence et l'impact du nombre de capteurs N autour de l'optimal ($\rho = N/N_{\text{opt}} \approx 1,5$). Les principales métriques utilisées pour évaluer les performances de l'algorithme sont, par message délivré à destination : (a) la distance moyenne parcourue par capteur, (b) la distribution des distances parcourues par les capteurs après un grand nombre d'itérations et (c) la probabilité qu'au moins un capteur bouge. Les résultats expérimentaux montrent que (a) converge pour toutes les valeurs de ρ montrant que le système converge vers (ou oscille autour pour $\rho < 1,5$) une position d'équilibre (voir Figure 3). L'évaluation de (b) (non représentée) montre un bon équilibre de charge

en termes de distance parcourue et donc d'énergie dépensée. Enfin (c) tend vers 0 pour $\rho \geq 1,5$, et reste autour de 1 pour $\rho < 1,5$ ce qui traduit une répartition homogène des capteurs (par opposition à un groupement compact dont seules les entités bordantes bougeraient).

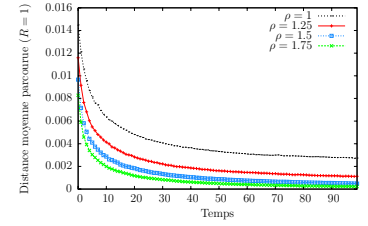


FIGURE 3. Distance moyenne parcourue par capteur pour délivrer un message.

V. ASPECTS PRATIQUES ET TRAVAUX EN COURS

Pour être exploitable en pratique, l'algorithme de routage doit être modifié pour résoudre les deux problèmes suivants : la preuve de convergence est basée sur l'existence d'une borne inférieure à la distance entre deux capteurs qui n'est plus garantie si plusieurs messages circulent simultanément dans le réseau. Comment adapter l'algorithme pour conserver cette borne tout en routant efficacement les messages ? Le maillage triangulaire présente, du fait de sa redondance, une propriété de tolérance aux fautes, n'est-il pas possible d'exploiter en plus sa structure géométrique pour tirer pleinement avantage du surplus de capteurs nécessaire à la convergence ?

A. Routage concurrent

L'utilisation d'une file pour les messages, la tête dictant le mouvement du capteur, triée par ordre croissant de temps écoulé depuis l'émission du message permet de garantir que chaque message est délivré. La convergence (c.-à-d. la borne sur la distance entre deux capteurs) peut être garantie en adoptant une stratégie de fusion de files lorsque deux capteurs entrent en contact (inspirée du modèle du «billard»), de telle sorte qu'ils repartent dans des directions opposées garantissant ainsi une distance minimale entre eux. La recherche d'une stratégie optimale est un de nos sujets de recherche actuel.

B. Planification de périodes de veille

Le maillage triangulaire est un sous-maillage de l'hexagonal et peut donc être divisé en trois maillages hexagonaux (voir Figure 4). En alternant de manière circulaire entre ces trois configurations (à l'aide d'une stratégie de mise en veille), on peut ainsi augmenter la durée de vie du système de 50%, exploitant ainsi pleinement le surplus de capteurs.

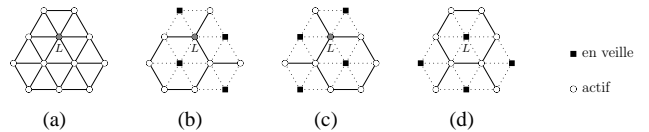


FIGURE 4. À chaque cycle le maillage est hexagonal.

RÉFÉRENCES

- [1] X. Bai and al., "Deploying wireless sensors to achieve both coverage and connectivity," in *Mobihoc '06*, 2006, pp. 131–142.
- [2] G. Tan, S. A. Jarvis, and A.-M. Kermarrec, "Connectivity-guaranteed and obstacle-adaptive deployment schemes for mobile sensor networks," in *ICDCS'08*, 2008.
- [3] A. Chen, S. Kumar, and T. H. Lai, "Designing localized algorithms for barrier coverage," in *MobiCom'07*, 2007, pp. 63–74.