

## La k-couverture de surface dans les réseaux de capteurs

Antoine Gallais, Jean Carle, David Simplot-Ryl

► **To cite this version:**

Antoine Gallais, Jean Carle, David Simplot-Ryl. La k-couverture de surface dans les réseaux de capteurs. 9ème Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications, May 2007, Ile d'Oléron, France. pp.77-80, 2007. <inria-00176952>

**HAL Id: inria-00176952**

**<https://hal.inria.fr/inria-00176952>**

Submitted on 5 Oct 2007

**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 $k$ -couverture de surface dans les réseaux de capteurs

Antoine Gallais, Jean Carle et David Simplot-Ryl

IRCICA/LIFL, Univ. Lille 1, INRIA Futurs - {gallais,carle,simplot}@lifl.fr

---

Les protocoles d'ordonnement d'activité dans les réseaux de capteurs visent à constituer un sous-ensemble de nœuds devant être actifs pour une période donnée, permettant aux autres de passer dans un mode passif moins consommateur d'énergie. La décision d'activité peut se faire selon divers critères. Celui que nous considérons ici est la couverture de surface multiple, ou  $k$ -couverture; Tout point physique de la zone de déploiement doit être couvert par au moins  $k$  nœuds actifs. Nous décrivons dans ce papier différentes méthodes pour l'adaptation d'algorithmes localisés de couverture simple à la  $k$ -couverture de surface.

**Keywords:** Réseaux de capteurs, ordonnancement d'activité, couverture de surface,  $k$ -couverture.

---

## 1 Introduction

L'ordonnement d'activité dans un réseau de capteurs sans fils revêt un rôle primordial pour l'économie d'énergie. La redondance induite par un déploiement aléatoire est mise à profit pour équilibrer la consommation d'énergie parmi les capteurs. Le critère utilisé ici est celui de la couverture de zone; les nœuds actifs doivent surveiller une zone aussi large que celle couverte par l'ensemble des nœuds et relaier les messages de collecte de données pendant que d'autres économisent leur énergie dans un mode passif. Les protocoles d'ordonnement d'activité permettent de conserver la cohérence de cette topologie dynamique, en termes de couverture de surface et de connectivité. Nous n'étudions ici que des solutions localisées, ne nécessitant qu'une connaissance à un saut du voisinage lors de la prise de décision d'activité. Ces algorithmes sont le plus souvent décrits dans un contexte de couverture simple par des ensembles connectés alors que de nombreuses motivations peuvent être invoquées pour la  $k$ -couverture et la  $k$ -connectivité (i.e  $k$  chemins distincts existent entre chaque paire de nœuds du réseau), allant du degré de pertinence des relevés collectés (dépendant directement du nombre de capteurs les corroborant) à la détection de fausses alertes (la crédibilité d'une alerte est proportionnelle au nombre de nœuds qui réagissent) en passant par un souci de tolérance aux pannes.

Alors que certaines solutions de couverture multiple visent à garantir que chaque point physique soit surveillé par au moins  $k$  capteurs actifs, d'autres tendent à construire  $k$  ensembles disjoints de capteurs, chacun de ces ensembles couvrant une fois la zone. Nous détaillons ici ces deux approches et proposons différentes généralisations et adaptations de nos protocoles dans le but de fournir de la couverture multiple de surface dans les réseaux de capteurs sans fils.

## 2 La couverture multiple

### 2.1 Définitions

La plupart des protocoles d'ordonnement d'activité ayant pour critère la couverture de surface utilisent un outil d'évaluation de couverture; tout nœud  $u$  devant décider de son statut d'activité doit au préalable évaluer la couverture fournie par ses voisins de communication. Il ne peut être passif que si la surveillance de sa zone est assurée par ces derniers. La zone de couverture de  $u$  est modélisée de la façon suivante :

$$S(u) = \{p \mid d(u, p) \leq SR(u)\}, \quad (1)$$

avec  $p$  un point physique de la zone de déploiement,  $d(u, p)$  représentant la distance euclidienne entre  $u$  et  $p$  et  $SR(u)$  le rayon de surveillance théorique du capteur  $u$ . Si  $S(u)$  est totalement couverte alors  $u$  peut devenir passif :

$$u_{passif} \Leftrightarrow \forall p \in S(u), \exists v \in N(u) \mid p \in S(v), \quad (2)$$

avec  $N(u) = \{v \in V \mid d(u, v) \leq CR\}$  ( $V$  étant l'ensemble des nœuds du réseau et  $CR$  le rayon de communication théorique des capteurs) représentant le voisinage de  $u$ . Ensuite, la couverture multiple peut être définie de la façon suivante :

**Définition 1** Une zone est dite  $k$ -couverte si tout point  $p$  peut être surveillé par au moins  $k$  capteurs actifs.

Nous nous référerons à cette définition en parlant de  $k$ -couverture plate. Il est alors aisé de modifier le mécanisme d'évaluation de couverture de la façon suivante :

$$u_{passif} \Leftrightarrow \forall p \in S(u), \|\{v \in N(u) \mid p \in S(v)\}\| \geq k, \quad (3)$$

de façon à ce que  $u$  ne puisse être passif que si tout point  $p$  de  $S(u)$  est couvert par au moins  $k$  voisins. Cette méthode permet d'adapter tout protocole s'appuyant sur une évaluation locale de la couverture lors de la prise de décision d'activité par un nœud. Une définition plus stricte serait que la  $k$ -couverture consiste en  $k$  sous-ensembles disjoints de nœuds actifs, aussi appelés couches ou niveaux d'activité et notés  $C_i$  :

**Définition 2** Une zone est dite  $k$ -couverte s'il existe  $k$  ensembles disjoints de nœuds actifs, chacun couvrant la zone une fois.

Les contraintes que doit vérifier tout nœud  $u$  avant de passer en mode passif sont donc :

$$u_{passif} \Leftrightarrow \|\{C_i \mid S(C_i) \supseteq S(u)\}\| \geq k \wedge \forall i \neq j, C_i \cap C_j = \emptyset. \quad (4)$$

Nous nous référerons à cette définition en tant que  $k$ -couverture par couches. Notons que résoudre le problème de la  $k$ -couverture par couches implique par définition la résolution du problème de la  $k$ -couverture plate. Cependant, la surface peut être  $k$ -couverte sans qu'il soit pour autant possible d'extraire  $k$  ensembles disjoints de capteurs actifs.

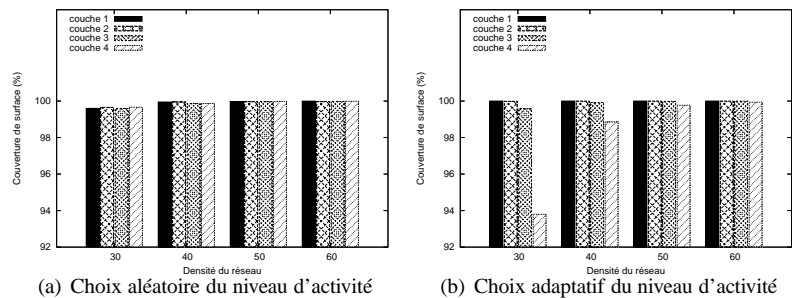
Nous avons établi les règles devant être vérifiées par tout nœud avant son passage en mode passif. Elles peuvent être augmentées d'un nouveau critère dans le but d'assurer la connexité de l'ensemble des nœuds actifs; Tout nœud  $u$  ne peut décider d'être passif que si  $S(u)$  est totalement couverte (ou  $k$ -couverte) par un ensemble *connecté* de voisins. Nous supposons ici que les messages échangés par les nœuds contiennent leur position et leur rayon de communication théorique, permettant ainsi aux nœuds d'évaluer la connexité de l'ensemble des voisins.

## 2.2 Travaux existants

Abrams, Goel and Plotkin [AGP04] proposent de résoudre le problème de la  $k$ -couverture par couches (voir définition 2) à l'aide de trois algorithmes construisant des ensembles dont la connexité n'est par ailleurs jamais discutée.

Après avoir rappelé que le problème de la couverture de surface par des ensembles connectés est NP-complet, Zhou, Das and Gupta [ZDG04] proposent trois heuristiques pour le résoudre. Parmi elles, deux versions distribuées sont décrites. Malheureusement, elles nécessitent toutes deux une connaissance à au moins deux sauts du voisinage de chaque nœud, les rendant difficilement assimilables à de véritables protocoles localisés.

La plupart des contributions portant sur la  $k$ -couverture de zone ne sont d'ailleurs pas localisées. Il s'agit le plus souvent de solutions centralisées, parfois déclinées en version distribuée nécessitant des informations à plus d'un saut. De plus, s'appuyant sur un théorème énonçant que, lorsque  $2SR \leq CR$ , le maintien de la  $k$ -connexité est garanti si la  $k$ -couverture de surface est maintenue [TG05], aucune d'entre elles n'évoque la connexité de l'ensemble des nœuds actifs.



**Fig. 1:** Couverture fournie par chaque couche d'activité. Le degré de couverture requis,  $k$ , est égal à 4.

### 3 Adaptation de protocoles conçus pour la couverture simple

Les résultats présentés ici sont obtenus à partir de réseaux déployés aléatoirement sur une zone  $50 \times 50$  et composés de nœuds aux propriétés homogènes ( $CR = SR = 10$ ).

#### 3.1 Modification du mécanisme d'évaluation de couverture

Comme nous l'avons déjà expliqué, il est possible d'assurer la  $k$ -couverture plate en modifiant l'outil d'évaluation de couverture. Si le critère de couverture est associé au critère de connexité, alors les ensembles de nœuds actifs construits couvrent totalement la zone et sont connectés. Des algorithmes tels que [TG05] ont en effet la possibilité d'assurer que la  $k$ -couverture implique la  $k$ -connexité (c'est à dire l'existence de  $k$  chemins disjoints entre toute paire de nœuds) mais cette propriété n'est malheureusement valable que lorsque  $2SR \leq CR$ . Ici, la  $k$ -couverture est par définition garantie par l'ensemble des nœuds actifs (Tab. 1) mais nous ne pouvons pas assurer que cet ensemble est  $k$ -connexe.

#### 3.2 Partitionner le réseau en $k$ ensembles couvrants

La  $k$ -couverture est également assurée si  $k$  ensembles disjoints couvrent chacun au moins une fois la zone (définition 2). On peut alors imposer de vérifier la connexité de chaque ensemble afin de garantir qu'entre deux régions de la zone, il existe  $k$  paires de nœuds capables de communiquer en utilisant des chemins disjoints. Les nœuds, en plus de choisir leur statut d'activité, doivent également choisir une couche d'activité, de façon aléatoire ou adaptative. Notons que quel que soit le choix opéré, la couverture simple est toujours assurée; en effet, quelle que soit la couche d'activité choisie par un nœud, ce dernier sera sélectionné par l'algorithme de couverture simple s'il est le seul de la couche à couvrir un point  $p$  donné.

##### 3.2.1 $k$ -couverture avec choix aléatoire de la couche d'activité

Les couches d'activité peuvent être créées selon un critère aléatoire. Il s'agit là de la façon la plus simple d'adapter un algorithme existant pour la couverture multiple. Chaque nœud choisit aléatoirement un numéro de couche compris entre 1 et  $k$  et applique ensuite n'importe quel algorithme de couverture simple en faisant abstraction de tout message émis par un nœud appartenant à une couche différente. Les  $k$  sous-ensembles vont ainsi se réduire en des ensembles de plus petite taille qui couvrira une surface équivalente à celle couverte par la totalité des nœuds de ce sous-ensemble. Nous avons appliqué cette méthode sur un protocole existant ne se prêtant pas à la  $k$ -couverture plate [CGSR05] (la décision d'activité n'y est pas basée sur une évaluation locale de la couverture). On peut observer sur la figure 1(a) que lorsque la densité est inférieure à 50, les différentes couches de nœuds ne couvrent pas totalement la zone. Les nœuds actifs de chaque couche couvrent bien une surface identique à celle initialement couverte par les nœuds ayant choisi cette même couche mais ils ne peuvent pas nécessairement couvrir la zone totalement du fait du choix aléatoire et de la densité trop faible pour la 4-couverture. Nous avons alors adapté un autre protocole, en utilisant cette fois un choix de niveau adaptatif.

Densité	$k$ -couverture plate	$k$ -couverture par couches (choix adaptatif)
Densité = 40	53.2%	84.1%
Densité = 60	39.1%	63.5%
Densité = 80	31.3%	51.5%

**Tab. 1:** Proportion de nœuds actifs nécessaires à la 4-couverture, avec PO [GCSRS06].

### 3.2.2 $k$ -couverture avec choix adaptatif de la couche d'activité

Le protocole que nous avons adapté [GCSRS06] se prête tout particulièrement à un choix adaptatif de niveau d'activité; Tout nœud  $u$  attend un temps aléatoire avant de prendre une décision d'activité. Une fois le temps d'attente écoulé, si  $S(u)$  est totalement couverte alors  $u$  décide d'être passif sans envoyer aucun message. S'il doit demeurer actif, en revanche, un message annonçant son activité est envoyé. De cette manière, il informe les nœuds voisins n'ayant pas encore décidé de sa présence. D'autres variantes existent mais, dans un souci de clarté, nous ne donnons ici que les résultats relatifs à cette dernière notée PO pour *Positive-Only*. Nous avons étendu ce protocole en introduisant dans les messages d'activité le numéro de couche choisie. Préalablement à la prise de décision d'activité,  $u$  trie ses voisins connus selon ce numéro et évalue la couverture fournie par chaque sous-ensemble ainsi que la connexité de chaque couche. Si il existe  $k$  couches de voisins connectées couvrant chacune  $S(u)$  alors  $u$  peut devenir passif. Sinon,  $u$  doit demeurer actif et choisit d'appartenir à la première couche ne répondant pas aux critères de couverture et de connexité. La caractéristique adaptative de ce choix rend le protocole tolérant aux densités trop faibles en lui permettant tout de même d'assurer de la couverture multiple, de degré inférieur ou égal à  $k$ . La figure 1(b) nous montre ainsi que lorsque la densité du réseau est trop faible (30 par exemple) et que la 4-couverture ne peut être atteinte, les nœuds peuvent néanmoins s'organiser de façon à ce que 2 couches d'activité couvrent totalement la zone tandis que la couverture des niveaux supérieurs décroît logiquement tout en entraînant une hausse du nombre de nœuds actifs par rapport à la  $k$ -couverture plate (Tab. 1).

## 4 Conclusion

Différentes solutions permettent d'adapter des algorithmes localisés initialement conçus pour la couverture de surface simple par des ensembles connectés. La  $k$ -couverture plate ne nécessite qu'une extension de l'outil d'évaluation de la couverture tandis que la répartition aléatoire des nœuds dans  $k$  sous-ensembles couvrants connectés requiert un choix du niveau d'activité. Lorsque ce choix est aléatoire, les niveaux de couverture fournis par chaque couche sont homogènes mais peuvent ne pas atteindre 100% lorsque la densité du réseau est trop faible. Un choix adaptatif de la couche d'activité permet quant à lui de garantir au moins  $i$  niveaux de couverture, avec  $i \leq k$ . Un tel choix assure également que  $i$  sous-ensembles de nœuds actifs seront connectés.

## References

- [AGP04] Z. Abrams, A. Goel, and S. Plotkin. Set  $k$ -cover algorithms for energy efficient monitoring in wireless sensor networks. In *Proceedings of International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pages 424–432, Berkeley, CA, USA, 2004.
- [CGSR05] J. Carle, A. Gallais, and D. Simplot-Ryl. Preserving area coverage in wireless sensor networks by using surface coverage relay dominating sets. In *Proceedings of IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 347–352, Cartagena, Spain, 2005.
- [GCSRS06] A. Gallais, J. Carle, D. Simplot-Ryl, and I. Stojmenović. Localized sensor area coverage with low communication overhead. In *Proceedings of 4th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, pages 328–337, Pisa, Italy, 2006.
- [TG05] D. Tian and N. D. Georganas. Connectivity maintenance and coverage preservation in wireless sensor networks. *AdHoc Networks Journal (Elsevier Science)*, pages 744–761, 2005.
- [ZDG04] Z. Zhou, S. Das, and H. Gupta. Connected  $k$ -coverage problem in sensor networks. In *Proceedings of 13th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pages 373–378, Chicago, IL, USA, 2004.