

# Etude et extension des relais de couverture de surface dans les réseaux de capteurs

Antoine Gallais, Jean Carle

► **To cite this version:**

Antoine Gallais, Jean Carle. Etude et extension des relais de couverture de surface dans les réseaux de capteurs. Colloque francophone sur l'ingénierie des protocoles (CFIP), Mar 2008, Les Arcs, France. 2008. <inria-00256215>

**HAL Id: inria-00256215**

**<https://hal.inria.fr/inria-00256215>**

Submitted on 14 Feb 2008

**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.

---

# Etude et extension des relais de couverture de surface dans les réseaux de capteurs

Antoine Gallais — Jean Carle

LIFL CNRS UMR 8022, Univ. Lille 1, INRIA Futurs, France  
{Antoine.Gallais, Jean.Carle}@lifl.fr

---

*RÉSUMÉ.* L'objectif des protocoles de couverture de surface est de mettre en veille des capteurs redondants tout en assurant une couverture totale de la zone par les nœuds restant allumés. La connexité de l'ensemble des nœuds actifs doit également être préservée dans la mesure où il est impératif d'assurer l'acheminement des rapports de surveillance vers les stations puits. La plupart des solutions existantes ne considèrent pas ces deux problèmes comme un seul et sont rarement évaluées sous des conditions réalistes. Dans cet article, nous proposons une analyse approfondie et des améliorations d'un protocole localisé maintenant la couverture de zone par des ensembles connectés en se basant sur des relais de couverture de surface (SCR). Dans un premier temps, nous avons amélioré l'une des phases critiques de l'algorithme ; la sélection des relais. Ceci nous a permis de diminuer le nombre de nœuds actifs sans altérer la couverture fournie. Nous avons ensuite soulevé le problème de sa résistance à des conditions de communication plus réalistes. Nous verrons alors comment de nouvelles modifications durant la phase de sélection des relais nous ont permis d'obtenir un protocole robuste et facilement configurable.

*ABSTRACT.* Area coverage protocols aim at turning off redundant sensor nodes while ensuring full coverage of the area by the remaining active nodes. Connectivity of the active nodes subset must also be provided so that monitoring reports can reach the sink stations. Existing solutions hardly address these two issues as a unified one and very few are robust to non ideal physical conditions. In this paper, we propose a deep analysis and some enhancements of a localized algorithm for area coverage, based on Surface Coverage Relays (SCR) and able to build connected active nodes sets that fully cover the area. We first enhanced the critical phase of our protocol (the relay selection) and show that the number of active nodes can be drastically reduced. We then raise the issue of the robustness of the protocol once a realistic physical layer is simulated. We will show how another modification of our relay selection phase led us to an even more robust and configurable protocol.

*MOTS-CLÉS :* Réseaux de capteurs sans fils, couverture de surface, algorithme localisé configurable, couche physique réaliste

*KEYWORDS:* Wireless sensor networks, area coverage, configurable localized algorithm, realistic physical layer.

---

## 1. Introduction

Les réseaux de capteurs sans fils sont composés de centaines d'objets équipés d'une batterie, d'une unité d'acquisition d'information et sont capables de communiquer sans fil. Déployés sur des zones distantes ou sensibles, ils deviennent alors à usage unique en raison de l'impossibilité de remplacer ou recharger leurs batteries. La consommation d'énergie est alors distribuée en exploitant la redondance induite par le déploiement aléatoire ; des nœuds sont actifs tandis que d'autres demeurent passifs, économisant ainsi leur énergie. Cette topologie dynamique ne doit pourtant pas mettre en péril l'application de surveillance. C'est pourquoi les nœuds actifs doivent couvrir une zone aussi large que l'ensemble des capteurs déployés. De plus, il est indispensable d'assurer l'acheminement des rapports en provenance des capteurs vers les stations puits chargées de stocker et de traiter les données. L'ensemble des nœuds actifs doit également être connecté. Dans [CAR 05], nous avons proposé un protocole localisé capable de maintenir une couverture de surface totale à l'aide d'ensembles connectés. Une première phase de découverte de voisinage suivie d'une autre de sélection des relais de couverture de surface sont nécessaires au processus de prise de décision exécuté par chaque nœud.

Dans cet article, nous revenons sur la phase de sélection de relais que nous avons mise en place. Cette solution nous permet de réduire davantage le nombre de nœuds actifs sans introduire de messages ou d'informations supplémentaires. La majeure partie des solutions au problème de couverture de surface considère des communications idéales (chaque nœud ayant un rayon de communication théorique au-delà duquel il ne peut rien recevoir ni transmettre directement). En réalité, il existe de nombreux aléas dans les communications sans fils qui ne sont pas considérés dans ces solutions. Nous avons soumis notre algorithme à des couches physiques non idéales (i.e. toute transmission ayant une probabilité donnée de se dérouler correctement). Nous montrerons qu'il s'en trouve très légèrement atteint, assurant une couverture moindre qu'avec une couche physique idéale. Nous avons alors introduit un nouveau paramètre, intervenant au cours de la sélection des relais, et qui nous permet de renforcer notre protocole. Nous montrerons également comment l'ajout de ce paramètre peut nous aider à configurer plus finement l'ordonnancement d'activité des capteurs déployés en fonction des besoins de l'application de surveillance.

## 2. Préliminaires

Nous supposons que les capteurs sont déployés aléatoirement et demeurent statiques. La plupart des solutions existantes supposent que les nœuds connaissent leur position exacte. La même hypothèse est reprise ici étant donné le problème de positionnement a déjà été largement étudié [BAC 05]. La position exacte peut être utilisée comme un identifiant unique pour chaque nœud. Nous supposons également que les capteurs sont synchronisés en temps de façon à organiser l'activité en tours successifs. Là encore, de nombreuses solutions ont été proposées dans ce domaine (voir [MAR 04] par exemple).

### 2.1. Modèles de communication et de surveillance

Un réseau est modélisé par un graphe  $G = (V, E)$ ,  $V$  étant l'ensemble des sommets et  $E \subseteq V^2$  celui des arêtes. Une arête entre deux sommets  $u$  et  $v$  existe si  $u$  est physiquement capable d'envoyer un message à  $v$ . Le voisinage de  $u$ , noté  $N(u)$ , est défini comme suit :

$$N(u) = \{v \in V \mid v \neq u \wedge (u, v) \in E\}. \quad [1]$$

Chaque objet possède un rayon de communication théorique  $R_c$  ainsi qu'un rayon de surveillance  $R_s$ . Nous noterons  $S(u)$  la surface couverte par un nœud  $u$  et  $S(A)$  celle couverte par un ensemble de sommets  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , tel que :

$$S(A) = \bigcup_{i=1}^{i=|A|} S(a_i). \quad [2]$$

### 2.2. Modèles de canal radio

Soit un graphe  $G = (V, E)$  et la distance euclidienne entre les nœuds  $u$  et  $v$   $\text{dist}(u, v)$ , le modèle du disque unitaire (*unit disk graph*) définit  $E$  de la manière suivante :

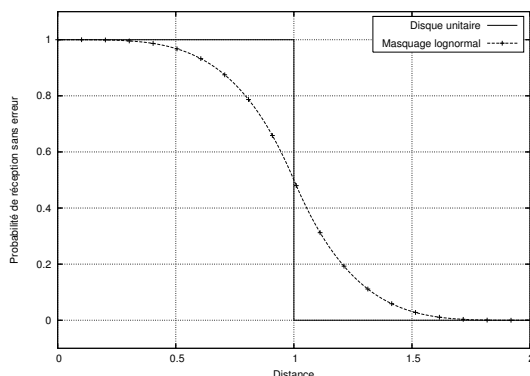
$$E = \{(u, v) \in V^2 \mid u \neq v \wedge \text{dist}(u, v) \leq R_c\}, \quad [3]$$

Cependant, dans un contexte pratique, chaque lien de communication a une probabilité d'exister, qui dépend de nombreux facteurs tels que la puissance d'émission et la distance émetteur/récepteur. Durant notre évaluation de performances, nous serons amenés à remplacer le modèle du disque unitaire par celui dit du masquage lognormal (*lognormal shadowing*), transformant ainsi  $G$  en un graphe valué, où le poids de chaque arête  $(u, v) \in E$  correspond à la probabilité de réception correcte  $p(\text{dist}(u, v))$  pour deux nœuds  $u$  et  $v$ . Une fonction d'approximation  $P(x)$  est décrite par Kuruvila et al. [KUR 04] :

$$P(x) = \begin{cases} 1 - \frac{(\frac{x}{R_c})^{2\alpha}}{2} & \text{si } 0 < x \leq R_c, \\ \frac{(\frac{2R_c - x}{R_c})^{2\alpha}}{2} & \text{si } R_c < x \leq 2 \times R_c, \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases} \quad [4]$$

$\alpha$  étant fonction de l'environnement et  $x$  étant la distance considérée.

Cette fonction suppose que la probabilité de réception correcte à distance  $R_c$  est toujours égale à  $P(R_c) = 0.5$  (voir Fig. 1).



**Figure 1.** Les deux modèles de couche physique considérés ( $R_c = 1$ ,  $\alpha = 2$ ).

Ce modèle, bien que plus réaliste que celui du disque unitaire, ne considère pas tous les facteurs caractérisant une véritable liaison sans fil. Si certains aspects, tels que la modulation ou les effets d'évanouissement, ne sont pas pris en compte directement, l'approximation employée se rapproche néanmoins de résultats précédemment obtenus dans des conditions réelles [GAL 06].

### 3. Travaux existants

Tian et Georganas [TIA 05] ont proposé un algorithme d'ordonnancement d'activité permettant à des capteurs synchronisés et aléatoirement déployés de régulièrement recenser leurs voisins puis d'attendre un temps donné à l'écoute d'éventuels messages de retraits. Ces derniers sont envoyés par un nœud ayant atteint la fin de son temps d'attente et qui est complètement couvert. La connectivité est assurée du fait d'un rapport fixe entre les rayons de surveillance et de communication ( $R_s \leq R_c$ ). Il est prouvé que cette hypothèse combinée avec une couverture de zone totale induit nécessairement un ensemble connecté [XIN 05].

Récemment, un algorithme aléatoire a été proposé dans [YEN 07]. Reposant sur un modèle de chaînes de Markov, cette solution permet à chaque capteur de devenir passif avec une probabilité donnée. Leur analyse montre qu'il est possible de configurer cette dernière pour assurer une couverture de surface totale ainsi que la connectivité de l'ensemble, ce quel que soit le ratio entre  $R_c$  et  $R_s$ . Néanmoins, tout changement de configuration nécessite une nouvelle analyse, ce qui pourrait se révéler un obstacle à une utilisation au sein de réseau dynamiques.

#### 4. Le protocole SCR-CADS

Alors que le maintien de la couverture de zone pourrait ne pas être une contrainte stricte, celui de la connexité s'avère souvent plus crucial en raison des informations qu'il faut acheminer. C'est pour cette raison que nous sommes revenus sur notre protocole SCR-CADS, prouvé comme assurant une couverture totale par des ensembles connectés. Cette solution consiste en trois étapes successives effectuées par chaque nœud (découverte de voisinage, sélection des relais et prise de décision) que nous rappelons brièvement.

##### 4.0.1. Découverte de voisinage

Cette phase est classique ; des messages *hello* sont échangés, contenant la position du nœud émetteur.

##### 4.0.2. Sélection des relais de couverture de surface

En étudiant la couverture de point, Jacquet et al. [ADJ 05] ont utilisé les relais multipoints (MPR) [QAY 02]. Chaque nœud sélectionne un sous-ensemble de son voisinage (l'ensemble MPR), suffisant à communiquer avec l'ensemble des voisins à deux sauts. Chaque nœud  $u$  doit ensuite envoyer son ensemble  $MPR(u)$  à ses voisins afin de permettre la prise de décision. Cette dernière s'effectue selon une règle simple, permettant de préserver la connexité de l'ensemble des nœuds actifs.

Comme notre but était d'assurer la connexité et la couverture, notre solution s'en inspire directement en proposant une définition des relais adaptée à la couverture de zone ; chaque nœud  $u$  calcule un ensemble de relais de couverture de surface  $SCR(u)$  devant couvrir une zone identique à celle couverte par l'ensemble des voisins :

$$\forall u, \exists SCR \mid S(SCR(u)) \setminus S(u) = S(N(u)) \setminus S(u). \quad [5]$$

Chaque nœud doit être capable de calculer son propre ensemble SCR. Notons que construire un ensemble de taille minimale est équivalent au problème du « weighted set cover » qui est NP-complet [KAR 72].

Initialement, nous avons proposé une heuristique reposant sur un calcul d'isobarycentres. Le voisin le plus lointain est d'abord considéré et nécessairement ajouté à l'ensemble SCR vide. Puis, afin d'éviter un calcul coûteux (quel est le voisin qui apporte le plus de couverture supplémentaire par rapport à celle déjà fournie par l'ensemble SCR ?), nous avons proposé de choisir le voisin le plus éloigné de l'isobarycentre des nœuds constituant l'ensemble des relais.

Nous proposons ici une nouvelle méthode qui consiste à trier les voisins par ordre décroissant de distance et à les considérer dans cet ordre lors du calcul de SCR. Si un nœud couvre une portion de zone encore non couverte par l'ensemble SCR, alors le voisin doit appartenir à cet ensemble. Une fois les ensembles SCR calculés et envoyés aux voisins, chaque capteur peut appliquer la règle de décision.

#### 4.0.3. *Prise de la décision d'activité*

Dans le protocole MPR-DS [ADJ 05], les nœuds appliquent une règle simple basée sur un identifiant (ou une clef) supposé unique pour chaque nœud.

**Definition 1** *Tout nœud  $u$  dont la clef est la plus petite du voisinage ou qui appartient à l'ensemble des relais du voisin ayant la plus petite clef doit être actif.*

Comme déjà montré dans [ADJ 05], cette règle suffit à garantir la connexité de l'ensemble obtenu. La même conclusion a été démontrée lorsque qu'elle est appliquée avec des ensembles SCR et mène également à une couverture de zone totale [CAR 05].

Maintenant que nous avons introduit SCR et présenté une nouvelle heuristique de sélection des relais, nous allons évaluer les performances de notre solution avec différents modèles de communication. Comme nous l'avons déjà évoqué, il est important de considérer des hypothèses réalistes afin de tester la validité de notre algorithme.

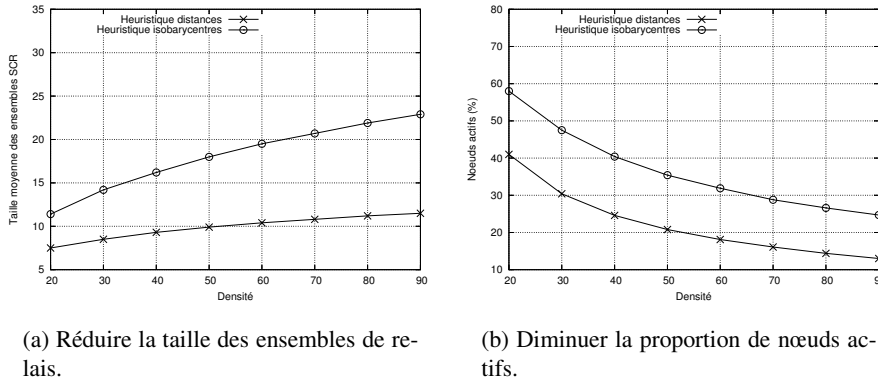
## 5. Evaluation de performances

Les résultats expérimentaux ont été obtenus à partir de graphes générés aléatoirement au sein d'un simulateur à événements discrets. Les nœuds sont déployés sur une zone carrée de  $50 \times 50$ . Les rayons  $R_c$  et  $R_s$  sont fixés à 10. Dans nos simulations, la densité du réseau se réfère au nombre moyen de nœuds par zone de communication. Chaque itération débute par la phase de découverte du voisinage, suivie de la sélection des relais et enfin de la prise de décision. La période suivante concerne les nœuds actifs uniquement (surveillance et trafic des informations collectées) et n'est pas reprise ici. Pour chaque densité, un nombre d'itérations suffisant est simulé. Par suffisant, nous entendons que 95% des résultats se trouvent dans un intervalle de confiance suffisamment étroit. Enfin, lorsque les nœuds doivent évaluer la zone couverte par un ensemble de capteurs, ils utilisent un outil d'évaluation de couverture, basé sur les intersections des disques de surveillance [ZHA 05, XIN 05].

### 5.1. *Sous des conditions de communication idéales*

Nous donnons pour commencer des résultats complémentaires au sujet du protocole SCR lorsqu'il est simulé avec le modèle du disque unitaire. Nous parlons alors de conditions idéales dans la mesure où aucun message ne peut être perdu, que ce soit en raison de collisions ou de l'environnement de transmission.

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'algorithme a été prouvé comme maintenant à la fois la couverture de surface et la connexité de l'ensemble des nœuds actifs. Nous nous concentrons donc à présent sur la taille des ensembles de relais suite à l'introduction de notre nouvelle heuristique.



**Figure 2.** Principaux avantages de l'heuristique des distances pour la sélection des relais.

### 5.1.1. Taille des ensembles SCR

Nous avons calculé la taille moyenne des ensembles SCR afin de comparer les deux heuristiques de sélection proposées. Cette donnée est importante d'abord dans la mesure où le nombre de nœuds actifs en dépend nécessairement et ensuite parce qu'elle détermine la taille des données de contrôle à envoyer dans les messages à l'issue de la sélection. Concernant le premier point, tout nœud ayant la plus petite clef de son voisinage est inéluctablement actif. Ce nombre varie donc en moyenne uniquement avec la densité. En revanche, plus les ensembles SCR sont grands plus la probabilité d'appartenir à celui du voisin ayant la plus petite clef l'est également, rendant par conséquent plus probable le fait de devoir être actif. Pour ce qui est du second point, étant donné que les ensembles SCR doivent être communiqués aux voisins à un saut, moins ils seront imposants, moins les messages seront grands, et la consommation énergétique du capteur liée au protocole sera réduite.

Nous avons pu observer que la nouvelle heuristique basée sur le calcul de distances procurait de meilleurs résultats que celle reposant sur les isobarycentres. La figure 2(a) nous montre une taille moyenne des ensembles générés avec la nouvelle méthode allant de 8 à 11 voisins, pour les densités 20 et 90 respectivement. Rappelons que la solution utilisant les barycentres conduisait à 11 voisins contenus dans l'ensemble SCR à densité 20 et jusque 24 à densité 90, soit plus du double de ce que nous obtenons aujourd'hui.

Voyons à présent si cette forte réduction de la taille des ensembles de relais a un impact similaire sur les proportions de nœuds actifs.



### 5.1.2. *Nœuds actifs*

La figure 2(b) nous montre les pourcentages de nœuds actifs en fonction de la densité du réseau. Ces proportions étaient par exemple de 24.7% à densité 90 avec l'heuristique des barycentres et ne sont plus maintenant que de 13% pour la même densité, avec notre nouvelle méthode. Ces résultats confirment l'importance de la sélection des relais et de la méthode qui y est employée ; la taille des données utiles dans les messages de contrôle peut être divisée par deux et le nombre de nœuds pouvant demeurer passifs à chaque tour est augmenté de 15%. Nous pensons donc que notre protocole pourrait avoir des effets bénéfiques en terme de consommation énergétique s'il venait à être employé dans la réalité. Avant cela, nous avons évalué sa capacité à résister aux aléas du canal radio.

## 5.2. *Avec une couche physique réaliste*

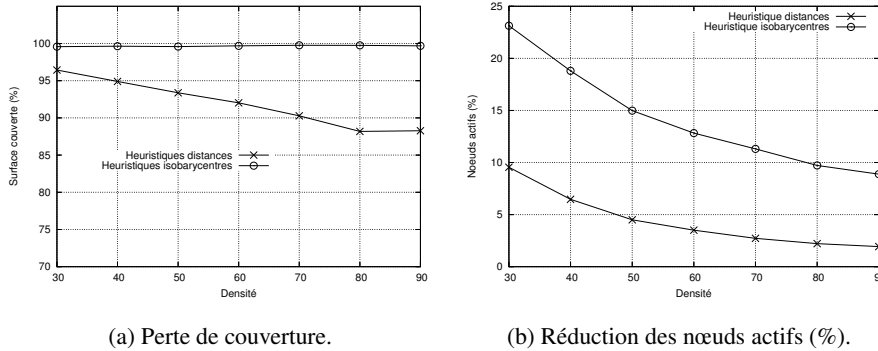
Nous évaluons maintenant notre protocole SCR-CADS avec une couche physique réaliste. Nous voulons évaluer sa robustesse et voir si des ajustements sont nécessaires. A présent, les liens de communication sont probabilistes ; deux nœuds communiquent avec une probabilité donnée fournie par la fonction 4. Ni retransmissions, ni acquittements n'ont été introduits dans cette étude sur des réseaux très denses. Nous nous sommes donc placés dans le pire cas où chaque message n'est envoyé qu'une seule fois.

Dans notre algorithme, une fois la découverte du voisinage effectuée et les ensembles SCR calculés, ils sont envoyés aux voisins à un saut afin de permettre la prise de décision basée sur la règle 1. Tant que le modèle du disque unitaire est employé, tous ces messages envoyés sont reçus par les voisins à un saut et des ensembles couvrants et connectés sont calculés. Observons à présent l'impact d'une couche physique réaliste sur la couverture de surface.

### 5.2.1. *Couverture de surface*

La figure 3(a) donne la surface couverte par les nœuds actifs en fonction de la densité du réseau. Si la couverture de zone était totale avec des communications parfaites, ce n'est plus le cas lorsque des aléas sont introduits dans les transmissions. Le pourcentage de couverture passe de 95% à densité 30 à moins de 90% à densité 80. Ces pertes ne sont pas aussi importantes que celles que nous avons déjà pu remarquer sur d'autres protocoles de couverture de surface [GAL 07]. De plus, une couverture garantie à 90% pourrait suffire dans de nombreuses applications d'observation ou de surveillance.

Expliquons maintenant pourquoi cet impact est si faible. Durant la phase de découverte de voisinage, les messages *hello* d'une partie des voisins pourrait ne pas être reçus par un nœud donné  $u$ . Cela ne fait pourtant qu'augmenter la probabilité qu'a  $u$  de penser que sa clef est la plus petite du voisinage. Ainsi, moins  $u$  découvre de voisins, plus ses chances d'être actif sont grandes. Imaginons alors qu'aucun message



**Figure 3.** L'algorithme SCR-CADS avec une couche physique réaliste (LNS, voir formule 4, avec  $\alpha = 2$ ).

ne puisse être transmis, alors tous les nœuds seront actifs et la surface entièrement couverte. Ce n'est pas le cas ici et les pertes de couverture ne peuvent pas s'expliquer par la phase de découverte de voisinage.

Voyons donc la phase de sélection des relais. Une fois calculés, les relais sont envoyés aux voisins à un saut. Notons qu'à présent, la notion de voisinage à un saut est difficile à cerner et nous préférons dire que ce message est émis et potentiellement reçu par tout nœud situé dans un rayon de  $2 \times R_c$ . Si certains ne sont jamais reçus par un nœud  $u$ , la conséquence sera que  $u$  ne connaîtra qu'un sous-ensemble de ses véritables sélecteurs SCR. Si l'un de ceux que  $u$  ignore se trouve être celui à la clef la plus petite du voisinage, alors  $u$  pensera ne pas avoir été sélectionné par ce dernier et décidera d'être passif, mettant en péril la couverture de surface. Ceci explique les pertes de couverture observées sur la figure 3(a) lorsque l'heuristique des distances est employée. L'impact est beaucoup moins important avec la méthode basée sur le calcul de barycentres, car elle génère toujours des ensembles SCR de plus grande taille et par conséquent davantage de nœuds actifs, comme nous le verrons par la suite. Notons enfin que si un message de relai est reçu par  $u$  depuis un nœud  $v$  jusqu'à présent inconnu (pas de message *hello* de  $v$  reçu par  $u$  durant la première phase), alors  $u$  devra considérer ce message. En effet,  $v$  avait peut-être reçu le message *hello* de  $u$  et pourrait l'avoir sélectionné comme relai de couverture. Finalement, seul un message est crucial ; celui contenant l'ensemble SCR du voisin ayant la plus petite clef du voisinage. Les aléas de communication peuvent ensuite être sources de nouvelle information.

### 5.2.2. Nœuds actifs

Généralement, lorsque des pertes de couverture se produisent, elles sont causées soit par une diminution du nombre de nœuds actifs (trop peu restent pour pouvoir couvrir la zone entièrement), soit par une incohérence spatiale (assez de nœuds actifs

mais inégalement distribués). Le deuxième cas peut difficilement se produire en raison de l'homogénéité de la distribution initiale. Effectivement, la figure 3(b) nous montre que le nombre de nœuds actifs est largement diminué, passant de moins de 10% à densité 30 à seulement 2% à densité 90.

Comme nous l'avons vu précédemment, cette forte baisse des proportions de nœuds actifs ne met pas en grand péril l'application de surveillance, démontrant ainsi l'inhérente robustesse de notre solution.

### 5.3. *Davantage de robustesse et de configurabilité*

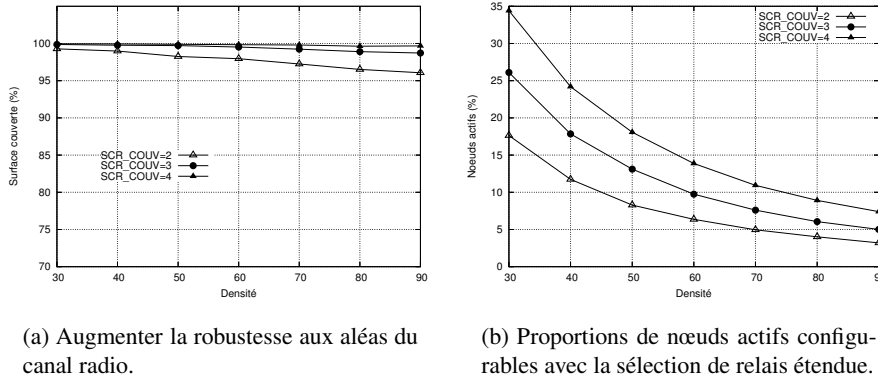
Bien que l'impact d'une couche physique réaliste soit moindre, nous avons observé une forte diminution des nœuds actifs, lui-même essentiellement influencé par la taille des ensembles de relais. Nous essayons à présent de donner une propriété de configurabilité à notre algorithme afin de pouvoir influencer facilement le nombre de nœuds actifs et par conséquent la proportion de zone couverte (pouvant ainsi corriger les pertes occasionnées par les aléas des transmissions).

Nous avons introduit un nouveau paramètre dit *de couverture* et noté  $SCR\_COUV$ . Il est utilisé durant la sélection des relais en imposant le nombre de relais devant couvrir chaque point de la zone couverte par l'ensemble des voisins. Autrement dit, pour chaque voisin considéré lors de la sélection, si la zone qu'il couvre n'est pas  $k$ -couverte (avec  $k = SCR\_COUV$ ) par l'ensemble des relais déjà sélectionnés alors il doit faire partie de l'ensemble SCR. Il existe plusieurs définitions de la  $k$ -couverture de surface. Notre approche est de considérer une zone comme  $k$ -couverte sitôt que tout point appartenant à cette surface est à portée de surveillance de  $k$  capteurs distincts.

Ceci devrait logiquement nous aider à augmenter les proportions de nœuds actifs, étant donné qu'elles sont grandement déterminées par les tailles de ensembles SCR. Celles-ci sont nécessairement augmentées par notre contrainte de  $k$ -couverture de surface. Pour les résultats présentés dans cette section, l'heuristique des distances est utilisée lors de la sélection des relais.

#### 5.3.1. *Couverture de surface*

Le but premier du paramètre  $SCR\_COUV$  est d'être capable de résister davantage aux pertes de messages en augmentant intentionnellement la redondance des nœuds actifs. La figure 4(a) nous montre la couverture de surface obtenue pour plusieurs valeurs du paramètre de couverture ( $SCR\_COUV \in \{2, 3, 4\}$ ). Aussitôt que  $SCR\_COUV > 1$ , la couverture est d'au moins 95%. Ceci montre que même en présence d'aléas durant les transmissions sans fils, notre algorithme peut fournir des résultats satisfaisants. Notre nouveau paramètre peut également nous aider à configurer la sélection des relais. Jusqu'à présent, nous ne disposions que de nos deux heuristiques. Le problème est qu'il est difficile aujourd'hui de changer dynamiquement le code déployé sur un capteur communicant. Changer la valeur du paramètre de couverture est en revanche plus aisé.



(a) Augmenter la robustesse aux aléas du canal radio.

(b) Proportions de nœuds actifs configurables avec la sélection de relais étendue.

**Figure 4.** Configurabilité du protocole SCR-CADS (LNS, voir formule 4, avec  $\alpha = 2$ ).

### 5.3.2. Nœuds actifs

Nous nous sommes enfin demandés à quel point la valeur de  $SCR\_COUV$  pouvait influencer les proportions de nœuds actifs. D'après la figure 4(b), lorsque la valeur de  $SCR\_COUV$  est égale à 2 (ce qui est suffisant pour assurer plus de 95% de surface couverte), nous obtenons entre 17% et 4% de nœuds actifs. Les courbes montrent que quelle que soit la densité du réseau, modifier la valeur de ce paramètre suffit à influencer clairement la redondance de surveillance.

## 6. Conclusion

Nous avons amélioré notre protocole SCR-CADS afin d'obtenir une phase de sélection des relais de couverture plus adaptée aux contraintes que nous pensons retrouver dans un environnement de déploiement réel. Avoir une solution localisée simple et pouvoir régler la redondance des nœuds actifs tout en conservant une robustesse aux aléas du canal radio sont pour nous autant de raisons qui font de cet algorithme un candidat crédible pour des déploiements réels.

Sitôt après avoir introduit une couche physique plus réaliste, nous n'avons plus évoqué le problème de la connexité du graphe, principalement car il est difficile de caractériser cette dernière. Nous aimerions maintenant étudier cet aspect afin de savoir si notre algorithme s'avère toujours satisfaisant pour des déploiements réels. Dans ce cadre, l'introduction de modèles de communication plus réalistes, intégrant par exemple les interférences, fait naturellement partie de nos ambitions. De même, si les besoins en synchronisation ou en localisation venaient à s'avérer des obstacles dans nos scénarios de déploiements (en termes de passage à l'échelle ou de coûts), il nous faudrait évaluer l'impact d'erreurs dans ces calculs et éventuellement de quelle manière notre protocole pourrait s'affranchir de ces hypothèses.

## 7. Bibliographie

- [ADJ 05] ADJIH C., JACQUET P., VIENNOT L., « Computing connected dominated sets with multipoint relays », *Ad Hoc and Sensor Wireless Networks journal (AHSWN)*, vol. 1, n° 3, 2005, p. 27–39.
- [BAC 05] BACHRACH J., TAYLOR C., « Localization in sensor networks », *Handbook of Sensor Networks (I. Stojmenović, ed.)*, Wiley, , 2005, p. 277–310.
- [CAR 05] CARLE J., GALLAIS A., SIMPLOT-RYL D., « Preserving Area Coverage in Wireless Sensor Networks by using Surface Coverage Relay Dominating Sets », *Proceedings of IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Cartagena, Spain, 2005, p. 347–352.
- [GAL 06] GALLAIS A., PARVERY H., CARLE J., GORCE J.-M., SIMPLOT-RYL D., « Efficiency Impairment of Wireless Sensor Networks Protocols under Realistic Physical Layer Conditions », *Proceedings of 10th IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*, Singapore, 2006.
- [GAL 07] GALLAIS A., INGELREST F., CARLE J., SIMPLOT-RYL D., « Preserving Area Coverage in Sensor Networks with a Realistic Physical Layer », *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Anchorage, AK, USA, 2007, short paper.
- [KAR 72] KARP R. M., « Reducibility among combinatorial problems », MILLER R. E., THATCHER J. W., Eds., *Complexity of Computer Computations*, p. 85–103, Plenum Press, New York, 1972.
- [KUR 04] KURUVILA J., NAYAK A., STOJMENOVIĆ I., « Hop Count Optimal Position Based Packet Routing Algorithms for Ad Hoc Wireless Networks with a Realistic Physical Layer », *Proceedings of IEEE Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS)*, Fort Lauderdale, FL, USA, 2004.
- [MAR 04] MAROTI M., KUSY B., SIMON G., LEDECZI A., « The flooding time synchronization protocol », *Proceedings of ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, Baltimore, MD, USA, 2004, p. 39–49.
- [QAY 02] QAYYUM A., VIENNOT L., A.LAOUITI, « Multipoint Relaying for Flooding Broadcast Messages in Mobile Wireless Networks », *Proceedings of Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, Hawaii, HI, USA, 2002.
- [TIA 05] TIAN D., GEORGANAS N. D., « Connectivity maintenance and coverage preservation in wireless sensor networks », *AdHoc Networks Journal (Elsevier Science)*, , 2005, p. 744–761.
- [XIN 05] XING G., WANG X., ZHANG Y., LU C., PLESS R., GILL C., « Integrated Coverage and Connectivity Configuration for Energy Conservation in Sensor Networks », *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 1, n° 1, 2005, p. 36–72, ACM Press, New York, NY, USA.
- [YEN 07] YENER B., MAGDON-ISMAIL M., SIVRIKAYA F., « Joint problem of power optimal connectivity and coverage in wireless sensor networks », *Wireless Networks*, vol. 13, n° 4, 2007, p. 537–550, Kluwer Academic Publishers.
- [ZHA 05] ZHANG H., HOU J. C., « Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks », *Ad Hoc and Sensor Wireless Networks journal (AHSWN)*, vol. 1, 2005, p. 89–123.