



HAL
open science

Protocoles d'auto-organisation : une étude qualitative au cours de la vie des réseaux de capteurs

Karel Heurtefeux, Fabrice Valois

► To cite this version:

Karel Heurtefeux, Fabrice Valois. Protocoles d'auto-organisation : une étude qualitative au cours de la vie des réseaux de capteurs. Journées Doctorales en Informatique et Réseaux, Jan 2008, Villeneuve d'Ascq, France. hal-00424991

HAL Id: hal-00424991

<https://hal.science/hal-00424991v1>

Submitted on 21 Oct 2009

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.

Protocoles d'auto-organisation : une étude qualitative au cours de la vie des réseaux de capteurs*

Karel Heurtefeux and Fabrice Valois

ARES INRIA / CITI, INSA-Lyon, F-69621, France
{karel.heurtefeux, fabrice.valois}@insa-lyon.fr

Résumé L'auto-organisation dans les réseaux de capteurs a pour objectif de faire apparaître des comportements émergents, par exemple sous forme de topologie logique connectée (dorsale) ou non connectée (clusters). Le but de ces vues logiques est de fournir une vue plus efficace que la vue physique et d'introduire de la robustesse, de la stabilité, etc... L'objectif est que les protocoles de communication basés sur cette vue logique soient plus efficaces que si l'on considère le réseau à *plat*. De nombreuses études traitent de l'évaluation de performances des topologies virtuelles en termes de consommation d'énergie, de cardinalité, etc... Mais le réseau est toujours considéré comme entièrement déployé. Selon nous, une analyse plus fine est possible pour caractériser les différentes stratégies d'auto-organisation durant la vie d'un réseau de capteurs sans fil. Ce papier étudie le comportement tel que la robustesse, la latence et la cardinalité de 2 principales stratégies d'auto-organisation : *i*) les stratégies orientées dominants (MPR, MPR-DS, CDS localisé, CDS-MIS) qui vont sélectionner un sous-ensemble de nœuds du réseau comme dominants, *ii*) les stratégies d'élagage ou de sélection de liens qui vont sélectionner un sous ensemble de liens (RNG, LMST). Nous étudions l'évolution de ces stratégies au cours du déploiement chaotique du réseau ou phase de naissance, le fonctionnement normal et la phase de mort.

1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fils sont des réseaux où, en l'absence d'infrastructure centralisée, la communication et l'organisation des nœuds requièrent des protocoles collaboratifs. De plus, la nature physique des capteurs entraîne des contraintes particulières : faible énergie, peu ou pas de mobilité, faible portée radio, puissance de calcul limitée. La puissance de transmission de chaque nœud étant plus faible que le diamètre du réseau, le routage multi-saut est utilisé pour l'échange de données avec le puits.

Pour gérer ces réseaux, nous devons être capable de construire une passerelle entre les contraintes inhérentes aux capteurs et les applications supportées par ces réseaux. Selon nous il y a deux approches : considérer le réseau à plat avec tous les nœuds équivalents physiquement et déployer directement les protocoles de communications ou concevoir une structure virtuelle, un schéma d'auto-organisation, qui offrira un cadre efficace pour les protocoles [TV04]. Dans le premier cas, le passage à l'échelle est illusoire car l'étendue du réseau entraîne

* Ce travail a été partiellement financé par le projet ANR RNRT ARESA.

une augmentation exponentielle des communications avec les protocoles classiques (routage unicast, broadcast, etc...). Dans le deuxième cas, des protocoles localisés sont utilisés pour fournir des schémas d'auto-organisation robustes. De tels schémas tirent avantage de l'hétérogénéité naturelle du réseau en termes de densité, mobilité, niveau d'énergie, etc... Dans cet article nous étudions le comportement de plusieurs schémas d'auto-organisation : les stratégies orientées dominants comme CDS [AJV02] et les stratégies de sélections de liens comme RNG [Tou80]. Dans le premier cas, un sous-ensemble des nœuds est sélectionné pour former un ensemble connecté dominant, dans le second cas tous les nœuds sont retenus mais seulement un sous-ensemble de liens sont dans l'organisation.

Il y a de nombreux avantages à créer une dorsale virtuelle basée sur une stratégie de dominants : la diffusion du trafic de contrôle par exemple, qui est un problème important car il nécessite d'atteindre tous les nœuds du réseau ou l'application d'un mode d'endormissement des nœuds. Enfin, cette structure logique permet de fournir un protocole de routage efficace [TV05].

L'élagage des liens dans un réseau est également utile. Le contrôle de topologie permet de sélectionner les liens les plus courts et donc les liens à la fois les moins coûteux en énergie et ceux avec un rapport signal à bruit plus important, et cela tout en garantissant la connectivité du réseau [CISRS03]. Nous pouvons imaginer d'autres critères de sélection des liens comme le niveau d'interférence entre deux nœuds, le taux d'erreur, etc...

Nous concentrons notre évaluation sur quatre protocoles représentatifs des principales stratégies pour construire un ensemble connecté dominant (CDS) : MPR, MPR-DS, CDS localisé, CDS-MIS et deux protocoles de sélection de liens : RNG et LMST.

Notre point de vue est que la caractérisation de ces protocoles d'auto-organisation est la première étape vers une possible adaptation des topologies virtuelles : une transition dynamique d'un schéma à un autre selon l'état du réseau. Que veut dire caractériser un protocole ? Nous essayons de mettre en avant les différences entre les protocoles quand le réseau évolue suite au déploiement de nouveaux nœuds ou à la disparition d'une partie d'entre eux. Nous définissons trois phases : la naissance quand les nœuds apparaissent, la phase de fonctionnement normal et la mort quand les nœuds commencent à disparaître à cause d'une défaillance ou d'un trop faible niveau d'énergie. La question à laquelle nous voulons répondre est la suivante : toutes les organisations sont-elles équivalentes durant ces trois phases ?

Cet article est structuré comme suit. Dans un premier temps, nous allons passer en revue les principaux algorithmes d'auto-organisation. Dans la section 3, nous allons préciser quelles sont les différentes phases de la vie d'un réseau de capteurs avant, en section 4, de discuter des hypothèses et de la modélisation effectuée. Les résultats seront présentés et discutés dans la section 5. Enfin, nous concluons ce travail en indiquant les pistes de recherches que nous poursuivons.

2 État de l'art

Dans les protocoles d'auto-organisation orientés dominants, le nombre de nœuds dominants doit être minimal afin d'optimiser la dépense en énergie du réseau notamment dans le cas d'une inondation. C'est un problème clef dans un environnement contraint en énergie comme les réseaux de capteurs. Cependant

le calcul d'un ensemble dominant connecté (CDS) de cardinalité minimale étant un problème NP-complet, il convient de trouver un compromis entre cardinalité et calcul distribué de l'ensemble dominant.

Dans les protocoles de sélection de liens, l'efficacité est en général déterminée par deux critères : le nombre d'arêtes et de boucles d'un côté, et la qualité des liens sélectionnés de l'autre. Tous les nœuds doivent être connectés avec le moins de liens possible et en utilisant les liens de meilleure qualité.

2.1 Stratégies orientées dominants

[QVL02] présente l'algorithme Multi Point Relay (MPR) et une heuristique de complexité $\log n$ qui calcule l'ensemble MPR pour un réseau de cardinalité n . Dans cet article les auteurs étudient l'impact du taux d'erreur dû aux interférences radio dans le cas d'une inondation aveugle et d'une inondation utilisant le MPR ainsi que la probabilité pour un nœud d'être dominant. Cependant le MPR n'est pas comparé avec d'autres algorithmes d'auto-organisation. [SSZ02] fournit les principaux résultats dans l'évaluation de performances et la comparaison entre les différents protocoles d'auto-organisation. Le mécanisme NES (Neighbor Elimination Scheme) est introduit et de nombreux schémas d'auto-organisation sont ainsi améliorés. Plusieurs métriques sont mesurées (cardinalité de l'ensemble dominant, degré des nœuds dominants, redondance, overhead) mais cependant, la robustesse n'est pas abordée. [AJV02] se concentre sur la construction d'un ensemble dominant utilisant MPR (noté MPR-DS). La cardinalité du MPR-DS et le nombre de dominants par dominés sont mesurés. [WD03] est un algorithme localisé de construction de CDS. L'originalité de ce papier est la prise en compte de liens asymétriques dans le réseau de capteurs. [WAF02] construit tout d'abord un ensemble maximal indépendant (MIS) et ensuite un CDS en interconnectant les nœuds du MIS entre eux. Ce protocole offre de bonnes performances en termes de cardinalité. [KMW04], [MvRW06] sont proches de notre étude. [KMW04] propose une analyse du comportement d'un protocole de clustering durant la phase déploiement du réseau : seule cette phase est étudiée et il n'y a pas de résultat sur le fonctionnement normal ou durant la phase de mort/reconstruction du réseau comme il est proposé dans notre travail. Le réseau de capteurs est modélisé comme un quasi UDG alors que nous considérons ici une couche physique plus réaliste pour introduire des incohérences dans le voisinage. Le temps de convergence est calculé ainsi que l'effet d'un réveil synchrone et asynchrone. Enfin, [MvRW06] est plus focalisé sur le compromis entre l'efficacité énergétique et la rapidité de la dissémination de données dans le réseau.

2.2 Stratégie de sélection de liens

[LHS03] présente un protocole qui construit un arbre couvrant minimal local (LMST). La topologie LMST préserve la connectivité originale du réseau et le degré de chacun des nœuds est borné par 6. De plus les auteurs comparent leur algorithme avec d'autres protocoles. Le protocole RNG (Relative Neighborhood Graph) et LMST sont utilisés dans [CISRS03] pour améliorer des mécanismes d'inondation. Les protocoles de sélection de liens ont pour objectif de réduire la puissance de transmission et de réduire ainsi la consommation en énergie tout en maintenant la connectivité. Une étude comparative avec le protocole centralisé BIP est présentée : les deux protocoles distribués restent compétitifs.

3 Les trois phases de la vie d'un réseau de capteurs

Quand on observe dans sa globalité un réseau de capteurs sans fil, il apparaît des phases distinctes avec des caractéristiques particulières : la **naissance**, le **fonctionnement normal** et la **mort**.

La phase de **naissance** correspond à l'arrivée progressive des nœuds, à la fois durant le déploiement initial du réseau de capteurs et durant le re-déploiement de nouveaux nœuds dans le réseau. Il en résulte une phase où les nœuds découvrent leur voisinage. Chaque nœud diffuse des paquets *hello* pour indiquer leur présence, transmettre des informations sur leur état, et diffuser leur table de voisinage. Des incohérences dans ces tables de voisinage apparaissent alors. En effet, à cause du déploiement progressif, les capteurs ont généralement une vision partielle de leur voisinage durant l'envoi de leurs premiers messages. Cela conduit à des erreurs durant le processus d'élection des nœuds dominants ou le processus de sélection de liens. Nous observons ces incohérences et le temps nécessaire avant la stabilisation de la structure logique. Nous déterminons ainsi la latence entre la naissance physique d'un réseau et sa naissance logique suivant son schéma d'auto-organisation.

La phase de **fonctionnement normal** commence dès que la structure organisée est stabilisée. Cette phase correspond à ce que nous pouvons attendre de l'auto-organisation. Nous mettons en évidence la qualité d'une auto-organisation durant cette phase en observant la cardinalité de la structure dominante dans le cas de protocoles orientés dominants, le degré moyen du réseau dans le cas de protocoles à sélection de liens. La phase de fonctionnement normal se termine quand il y a trop de modifications dans le réseau pour que la structure soit maintenue.

Alors commence la troisième et dernière phase : la **mort**. Lorsqu'un ou plusieurs nœuds disparaissent, la reconstruction de la structure logique, globale ou localisée va être nécessaire. Là encore, les capteurs n'ont pas immédiatement la perception de la disparition d'un voisin, cela a pour conséquence une certaine inertie. Cette dernière phase peut être assimilée à un processus de maintenance et d'auto-réparation.

4 Modélisation et hypothèses

4.1 Modélisation

Les résultats proviennent de simulations avec un intervalle de confiance de 95%. Nous considérons deux modélisations différentes d'un même réseau de capteurs. Dans un premier cas, nous considérons une couche physique idéale et une couche MAC idéale : le réseau ne subit ni interférences ni collisions. Le deuxième cas est plus réaliste : nous utilisons un simulateur à événements discrets (JIST/SWANS) en tenant compte de l'évanouissement du canal, des interférences mais aussi des collisions. La différence d'approche est importante, le second cas introduit un voisinage qui n'est pas nécessairement persistant ainsi que des pertes de paquets. La cardinalité du réseau varie entre 50 et 200 nœuds distribués de façon aléatoire et uniforme. La puissance d'émission permet de contrôler la densité du réseau. L'objectif est d'observer les environnements influençant la construction de la topologie logique. Chaque capteur est considéré comme fixe et son identité est déterminée par un identifiant unique.

4.2 Les quatre protocoles orientés dominants

Quatre schémas d'auto-organisation construisant des CDS sont étudiés : *i*) le Multipoint Relay (MPR) [QVL02] qui va construire un ensemble dominant connecté orienté source, *ii*) le Multipoint Relay-Dominating Set (MPR-DS) [AJV02], qui utilise le même mode d'élection que le MPR mais avec une phase initiale qui permet d'être entièrement distribué et non-orienté source, *iii*) le (CDS-règle k) [WD03] permettant la construction localisée d'un CDS puis *iv*) la construction d'un CDS basée sur la construction préalable d'un Minimum Independent Set (CDS-MIS) [WAF02].

4.3 Les deux protocoles de sélection de liens

Le RNG [Tou80] est basé sur la connaissance de la position de nœuds. En effet, chaque capteur connaît sa position et la diffuse à son voisinage direct. Grâce à la position de son voisinage à 1 saut, un nœud va dé-sélectionner les liens les plus longs de la façon suivante : soit deux nœuds voisins u et v . Si il existe un nœud w tel que $d(u, v) > d(u, w)$ et $d(v, u) > d(v, w)$ avec $d(u, v)$ la distance euclidienne entre les sommets u et v alors l'arête (u, v) est dé-sélectionnée.

[LHS03] va construire un arbre couvrant minimum local (LMST). Chaque nœud connaît la position de ses voisins à 1 saut et chaque nœud calcule son propre MST sur son voisinage. Puis, si un nœud u est dans le LMST calculé par un nœud v et que le nœud v est dans le LMST du nœud u alors le lien (u, v) est retenu dans le LMST global. La construction du LMST global est ainsi basée sur la construction locale d'un MST par chaque nœud.

5 Résultats

Notre objectif est de mettre en évidence le comportement des 6 protocoles d'auto-organisation précédents durant l'évolution du réseau. La latence, c'est à dire la durée d'instabilité de la structure logique, est mesurée. Pour étudier la *qualité* des protocoles, nous calculons la cardinalité du CDS pour les protocoles orientés dominants et le degré moyen pour les protocoles de sélection de liens. Afin de comprendre les conséquences de la disparition d'un nœud nous observons le nombre de changements qu'entraîne cette disparition ainsi que leur distance par rapport au nœud mort. Cette métrique est utile pour comprendre pourquoi, en dépit de protocoles localisés, il est possible d'avoir des reconstructions non locales. Selon nous, ces métriques permettent de caractériser les différentes auto-organisation durant l'évolution d'un réseaux de capteurs sans fil (naissance, vie et mort).

5.1 Déploiement du réseau

Le temps de construction de la topologie logique (naissance) est différente selon les schémas d'auto-organisation orientés dominants (Fig. 1). Alors que les nœuds découvrent leur voisinage en moins de 1.8 secondes, la topologie logique du MPR va mettre plus de 18 secondes avant de devenir stable. En revanche les autres schémas seront plus rapides en achevant la construction de leur ensemble dominant en moins de quelques secondes. Le degré moyen des nœuds va avoir

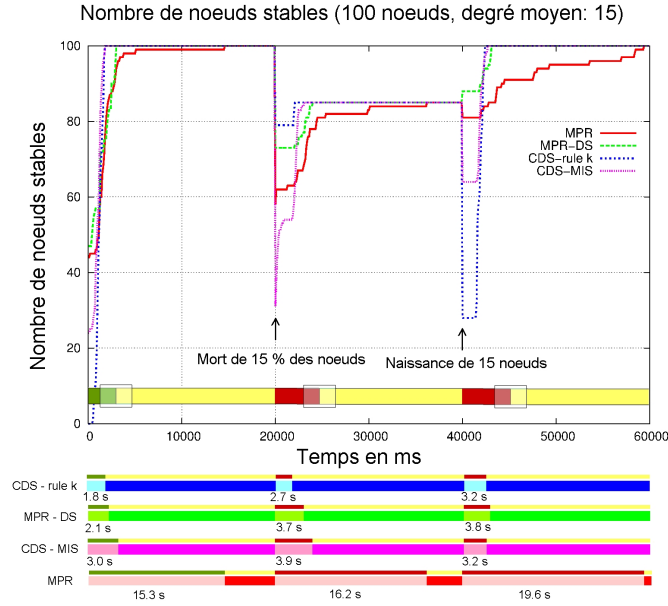


Fig. 1. Latence des 4 schémas d’auto-organisation orientés dominants

un impact non négligeable dans le temps de construction des structures logiques basées sur une construction en arbre : la hauteur de l’arbre parcourant le réseau étant d’autant plus réduite que le degré moyen est élevé par rapport à un même graphe de degré moindre, le temps de parcours et d’élection des nœuds dominants s’en trouve réduit. Pour le MPR-DS et le CDS localisé, ce temps de construction reste identique car l’élection des nœuds dominants est purement locale. L’énergie consommée est directement liée au temps par l’utilisation de *hello* périodiques. Une latence importante signifie un nombre de paquets nécessaires important. On note que la construction de la topologie pour le CDS localisé va nécessiter une phase où près de 80% des nœuds seront présélectionnés comme « dominants » avant de prendre leur statut de « dominés ». Ce passage d’un statut à l’autre, s’il n’est pas préjudiciable en termes de temps peut en revanche être coûteux en énergie et/ou en surcoût.

La construction des topologies de sélection de liens est beaucoup plus rapide. La naissance logique du réseau, c’est à dire la construction de la topologie logique, correspond exactement à sa naissance physique, c’est à dire la découverte de l’ensemble du voisinage de chaque capteur. Ainsi la naissance logique est très rapide : aux alentours de 1.8 secondes. Les deux protocoles sont donc très proches. La vitesse à laquelle les nœuds déterminent leurs voisins logiques, ceux avec qui ils gardent un lien, est seulement liée à la périodicité d’envoi des paquets hello. La qualité des protocoles de sélection de lien durant la phase de fonctionnement normal est déterminée par la qualité des liens sélectionnés et la connectivité du réseau. RNG et LMST garantissent la connectivité du réseau. Cependant RNG est légèrement plus performant : pour un degré moyen constant de 18, il garde seulement 2.4 voisins logiques tandis que LMST en sélectionne 2.6. Cela s’explique par l’implémentation que nous avons choisi de faire du protocole

LMST où la topologie logique est constituée de la somme des vues logiques de chacun des noeuds : les capteurs ne s'échangent pas leur arbre couvrant local.

5.2 Adaptation des topologies logiques : la robustesse

Une des attentes des réseaux de capteurs est leur capacité à être déployés dans des conditions difficiles, rapidement. Cela signifie que sans robustesse le réseau perd de son principal intérêt. Pour mesurer la robustesse nous enlevons un pourcentage variable de noeuds de ce réseau, parmi les dominants, les dominés (dans le cas des protocoles orientés dominants) ou indistinctement (dans le cas des deux stratégies).

Pour les protocoles orientés dominants, on retrouve les mêmes tendances que sur la figure 1 quelque soit la nature des noeuds. Cependant la perte d'un noeud dominant a toujours plus de conséquences que la perte d'un noeud dominé : le CDS-MIS est très peu résistant à la perte de capteurs notamment pour les degrés moyens et faibles, mais il retrouve rapidement une structure stable. Le MPR est plus résistant en termes de changements de topologie mais ne retrouve une structure stable que très lentement après la perte des noeuds. Le MPR-DS et le CDS localisé se comportent convenablement face à la perte de noeuds : leur structure est changée localement et elle se stabilise rapidement. A taille égale, un réseau avec un degré moyen supérieur sera plus robuste quelque soit le protocole d'auto-organisation utilisé. La raison de la faiblesse structurelle du MPR et du CDS-MIS est à chercher dans la construction en arbre de l'ensemble dominant. Si cette structure permet une faible cardinalité de l'ensemble dominant pour le CDS-MIS [WAF02], l'initialisation de la construction par un noeud « source » entraîne une grande fragilité : si un noeud dominant proche de la source change d'état c'est toute la branche de l'arbre qui est potentiellement à reconstruire. Ainsi d'après les différentes simulations effectuées, le nombre de changements lors de la perte de noeuds MPR est relativement important. Lorsque l'on supprime un noeud de l'arbre, le nombre moyen de noeuds affectés est de 3 et la portée moyenne de 1.70. Un comportement similaire est constaté pour le protocole CDS-MIS avec une moyenne de 13 noeuds dont le statut est modifié et une portée de 1.70 sauts. Cela signifie que la perte d'un seul noeud dominant va entraîner une modification topologique importante de l'arbre, à la fois en termes de nombre de noeuds modifiés mais également en termes de distance par rapport au noeud mort. Là encore, la construction en arbre de l'ensemble dominant est mise en cause. De plus, la cardinalité très faible d'un ensemble dominant organisé avec le protocole CDS-MIS suggère une plus grande importance des noeuds dominants car il y a très peu de redondance. Le protocole CDS localisé se comporte de façon très satisfaisante dans les deux aspects tandis que le protocole MPR-DS subit un changement de topologie non négligeable mais uniquement localisé à 1 saut du noeud perdu. (1.1 noeuds changeant en moyenne sur un rayon moyen de 1.1 saut pour le CDS localisé et 2.4 noeuds changeant en moyenne sur un rayon moyen de 1.08 saut pour le MPR-DS).

Le comportement des protocoles de sélection de liens est différent. Les incohérences sont plus rares car seul le voisinage à 1 saut est concerné et il n'y a pas de mécanisme d'élection. En conséquence, les perturbations dues à la perte d'un noeuds sont très limitées et totalement localisées. De plus, le degré moyen du réseau ne joue aucun rôle dans la robustesse car la topologie LMST ou RNG est sensiblement la même quelque soit la puissance de transmission.

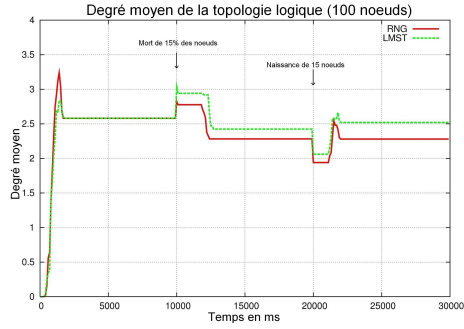


Fig. 2. Evolution du degré moyen des topologies LMST et RNG

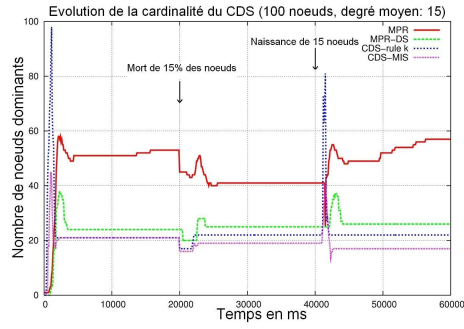


Fig. 3. Evolution de la cardinalité du CDS pour les topologies orientées dominants

Le nombre moyen de changements d'une topologie organisée selon RNG est égal à 1.7. La propagation de la perte d'un nœud est purement locale et donc égale à 1 saut dans la topologie logique, c'est à dire que seulement les arêtes contenues dans le voisinage du nœud mort sont potentiellement perturbées (Fig. 4). Le comportement est similaire pour le protocole LMST en termes de nombre de changements (1.8) et de propagation (Fig. 5).

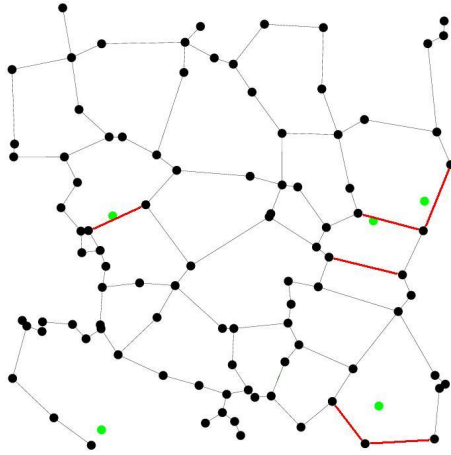


Fig. 4. Conséquences de la mort de nœuds sur la topologie RNG

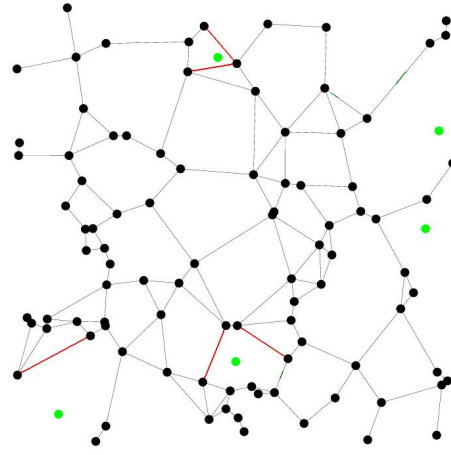


Fig. 5. Conséquences de la mort de nœuds sur la topologie LMST

Les deux figures 6 et 7 illustrent ces résultats. Elles représentent les modifications dans la topologie logique quand plusieurs nœuds meurent. La figure 6 correspond à une topologie logique organisée avec CDS-MIS. Le nœud leader, qui initie la construction de la topologie, est représenté en vert, les nœuds entourés en bleu sont les nœuds morts et les arêtes rouges représentent les changements topologiques induits par cette mort. Nous pouvons noter que les perturbations peuvent survenir loin des nœuds perdus. En effet, les changements de topologies peuvent se propager jusqu'à la fin d'une branche de l'arbre. A contrario, les to-

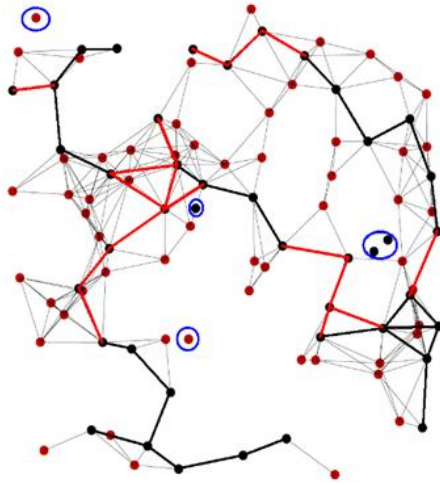


Fig. 6. Conséquences de la mort de nœuds sur la topologie CDS-MIS

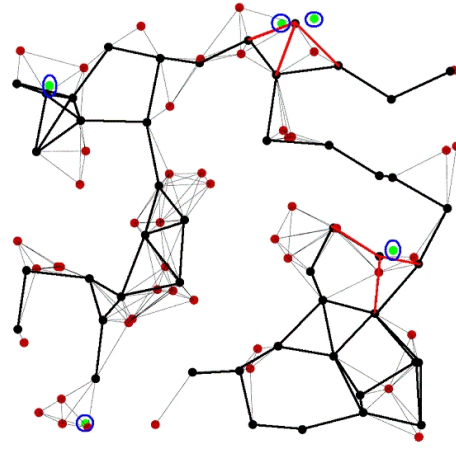


Fig. 7. Conséquences de la mort de nœuds sur la topologie CDS localisé

pologies créées par le CDS localisé (Fig. 7) réagissent généralement par le simple remplacement du nœud dominant mort par un voisin à 1 saut. Les perturbations sont localisées.

Nous observons également le comportement des protocoles d'auto-organisation quand de nouveaux nœuds sont déployés alors que la structure logique est déjà construite. Dans ce scénario, le CDS localisé est extrêmement inefficace car sa phase initiale, le *marking process*, sur-sélectionne les nœuds dans l'ensemble dominant. La seconde phase de l'algorithme, la règle d'élagage k les dé-sélectionne presque immédiatement (Fig. 3) mais cette variation d'un état dominant à dominé d'un nombre aussi important de nœuds, même si elle a peu d'effet néfaste sur la latence, peut coûter cher en énergie.

Le CDS-MIS réagit mieux mais 15% des nœuds du réseau vont subir ce changement. Le MPR et le MPR-DS ne vont souffrir de presque aucun changement de topologie et vont se contenter d'absorber les nouveaux nœuds dans leur topologie. Le degré moyen du réseau ne va pas changer radicalement ces comportements, seul l'identifiant des nœuds ajoutés peut avoir une influence pour le cas du protocole MPR-DS dont la topologie logique va être perturbée par l'apparition d'un nouveau minimum local.

6 Conclusion

Dans ce travail nous avons proposé une étude qualitative pour comprendre le comportement de protocoles d'auto-organisation localisés durant les principales phases dans la vie des réseaux de capteurs que nous avons définis : la naissance, le fonctionnement normal et la mort. Nous avons étudié quatre principaux schémas d'auto-organisation orientés dominants (MPR, MPR-DS, CDS localisé, CDS-MIS) et deux protocoles de sélection de liens (LMST, RNG) durant ces trois phases. Nous avons ainsi observé comment ces protocoles réagissaient à l'arrivée de nouveaux nœuds ou à leur mort. Nous avons regardé l'évolution

de la cardinalité et de la latence pour reconstruire une structure logique stable. Nous pouvons noter la grande robustesse des deux protocoles de sélection de liens ainsi que des protocoles orientés dominants MPR-DS et CDS localisé. En revanche, le CDS-MIS n'est pas robuste malgré une très bonne cardinalité. Selon nous il est possible de tirer avantage de ces observations pour proposer un nouvel algorithme d'auto-organisation dynamique qui prenne en considération les caractéristiques du réseau pour basculer d'un schéma à un autre. Le prochain objectif est d'étudier ces protocoles dans un environnement réel avec une prise en compte de la consommation énergétique. Le projet ARESA [DDM⁺07] nous offre cette opportunité avec le déploiement de réseau de capteurs de plus de 10.000 nœuds.

Références

- [AJV02] C. Adjih, P. Jacquet, and L. Viennot. Computing CDS with multipoint relays. INRIA, RR-4597, October 2002.
- [CISRS03] J. Cartigny, F. Ingelrest, D. Simplot-Ryl, and I. Stojmenovic. Localized LMST and RNG based minimum energy broadcast protocols in ad hoc networks. In *IEEE INFOCOM*, San Francisco, USA, April 2003.
- [DDM⁺07] M. Dohler, D. Barthel, F. Maraninchi, L. Mounier, S. Aubert, C. Dugas, A. Buhrig, F. Pagnat, M. Renaudin, A. Duda, M. Heusse, and F. Valois. The ARESA project : Facilitating research, development and commercialization of WSNs. In *IEEE SECON*, San Diego, USA, June 2007.
- [KMW04] F. Kuhn, T. Moscibroda, and R. Wattenhofer. Initializing newly deployed ad hoc and sensor networks. In *ACM MOBICOM*, Philadelphia, USA, September 2004.
- [LHS03] N. Li, Jennifer C. Hou, and L. Sha. Design and analysis of an MST-based topology control algorithm. In *IEEE INFOCOM*, San Francisco, USA, April 2003.
- [MvRW06] T. Moscibroda, P. von Rickenbach, and R. Wattenhofer. Analyzing the energy-latency trade-off during the deployment of sensor networks. In *IEEE INFOCOM*, Barcelona, Spain, April 2006.
- [QVL02] A. Qayyum, L. Viennot, and A. Laouiti. Relaying for flooding broadcast messages in mobiles wireless networks. In *35th annual Hawaii international conference on system sciences*, Hawaii, 2002.
- [SSZ02] I. Stojmenovic, M. Seddigh, and J. Zunic. Dominating sets and neighbor elimination-based broadcasting algorithms in wireless networks. *IEEE TPDS*, 13(1) :14–25, 2002.
- [Tou80] G. Toussaint. The relative neighbourhood graph of a finite planar set. *Pattern Recognition*, 12 :261–268, 1980.
- [TV04] F. Theoleyre and F. Valois. A virtual structure for hybrid network. In *IEEE WCNC*, Atlanta, USA, March 2004.
- [TV05] F. Theoleyre and F. Valois. Virtual structure routing in manet. In *IEEE ICC*, Seoul, Korea, May 2005.
- [WAF02] P. Wan, K. Alzoubi, and O. Frieder. Distributed construction of connected dominating set in wireless ad hoc networks. In *Infocom*, New York, USA, 2002.
- [WD03] J. Wu and F. Dai. Distributed dominant pruning in ad hoc wireless networks. In *IEEE ICC*, Anchorage, USA, may 2003.