

## Memoire d'Habilitation

présentée à  
L'université de Lille 1  
le 05 Décembre 2013

par

Mr RAZAFINDRALAMBO Tahiry

# Mouvements Autonomes : vers la Créativité dans les Réseaux sans fil

Après avis de :

Mme Silvia Giordano  
Mr Thomas Noël  
Mme Maria Potop-Butucaru

University of Applied Science - SUPSI  
Université de Strasbourg  
Université Paris 6

Soutenue devant :

Mr Vania CONAN  
Mme Silvia Giordano  
Mme Nathalie Mitton  
Mr Thomas Noël  
Mme Maria Potop-Butucaru  
Mr David Simplot-Ryl  
Mr Fabrice Valois

Thales Communications & Security  
University of Applied Science - SUPSI  
Inria  
Université de Strasbourg  
Université Paris 6  
Université Lille 1  
INSA Lyon

This page is intentionally left blank

# Remerciements

---

*à Aina Lila Dina et l'Autre...*

*Nathalie Mitton, David Simplot-Ryl, Mr. Vania CONAN, Pr. Silvia Giordano, Pr. Thomas Noël, Pr. Maria Potop-Butucaru, Pr. Fabrice Valois, Isabelle Guérin-Lassous, Isabelle Simplot-Ryl, Antoine Gallais, Christelle Caillouet, Fadila Khadar, Marcelo Dias de Amorim, Chloé Rolland, Blandine Bussière, Fabrice Theoleyre, Anne Rejl, Julien Vandaele, Pr. Claude Puech, Stéphane Ducasse, Milan Erdelj, Alia Ghaddar, Karen Miranda, Enrico Natalizio, Dimitrios Zorbas, Razafimandimby Jean-Christanel, Kalypso Magklara, Natale Guzzo, l'AGOS (Charlotte, Daniel, Marie-B, Julie, Emilie, Amélie, re-Julien, Alice), les membres de FUN (re-Nathalie, re-Anne, Valeria, Roudy, Tony, re-Milan, Nicolas, re-Natale, re-Karen, Riccardo, Ibrahim, Rim, re-Fadila, re-Kalypso, Roberto, Gabriele, Loïc, Anne-So, re-Dimitrios, re-Enrico, re-David, re-Isabelle, Thierry, Xu, Arnaud, Lucie, Victor, Priyanka) et de POPS, mes co-bureaux (Gilles, Jean, Mickey, re-Nathalie, re-Julien, Jean-Michel). Mes co-auteurs. Tous les autres qui ont rendu Algotel et ResCom encore plus intéressant. @Inria\_Lille, @inria\_chile, #CCP, #Salsa. J'en ai sûrement oublié, ne m'en voulez pas. Ny fianakaviako rehetra izay alavitra ahy fa ato am-poko mandrakariva*

Écrit avec l'aide de Vim, Latex, git

# Table des matières

---

1	Introduction	1
1.1	Un mot sur ce manuscrit . . . . .	1
1.2	Contexte des travaux présentés . . . . .	2
1.3	Organisation du document . . . . .	4
2	La mobilité créatrice de topologie et d'application	6
2.1	Introduction, définitions et contraintes . . . . .	6
2.2	Maîtriser et faire évoluer la topologie . . . . .	7
2.3	Algorithmes de déploiement . . . . .	9
2.4	Conclusions et perspectives . . . . .	17
3	La mobilité créatrice de ressources pour la communication	20
3.1	Introduction, définitions et contraintes . . . . .	20
3.2	Maîtriser et modifier les ressources réseaux . . . . .	22
3.3	Introduire de la qualité de service . . . . .	24
3.4	Conclusions et perspectives . . . . .	32
4	Conclusions et Perspectives	34
4.1	Résumé du manuscrit . . . . .	34
4.2	Résumé des autres travaux . . . . .	35
4.3	Programme, perspectives de recherche et contexte . . . . .	40
	Bibliographie	45

# Introduction

# 1

## Sommaire

---

1.1	Un mot sur ce manuscrit . . . . .	1
1.2	Contexte des travaux présentés . . . . .	2
1.3	Organisation du document . . . . .	4

---

### 1.1 Un mot sur ce manuscrit

Ce manuscrit retrace mes activités des recherches depuis 2007. Il exclut donc mes travaux de thèse. Il inclut particulièrement mes travaux autour de la mobilité dans les réseaux contraints comme les réseaux de capteurs et d'actionneurs. Il inclut aussi les travaux que j'ai effectués autour de l'utilisation de la mobilité comme primitive pour la qualité de service. En revanche, dans un souci de cohérence et même si il y a un lien sous-jacent entre les deux thématiques, ce manuscrit n'aborde pas les résultats obtenus entre 2007 et 2012 concernant l'agrégation et la prédiction de données dans les réseaux de capteurs. Je dis que ces thématiques sont liées de manière sous-jacente parce que des travaux dans l'équipe reprennent les résultats de prédiction utilisant des séries temporelles auto-régressives pour anticiper et deviner la mobilité de ses voisins de manière efficace.

Le titre de ce manuscrit nécessite (au moins pour certains) un minimum d'explication. Il s'avère que le choix du titre n'est pas si évident. J'ai longtemps hésité entre un titre à rallonge qui explique exactement ce qui est présenté dans le manuscrit et un titre plus court et plus accrocheur. Je pense avoir trouvé un bon compromis. Ce titre : "Mouvements Autonomes : vers la Créativité dans les Réseaux sans fil" résume les travaux que je présente autour de la mobilité contrôlée dans les réseaux sans fil qui selon moi permet de créer de nouvelles fonctionnalités, ressources ou applications dans ces réseaux. De plus ce titre ouvre aussi vers les perspectives vers lesquelles

## 1.2 Contexte des travaux présentés

---

je veux aller c'est à dire vers des réseaux intelligents et donc créatifs.

Je profite de cette section pour présenter mes excuses à toutes les personnes avec qui j'ai pu travailler et avec lesquelles je travaille encore (avec un plaisir certain) et dont les travaux ne sont pas présentés ici. Ces personnes savent que même si leurs travaux ne figurent pas à la place qu'ils méritent dans ce manuscrit, elles ont fortement contribué aux autres résultats qui y sont présentés. Dans un ordre plus qu'aléatoire, les travaux que j'ai effectués avec les personnes suivantes ne sont pas repris (ou repris seulement partiellement) dans ce manuscrit : Antoine Gallais, Alia Ghaddar, Ivan Stojmenovic, Christelle Caillouet, Srdjan Krco, Aline Carneiro Viana, Katia Obraczka etc. Pour les autres j'espère que vous reconnaissez votre travail et j'espère que dans la transcription, je n'ai pas altéré la contribution originale.

## 1.2 Contexte des travaux présentés

Le contexte présenté dans cette section ne reprend pas un contexte général qui pourrait inclure les réseaux sans fil, les réseaux ad hoc, les réseaux maillés, les réseaux de capteurs ou l'Internet des objets en général. Je ne me focalise que sur la seule notion de mobilité dans les réseaux sans fil dans la suite de cette section et dans la suite du manuscrit.

La mobilité est le caractère ou la propriété d'un objet qui a une capacité ou une possibilité de se mouvoir ou d'être mû. Elle caractérise toutes choses qui changent rapidement de forme, d'aspect ou qui est instable, variable ou fluctuant dans le temps et l'espace. Cette définition de la mobilité ne présage rien de beau surtout lorsqu'on l'applique aux réseaux et c'est dans ce contexte compliqué que les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent. En effet, même si il est plus facile de ne pas parler de mobilité dans un réseau, sans vouloir dénigrer les travaux ne considérant pas la mobilité, l'introduction de la mobilité dans les réseaux a marqué une étape dans la description et la mise en place de systèmes communicants devant tenir compte de la mobilité d'une ou plusieurs entités composant ce système. L'évolution des paradigmes de communication actuels montre qu'il est de plus en plus difficile de concevoir un système de communication intégrant l'utilisateur final sans parler de mobilité. L'utilisation croissante des réseaux GSM et Wifi [21] en est l'exemple parfait. Rien qu'en 2006, on comptait en France environ 37.000 Hot Spots permettant un accès Internet par Wifi générant environ 18 millions d'euros de recettes<sup>1</sup> autorisant ainsi aux utilisateurs itinérants un accès presque permanent à des ressources distantes. A partir du moment où l'on considère que la mobilité existe dans les réseaux, qu'elle soit physique comme par exemple avec déplacement physique d'une entité ou logique avec le

---

1. Source : [www.arcep.fr](http://www.arcep.fr)

## 1.2 Contexte des travaux présentés

---

déplacement d'une ressource ou d'un service, les communications dans ces réseaux doivent tenir compte de cette mobilité.

Les protocoles de communications doivent donc prendre en compte l'instabilité, la variabilité et la fluctuation imposées par la mobilité de certaines entités composant le réseau. C'est ainsi que beaucoup de protocoles de communications, surtout les protocoles pour les réseaux ad hoc, ont été conçus et évalués pour et selon leur résistance à la mobilité. Corson et Macker mettent en avant l'aspect négatif de la mobilité dans la RFC 2501 [9] et préconisent même pour l'évaluation des protocoles de routages dans les réseaux ad hoc mobiles (MANET) de considérer la capacité du protocole à prendre en compte les changements de topologies, la mobilité des stations ou encore la présence de nœuds actifs ou passifs comme critères de performance. Au début des années 2000, Grossglauser et Tse [20] montrent que la mobilité n'a pas que des inconvénients en soulignant que la mobilité dans les réseaux MANET permet d'augmenter la capacité de ces réseaux. Dans la même veine, les travaux de Čapkun *et al.* [40] et de Liu *et al.* [25] montrent que la mobilité permet d'augmenter la sécurité dans un réseau ad hoc ou la zone couverte par l'ensemble des capteurs dans un réseau de capteurs. Ces trois articles et bien d'autres soulèvent deux points importants : (i) L'apport de la mobilité décrite dans ces trois articles concernent des services ou des fonctionnalités de niveau application si l'on s'en réfère au modèle OSI [46]<sup>2</sup> et (ii) la mobilité considérée est une mobilité subie par des entités composant le réseau.

Les deux points soulevés précédemment seront abordés suivant différents angles dans ce manuscrit. Par rapport au premier point, les résultats que je montre ici considèrent deux aspects. Le premier aspect suit les travaux de Liu *et al.* [25] et se concentre sur les apports de la mobilité au niveau application et plus spécifiquement au niveau de la couverture dans les réseaux de capteurs. Le deuxième aspect considère l'utilisation de la mobilité comme une primitive de réseau et utilise celle-ci pour augmenter les performances de la pile protocolaire. Concernant le deuxième point et contrairement aux travaux cités plus haut ([20], [40] et [25]) la mobilité considérée est une mobilité contrôlée. Cet aspect permet entre autre de contrôler ou d'anticiper l'instabilité, la variabilité et la fluctuation du réseau mais aussi de maîtriser la couverture et la topologie dans les réseaux de capteurs. L'utilisation de la mobilité contrôlée pour les applications de réseau de capteurs et pour augmenter la qualité de service de la pile protocolaire sont les deux contributions qui sont abordées dans ce manuscrit.

---

2. On aurait peut être aimé voir un article dont le titre aurait été : "Mobility reduces route delay establishment in MANET"



### 1.3 Organisation du document

Ce manuscrit décrit deux de mes contributions principales ce qui facilite grandement l'articulation des chapitres. Dans le chapitre 2, je décris les travaux effectués autour de l'utilisation de la mobilité contrôlée dans les réseaux de capteurs. Ce chapitre 2 décrit un algorithme d'auto déploiement de réseau de capteurs mobiles avec un double objectif. 1) L'algorithme doit pouvoir fournir plusieurs types de couvertures (toute la zone, quelques points de la zones ou une barrière). L'algorithme utilise des forces d'attraction et de répulsion entre capteurs voisins pour prendre une décision de mouvement ne s'appuyant que sur des informations locales. En modifiant simplement ces forces, l'algorithme permet de fournir plusieurs types de déploiements. 2) L'algorithme doit permettre le maintien de la connexité du réseau tout au long de la procédure de déploiement. Il faut noter que le déploiement, expansion du réseau, et le maintien de la connexité sont deux objectifs antagonistes. Ici aussi, des méthodes locales sont utilisées pour maintenir une connexité globale du réseau.

Le chapitre 3 décrit l'utilisation de la mobilité contrôlée dans le cadre des réseaux de substitution. Un réseau de substitution est un réseau sans fil utilisé comme support d'un réseau existant, une définition plus précise est donnée dans le chapitre 3. Dans ce chapitre, je décris une architecture de qualité de service à mettre en place dans ce type de réseau mais aussi un algorithme simple de (re)positionnement autonome et local des routeurs mobiles permettant d'augmenter la qualité de service et la qualité d'expérience perçues dans les réseaux de substitution. Un exemple simple et utilisé tout au long de ce chapitre pour montrer le concept depuis les simulations jusqu'à l'expérimentation.

Le chapitre 4 conclut ce manuscrit en résumant les contributions présentées mais aussi en décrivant les autres travaux que j'ai pu réaliser depuis 2007. Ce chapitre décrit aussi mes perspectives de recherche en replaçant l'ensemble de mes travaux dans un contexte beaucoup plus global relatif à l'Internet du futur. Il peut sembler inadéquat de re-situer le contexte général de mes travaux seulement dans le dernier chapitre de ce manuscrit mais dans ma logique et mon sens (discutable) de l'organisation il me paraît plus approprié de revenir sur ce contexte seulement dans cette dernière partie pour mettre en valeur la suite à donner à mes travaux et ainsi éviter une certaine redondance entre le début et la fin du manuscrit.

## 1.3 Organisation du document

---

### Notes sur le contenu

Je ne donne pas un état de l'art permettant au manuscrit d'être auto-suffisant. Les raisons sont multiples et sûrement mauvaises, mais la plus simple qui me vient en tête au moment où j'écris ces lignes c'est : "ne pas perdre le lecteur". En omettant cette partie et en me focalisant sur un contexte plutôt global pour les contributions présentées je pense avoir trouvé un compromis<sup>3</sup>. Dans tous les cas, pour plus de détails il est possible de se référer aux publications dont sont extraites les contributions.

---

3. Si cet aspect est dérangeant, c'est que le compromis est bon car comme on sait : Un bon compromis laisse toujours tout le monde insatisfait.

# La mobilité créatrice de topologie et d'application

# 2

## Sommaire

---

2.1	Introduction, définitions et contraintes . . . . .	6
2.2	Maîtriser et faire évoluer la topologie . . . . .	7
2.3	Algorithmes de déploiement . . . . .	9
	La préservation de la connexité . . . . .	9
	La couverture de point d'intérêt . . . . .	11
	La découverte et la couverture mobile . . . . .	15
2.4	Conclusions et perspectives . . . . .	17

---

## 2.1 Introduction, définitions et contraintes

Les réseaux de capteurs sont souvent déployés pour surveiller un ou plusieurs phénomènes physiques dans une zone géographique donnée. Le placement (positionnement ou déploiement) des capteurs dans cette zone géographique est un point crucial qui détermine l'efficacité du réseau de capteurs en termes de détection d'évènements mais aussi en termes de durée de vie. En effet un réseau dans lequel les capteurs seraient mal répartis ne permettrait pas de capturer finement toute les informations relatives à la zone géographique à observer. De plus, un mauvais placement des capteurs peut provoquer une perte prématurée d'énergie pour un sous-ensemble des capteurs. Ainsi, le placement des capteurs devient un problème d'optimisation qui peut être complexe. L'idée est de couvrir le plus grand nombre de zones ou d'évènements en utilisant le minimum de capteurs. Ce problème de placement reste complexe même dans un contexte déterministe et statique. Une solution optimale, calculer *a priori*, requiert une connaissance complète de l'environnement de déploiement ce qui n'est pas toujours possible. Dans un contexte dynamique et/ou mobile les solutions de placement ne sont faisables que si deux hypothèses

## 2.2 Maîtriser et faire évoluer la topologie

---

sont prises en compte : 1) Chaque capteur doit pouvoir évaluer sa position et 2) les capteurs doivent être capables de se mouvoir. L'avantage principal concernant l'utilisation d'un déploiement dynamique est la possibilité de maîtriser la topologie qui permettra par exemple de réduire la consommation énergétique, d'optimiser les processus de routage et d'inondation [6]. En plus, grâce à un déploiement dynamique utilisant des capteurs mobiles il est possible de modifier dynamiquement cette topologie en fonction de l'évolution des besoins applicatifs (modification du type de couverture). Dans notre cas, une propriété importante du graphe<sup>1</sup> que nous voulons garder tout au long de la procédure déploiement est la connexité [31]. Cette propriété présente l'avantage de pouvoir mettre à jour en 'temps réel'<sup>2</sup> le réseau, les objectifs du réseau, les algorithmes ou autres programmes contenus sur les capteurs.

## 2.2 Maîtriser et faire évoluer la topologie

Il existe plusieurs manières de maîtriser ou de contrôler la topologie d'un réseau de capteurs qui peuvent faire appel ou non à la mobilité. Les techniques de réduction du voisinage utilisés par Gallais *et al.* dans [16] en sont un exemple. Si ces méthodes sont efficaces, surtout pour l'économie d'énergie, elles ne permettent pas de modifier physiquement la topologie du réseau mais plutôt de raisonner sur une topologie (ou sous-topologie) logique. Certains travaux, dont ceux de Batalin *et al.* dans [2], proposent de modifier physiquement une topologie en déplaçant les capteurs. Ces méthodes permettent d'obtenir, selon la topologie de départ souvent aléatoire, des topologies plus efficaces en termes d'énergie ou de couverture en minimisant par exemple le recouvrement des zones de surveillance des capteurs. En revanche, certains problèmes présents dans la topologie de départ ne peuvent pas être résolus après la modification de la topologie comme par exemple la connexité du graphe dont les sommets sont les capteurs et les arêtes les liens de communications. L'intérêt de maîtriser la topologie du réseau depuis le début du déploiement jusqu'à sa fin nous permet de nous affranchir des problèmes cités si dessus mais bien d'autres encore. En effet, on peut aussi rajouter la ré-organisation à la volée du réseau, l'optimisation de certains mécanismes comme l'inondation, la modification des objectifs en cours de déploiement pour ne citer que ceux-là.

Maîtriser la topologie d'un réseau et la faire évoluer selon l'utilisation qui en est faite est le rêve de tout administrateur réseau, du moins ceux que je connais. Cette évolution pour être agréable à l'administrateur doit bien sûr se faire de la manière la plus automatique et autonome possible. En effet, une des caractéristiques de l'administrateur réseau, encore une fois pour ceux

---

1. Nous représentons le réseau de capteurs par un graphe

2. C'est un petit abus de langage qui permet néanmoins de saisir l'importance de cette propriété.

## 2.2 Maîtriser et faire évoluer la topologie

---

que je connais, est de ne pas vouloir quitter sa chaise surtout pour résoudre des problèmes qui auraient dû être évités. Pour éviter de devoir intervenir dans un réseau, l'une des solutions les plus utilisées est le bon 'dimensionnement' de celui-ci au départ. Ce dimensionnement est fait en essayant d'anticiper au mieux les besoins et utilisations qui seront faits du réseau. Ce bon dimensionnement n'est pas toujours possible pour plusieurs raisons : Premièrement les besoins ne sont pas toujours connus d'avance. Deuxièmement, les ressources pouvant être installés dans le réseau ne sont pas infinies. Troisièmement, les coûts induits par un sur-dimensionnement d'un réseau peuvent être colossaux. Quatrièmement, dans un contexte de réseau de capteurs sans fil ce dimensionnement est encore plus compliqué de part la nature dynamique du réseau (ajout-destruction de capteurs, déperdition énergétique, etc.). Le problème de la maîtrise et de l'évolution de la topologie dans les réseaux de capteurs est d'autant plus intéressant que les caractéristiques actuelles des réseaux de capteurs comme la mobilité, la possibilité de se recharger permettent d'entrevoir des solutions efficaces et élégantes.

Depuis plusieurs années, l'état de l'art s'est enrichi de méthodes, d'architectures et de protocoles permettant de modifier la topologie des réseaux de capteurs. Dans un contexte un peu plus restreint, plusieurs travaux ont proposé des algorithmes permettant de déployer ou de re-déployer de manière plus ou moins autonome des capteurs dont l'objectif est de couvrir de manière efficace, avec un nombre minimum de capteurs, toute une zone ou certaines parties d'une zone. Il existe, dans la littérature trois grandes familles d'algorithmes permettant de placer, déplacer ou replacer des capteurs mobiles. (i) La première méthode consiste à suivre un maillage prédéfini (triangulaire, carré ou hexagonale). Dans ce type de déploiement, soit les positions finales des capteurs peuvent être pré-calculées au début du déploiement soit un capteur particulier joue un rôle central et les autres capteurs s'organisent autour de ce capteur central comme dans [42]. (ii) La deuxième méthode consiste en un partitionnement de la zone à couvrir en cellules plus petites. Le nombre de capteurs dans chaque cellule est considéré comme la charge de la cellule. Le mouvement des capteurs est considéré comme un problème d'équilibrage de charge entre les cellules. Un exemple de cette stratégie de mouvement et de couverture est proposé dans [8]. (iii) La troisième méthode consiste à considérer les capteurs comme des particules physiques exerçant les uns sur les autres des forces attractives ou répulsives. Ces forces virtuelles permettent d'attirer les capteurs vers les zones d'intérêts, aux capteurs de se repousser pour couvrir un plus grand espace et aussi permet d'éviter des obstacles sur le terrain. Un exemple de ce type de déploiement est proposé dans [2]. Pour plus de détails sur les différents types de déploiement, j'encourage le lecteur ou la lectrice à se référer à [5] pour un exemple de déploiement de réseau de capteurs statique avec utilisation des techniques de réduction de graphes pour modifier la

## 2.3 Algorithmes de déploiement

---

topologie. Les travaux présentés dans [1, 24, 32] proposent des solutions centralisées permettant de calculer *a priori* les positions des capteurs. Pour des travaux de synthèse plus complets le lecteur ou la lectrice pourra se référer à [41, 44, 45].

## 2.3 Algorithmes de déploiement

### La préservation de la connexité

*T. Razafindralambo, D. Simplot-Ryl : Connectivity Preservation and Coverage Schemes for Wireless Sensor Networks. IEEE Transaction on Automatic Control. 56(10) : 2418-2428 (2011) [36]*

L'une des propriétés que nous voulons conserver tout au long du déploiement est la connexité du graphe représentant le réseau de capteurs. Dans un graphe dont les sommets et les arêtes évoluent dans le temps, maintenir cette propriété est cruciale car elle permet de s'assurer de la cohérence des tâches effectuées par chaque capteur. En effet il est possible que les objectifs et les tâches effectuées par chaque capteur changent. Par exemple, il peut être important dans un premier temps de découvrir l'environnement dans lequel vont évoluer les capteurs avant d'effectuer les tâches d'observations. En cas de déconnexion du réseau certains capteurs vont se retrouver dans la première phase et d'autres dans la seconde, cette incohérence peut provoquer des dysfonctionnements majeurs dans le réseau.

Dans nos travaux, nous faisons l'hypothèse que le réseau est connecté initialement. Cette hypothèse est valable car nous supposons que les capteurs ont le même point de départ (station de base). Nous supposons aussi que chaque capteur décide de se mouvoir indépendamment des autres capteurs. L'algorithme que nous proposons, contrairement à ceux proposés dans la littérature, permet de garantir la connexité tout au long de la procédure de déploiement. Pour ce faire, nous imposons aux capteurs des contraintes locales sur leurs mouvements permettant de garantir la connexité globale du réseau. Les contraintes imposées aux capteurs, pour maintenir la connexité, doivent permettre le bon déroulement du déploiement. La contrainte de connexité et l'expansion pour la couverture sont deux objectifs opposés qui rendent le problème de déploiement plus complexe et impose d'effectuer des compromis. Grâce à une technique de réduction de graphe (dans notre cas le graphe de voisinage relatif) permettant de diminuer le nombre de capteurs influant les uns sur les autres et permettant aussi de conserver la connexité, le tout dans un contexte local, nous a permis d'atteindre un bon compromis entre déploiement (rapide et efficace) et maintien de la connexité.

L'approche que nous avons choisie pour maintenir la connexité repose sur un principe simple.

## 2.3 Algorithmes de déploiement

---

Nous restreignons les mouvements des capteurs afin de les empêcher de sortir du rayon de communication d'un sous-ensemble de capteurs avoisinant. Ce sous-ensemble est choisi de manière à ce qu'il permette de maintenir la connexité globale tout en étant le plus petit possible. Il est important de noter que nous découplons intentionnellement la préservation de la connexité du déploiement pour maintenir cette connexité quels que soient les objectifs du déploiement. Pour prouver la propriété de connexité, nous modélisons notre réseau de capteurs par un graphe  $G(V, E)$  où  $V$  est l'ensemble des sommets et  $E = \{(u, v) \in V^2 \mid u \neq v \wedge d(u, v) \leq R\}$ , l'ensemble des arêtes. Ici,  $d(u, v)$  est la distance euclidienne entre les capteurs  $u$  et  $v$  et  $R$  le rayon de communication. Nous notons  $N(u) = \{v \in E \mid d(u, v) \leq R\}$ , l'ensemble des capteurs voisins du capteur  $u$ . Nous définissons aussi  $RNG(G) = (V, E^{rng})$ , où  $E^{rng} = \{(u, v) \in E \mid \nexists w \in (N(u) \cap N(v)) \wedge d(u, w) < d(u, v) \wedge d(v, w) < d(u, v)\}$  le sous-graphe de voisinage relatif issu de  $G(V, E)$ . Nous définissons aussi  $N_{RNG}(u) = \{v, w \in N(u) \wedge v \in N(w) \mid d(u, v) < d(u, w) \wedge d(u, w) < d(v, w)\}$  comme l'ensemble des voisins du capteur  $u$  dans le sous-graphe  $RNG(G)$ . Ainsi, la distance maximale qu'un capteur  $u$  peut parcourir est limitée à  $d \leq (R - d^+(u))/2$ , où  $R$  est le rayon de communication et  $d^+(u)$  la distance entre  $u$  et son voisin le plus éloigné faisant partie de  $N_{RNG}(u)$ .

La réduction de graphe  $RNG(G)$  présente deux avantages majeurs. Premièrement, cette réduction peut être calculée localement par chaque capteur (une connaissance du voisinage à deux sauts suffit) [39]. Deuxièmement, si le graphe  $G(V, E)$  est connecté alors le sous-graphe  $RNG(G)$  l'est aussi [39]. Ces deux propriétés sont importantes pour le passage à l'échelle des algorithmes et pour la préservation de la connexité du graphe. De plus,  $\|E^{rng}\| \leq \|E\|$  ce qui permet de réduire les interactions entre les capteurs et accroît les possibilités de déploiement. Il faut noter que d'autres réductions de graphe possèdent les mêmes propriétés comme le graphe de Gabriel [15] ou le *Localized Minimum Spanning Tree* [14].

**Théorème 1.** *Si au temps  $t = T_1$  le graphe  $G(V, E)$  est connecté alors,  $\forall t = T_2$  avec  $T_2 > T_1$  le graphe  $G(V, E)$  est connecté quelque soit le mouvement des capteurs.*

*Démonstration.* Soit  $u$  et  $v$  deux capteurs tels que  $u$  et  $v$  soient connectés au temps  $t = T_1$ . On suppose que  $u \in RNG(v)$ ,  $v \in RNG(u)$  et  $d(u, v) = d^+(u)$ . On suppose que les deux capteurs veulent se déplacer au même moment dans des directions opposées. La distance maximum de déplacement du capteur  $v$  dépendra de  $d^+(v)$  sachant que  $d(u, v) \leq d^+(v)$ . Dans ce cas, la distance maximale pouvant être parcourue par le capteur  $v$  est  $d_v = (R - d^+(v))/2 \leq (R - d^+(u))/2$  de même, la distance maximale pouvant être parcourue par le capteur  $u$  est  $d_u = (R - d^+(u))/2$ . De ce fait, après le mouvement respectif de chaque capteur, la distance entre les capteurs  $u$  et  $v$  sera  $d(u, v) + (R - d^+(u))/2 + (R - d^+(v))/2 \leq R$ . Si comme dans notre

## 2.3 Algorithmes de déploiement

---

cas la connexité est préservée avec le voisin  $v \in N_{RNG}(u)$  le plus éloigné alors la connexité est préservée avec tout les voisins  $N_{RNG}(u)$  et si la connexité est préservée avec tous les voisins  $N_{RNG}(u)$  alors la connexité est préservée pour le graphe  $G(V, E)$  [39].  $\square$

Il faut noter que les graphes  $G(V, E)$  et  $RNG(G)$  évoluent après chaque mouvement de capteur. Malgré cette évolution, le Théorème 1 reste valide. Il est aussi important de noter que si la direction du capteur  $u$  s'approche du capteur qui est à distance  $d^+(u)$  la condition  $d_u = (R - d^+(u))/2$  peut être relâchée.

Des résultats sur la restauration de la connexité en cas de perte, destruction ou mal-fonction des capteurs mobiles sont donnés dans la publication citée en début de sous-section. Ces résultats décrivent notamment un moyen de vérifier simplement la connexité du réseau et de la restaurer dans le cas où la connexité serait rompue à cause du dysfonctionnement d'un ou plusieurs capteurs.

### La couverture de point d'intérêt

*M. Erdelj, T. Razafindralambo, D. Simplot-Ryl : Covering Points of Interest with Mobile Sensors. IEEE Transaction Parallel Distributed Systems 24(1) : 32-43 (2013) [13]*

Cette sous-section présente un exemple d'algorithme permettant la couverture de point d'intérêt. Comme précédemment, nous considérons un réseau de capteurs mobiles et une station de base. Nous supposons au début du déploiement que les capteurs se trouvent à une distance de  $R/4$ ,  $R$  étant le rayon de communication, autour de la station de base. Cette hypothèse nous permet de nous assurer que le réseau de capteurs est initialement connexe. Nous supposons aussi que la position du point d'intérêt est connue de tous les capteurs. Pour couvrir le point d'intérêt, les capteurs vont se déplacer vers celui-ci avec une contrainte de connexité impliquant et incluant la station de base. Dans ce scénario, des capteurs seront positionnés sur le point d'intérêt et d'autres capteurs serviront pour la connexité. Nous considérons qu'un capteur couvre le point d'intérêt quand la distance entre ce capteur et le point d'intérêt est inférieure à un certain seuil  $\epsilon_2$ . L'algorithme que nous proposons pour le déploiement, comme pour la connexité, est lui aussi localisé.

La figure 2.1 montre le déroulement de l'algorithme. Dans cet exemple, pour un souci de clarté, un seul capteur se meut à la fois. Cette figure montre comment les capteurs se déplacent au fur et à mesure vers le point d'intérêt. Les capteurs  $v$ , puis  $w$  choisissent comme direction  $\vec{d}_p$  vers le point d'intérêt. On peut noter ici que le capteur  $x$  (au départ) est voisin de  $v$  dans le graphe  $G(V, E)$  mais pas dans le graphe  $RNG(G)$ . On peut aussi noter que la contrainte de



## 2.3 Algorithmes de déploiement

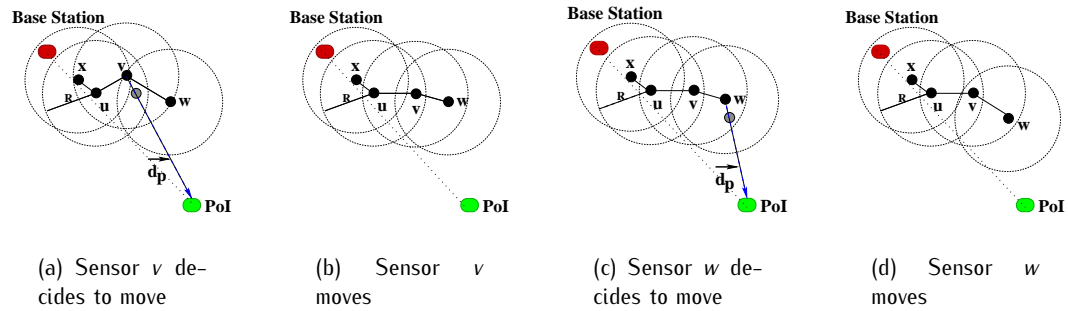


FIGURE 2.1 – Exemple pour la couverture de point d'intérêt.

connectivité ne permet pas au capteur  $v$  de se déplacer à une distance  $R$  du capteur  $u$  suivant la contrainte  $d \leq (R - d^+(v))/2$  vue précédemment. Il faut noter ici que quand  $(R - d^+(v))/2 \leq \epsilon_1$ ,  $\epsilon_1$  étant un paramètre de l'algorithme, le capteur ne bouge plus afin d'éviter une infinité de petits mouvements.

Notre algorithme localisé présente ainsi quelques propriétés intéressantes en plus de la garantie de connectivité. En effet, nous prouvons que l'algorithme se termine, que le déploiement formera une ligne entre le point d'intérêt et la station de base et que le nombre de capteurs servant pour la connectivité sera minimisé pour maximiser le nombre de capteurs couvrant le point d'intérêt.

**Théorème 2.** *Il existe un temps  $t > T_3$  après lequel tous les capteurs sont arrêtés.*

*Démonstration.* Prenons le cas où le réseau est composé d'une station de base  $b$ , d'un point d'intérêt  $p$  et d'un capteur  $u$ . Au début du déploiement, à  $t = 0$ ,  $d(u^{(0)}, b) < R$  (nous indexons ici  $u$  par l'indice du temps). Après la première itération,  $d(u^{(1)}, b) = d(u^{(0)}, b) + (R - d(u^{(0)}, b))/2$ . Après la  $i^{\text{ème}}$  itération,  $d(u^{(i)}, b) = \frac{1}{2^i}((2^i - 1)R + d(u^{(0)}, b))$ . Pour  $i$  tendant vers l'infini,  $\lim_{i \rightarrow \infty} (R - d(u^{(i)}, b)) = 0$ . De ce fait il existe un  $t = T_3$  tel que la condition  $R - d(u^{(i)}, b) < \epsilon_1$  est satisfaite. Quand cette condition est satisfaite, le déploiement s'arrête. En procédant par récurrence dans le cas d'un réseau comportant plus de capteurs, la preuve continue de fonctionner. Si le réseau comporte assez de capteurs pour atteindre le point d'intérêt tout en maintenant la connectivité, la valeur  $T_3$  est aussi limitée par la condition  $d(u, p) < \epsilon_2$ .  $\square$

**Théorème 3.** *Soit  $b$  la station de base,  $p$  le point d'intérêt et un capteur  $u$  ne se trouvant pas sur le segment  $[b, p]$ . La distance  $h$  entre  $u$  et  $[b, p]$  est décroissante.*

*Démonstration.* Chaque mouvement du capteur  $u$  se fait vers le point d'intérêt. Puisque la di-

## 2.3 Algorithmes de déploiement

rection de  $u$  suit  $\vec{up}$  et que la distance parcourue par  $u$  est  $d \geq 0$ , la distance  $d(u, p)$  est décroissante. De ce fait, la distance entre  $u$  et  $[b, p]$  est décroissante.  $\square$

Le Théorème 3 montre qu'avec notre algorithme, les capteurs seront placés le long d'une ligne droite entre la station de base et le point d'intérêt.

**Théorème 4.** *Si le point d'intérêt est à une distance infinie de la station de base, à la fin du déploiement, chaque capteur aura au plus deux voisins dans  $RNG(G)$ .*

*Démonstration.* Nous considérons que le point d'intérêt est à une distance infinie pour deux raisons. Premièrement, cette hypothèse suggère que les capteurs se meuvent parallèlement à la droite  $(b, p)$ . Deuxièmement, nous nous assurons qu'aucun capteur ne puisse atteindre le point d'intérêt et que de ce fait, tous les capteurs servent à la connexité. Cette hypothèse peut facilement être relâchée.

Si le déploiement se termine, cela signifie que la distance entre un capteur  $u$  et son voisin  $v$  est  $d(u, v) > R - \epsilon_1$ . Pour faciliter la compréhension de la preuve, considérons la Figure 2.2.

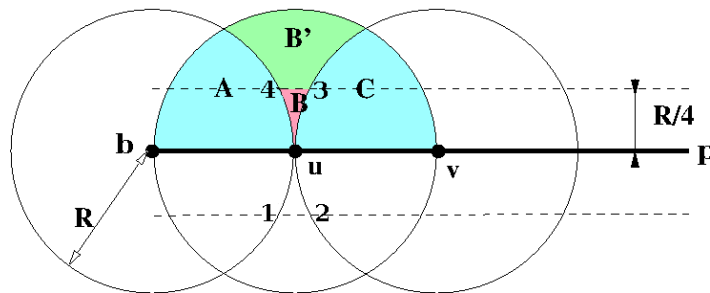


FIGURE 2.2 – Aide pour la preuve du Théorème 4.

Dans cette configuration,  $u$  et  $v$  ne peuvent plus bouger puisqu'ils sont à une distance  $R - \epsilon_1$  de  $b$  et  $u$  respectivement. Il est important de noter que suivant le Théorème 3, les capteurs restent à une distance inférieure ou égale à  $R/4$  du segment  $[b, p]$ . Supposons que  $u$  ait plus de deux voisins dans  $RNG(G)$  à la fin du déploiement. Dans ce cas, il existe  $w \in RNG(u)$ . Dans la Figure 2.2,  $w$  doit se trouver dans les surfaces  $A$ ,  $B$ ,  $B'$  ou  $C$ .

**Cas A ou C :** Si  $w$  se trouve dans les surface  $A$  ou  $C$ ,  $w \in RNG(u)$ , mais  $b \notin RNG(u)$  (ou  $v \notin RNG(u)$ ). Dans ce cas,  $d(b, w) \leq R - \epsilon_1$  (ou  $d(v, w) \leq R - \epsilon_1$ ) et  $w$  peut bouger. Ce qui est contraire à l'hypothèse que le déploiement est terminé.

**Cas  $B'$  :** Un capteur  $w$  ne peut pas se retrouver dans la surface  $B'$  puisque nous supposons

## 2.3 Algorithmes de déploiement

qu'au début du déploiement, les capteurs sont à une distance inférieure à  $R/4$  de la station de base et que le Théorème 3 montre que cette distance est décroissante ou stable.

**Cas B :** Si le capteur  $w$  se retrouve dans la surface  $B$ ,  $w \in RNG(u)$  et le Théorème 3 est vérifié. Cependant, si  $w \in B$  et  $d(u, w) \leq R - \epsilon_1$  alors  $w$  peut bouger ce qui est contraire à notre hypothèse de terminaison. Cette preuve peut être étendue à toutes les configurations puisque la distance maximum entre le capteur  $u$  et les points 1, 2, 3 and 4 de la Figure 2.2 est au plus  $\max d(u, i) = R\sqrt{2 - \sqrt{3}}$ , pour  $i = \{1, 2, 3, 4\}$ . C'est le cas que l'on observe au point d'intersection 4 quand  $b$  et  $u$  se trouvent sur la ligne pointillée en bas de la Figure 2.2. Dans ce cas, si  $w \in B$  alors  $d(u, w) \leq R\sqrt{2 - \sqrt{3}} < R - \epsilon_1, \forall \epsilon_1 < R(1 - \sqrt{2 - \sqrt{3}})$  ce qui permet au capteur  $w$  de bouger. Noter que cette preuve nous permet aussi de donner une valeur maximale à  $\epsilon_1 < R(1 - \sqrt{2 - \sqrt{3}})$ .  $\square$

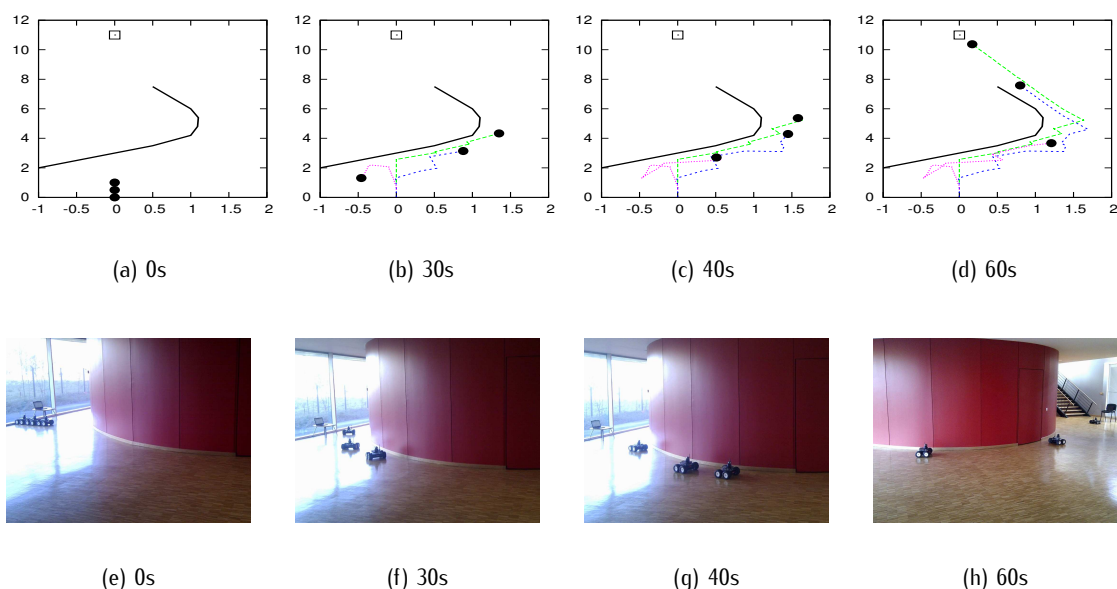


FIGURE 2.3 – Preuve de concept sur robot WifiBot.

L'algorithme décrit dans cette sous-section a été implémenté sur des robots mobile WifiBot<sup>3</sup>. De plus pour les expérimentations réalisées, faisant office de preuve de concept, nous avons aussi implémenté un algorithme simple d'évitement d'obstacle. La Figure 2.3 montre un exemple de déploiement sur laquelle les figures du haut représentent les photos du déploiement et les figures du bas montrent les positions correspondantes sur un graphe. Sur ces figures, la station

3. <http://www.wifibot.com>

## 2.3 Algorithmes de déploiement

---

de base se trouve en  $(0, 0)$  et le point d'intérêt à  $(0, 11)$ . D'autres résultats de simulations sont présentés dans la publication citée en début de sous-section mais aussi dans le manuscrit de thèse de Mr. Milan Erdelj [13] notamment concernant le changement d'objectif avec le suivi d'un point d'intérêt mobile.

### La découverte et la couverture mobile

*M. Erdelj, V. Loscri, E. Natalizio, T. Razafindralambo. Multiple Point of Interest Discovery and Coverage with Mobile Wireless Sensors. Ad Hoc Networks, Elsevier, 2013 [11]*

Dans cette sous-section, nous abordons le problème de la couverture de points d'intérêt en y incluant la découverte de ceux-ci. De plus, nous ajoutons d'autres contraintes aux hypothèses effectuées depuis le début de ce chapitre. Dans cette optique, dans une première partie de cette sous-section, nous reformulons le problème de la couverture et de la connexité en y incluant le problème de la découverte des points d'intérêt.

Dans la section précédente, la couverture du point d'intérêt est effectuée de manière permanente et la connexité du réseau, elle aussi, est garantie de manière permanente. Dans cette sous-section, nous supposons qu'il n'est pas optimal de garantir ces deux exigences, du moins de manière permanente. Les raisons peuvent être dues à un nombre réduit de capteurs ne permettant ni de découvrir, ni de couvrir un nombre important de points d'intérêt en même temps ou à une forte dynamique des points d'intérêt (apparition, disparition, mouvement). L'une des solutions vers lesquelles nous nous sommes penchés pour résoudre ce problème est l'ajout d'une dimension temporelle. L'idée est d'optimiser la couverture en autorisant les capteurs à couvrir plus d'un point d'intérêt mais aussi d'autoriser des déconnexions temporaires du réseau. Notre approche est originale car nous exploitons la mobilité contrôlée des capteurs pour maîtriser au mieux la couverture et la connexité en y ajoutant cette dimension temporelle.

Le problème abordé dans cette sous-section est lié à une contrainte sur le nombre de capteurs pouvant être déployés. En effet dans certains cas, l'hypothèse selon laquelle les capteurs déployés sont à bas coût n'est pas toujours vraie comme par exemple avec l'utilisation de drones d'observation. Dans ce cas, relâcher les contraintes de connexité et de couverture de point d'intérêt devient une nécessité. L'ajout d'une dimension temporelle augmente la difficulté du problème car même dans ce cas il est important de pouvoir fournir des garanties sur la connexité et la couverture intermittentes. L'idée de ce travail est de nous assurer que les points d'intérêt sont au moins couverts un certain temps et que le temps de transmission des données vers la station de base, délai de bout en bout, soit borné ou au moins maîtrisé.

## 2.3 Algorithmes de déploiement

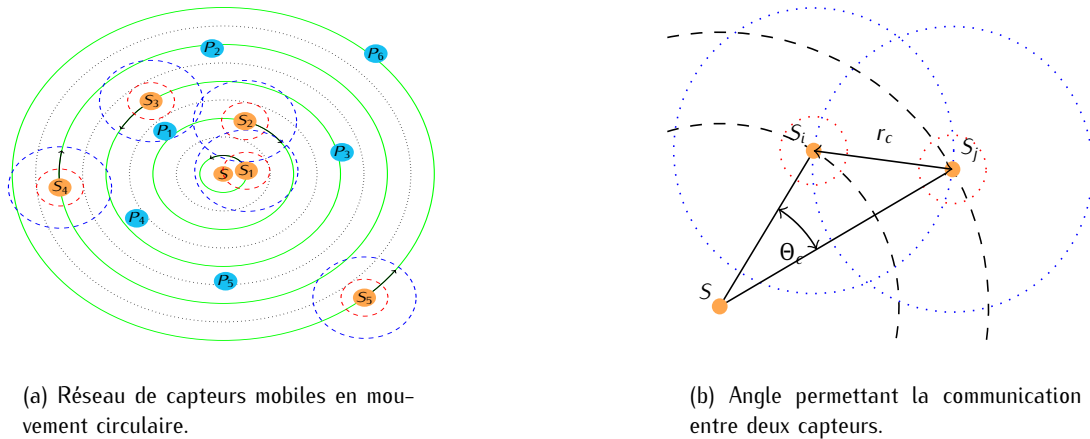


FIGURE 2.4 – Modèle de mouvement.

Dans ce sens, nos travaux se démarquent des travaux de Whitbeck *et al.* [43], Kempe *et al.* [23] et Xuan *et al.* [3]. Dans ces travaux, les auteurs étudient les graphes évolutifs (ou DTN -*Delay Tolerant Networks*-, réseaux temporels ou *time-varying graphs*) d'un point de vue théorique pour en extraire les propriétés intéressantes comme la *reachability* dans [43]. Dans nos travaux, nous exploitons la mobilité contrôlée pour maîtriser l'équivalent de la *reachability* dans [43] et nous y ajoutons les contraintes d'observations des points d'intérêt. Nous avons ainsi montré que dans un modèle simple de mouvement (mouvement circulaire), et grâce à la maîtrise de la vitesse des capteurs, nous pouvons prouver et obtenir des propriétés de connexité et de couverture.

La Figure 2.4(a) présente le réseau de capteurs que nous considérons. Ici, nous supposons que la station de base est  $S$  et que les capteurs  $S_i$  effectuent des mouvements circulaires autour de  $S$  avec des rayons de mouvements différents (en vert sur la figure). Nous supposons aussi que le rayon de communication permet à chaque capteur de communiquer avec le et les capteurs se trouvant sur le cercle de rayon de mouvement immédiatement supérieur et inférieur. Les points d'intérêt peuvent être représentés par les points  $P_i$ . Ici nous supposons que le rayon de couverture ou *sensing*  $r_s$  est au moins de deux fois inférieur au rayon de communication  $r_c$  bien que cette hypothèse peut être facilement modifiée sans changer le sens des analyses effectuées. Dans la suite de cette sous-section nous présentons des résultats dans lesquels les capteurs se trouvant sur des rayons de mouvement voisins évoluent dans des sens opposés. Ici, il faut noter que le capteur  $S_1$  est en permanence connecté à la station de base. Pour plus de détails, j'invite le lecteur à se référer à l'article cité en début de sous-section.

La Figure 2.4(b) montre la condition de communication entre deux capteurs se trouvant sur

## 2.4 Conclusions et perspectives

---

deux rayons de mouvement voisins. L'angle  $\Theta_c$  est l'angle minimal qui permet à deux capteurs de communiquer. Suivant les lois des cosinus, cette angle vaut :  $\Theta_c = \frac{2r_s^2(4n^2-8n+5)-r_c^2}{2r_s^2(4n^2-8n+3)}$  où,  $n$  est le niveau du rayon de mouvement se trouvant à une distance  $r_s(2n-1)$  de la station de base. Il faut noter ici que pour  $r_c = 2r_s$ ,  $\Theta_c = 0$ . Si nous supposons que les capteurs doivent rester dans un rayon de communication l'un de l'autre pour une durée de  $T_c$  pour permettre une communication, alors si  $\Theta_c = 0$ , les deux capteurs  $S_i$  et  $S_j$  doivent être statiques durant un temps durant  $T_c$  pour communiquer. Pour  $2r_s \leq r_c < 4r_s$ , la vitesse de  $S_j$  se trouvant sur le rayon de communication  $n$  (sur la Figure 2.4(b)) est de  $v_j \leq \frac{2\Theta_c r_s(2n-1)}{T_c}$  et la vitesse de  $S_i$  se trouvant sur le rayon de communication  $n-1$  est de  $v_i \leq \frac{2\Theta_c r_s(2n-3)}{T_c}$ . Ici, nous mettons une inégalité car toutes les vitesses inférieures aux valeurs données permettent une communication pendant une durée d'au moins  $T_c$ . Néanmoins, pour augmenter la fréquence de rencontre, il est préférable si possible d'avoir une égalité. Dans l'optique de minimiser le temps inter-contact des capteurs, nous supposons qu'après être sortis du rayon de communication l'un de l'autre les capteurs utilisent leurs vitesses  $v_{max}$ . Dans ce cas, le temps inter-contact pour  $S_i$  et  $S_j$  est de :  $T_{int} = 2(\pi - \Theta_c) \frac{r_s(2n-3)(2n-1)}{4(n-1)v_{max}}$ . Supposons maintenant que pour réduire encore le temps inter-contact, nous disposons des plusieurs capteurs par rayon de mouvement. Par exemple pour le rayon de niveau  $n$ , nous disposons de  $n$  capteurs repartis de manière équidistante. Dans ce cas, le temps inter-contact sera de :  $T_{int} = 2(\frac{\pi}{n} - \Theta_c) \frac{r_s(2n-3)(2n-1)}{4(n-1)v_{max}}$ . Le même raisonnement est utilisé pour la couverture des points d'intérêt avec un temps minimum  $T_s$  de couverture.

Les Figures 2.5(a) et 2.5(b) montrent les temps inter-contact en fonction du niveau de rayon de communication. On voit sur ces figures le gain apporté par l'ajout de plusieurs capteurs par rayon de communication. Les Figures 2.5(c) et 2.5(d) montrent des résultats de simulation sur le temps nécessaire pour reporter l'information relatif à un point d'intérêt en fonction de sa distance et le pourcentage de points d'intérêt découvert et connu par la station de base. Sur la Figure 2.5(d), nous voyons que pour découvrir tous les points d'intérêt du point de vue de la station de base, 118s sont nécessaires pour une vitesse  $v_{max} = 1ms^{-1}$  avec 50 points d'intérêt repartis aléatoirement sur une surface de 8000m<sup>2</sup>.

## 2.4 Conclusions et perspectives

Dans cette section, nous nous sommes attachés à l'étude de l'utilisation de la mobilité contrôlée au service d'une application pour réseau de capteurs. Plus particulièrement, nous avons étudié les implications de la modification physique de la topologie d'un réseau sur les performances obtenues par le réseau en terme de couverture (dans notre cas). La contrainte forte que nous

## 2.4 Conclusions et perspectives

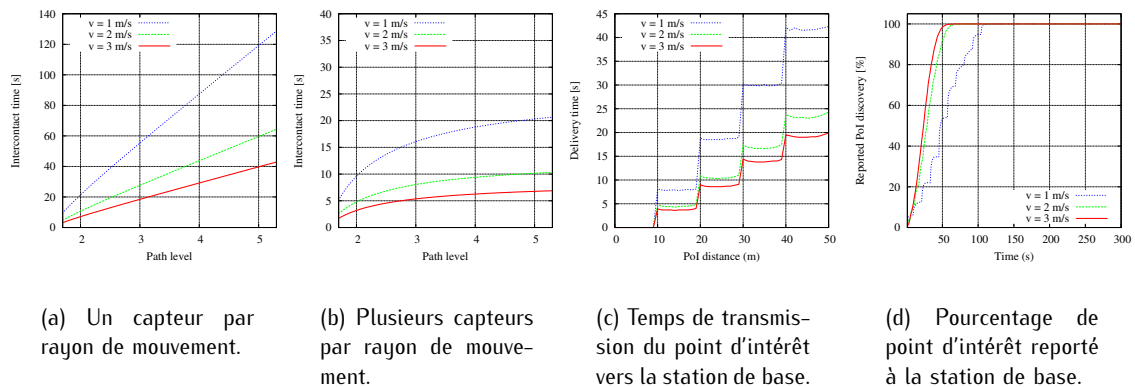


FIGURE 2.5 – Temps inter-contact pour les capteurs avec différentes valeurs de  $v_{max}$  (cas d'un seul capteur par rayon de mouvement et de plusieurs capteurs par rayon de mouvement ( $r_s = 5m$ ,  $r_c = 11m$ ,  $T_c = 2s$ )) et découverte des points d'intérêt par la station de base.

avons considérée est liée à la connectivité du réseau, en effet nous avons voulu nous concentrer sur cette propriété car elle est fortement liée à la transmission des données depuis les objets observés vers la station de base. Ce chapitre montre que la conception et l'exploitation d'un réseau dynamique permettent de *créer* des configurations autorisant une meilleure utilisation des ressources du réseau au niveau applicatif.

Les algorithmes, les analyses et les preuves de concept que nous décrivons montrent que la *création* de services applicatifs plus performants est possible avec l'exploitation de la mobilité contrôlée. Le changement de paradigme concernant la mobilité depuis la considération de celle-ci comme un moyen d'évaluation des protocoles des réseaux *MANET* jusqu'à son exploitation pour la diffusion d'information dans les réseaux *DTN* (*Delay Tolerant Network*) continue avec les travaux, et d'autres, que nous présentons ici. Nous considérons ici la mobilité comme un outil faisant partie intégrante des primitives pouvant être fournies par l'ensemble des capteurs.

Les résultats ici ne présentent qu'une petite partie des possibilités pouvant être offertes par l'exploitation de la mobilité dans les réseaux de capteurs. Nous nous sommes focalisés sur deux points importants : (i) les preuves théoriques de la connectivité et (ii) l'implémentation réelle des algorithmes et concepts proposés. La démarche scientifique derrière ces deux résultats s'inscrit dans une volonté de s'appuyer sur des fondements scientifiques solides et allant vers la pratique et la mise en œuvre des algorithmes étudiés. À court terme, nous voulons exploiter les possibilités offertes par les plateformes d'expérimentations FIT<sup>4</sup> pour continuer les expérimentations et

4. <http://fit-equipex.fr/>

## 2.4 Conclusions et perspectives

---

profiter du passage à l'échelle expérimental fournis par ces plateformes. À moyen terme, nous travaillons déjà sur d'autres algorithmes ne disposant que de quelques capteurs mobiles au service du réseau et des autres capteurs. Dans ce cas, nous essayons de voir les limites de l'utilisation de la mobilité contrôlée dans le maintien et la création de la connexité et de la couverture.

Les perspectives offertes par l'utilisation de la mobilité contrôlée dans les réseaux de capteurs semblent infinies. Les résultats que j'ai montrés ici sont un sous-ensemble des travaux sur lesquels j'ai travaillé et un sous-ensemble minime de la littérature sur le sujet. Cependant, nos travaux et ceux d'autres laboratoires de recherche ouvrent une nouvelle dimension sur la création de services applicatifs. Par exemple, un aspect que nous n'avons pas abordé ici consiste en l'utilisation de la mobilité pour réduire la consommation énergétique des réseaux de capteurs (au delà des travaux effectués sur le routage) ou la modification de la topologie permettant de s'adapter aux évolutions des différentes demandes en termes de trafic. L'idée que nous avons émise de fournir des outils au réseau lui permettant de créer ses propres ressources pour le rendre encore plus autonome.



# La mobilité créatrice de ressources pour la communication

# 3

## Sommaire

---

3.1	Introduction, définitions et contraintes . . . . .	20
3.2	Maîtriser et modifier les ressources réseaux . . . . .	22
3.3	Introduire de la qualité de service . . . . .	24
	Algorithme de positionnement de routeurs mobiles sans fil . . . . .	25
	Évaluations réelles . . . . .	29
3.4	Conclusions et perspectives . . . . .	32

---

## 3.1 Introduction, définitions et contraintes

Dans cette section, nous introduisons le concept de réseau de substitution [28] pour mieux aborder les problématiques de l'utilisation de la mobilité contrôlée dans et pour le réseau. Contrairement aux sections précédentes, notre approche ici est d'utiliser la mobilité comme une primitive de la pile de communication. Nous utilisons la mobilité comme un service pouvant être utilisé par les protocoles de la pile de communication leur permettant d'améliorer leurs performances. Par exemple, rapprocher deux routeurs sans fil mobiles permet d'augmenter la qualité du signal radio entre ces deux routeurs et ainsi minimiser le taux d'erreurs par bits. Ici, nous ne nous attachons pas au niveau application de la pile de communication même si dans la suite le niveau application est utilisé pour évaluer les changements provoqués par les modifications de positions. Les réseaux de substitution font partie d'une famille de réseaux pouvant aussi être appelée réseau à déploiement rapide (*Rapidly Deployable Network*).

Le contexte de cette section s'appuie sur les réseaux de substitution. Nous définissons un réseau de substitution comme un réseau sans fil pouvant être déployé rapidement comme solution d'appui ou de soutien venant en aide à un réseau déjà en place (ou réseau de base) qui connaîtrait

### 3.1 Introduction, définitions et contraintes

---

un problème de performance. Contrairement aux réseaux *ad hoc* ou réseaux maillés, un réseau de substitution ne fournit pas de service à des clients finaux mais essaye plutôt de restaurer ou de maintenir certains services fournis par le réseau de base en cas de panne de celui-ci. Par définition, un réseau de substitution n'est donc pas une entité autonome, mais il vient en soutien à un réseau déjà existant.

Dans cette section, nous étudions des scénarios dans lesquels les entités d'un réseau existant, comme les routeurs, sont subitement déconnectées ou rencontrent des pannes. Les problèmes rencontrés par ce réseau de base doivent être résolus en restaurant les services comme la connectivité et ce en utilisant la capacité des routeurs composant le réseau de substitution à se mouvoir de manière autonome. Dans cette optique, il est crucial de concevoir des algorithmes pouvant fonctionner dans cet environnement et pouvant faire fonctionner les entités de cet environnement. Ici, comme dans tout ce manuscrit, nous nous intéressons plus particulièrement à la qualité de la connectivité d'un point de vue du réseau, c'est à dire à la qualité des liens établis dans et par le réseau de substitution. L'un des défis est de fournir une connectivité du réseau permettant de satisfaire les besoins au niveau application, comme la qualité d'expérience (QoE) ou la qualité de service (QoS), sans connaissance préalable des positions optimales<sup>1</sup>. Ce problème de placement complexe n'a que très peu été abordé dans la littérature.

L'objectif d'un réseau de substitution est de déployer un ensemble d'entité mobile sans fil (ou routeur mobile sans fil) servant de relais entre les routeurs classiques du réseau de base. Ce déploiement se fait sans connaissance préalable de la position optimale des routeurs mobiles sans fil, pour restaurer la connectivité du réseau de base, pour accroître les performances, et si possible satisfaire les besoins applicatifs comme le délai, le débit ou d'autres paramètres de qualité de service ou qualité d'expérience. Le réseau de substitution utilise la mobilité contrôlée des routeurs mobiles sans fil pour essayer d'augmenter les performances au niveau de toutes les couches de la pile protocolaire de communication. Contrairement aux travaux présentés dans les sections précédentes, ici, la mobilité contrôlée est introduite et utilisée dans et pour toute la pile protocolaire. Nous essayons ici de l'introduire comme une primitive du réseau. En nous appuyant sur cette définition du réseau de substitution, nous supposons que les routeurs mobiles sans fil doivent avoir une capacité autonome d'organisation, d'optimisation et de réparation pour permettre plus de flexibilité et un meilleur passage à l'échelle et une meilleure résistance aux problèmes pouvant survenir dans le réseau.

---

1. Si elles existent, mais c'est un autre débat.

## 3.2 Maîtriser et modifier les ressources réseaux

### 3.2 Maîtriser et modifier les ressources réseaux

*T. Razafindralambo, T. Begin, M. Dias de Amorim, I. Guérin Lassous, N. Mitton, D. Simplot-Ryl. Promoting Quality of Service in Substitution Networks with Controlled Mobility. ADHOC-NOW 2011 : 248-261 [37]*

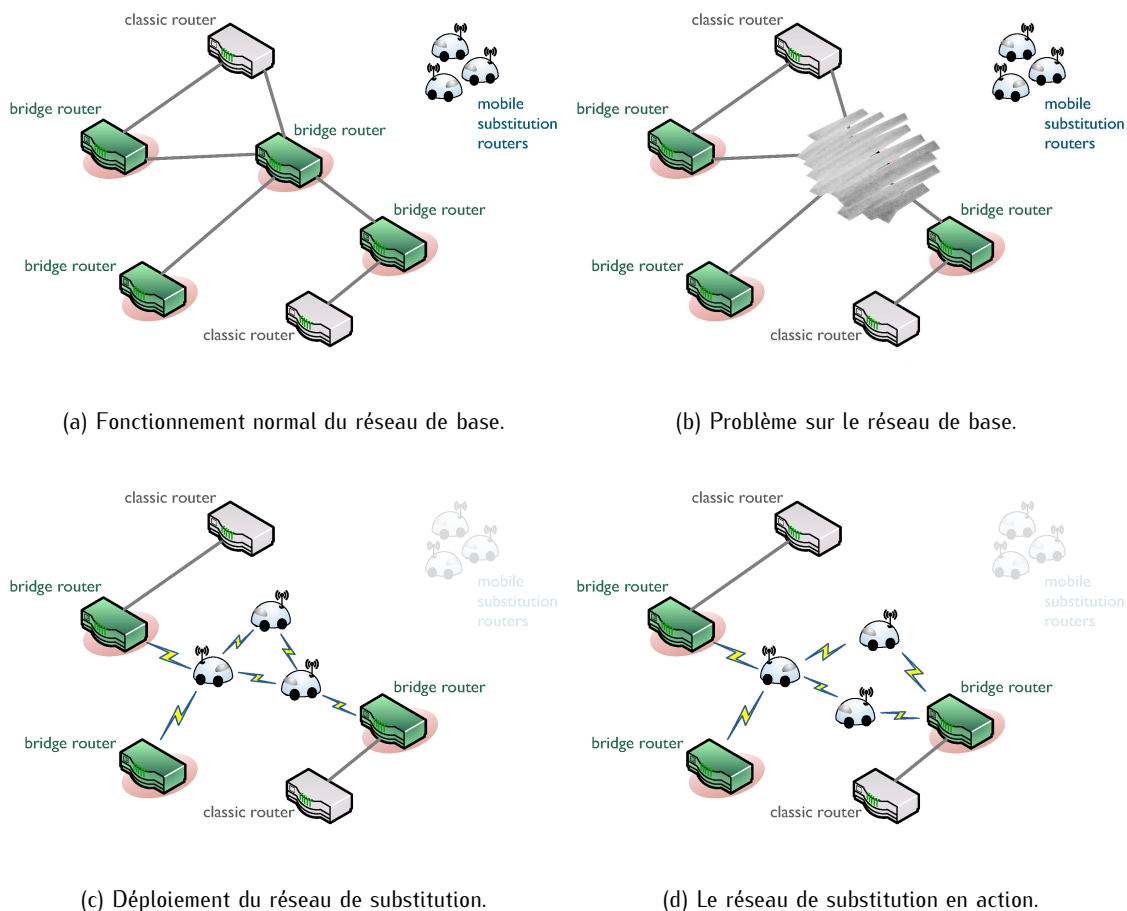


FIGURE 3.1 – Exemple d'utilisation d'un réseau de substitution.

Dans la suite de cette section, nous considérons une technologie spécifique pour faciliter les explications même si les concepts développés sont indépendants des technologies utilisées et disponibles sur le marché. Nous utiliserons le standard IEEE 802.11 [21]<sup>2</sup> et supposons que la pile protocolaire utilisée est TCP/IP [38]. La Figure 3.1 montre un exemple d'utilisation d'un réseau de substitution. La première figure (Figure 3.1(a)) montre le fonctionnement normal du réseau de base. La seconde figure (Figure 3.1(b)) montre l'apparition d'un problème sur le réseau

2. C'est la technologie disponible sur notre plateforme d'expérimentation composée de robots Wifibot

### 3.2 Maîtriser et modifier les ressources réseaux

---

de base. La troisième figure (Figure 3.1(c)) montre le déploiement du réseau de substitution et la quatrième figure (Figure 3.1(d)) montre un re-déploiement du réseau de substitution. Il faut noter sur la Figure 3.1 la présence de deux types de routeurs dans le réseau de base. Les routeurs normaux en gris sur la figure et les routeurs faisant le pont entre le réseau de base et le réseau de substitution en vert sur la figure.

La maîtrise de la topologie dans le contexte des réseaux de substitution est un problème primordial. En effet, à tous les niveaux de la pile protocolaire il existe des enjeux liés aux contextes topologique du réseau. Par exemple, au niveau physique dans un contexte sans fil, il est important que les stations essayant de communiquer soient les plus proches possible pour augmenter la qualité du lien radio. Plus spécifiquement, la puissance du signal radio diminuant au moins avec le carré de la distance, il est important réduire celle-ci afin d'augmenter la puissance reçue et ainsi minimiser la probabilité d'erreur par bits [17]. Au niveau liaison et encore plus spécifiquement avec l'utilisation de technologie telle que le standard IEEE 801.11, les pertes de performances liées aux problèmes topologiques sont nombreux, comme par exemple les stations cachées [7]. Au niveau IP, la relation entre la maîtrise de la topologie et la connexité est évidente [18]. Au niveau transport, les liens traversés peuvent être modifiés par le mouvement des routeurs et ainsi suppriment les effets néfastes des liens asymétriques [22].

Les besoins au niveau de chaque couche de la pile protocolaire sont différents mais la mobilité contrôlée permet d'apporter des solutions au niveau topologique à certains problèmes spécifiques. Il faut aussi noter que les besoins topologiques au niveau de chaque couche peuvent être antagonistes. En effet, au niveau de la couche physique la tendance sera de rapprocher les routeurs mobiles sans fil alors qu'au niveau routage la tendance sera plutôt à l'expansion du réseau de substitution. Des priorités doivent donc être données sur l'utilisation de la capacité des routeurs mobiles sans fil à se mouvoir. Dans ce cas précis, il est préférable dans un premier temps de restaurer la connexité du réseau et dans un second temps de modifier la position des routeurs mobiles sans fil pour essayer d'améliorer la perception du réseau au niveau physique.

Sans même parler de la mobilité, l'une des caractéristiques d'un réseau sans fil est sa variabilité dans le temps. Les conditions du canal radio varient en fonction de l'environnement dans lequel se trouve le routeur mobile sans fil. Ainsi une position correcte à un moment donné ne le sera plus à l'instant d'après. De même, le problème des stations cachées est un problème fortement lié au trafic circulant sur le réseau. Si le trafic circulant sur le réseau n'exhibe pas le problème des stations cachées, il est inutile de vouloir le résoudre même si potentiellement ce problème pourrait apparaître. Au niveau routage, il est inutile de créer de la connexité entre deux points du réseau si aucun trafic n'y circule. Il est donc important de connaître en permanence les besoins

### 3.3 Introduire de la qualité de service

---

du réseau au niveau de chaque couche. Pour ce faire, il faut une surveillance constante des conditions du réseau à tous les niveaux de la pile protocolaire.

Le projet ANR RESCUE<sup>3</sup> entre dans tous les détails de la mise en œuvre des réseaux de substitution. Dans ce manuscrit, nous nous focalisons sur l'utilisation de la mobilité contrôlée. Néanmoins, pour permettre le développement d'algorithmes nous avons pris le parti de mettre en œuvre un système simple de surveillance du réseau, de nous focaliser sur une topologie simple et de nous affranchir de la détection des problèmes qui surviendraient initialement sur le réseau de base.

### 3.3 Introduire de la qualité de service

*K. Miranda, E. Natalizio, T. Razafindralambo. Adaptive Deployment Scheme for Mobile Relays in Substitution Networks. IJDSN 2012 (2012) [29]*

Dans cette section, nous décrivons un algorithme simple permettant de positionner ou de repositionner un routeur mobile sans fil. Nous nous sommes focalisés sur un algorithme ayant les propriétés suivantes :

- Localisé : Toutes les décisions prises par le routeur mobile sans fil s'appuient sur des informations du voisinage à un saut. Dans notre algorithme des échanges de paquets sont générés par le routeur mobile sans fil et les routeurs avoisinants pour obtenir des informations sur l'état des liens, entre le routeur mobile sans fil et ses voisins et ainsi prendre une décision de mouvement ou de positionnement en fonction de cet état.
- Passage à l'échelle : L'une des conséquences de la propriété précédente est un meilleur passage à l'échelle de notre algorithme. En effet, dans notre cas, la complexité en nombre de messages échangés est fonction de la taille du voisinage à un saut.
- Adaptatif : L'algorithme que nous proposons assure la connexité du réseau. La qualité de cette connexité est évaluée de manière permanente et adaptée en fonction de l'évolution de la qualité des liens grâce à la mobilité contrôlée des routeurs mobiles sans fil. Ainsi, l'algorithme s'adapte aux conditions évolutives du réseau.

Pour accroître les performances du réseau, dans l'algorithme que nous proposons, chaque routeur mobile sans fil prend de manière autonome l'entière décision de ses mouvements. Le routeur mobile sans fil décide de se mouvoir ou non, et la direction vers laquelle il se meut en appuyant sa décision seulement sur la vue locale qu'il a du réseau. Notre objectif est d'augmenter les performances globales du réseau en utilisant des décisions locales et indépendantes d'un

---

3. <http://rescue.lille.inria.fr>

### 3.3 Introduire de la qualité de service

---

routeur mobile sans fil à un autre. Notre idée étant que durant tout le déploiement du réseau de substitution, un routeur mobile sans fil détermine sa nouvelle position en utilisant le retour d'information concernant la qualité du lien qu'il a avec ses voisins.

#### Algorithme de positionnement de routeurs mobiles sans fil

*J. Razafimandimby, K. Miranda, D. Zorbas and T. Razafindralambo. Fast and reliable robot deployment for substitution networks. Pe-Wasun (2013) [34]*

L'idée derrière notre algorithme est simple. Pendant toute la durée du déploiement du réseau de substitution, chaque routeur mobile sans fil évalue la qualité des liens qui le lie aux autres routeurs mobiles sans fil voisins. Cette évaluation se fait par des mesures de paramètres obtenus au niveau des couches de la pile de communication. Ces mesures sont comparées, pour chaque lien, et sont utilisées pour prendre la décision de mouvement. Il faut noter que l'utilisation de paramètres locaux ne permet pas d'arriver à un optimum global, mais permet un meilleur passage à l'échelle et aussi de rendre l'algorithme plus réactif.

L'algorithme se divise en trois étapes :

1. **Calcul de la qualité des liens.** Pour calculer la qualité des liens, nous utilisons une méthode intrusive. Le routeur mobile sans fil envoie, en *broadcast*<sup>4</sup> de manière périodique (toutes les  $t$  secondes) des messages `probe request` contenant un numéro de séquence, sa position et l'identifiant du routeur mobile sans fil (adresse IP ou adresse MAC). Chaque routeur mobile sans fil recevant un message `probe request`, y répond en envoyant un message `probe reply` en utilisant une transmission point à point incluant les informations comme sa position, le numéro de séquence du message `probe request` auquel il répond, et son identifiant. Nous utilisons une méthode intrusive pour obtenir des informations à jour mais aussi pour obtenir une vue cohérente et équitable de tous les liens avoisinants un routeur mobile sans fil.

Les exemples de mesure de qualité des liens utilisés sont : le rapport signal sur bruit (*Signal-Noise Ratio* - SNR) ou la puissance du signal reçu (*Received Signal Strength* - RSS) pour les mesures au niveau de la couche Physique, le débit de transmission (*Transmission Rate* - TR) pour la mesure au niveau de la couche Liaison de données. Le temps d'envoi aller-retour (*Round-Trip-Time* - RTT) pour la mesure au niveau de la couche Routage. Toutes ces mesures peuvent être calculées, dans un réseau utilisant la pile protocolaire TCP/IP, avec l'échange des messages `probe request` et `probe reply`.

---

4. Le terme *broadcast* signifie, ici, la diffusion d'un message dans le réseau à tous les voisins du routeur mobile sans fil. Contrairement à *flooding* qui signifie, ici, une diffusion à toutes les composantes du réseau.

### 3.3 Introduire de la qualité de service

---

Il est important de noter que les messages `probe request` et `probe reply` ont une priorité supérieure comparés aux messages de données classiques. Plus particulièrement, quand un message `probe request` ou `probe reply` est forgé, il sera placé au début de la file d'attente au niveau de la couche liaisons de données. Cependant, au niveau de la sous-couche *Medium Access Control*, il ne peut pas préempter une transmission en cours. Il faut aussi noter que les routeurs mobiles sans fil sont d'abord des routeurs, et ainsi ne contiennent la pile de communication que jusqu'au niveau 3 ce qui empêche d'utiliser des mesures de qualité des liens de niveau 4 ou plus.

2. **Calcul de la direction.** Chaque routeur mobile sans fil calcule sa nouvelle position en fonction de la qualité des liens toutes les  $k \times t$  secondes pour  $k > 2$  afin d'assurer d'obtenir assez de mesures pour avoir des statistiques cohérentes. Plus la valeur de  $k$  est grande, meilleures sont les statistiques obtenues. Le routeur mobile sans fil conserve chaque mesure de qualité reçue pour chaque lien (venant des messages `probe reply`). Un système de fenêtre glissante permet de supprimer les valeurs en utilisant une politique du "premier arrivé, premier sorti".

Notons par exemple  $RTT_{next}$  et  $RTT_{prev}$  les valeurs de la qualité des liens, ici le temps d'envoi aller-retour, évaluées par un routeur mobile sans fil. Ici, les indices  $next$  et  $prev$  signifient qu'il y a flux de données passant par le routeur mobile sans fil et permettent d'identifier le sens de ce flux. Les valeurs  $RTT_{next}$  et  $RTT_{prev}$  sont comparées et si  $RTT_{next} > RTT_{prev}$  alors le routeur mobile sans fil se déplacera vers l'entité réseau représenté par l'indice  $next$  donné par la direction  $\vec{D}$ . Pour chaque mesure de qualité des liens utilisée, une moyenne est calculée avant d'effectuer la comparaison. Ici, nous supposons que le temps d'envoi aller-retour par rapport aux voisins  $next$  et  $prev$  est "relié" d'une manière ou d'une autre à la position du routeur mobile sans fil<sup>5</sup>. Dans le cas de multiples flux passant par le même routeur mobile sans fil, celui-ci se déplacera, par exemple, vers son voisin  $i$  ayant le temps d'envoi aller-retour le plus élevé, ou une position pondérée peut être calculée.

3. **Mouvement vers la nouvelle position.** Dans cette étape, chaque routeur mobile sans fil se déplace dans la direction calculée à l'étape précédente sur une distance  $d$ . Le calcul de cette distance  $d$  peut se faire de plusieurs manières. La plus simple est de fixer  $d$  comme étant une constante. L'autre approche consiste à calculer une distance proportionnelle à la différence entre les valeurs de qualité des liens. Nous avons testé les deux approches et les résultats confirment que la première approche permet un déploiement plus rapide. Pour

---

5. Il est difficile de lier de manière fiable les mesures de qualité des liens décrites ici avec la distance.

### 3.3 Introduire de la qualité de service

---

les expérimentations que nous avons choisies nous avons néanmoins utilisé la première approche car elle permet de mieux maîtriser les dérives de position liées au déplacements des routeurs mobiles sans fil. De plus, cette deuxième méthode permet à chaque étape, dans des conditions réelles, de maîtriser la connectivité.

Dans notre algorithme, les routeurs mobiles sans fil essaient d'égaliser les mesures de qualité des liens pour les valeurs de  $RTT_{next}$  et  $RTT_{prev}$  dans l'exemple cité plus haut. Cette volonté d'égalisation peut facilement être remplacé par la maximisation du minimum (pour le rapport signal sur bruit, la puissance du signal reçu ou le débit de transmission) ou minimisation du maximum (pour le temps d'envoi aller-retour) des valeurs de qualité des liens dans le cas où plusieurs flux passent par le même routeur mobile sans fil. On peut aussi imaginer minimiser la différence entre le maximum et le minimum des valeurs de qualité des liens.

Dans la suite de cette section, nous présentons notre algorithme avec deux calculs pour la valeur de la distance à parcourir. Le premier calcul se fait avec une valeur de  $d = 3m$  et le deuxième avec une valeur de  $d = \frac{RTT_{next}^{avg} - RTT_{prev}^{avg}}{\max_{i,j}\{RTT_{next}^i - RTT_{prev}^j\}} \times \frac{\vec{D}}{2}$ . Dans le second cas,  $RTT_{next}^{avg}$  et  $RTT_{prev}^{avg}$  sont les moyennes des valeurs de temps d'envoi aller-retour et  $RTT_{next}^i$  et  $RTT_{prev}^j$  sont les valeurs de temps d'envoi aller-retour. Le dénominateur de cette première fraction permet d'obtenir la différence maximale entre les valeurs de temps d'envoi aller-retour. Dans la seconde fraction, la division par 2, permet d'éviter des oscillations autour de la valeur recherchée. Ici, on peut noter que des algorithmes *Additive Increase*, *Multiplicative Decrease* à la TCP fonctionnent aussi.

Les Figures 3.2 et 3.3 montrent des résultats de simulation obtenus avec notre algorithme. Dans ces simulations, réalisées avec NS-2<sup>6</sup>, il y a une source du flux de données et une destination. Le flux transite par le routeur mobile sans fil qui au départ de la simulation se trouve proche de la source. Ces deux figures montrent les débits obtenus et la position du routeur mobile sans fil par rapport à la source. Ces résultats montrent une convergence plus rapide de la version de l'algorithme utilisant la méthode proportionnelle pour l'utilisation des trois métriques de qualité des liens. Nous pouvons voir aussi un plus forte oscillation quand l'algorithme utilise la méthode proportionnelle.

Les Figures 3.2 et 3.3 sont le résultat d'un exemple de l'utilisation de la mobilité contrôlée dans un réseau de substitution. Ces résultats montrent aussi que le (re)-placement des routeurs mobiles sans fil est un problème important dans les systèmes sans fil. A partir de ces résultats, nous pouvons aussi voir que la métrique utilisée pour évaluer la qualité des liens est importante

---

6. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>



### 3.3 Introduire de la qualité de service

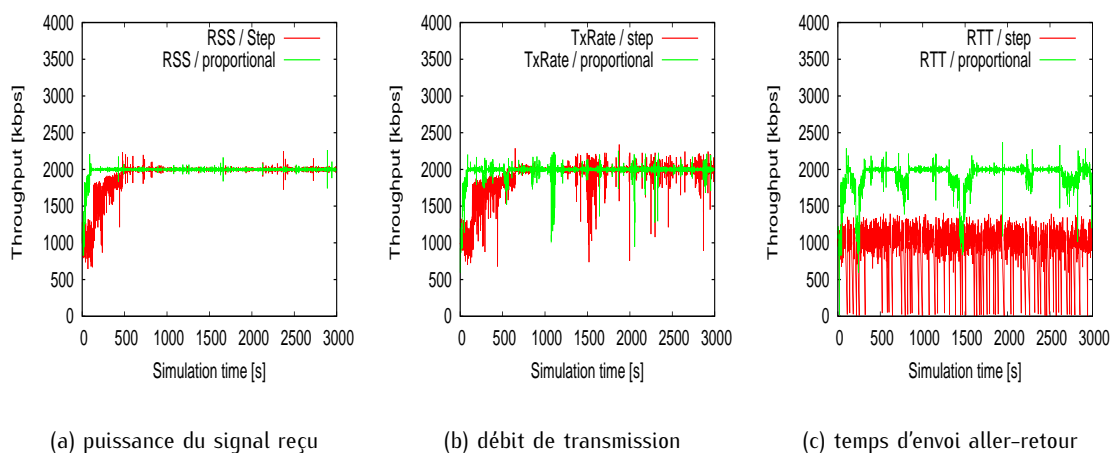


FIGURE 3.2 – Simulation d'un algorithme de placement pour réseau de substitution : Mesure du débit.

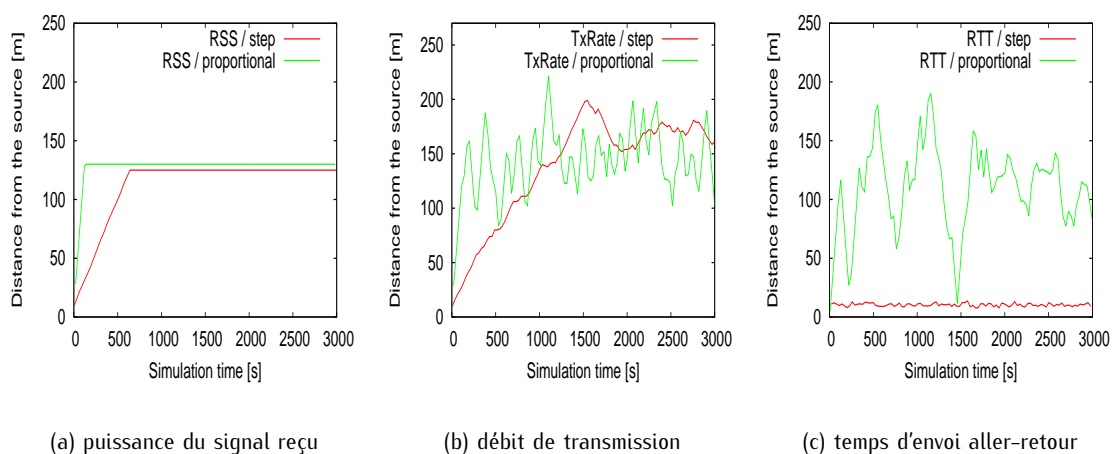


FIGURE 3.3 – Simulation d'un algorithme de placement pour réseau de substitution : Mesure de la distance.

car elle permet dans certains cas de s'adapter plus rapidement aux changements et dans certains cas permet de gommer les variations trop rapides des conditions du réseau.

### 3.3 Introduire de la qualité de service

---

#### Évaluations réelles

*K. Miranda, E. Natalizio, T. Razafindralambo, A. Molinaro. Adaptive router deployment for multimedia services in mobile pervasive environments. PerCom Workshops (2012) 471-474 [30]*

Nous avons évalué une modification de l'algorithme proposé dans la section précédente sur des robots WiFibot<sup>7</sup>. Nous avons gardé le même scénario simple que dans la section précédente, c'est à dire une source, une destination et un routeur mobile sans fil servant de relais de communication. Nous avons changé l'évaluation et nous sommes tournés vers l'évaluation d'un flux multimédia (vidéo). L'algorithme a été modifié car pour l'évaluation réelle, nous utilisons les paquets *ICMP*<sup>8</sup> [33] pour remplacer les messages *probe request* et *probe reply*. Cette modification rend l'évaluation plus simple et montre comment notre algorithme peut s'adapter à une autre manière d'évaluer la qualité des liens. L'utilisation des paquets *ICMP* permet d'avoir deux mesures de niveau Routage : Le temps d'envoi aller-retour et le taux de perte. Nous combinons ces deux mesures pour évaluer la qualité des liens et prendre une décision de mouvement. Ici, comme dans la section précédente, nous nous sommes attachés à évaluer un scénario simple. En effet, il est difficile d'interpréter les résultats obtenus dans les cas de simulations et encore plus d'expérimentations à large échelle impliquant de nombreux paramètres non maîtrisés voire inconnus.

Les Figures 3.4(a) et 3.4(b) montrent les résultats d'expérimentation. La Figure 3.4(a) trace la position du robot en fonction du temps et la Figure 3.4(b) montre l'évolution du temps d'envoi aller-retour moyen entre le robot et la source et le robot et la destination. Ces deux résultats montrent l'interdépendance entre la position et la valeur du temps d'envoi aller-retour. On voit ici que la différence entre les temps d'envoi aller-retour impose un certain mouvement au niveau du routeur et que ce mouvement en plus de permettre d'égaliser ces temps d'envoi aller-retour le réduit. Ces figures montrent aussi la variabilité de la mesure utilisant les paquets *ICMP* et le positionnement presque central du routeur à la fin de l'expérimentation.

La Figure 3.5 montre les trames de vidéo perdues lors de l'expérimentation. Nous n'entrerons pas ici dans les détails sur les différentes trames décomposant une vidéo pour sa transmission. Le lecteur pourra se référer à l'article de Gross *et al.* dans [19]. Nous pouvons voir sur la figure de droite, montrant la transmission de vidéo à la fin de l'expérimentation que le nombre de trames perdues diminue et est inférieur à celles perdues en début d'expérimentation (figure de gauche). Ces résultats montrent l'effet positif de la mobilité contrôlée sont confirmé par les résultats de la Figure 3.6. Cette figure montre les nombres de groupe de trames vidéo dont le *Mean Opinion*

---

7. <http://www.wifibot.com>

8. Internet Control Message Protocol, *ping* pour les intimes

### 3.3 Introduire de la qualité de service

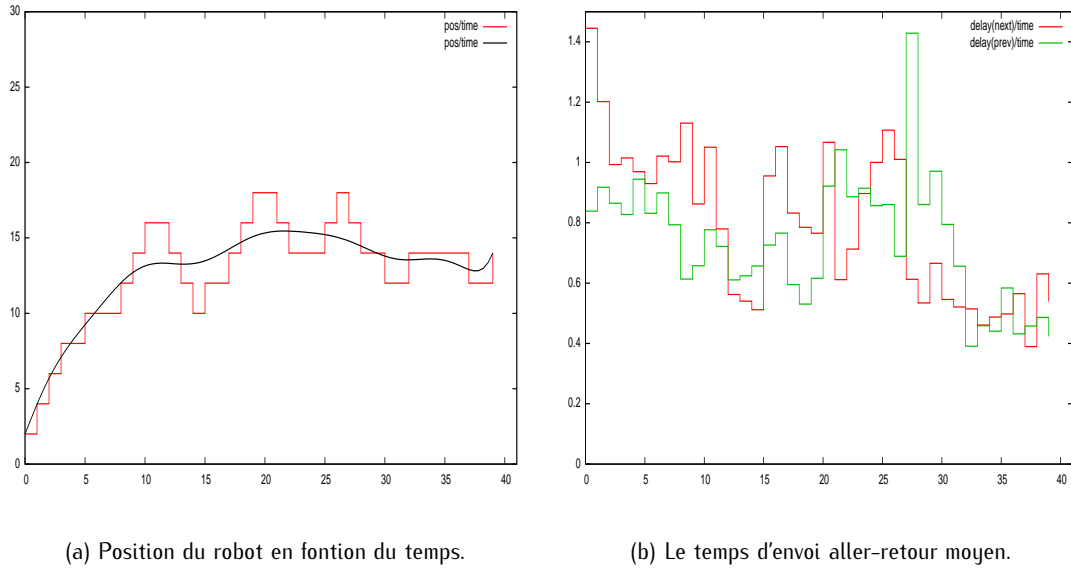


FIGURE 3.4 – Trajectoire du robot et délai des paquets *ICMP*.

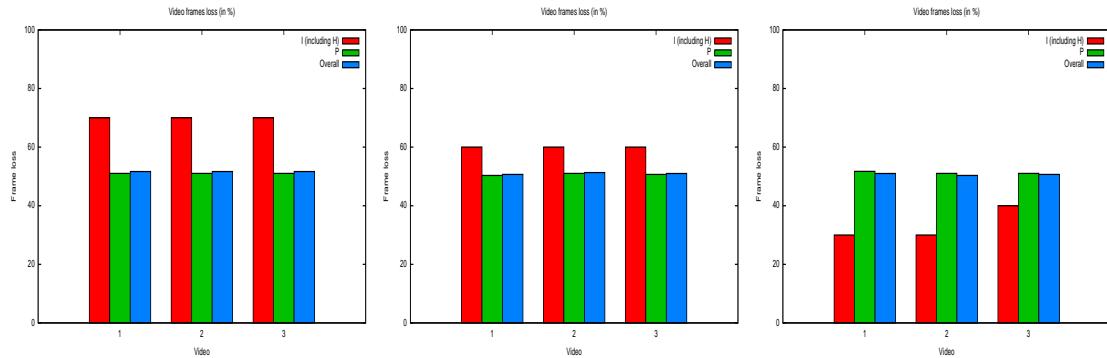


FIGURE 3.5 – Trames de vidéos perdues durant la transmission (en début, milieu et fin d'expérimentation).

*Score* (MOS) est inférieur à celui de la vidéo avant transmission. Le *Mean Opinion Score* est une mesure subjective, voire dans [19], comprise en 1 et 5 permettant de déterminer la qualité de la vidéo. Avant transmission, cette mesure n'est par toujours égale à 5, son maximum, car elle dépend aussi de l'encodage vidéo utilisé, d'où l'utilisation de cette différence pour l'évaluation. La Figure 3.6 montre qu'en fin d'expérimentation (figure de droite), le nombre de trames ayant un *Mean Opinion Score* inférieur à celui avant transmission n'est plus de 100% comparé à celui

### 3.3 Introduire de la qualité de service

du début de l'expérimentation (figure de gauche).

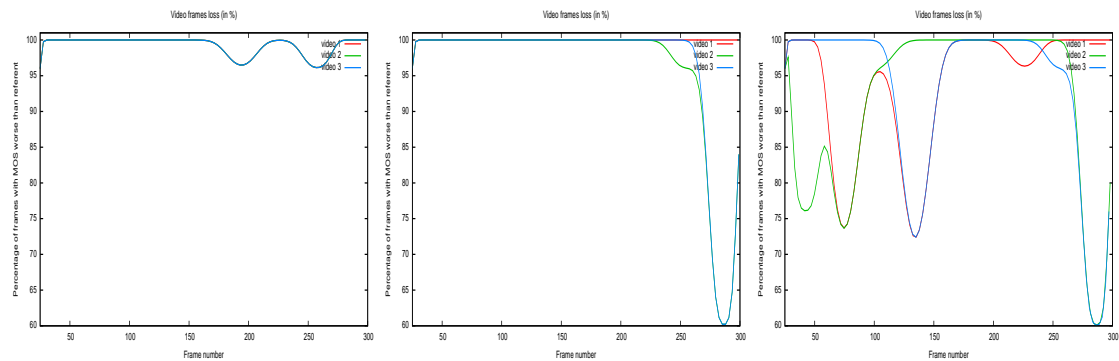


FIGURE 3.6 – Différence sur le *Mean Opinion Score* (MOS).

Pour un meilleur aperçu, nous avons extrait quelques images des vidéos obtenues au niveau du récepteur. Ces images sont présentées sur la Figure 3.7. L'image de la Figure 3.7(a) montre une image extraite de la vidéo avant transmission. Nous voyons que cette image n'est pas parfaite due à la compression utilisée. L'image de la Figure 3.7(b) montre une image extraite en début d'expérimentation, l'image de la Figure 3.7(c) montre une image du milieu d'expérimentation et l'image de la Figure 3.7(d) est une image de fin d'expérimentation. Il faut rappeler que la même vidéo est envoyée plusieurs fois pour permettre d'extraire les mêmes images. La Figure 3.7 montre bien l'effet bénéfique du re-positionnement sur la qualité de transmission de la vidéo.



(a) Originale

(b) Début

(c) Milieu

(d) Fin

FIGURE 3.7 – Aperçu de la différence de qualité des vidéos transmises.

### 3.4 Conclusions et perspectives

---

#### 3.4 Conclusions et perspectives

Dans cette section, nous avons montré une manière d'utiliser la mobilité contrôlée pour améliorer les performances et le fonctionnement d'un réseau. Le concept que nous avons en tête, et qui a motivé notre recherche sur le sujet, est l'utilisation de la mobilité contrôlée par les différentes couches de la pile protocolaire. Nous considérons ainsi que ce sont les besoins au niveau de chaque protocole de la pile protocolaire qui motivent le mouvement des entités composant le réseau. L'introduction dans la pile protocolaire et l'utilisation par les protocoles de la mobilité contrôlée permet selon nous de créer de nouvelles ressources comme de nouveaux chemins pour le routage ou plus de bande passante avec l'utilisation de l'adaptation de débit de IEEE 802.11.

Les résultats de simulation et d'expérimentation que nous avons décrits ici montrent que l'utilisation de la mobilité contrôlée dans le réseau et pour le réseau n'est possible et permet d'obtenir des résultats améliorant les performances. Nous poussons ici un peu plus loin l'utilisation de la mobilité contrôlée en essayant de faire de la mobilité une primitive ou un service, comme la découverte de voisinage, du réseau et exploité par le réseau et pas seulement par les besoins des applications comme montré précédemment.

Les résultats présentés ne sont que des résultats préliminaires et beaucoup d'études, de développement et d'implémentation sont encore nécessaires pour faire de ce concept une réalité. En effet, ces premiers résultats montrent que le concept est viable et prometteur. On peut espérer ouvrir à long terme un plus grand pan de recherche. Cependant, dans un court terme, nous nous focaliserons sur l'utilisation de la mobilité contrôlée pour augmenter la qualité de service dans les réseaux pouvant se servir d'entité mobile. A moyen terme, nous travaillons sur des expérimentations à large échelle pouvant inclure des robots comme les WiFibots et des drones. La combinaison de plusieurs entités mobiles pourrait permettre d'augmenter les possibilités de création de nouvelles ressources dans le réseau.

Ici encore, les possibilités offertes par la mobilité contrôlée semble infinies. En effet, la maîtrise de la topologie offerte par l'exploitation de la mobilité contrôlée permettrait de s'affranchir de beaucoup de problèmes (comme les stations cachées) qui semble insolvable. Par exemple, plusieurs travaux cherchent à résoudre le problème des stations cachées soit par la proposition de nouveaux protocoles, soit par l'utilisation de nouvelles technologies (multi-canal notamment), soit par l'utilisation de nouvelles techniques d'encodage. De plus, un réseau dont la topologie est maîtrisée par le réseau lui-même permettrait de créer au besoin des liens courts plus fiable ou des liens longs plus opportunistes en fonction des besoins. L'idée que nous avons est de fournir

### **3.4 Conclusions et perspectives**

---

aux protocoles un service ou un outil le rendant plus autonomes en créant ou en modifiant ses propres ressources.

## Conclusions et Perspectives

---

### Sommaire

---

4.1	Résumé du manuscrit . . . . .	34
4.2	Résumé des autres travaux . . . . .	35
	Mobilité au niveau application . . . . .	35
	Autre utilisation de la mobilité contrôlée . . . . .	37
	Utilisation de la mobilité incontrôlée . . . . .	39
4.3	Programme, perspectives de recherche et contexte . . . . .	40
	la mobilité contrôlée dans la pile de communication . . . . .	41
	la mobilité contrôlée au niveau application . . . . .	43
	Perspectives lointaines . . . . .	44

---

### 4.1 Résumé du manuscrit

Dans ce manuscrit, j'ai pris le parti de n'exposer que deux de mes contributions majeures de ces dernières années. Il ne m'a pas été facile de choisir ces deux contributions. Pour ce faire, je me suis surtout attaché à présenter les contributions qui ouvrent les perspectives vers lesquelles je voudrais orienter ma recherche. Dans la section suivante, je replace l'intégralité de mes travaux dans le contexte de ma recherche depuis 2008. Pour décrire mes travaux depuis 2008, il y a un fil conducteur sous-jacent qui est l'utilisation ou l'exploitation de la mobilité, contrôlée ou non, dans les réseaux sans fil multi-sauts. Dans ce manuscrit, je me suis attaché à l'exploitation de la mobilité contrôlée dans les réseaux de capteurs et dans les réseaux de substitution.

Mes travaux se placent dans le cadre d'une pile de communication classique et de l'introduction de la mobilité contrôlée dans cette pile de communication. Dans la première partie de ce manuscrit, cette mobilité contrôlée a été introduite au niveau application. Ainsi, l'application emploie

## 4.2 Résumé des autres travaux

---

la mobilité des entités composant le réseau pour satisfaire les besoins et exigences de celle-ci. Dans cette première partie, l'application utilisée est une application de couverture de surface ou de points d'intérêt. Pour schématiser cette première approche, nous pouvons imaginer que l'application a le contrôle direct sur le moteur des entités mobiles. La seule contrainte imposée à l'application dans nos travaux est la connexité du réseau. L'utilisation de la mobilité contrôlée et le maintien de la connexité permet de modifier à la volée les objectifs au niveau application. De plus, l'application ayant dans certains cas une vue d'ensemble sur le réseau, la possibilité offerte par la mobilité contrôlée peut permettre à celle-ci de gérer d'autres ressources, hors pile de communication, telles que l'énergie consommée par les entités du réseau.

Dans la seconde partie des travaux présentés, la mobilité contrôlée est introduite dans la pile de communication autre part qu'au niveau application. Dans cette deuxième partie, ce sont les protocoles de communication qui ont un accès direct au moteur des entités mobiles. Dans ces travaux, chaque protocole de communication évalue ses besoins et exigences. L'exemple le plus simple se situe au niveau du routage (couche IP du modèle TCP/IP) qui doit pouvoir établir des chemins entre les sources et les destinations. L'utilisation de la mobilité contrôlée est ici évidente car la création de chemins est fortement liée à la topologie du réseau. L'utilisation au niveau des autres protocoles de communication est parfois moins évidente comme au niveau liaison où le fonctionnement du protocole et la topologie du réseau ne sont pas liés aussi directement que pour le routage. Cette seconde approche me paraît plus complexe et plus risquée, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives de recherche. L'intuition et les premiers résultats décrits dans ce manuscrit montrent que la mobilité contrôlée peut être une piste pour fournir/accroître la qualité de service dans les réseaux.

L'utilisation de la mobilité contrôlée à tous les niveaux de la pile de communication, en même temps, est un autre problème qui devra être abordé. Les objectifs contradictoires des protocoles de communications et de l'application imposent des choix et/ou des compromis. L'étude de ces compromis me semble très intéressante. Par exemple, les protocoles de niveau routage vont vouloir diversifier les chemins en éloignant les routeurs mobiles sans fil les uns des autres alors que les protocoles de niveau liaison et au niveau physique vont vouloir les rapprocher pour augmenter la robustesse des transmissions.

## 4.2 Résumé des autres travaux

### Mobilité au niveau application



## 4.2 Résumé des autres travaux

### De l'utilisation de la mobilité contrôlée et de la connexité

Milan Erdelj, Tahiry Razafindralambo. *Multiple Target Discovery and Coverage with Mobile Wireless Sensors*. 14èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel), 2012, La Grande Motte, France. *Multiple Target Discovery and Coverage with Mobile Wireless Sensors*, pp. 1-4 [12]

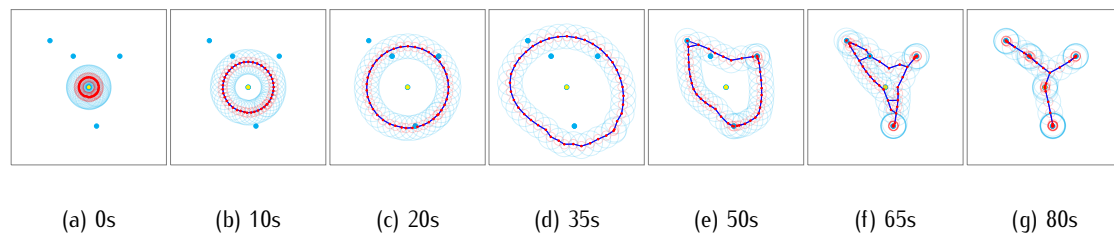


FIGURE 4.1 – Découverte et couverture de points d'intérêt.

La Figure 4.1 montre un exemple d'utilisation de la mobilité contrôlée et de la préservation de la connexité pour la découverte et la couverture de points d'intérêt. L'intérêt de la préservation de la connexité ici permet de passer la phase de découverte à la phase de couverture en même temps pour tous les capteurs. Ces résultats montrent aussi l'intérêt de la séparation entre les objectifs de couverture et la préservation de la connexité. Dans toutes les phases de la Figure 4.1 la connexité est préservée grâce à l'algorithme présenté dans les sections précédentes.

### Algorithme optimal pour la couverture

Carmelo Costanzo, Valeria Loscri, Enrico Natalizio, Tahiry Razafindralambo. *Nodes self-deployment for coverage maximization in mobile robot networks using an evolving neural network*. *Computer Communications*, Elsevier, 2012, 35 (9), pp. 1047-1055. [10]

Une partie des nos travaux s'est focalisée sur les aspects de couverture, et pas seulement de points d'intérêt. L'utilisation de la mobilité contrôlée nous a permis de développer un algorithme génétique optimal s'appuyant sur les réseaux neuronaux pour fournir une couverture d'une surface comportant des obstacles. La Figure 4.2 montre le résultat de cet algorithme. Ici, la mobilité contrôlée est utilisée encore une fois au niveau application et le réseau neuronal pilote directement le mouvement des capteurs en fonction des interactions de celui-ci avec ses voisins. L'algorithme génétique permet de modéliser l'objectif global du réseau alors que l'utilisation des réseaux neuronaux pilote individuellement les capteurs. Cette combinaison nous permet d'obtenir

## 4.2 Résumé des autres travaux

---

une solution optimal globale en utilisant des interactions locales entre les capteurs.

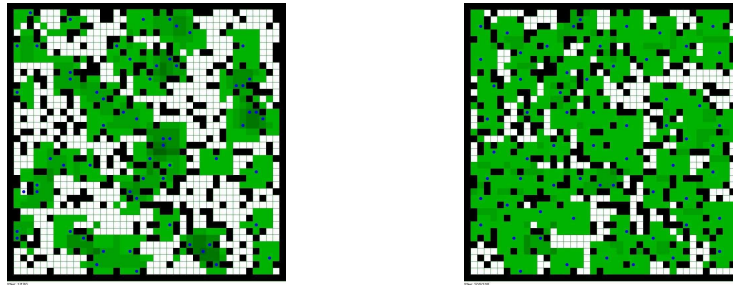


FIGURE 4.2 – Algorithme

### Autre utilisation de la mobilité contrôlée

Dans cette section, je ne liste que les travaux qui sont plus ou moins liés au thème général développé dans ce manuscrit, c'est à dire la mobilité et son utilisation. Certains des travaux que j'ai effectués depuis 2008 n'entrent pas dans ce thème et ne seront pas présentés ici mais restent dans le thème global de ma recherche qui sont les réseaux sans fil contraints.

### Collecte de donnée en utilisant la mobilité contrôlée

*Christelle Caillouet, Xu Li, Tahiry Razafindralambo. A Multi-objective Approach for Data Collection in Wireless Sensor Networks. 10th International Conference on Ad Hoc Networks and Wireless (AdHocNow), Jul 2011, Paderborn, Germany. [4]*

Nous nous sommes intéressés à la collecte de données dans les réseaux des capteurs utilisant une ou plusieurs entités mobiles pour cette collecte. Dans ces travaux, nous avons développé un programme linéaire permettant de calculer les trajectoires des entités mobiles de collecte afin de minimiser les délais de collecte et l'énergie consommée par les capteurs. Dans ces travaux, nous faisons des hypothèses fortes comme la connaissance de la position de tous les capteurs et des algorithmes de routage sous-jacents qui devront être relâchées pour permettre une utilisation réelle des résultats.

### La mobilité contrôlée hors du réseau

*Kalypso Magklara, Dimitrios Zorbas, Tahiry Razafindralambo. Node Discovery and Replacement Using Mobile Robot. 4th International Conference on Ad Hoc Networks, Oct 2012, Paris, France. [27]*

## 4.2 Résumé des autres travaux

---

Nous nous sommes intéressés au problème de l'utilisation de la mobilité contrôlée quand celle-ci n'est pas inhérente au réseau, mais fournie par une entité extérieure capable de bouger les entités du réseau. Dans nos travaux, nous avons proposé trois algorithmes permettant de maximiser la durée de vie d'un réseau de capteurs fixe. Les capteurs dont le niveau d'énergie est en dessous d'un seuil sont remplacés. La première méthode proposée est pro-active, les capteurs émettent un signal d'alarme pour demander un remplacement. La seconde est réactive, l'entité mobile parcourt continuellement le réseau et remplace les capteurs ayant moins d'énergie. La troisième est hybride et mixe les avantages<sup>1</sup> des deux autres approches.

### Équilibrage de couverture

*Dimitrios Zorbas, Tahiry Razafindralambo. Wireless sensor network redeployment under the target coverage constraint. NTMS 2012 : The Fifth IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security, May 2012, Istanbul, Turkey. [47]*

*Tahiry Razafindralambo, Nathalie Mitton, Aline Carneiro Viana, Marcelo Dias De Amorim, Katia Obraczka. Adaptive Deployment for Pervasive Data Gathering in Connectivity-Challenged Environments. Eighth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PERCOM), Mar 2010, France. Eighth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PERCOM) [35]*

Pour une meilleure optimisation de la couverture des points d'intérêt, nous avons proposé un algorithme local permettant d'équilibrer (au mieux) la couverture des points d'intérêt par les capteurs. Cet algorithme utilise des communications locales pour essayer<sup>2</sup> de fournir cet équilibre. L'idée que nous avons pour motiver cet équilibrage est que le point d'intérêt couvert par des capteurs avec peu d'énergie sera couvert moins longtemps et moins bien. Pour pallier ces problèmes, les capteurs se déplacent pour équilibrer les couvertures des points d'intérêt de manière temporelle et spatiale.

Dans la même optique d'équilibrage, nous avons proposé un algorithme permettant aux capteurs, ici mobiles, de s'échanger des zones de couverture pour que chaque capteur puisse parcourir sa zone en un temps borné et pour que le nombre de points d'intérêt mobiles circulant dans sa zone soit égales<sup>3</sup> au nombre de points d'intérêt circulant dans la zone de ses voisins.

---

1. et aussi certains inconvénients, il faut bien le dire  
2. la localité à ses limites  
3. Plus ou moins, car ici encore notre algorithme est local.

## 4.2 Résumé des autres travaux

---

### Couverture de points d'intérêt dynamiques ou zones d'intérêts dynamiques

*Dimitrios Zorbas, Tahiry Razafindralambo, Luigi Di Puglia Pugliese, Francesca Guerriero. Energy efficient mobile target tracking using flying drones. The 4th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2013), Jun 2013, Halifax, Canada. [48]*

*Valeria Loscri, Enrico Natalizio, Tahiry Razafindralambo, Nathalie Mitton. Distributed Algorithm to Improve Coverage for Mobile Swarms of Sensors. May. 2013. Poster in IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS) [26]*

Nous nous sommes aussi intéressés à des scénarios plus dynamiques dans lesquels les points d'intérêt sont mobiles et doivent être couverts et suivis par des capteurs mobiles. Nous avons proposé un algorithme permettant de suivre et surveiller les points d'intérêt par des drones. Nous faisons comme hypothèses que la couverture des drones dépend de leur altitude et que les changements d'altitude augmentent la consommation énergétique. Nous avons développé un algorithme localisé permettant de réduire le nombre de drones utilisés pour la couverture et l'énergie consommée totale des drones. Dans le même contexte, nous avons utilisé un algorithme s'appuyant sur les forces virtuelles pour localiser et couvrir les points d'intérêt dynamiques ou zones d'intérêts dynamiques.

### Utilisation de la mobilité incontrôlée

*Yu Chen, Eric Fleury, Tahiry Razafindralambo. Scalable Address Allocation Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, International Conference on, Dec 2009, Wi Yi Mountain, China. MSN - Fifth International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks - 2009, pp. 41-48.*

L'un des premiers travaux sur lesquels j'ai travaillé et qui m'a conduit dans le thème de recherche abordée dans ce manuscrit concerne l'utilisation de la mobilité incontrôlée ou subie. L'idée que nous avions était de profiter des contacts provoqués par la mobilité des capteurs ou entités sans fil pour les aider à se configurer. Nous nous sommes intéressés particulièrement à la configuration des adresses IP des entités mobiles. Les résultats théoriques que nous avons obtenus montrent que la mobilité permet de configurer plus rapidement et un plus grand nombre d'entités mobiles. Ce sont ces travaux qui m'ont aussi poussés à m'orienter vers l'utilisation de la mobilité dans la pile de communication autre qu'au niveau application.

## 4.3 Programme, perspectives de recherche et contexte

---

### 4.3 Programme, perspectives de recherche et contexte

Quand on parle de mobilité contrôlée il faut retenir qu'il y a un aspect spatial et temporel à prendre en compte. Ainsi les questions basiques que l'on peut se poser quand on veut utiliser les capacités d'un réseau à se mouvoir sont : Pourquoi ? Quand ? Où ? Comment ? . **Le pourquoi** nous permet d'identifier l'objectif lié au mouvement qu'il soit au niveau applicatif ou au niveau de protocoles de communication. **Le quand** permet de décider du moment opportun pour profiter de la capacité du réseau à se mouvoir. **Le où** permet de savoir au delà du fait qu'il faille se mouvoir la direction vers laquelle il faut aller pour satisfaire le 'pourquoi'. **Le comment** prend en compte toutes les contraintes du mouvement.

C'est autour de ces quatre questions que je place le contexte globale de ma recherche depuis 2007 et le moment où j'ai commencé à m'intéresser à la mobilité et plus particulièrement à la mobilité contrôlée. C'est en répondant à ces quatre questions que j'ai réussi à structurer et orienter avec plus ou moins de succès ma recherche. Les premières réponses intuitives à ces questions ont été : Parce c'est possible, quand c'est possible, où c'est possible et de la manière la plus simple possible. En creusant un peu, ces questions sont plus complexes à aborder. Sachant qu'il est possible de se mouvoir, est ce que ça a vraiment un intérêt<sup>4</sup> et pour qui ? Si il faut vraiment se déplacer à quel moment le faire<sup>5</sup> ? Une fois que j'ai décidé de me déplacer jusqu'où je vais, puis-je faire moins<sup>6</sup> ? Et si le déplacement est imminent et inévitable comment impliquer les autres<sup>7</sup> ?

Les réponses aux questions précédentes dans un contexte de couverture de surface sont plus intuitives, ce qui ne les rend pas plus faciles à mettre en œuvre. La couverture de surface par des réseaux de capteurs utilisant la mobilité contrôlée est le premier problème que j'ai abordé faisant suite à des travaux développés par l'équipe projet Inria POPS. C'est après que je me suis intéressé à la mobilité contrôlée dans la pile de communication (ayant une formation réseau). La similarité entre ces deux problèmes quand on cherche à savoir pourquoi, quand, où et comment se mouvoir et exploiter la mobilité contrôlée m'a permis d'aborder le problème de manière plus générale. En poursuivant ces deux objectifs assez différents, je pense avoir conduit une seule recherche et c'est toujours dans ce sens que j'aimerais continuer. Si dans les sous-sections suivantes je sépare l'utilisation de la mobilité contrôlée au niveau de la pile de communication et au niveau de l'application, c'est pour simplifier la lecture. Il n'y a pas une coupure aussi nette dans ma

---

4. C'est la paresse du malgache qui parle

5. C'est encore le malgache qui dit : Pourquoi faire aujourd'hui ce qui peut attendre demain ?

6. La encore c'est la loi de la paresse

7. C'est le principe de l'insulaire qui ne veut pas se séparer des siens

### 4.3 Programme, perspectives de recherche et contexte

---

recherche au quotidien.

#### la mobilité contrôlée dans la pile de communication

J'ai commencé à m'intéresser à l'introduction de la mobilité contrôlée dans la pile de communication. Les premiers résultats de simulations et d'expérimentation sont convaincants et il me semble que c'est une piste importante à explorer dans un futur assez proche. Plusieurs problèmes importants sont néanmoins à prendre en compte.

Dans un premier temps, il me semble important de s'attaquer au problème de l'architecture dans laquelle il faut/on doit travailler. Jusqu'ici, il n'a pas été question d'architecture mais simplement d'introduire la mobilité là où elle n'était pas encore. Pour éviter une forme anarchique de l'utilisation de la mobilité surtout si celle-ci est mise à disposition de tous les protocoles, il faut architecturer son accès. L'intuition et l'idée la plus simple sont de placer la mobilité comme se fut le cas un temps pour l'économie d'énergie de manière verticale (si on suppose que les piles de communication sont un empilement horizontales). Cette architecture pose le problème de l'accès à cette entité verticale. Doit-on ou peut-on fournir les mêmes interfaces d'accès au moteur à tous les protocoles ? L'instinct égalitaire voudrait dire "oui" mais certains protocoles ont plus besoin de contrôler la mobilité que d'autres<sup>8</sup>. C'est le cas par exemple d'un protocole de routage comparé à un protocole de transport<sup>9</sup>. L'autre possibilité voudrait que, comme les tables de voisinages, un protocole exploitant la mobilité soit développé dans chaque sous-couche voulant exploiter la mobilité. C'est le cas par exemple du protocole *ICMP* ou les protocoles *Hello* pour le niveau routage et le protocole *ARP (Address Resolution Protocol)* pour le niveau liaisons. Dans ce cas, l'absence d'une entité commune entre les couches pour la gestion de la mobilité peut poser des problèmes, surtout si les décisions de mouvements prises au niveau de chaque couche sont différentes. Une entité centralisant les demandes de mouvement pourrait être développée pour gérer les conflits et les demandes en règle générale. Cette idée me plaît moins car elle revient à ne plus placer la mobilité comme une primitive pouvant être utilisée par les protocoles. La solution serait peut-être de proposer une approche de communication inter-couches permettant de gérer les conflits.

Dans un second temps, il est important de savoir pourquoi, quand, où et comment de mouvoir. En effet décider d'un mouvement n'est pas si anodin. Étant donné un objectif qui répond au pourquoi, il faut d'abord lier cet objectif au mouvement ou la topologie du réseau. Dans certains cas, cette

---

8. L'égalité ne mène pas toujours à la justice...

9. Je ne sais pas encore en quoi un protocole de transport peut avoir besoin de maîtriser la mobilité hormis de rapprocher la source et la destination pour ramener le concept de bout-en-bout à un saut.

### 4.3 Programme, perspectives de recherche et contexte

---

corrélation est directe comme pour le cas de la couverture. Dans d'autres cas, comme celui du protocole de transport, elle est moins évidente voire inexistante. Je pense ici qu'il faut y consacrer un peu de temps et qu'il y a dans cette perspective de jolis résultats à trouver/montrer. Ensuite, il faut pouvoir déterminer quand utiliser la mobilité contrôlée. Dans le cas d'une utilisation dans la pile protocolaire cela implique une connaissance en temps réel de l'état du réseau. Par exemple, le problème des stations cachées dépend d'une configuration topologique mais aussi du trafic circulant sur le réseau et détecter ce problème de façon locale est assez complexe<sup>10</sup>. Pour ce faire il faudrait introduire un système de surveillance du réseau (*monitoring*) qui est un autre problème à part entière surtout dans un réseau sans fil. Ensuite, il faut décider où se déplacer. Là encore il faut pouvoir de manière certaine exprimer la relation entre la topologie du réseau et les effets du mouvement. Cet aspect est complexe et certains résultats d'expérimentation utilisant le placement avec les paquets *ICMP* (voir les chapitres précédents) nous l'ont montré<sup>11</sup>. Identifier ces relations est d'autant plus complexe dans les expérimentations car l'environnement de test n'est pas entièrement maîtrisé. Enfin, le 'comment' rejoint le paragraphe précédent sur les contraintes imposées par l'environnement extérieur (obstacles, connexité) et les contraintes internes sur les besoins particuliers de chaque protocole.

Dans un troisième temps et de manière plus transversale, il me paraît important de s'attaquer au problème de la qualité de service et de la qualité d'expérience dans un réseau sans fil en y introduisant le concept de la mobilité contrôlée. Si nous nous replaçons dans le contexte du projet ANR VERSO RESCUE, avec l'utilisation des réseaux de substitution, la qualité de service est fondamentale. Dans ce projet, nous avons déjà abordé le problème en proposant une architecture de qualité de service. En partant de cette architecture il faudrait implémenter les protocoles et mécanismes permettant cette qualité de service. Ce développement n'est pas évident pour plusieurs raisons, car encore une fois il est parfois complexe de lier une mesure de qualité de service à une topologie ou une position particulière des entités du réseau. L'autre aspect intéressant de la qualité de service est de concevoir une mesure permettant d'évaluer la qualité de service offerte par la mobilité contrôlée surtout si celle-ci est considérée comme un service intégré à la pile de communication. Comme il est possible de mesurer si un protocole de découverte de voisinage fournit un service de qualité en fonction de la cohérence de la table de voisinage, il serait intéressant de fournir une métrique permettant de juger si les mouvements sollicités sont effectués et l'ont été de manière efficace. Cette mesure peut être la vitesse à laquelle la requête de mouvement a été traitée, ou le respect de certaines contraintes tout au

---

10. J'ai essayé il y a quelques années.

11. Durant une expérimentation nous obtenions les effets inverses. C'est à dire qu'en s'approchant de la destination, le temps d'envoi aller-retour des paquets *ICMP* augmentaient entre le routeur mobile sans fil et la destination.

### 4.3 Programme, perspectives de recherche et contexte

---

long du mouvement.

Dans tous les cas, l'introduction de la mobilité contrôlée dans la pile de communication reste un problème ouvert.

#### la mobilité contrôlée au niveau application

En nous replaçant dans le contexte des réseaux de capteurs et en se concentrant sur le niveau application, plusieurs problèmes intéressants restent encore ouverts. En effet, l'utilisation de la mobilité contrôlée permet de décliner à l'infini les solutions mais aussi les problèmes.

L'un des aspects sur lesquels je travaille en ce moment concerne l'autonomie totale des capteurs. J'entends par là que fournir la possibilité aux capteurs de se mouvoir de manière autonome et de les contraindre par des objectifs applicatifs stricts ou de connexité est un peu paradoxal. L'idée que nous étudions en ce moment est l'introduction de certaines notions psycho-sociales dans les capteurs. Nous travaillons particulièrement sur la notion de bien-être. Cette notion implique le fait pour le capteur d'atteindre un objectif (que nous lui fixons) comme par exemple trouver et couvrir un point d'intérêt. Atteindre cet objectif pour le capteur le rend "heureux". Nous introduisons aussi les notions d'unicité. Cette notion explique que l'homme, par exemple, aime se sentir unique mais pas trop. Si nous parvenons à modéliser ces deux aspects et à les introduire dans les capteurs nous pensons apporter encore plus d'autonomie en nous approchant encore plus de réseau que j'appelle *créatif*. Il faut noter que transformer une notion psycho-sociale en une notion informatique est déjà un défi en soit. Néanmoins, dans le domaine de la psychologie, certaine évaluation du bien-être ou de l'unicité peut se faire par des questionnaires simple et produire des résultats numériques plus ou moins fiables. Cet aspect nous simplifie la tâche car elle permet d'avoir une mesure numérique de ces notions et facilite leurs implémentations. Les résultats préliminaires sont convaincants et méritent que l'on s'y penche un peu plus même si notre modèle considère encore des hypothèses très fortes comme une mesure binaire de la notion de bien-être, soit on est heureux, soit on ne l'est pas, ou une mesure binaire de la notion d'unicité, soit on se sent unique ou pas.

Comme évoqué dans les chapitres précédents, l'intérêt principal de la mobilité contrôlée au niveau application est la maîtrise de la topologie. Il est ainsi envisageable de produire avec la mobilité contrôlée des couvertures différentes dépendant de l'espace et du temps. Les résultats sur la couverture avec des mouvements circulaires montrent qu'il est possible de profiter de la mobilité contrôlée pour créer des réseaux *DTN Delay Tolerant Network* parfaitement maîtrisés. Je pense qu'il est important de continuer les recherches dans ce sens car les *DTN* permettent de relâcher les contraintes fortes de connexité et de couverture. Dans le cadre de mouvements parfaitement



### 4.3 Programme, perspectives de recherche et contexte

---

circulaires, nous avons montré qu'il est possible de fournir des résultats théoriques solides. Dans le cas où les mouvements ne peuvent pas être aussi précis, ce qui sera souvent le cas dans la réalité, il me paraît important d'étudier les apports théoriques de la mobilité contrôlée. Par exemple, mixer un mouvement circulaire régulier et un mouvement plus aléatoire peut permettre de couvrir plus de points d'intérêt ou de surface et de continuer à maîtriser au moins d'un point de vue probabiliste les temps inter-contact et de ce fait la connexité intermittente. La création artificielle de *DTN* va à l'encontre des paradigmes actuels mais permet à mon sens d'aller au delà des contraintes et des limitations des résultats obtenus jusqu'ici

Ici aussi les perspectives sont nombreuses et le domaine de recherche me semble encore assez ouvert.

#### Perspectives lointaines

À long terme, il me semble intéressant d'étudier grâce à la mobilité contrôlée un mélange des deux aspects vus précédemment. Il me semble que deux domaines assez ouverts pour le moment qui sont les *DTN Delay Tolerant Network* et le *monitoring* de réseau sans fil peuvent être savamment mixés avec comme toile de fond la mobilité contrôlée. En effet, pour le moment, les résultats sur les *DTNs* sont pour les plus intéressants des résultats théoriques qui découlent d'expérimentations pratiques. D'un autre côté, les outils et méthodes de *monitoring* de réseau sans fil ne le sont (pour la plupart) que pour des réseaux dont la topologie est statique. Il me paraît intéressant de travailler sur des méthodes de monitoring de *DTNs* ou de réseaux mobiles en règle générale en utilisant la mobilité contrôlée de certaines entités introduites artificiellement dans le réseau. Ce système aura dans un premier temps le mérite de confirmer pratiquement les modèles théoriques surtout sur le routage et la diffusion de données dans les *DTNs*. Ensuite, ce système permettra de savoir si il existe ou non des parcours (des entités avec mobilité contrôlée) optimaux permettant de surveiller un *DTNs* sans perdre d'informations. Un point de départ pour s'attaquer à ce problème serait de partir des traces de *DTNs* existants, d'y introduire virtuellement des entités de surveillance avec mobilité contrôlée et d'analyser les observations sur les temps inter-contact, les opportunités de routages etc. pour les comparer avec les statistiques des traces réelles.

Comme dirait une personne de mon entourage. Je peux reprendre une activité normale.

# Bibliographie

---

- [1] Xiaole Bai, Santosh Kumar, Dong Xuan, Ziqiu Yun, and Ten H. Lai. Deploying wireless sensors to achieve both coverage and connectivity. In *MobiHoc '06 : Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 131–142, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [2] Maxim A. Batalin and Gaurav S. Sukhatme. Spreading out : A local approach to multi-robot coverage. In *in Proc. of 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems*, pages 373–382, 2002.
- [3] Binh-Minh Bui-Xuan, Afonso Ferreira, and Aubin Jarry. Computing shortest, fastest, and foremost journeys in dynamic networks. *Int. J. Found. Comput. Sci.*, 14(2) :267–285, 2003.
- [4] Christelle Caillouet, Xu Li, and Tahiry Razafindralambo. A multi-objective approach for data collection in wireless sensor networks. In *ADHOC-NOW*, pages 220–233, 2011.
- [5] Jean Carle and David Simplot-Ryl. Energy-efficient area monitoring for sensor networks. *Computer*, 37(2) :40–46, 2004.
- [6] Julien Cartigny, F. Ingelrest, David Simplot-Ryl, and Ivan Stojmenovic. Localized lms and rng based minimum-energy broadcast protocols in ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 3 :1–16, 2005.
- [7] C. Chaudet, D. Dhoutaut, and I. Guérin-Lassous. Performance Issues with IEEE 802.11 in Ad Hoc Networking. *IEEE Communications Magazine*, 43(7) :110–116, July 2005.
- [8] S. Chellappan, Wenjun Gu, Xiaole Bai, Dong Xuan, Bin Ma, and Kaizhong Zhang. Deploying wireless sensor networks under limited mobility constraints. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 6(10) :1142–1157, Oct. 2007.
- [9] S. Corson and J. Macker. Mobile Ad hoc Networking (MANET) : Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations. RFC 2501, IETF, 1999.
- [10] Carmelo Costanzo, Valeria Loscri, Enrico Natalizio, and Tahiry Razafindralambo. Nodes self-deployment for coverage maximization in mobile robot networks using an evolving neural network. *Computer Communications*, 35(9) :1047–1055, 2012.
- [11] Milan Erdelj, Valeria Loscri, Enrico Natalizio, and Tahiry Razafindralambo. Multiple Point of Interest Discovery and Coverage with Mobile Wireless Sensors. *Ad Hoc Networks*, 2013.
- [12] Milan Erdelj and Tahiry Razafindralambo. Multiple Target Discovery and Coverage with Mobile Wireless Sensors. In *14èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel)*, pages 1–4, La Grande Motte, France, 2012.
- [13] Milan Erdelj, Tahiry Razafindralambo, and David Simplot-Ryl. Covering points of interest with mobile sensors. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, 24(1) :32–43, 2013.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [14] Hannes Frey, Francois Ingelrest, and David Simplot-Ryl. Localized minimum spanning tree based multicast routing with energy-efficient guaranteed delivery in ad hoc and sensor networks. In *Proceedings of the 2008 International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, WOWMOM '08*, pages 1–8, Washington, DC, USA, 2008. IEEE Computer Society.
- [15] Ruben K. Gabriel and Robert R. Sokal. A New Statistical Approach to Geographic Variation Analysis. *Systematic Zoology*, 18(3) :259–278, September 1969.
- [16] Antoine Gallais, Jean Carle, David Simplot-Ryl, and Ivan Stojmenovic;. Localized sensor area coverage with low communication overhead. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(5) :661–672, 2008.
- [17] Jean-Marie Gorce, Ruifeng Zhang, and Hervé Parvery. Impact of radio link unreliability on the connectivity of wireless sensor networks. *EURASIP J. Wireless Comm. and Networking*, 2007, 2007.
- [18] Nicolas Gouvy, Essia Hamouda Elhafsi, Nathalie Mitton, and David Simplot-Ryl. Minimising energy consumption through mobility with connectivity preservation in sensor networks. *IJPEDES*, 27(6) :521–540, 2012.
- [19] James Gross, Jirka Klaue, Holger Karl, and Adam Wolisz. Cross-layer optimization of ofdm transmission systems for mpeg-4 video streaming. *Computer Communications*, 27(11) :1044–1055, 2004.
- [20] M. Grossglauser and D.N.C. Tse. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 10(4) :477 – 486, aug 2002.
- [21] IEEE and Information Exchange between Systems. *Local and Metropolitan Area Network – Specific Requirements –Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications — Higher-speed physical layer extension in the 2.4 GHz band*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999.
- [22] Lampros Kalamoukas, Anujan Varma, and K. K. Ramakrishnan. Improving tcp throughput over two-way asymmetric links : analysis and solutions. *SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.*, 26(1) :78–89, June 1998.
- [23] David Kempe, Jon Kleinberg, and Amit Kumar. Connectivity and inference problems for temporal networks. *Journal of Computer and System Sciences*, 64(4) :820 – 842, 2002.
- [24] A. Krause, C. Guestrin, A. Gupta, and J. Kleinberg. Near-optimal sensor placements : maximizing information while minimizing communication cost. *Information Processing in Sensor Networks, 2006. IPSN 2006. The Fifth International Conference on*, pages 2–10, 0-0 2006.
- [25] B. Liu, P. Brass, O. Dousse, P. Nain, and D. Towsley. Mobility improves coverage of sensor networks. In *Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, MobiHoc '05*, pages 300–308, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [26] Valeria Loscrì, Enrico Natalizio, Tahiry Razafindralambo, and Nathalie Mitton. Distributed algorithm to improve coverage for mobile swarms of sensors. In *DCOSS*, pages 292–294, 2013.
- [27] Kalypso Magklara, Dimitrios Zorbas, and Tahiry Razafindralambo. Node discovery and replacement using mobile robot. In *ADHOCNETS*, pages 59–71, 2012.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [28] Karen Miranda, Enrico Natalizio, and Tahiry Razafindralambo. Adaptive deployment scheme for mobile relays in substitution networks. *IJDSN*, 2012, 2012.
- [29] Karen Miranda, Enrico Natalizio, and Tahiry Razafindralambo. Adaptive Deployment Scheme for Mobile Relays in Substitution Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, September 2012.
- [30] Karen Miranda, Enrico Natalizio, Tahiry Razafindralambo, and Antonella Molinaro. Adaptive router deployment for multimedia services in mobile pervasive environments. In *PerCom Workshops*, pages 471–474, 2012.
- [31] Srinath Perur and Sridhar Iyer. Characterisation of a connectivity measure for sparse wireless multi-hop networks. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 3(4) :311–330, 2007.
- [32] Dario Pompili, Tommaso Melodia, and Ian F. Akyildiz. Deployment analysis in underwater acoustic wireless sensor networks. In *WUWNet '06 : Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks*, pages 48–55, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [33] J. Postel. Internet control message protocol. RFC 792, IETF, 1981.
- [34] Jean Razafimandimby, Karen Miranda, Dimitrios Zorbas, and Tahiry Razafindralambo. Fast and reliable robot deployment for substitution networks. In *PE-WASUN - Tenth ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks - 2013*, Barcelona, Spain, November 2013.
- [35] Tahiry Razafindralambo, Nathalie Mitton, Aline Carneiro Viana, Marcelo Dias de Amorim, and Katia Obraczka. Adaptive deployment for pervasive data gathering in connectivity-challenged environments. In *PerCom*, pages 51–59, 2010.
- [36] Tahiry Razafindralambo and David Simplot-Ryl. Connectivity Preservation and Coverage Schemes for Wireless Sensor Networks. *Transaction on Automatic Control*, 56(10) :2418 – 2428, October 2011.
- [37] Tahiry Razafindralambo, M., Thomas Begin, Marcelo Dias De Amorim, Isabelle Guérin-Lassous, Nathalie Mitton, and David Simplot-Ryl. Promoting Quality of Service in Substitution Networks with Controlled Mobility. In *10th International Conference on Ad Hoc Networks and Wireless (AdHocNow)*, pages 248–261, Paderborn, Germany, July 2011.
- [38] T.J. Socolofsky and C.J. Kale. TCP/IP tutorial. RFC 1180 (Informational), January 1991.
- [39] Godfried T. Toussaint. The relative neighbourhood graph of a finite planar set. *Pattern Recognition*, 12(4) :261 – 268, 1980.
- [40] S. Čapkun, J.-P. Hubaux, and L. Buttyán. Mobility helps security in ad hoc networks. In *Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, MobiHoc '03*, pages 46–56, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [41] Bang Wang, Hock Beng Lim, and Di Ma. A survey of movement strategies for improving network coverage in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 32(13-14) :1427 – 1436, 2009.
- [42] You-Chiun Wang and Chun-Chi Hu. Efficient placement and dispatch of sensors in a wireless sensor network. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(2) :262–274, 2008. Senior Member-Tseng, Yu-Chee.

- [43] John Whitbeck, Marcelo Dias de Amorim, Vania Conan, and Jean-Loup Guillaume. Temporal reachability graphs. In *MOBICOM*, pages 377–388, 2012.
- [44] Min Xi, Yong Qi, Kui Wu, Jizhong Zhao, and Mo Li. Using potential to guide mobile nodes in wireless sensor networks. *Adhoc and Sensor Wireless Networks*, 12(3-4) :229–251, 2011.
- [45] Mohamed Younis and Kemal Akkaya. Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks : A survey. *Ad Hoc Networks*, 6(4) :621 – 655, 2008.
- [46] H. Zimmermann. OSI Reference Model - The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection. *IEEE Transactions on Communications*, 28(4) :425 – 432, April 1980.
- [47] Dimitrios Zorbas and Tahiry Razafindralambo. Wireless sensor network redeployment under the target coverage constraint. In *NTMS*, pages 1–5, 2012.
- [48] Dimitrios Zorbas, Tahiry Razafindralambo, Luigi Di Puglia Pugliese, and Francesca Guerriero. Energy efficient mobile target tracking using flying drones. In *ANT/SEIT*, pages 80–87, 2013.

RAZAFINDRALAMBO Tahiry  
Inria Lille - Nord Europe  
40 Avenue Halley, F-59650, Villeneuve d'Ascq, France  
tahiry.razafindralambo@inria.fr  
<http://researchers.lille.inria.fr/~razafind>