

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI
BOUMEDIENE (USTHB)
FACULTE D'ELECTRONIQUE ET D'INFORMATIQUE



MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER

EN : INFORMATIQUE

Spécialité : Informatique Mobile

Par : Mme née Yasmine BENOSMAN

DETECTION DE NŒUDS REDONDANTS
POUR LE REDEPLOIEMENT DES REGIONS
VOIDS DANS LES WSNs

Soutenu publiquement le 25/06/2013 devant le jury composé de :

M. Mohamed AHMED NACER	Prof USTHB / FEI	Président
M. Mahfoud BENCHAIËBA	MCA USTHB / FEI	Directeur de mémoire
M. Youcef ZAFOUNE	MCA USTHB / FEI	Examinateur
M. Djamel TANDJAOUI	MRA / CERIST	Examinateur

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil sont souvent déployés aléatoirement dans des zones inaccessibles et parfois hostiles. Ce type de déploiement conduit à une redondance de capteurs, c'est-à-dire qu'il y a des régions surveillées par deux ou plusieurs capteurs au même temps. Cependant, couvrir la même zone par plusieurs capteurs surcharge le réseau par des messages inutiles de données lorsqu'il y a occurrence d'un évènement, ce qui est coûteux en terme de consommation d'énergie. Ainsi, il est essentiel de prévoir des mécanismes qui identifient les capteurs redondants tout en préservant la couverture de la zone d'intérêt. Ces capteurs peuvent être exploités pour la prolongation de la durée de vie du réseau à travers des solutions d'ordonnancement d'activités qui désactivent les capteurs redondants pour qu'ils économisent leur énergie. Ils peuvent aussi être redéployés pour réparer un vide qui apparaît dans le réseau. Dans ce contexte, nous avons proposé la méthode RND (*Redundant Node Detection*) qui adopte une approche totalement localisée pour l'évaluation de la redondance, ce qui permet d'avoir une solution robuste, adaptable et surtout assurant le passage à l'échelle. La méthode repose sur un nouveau critère de redondance basé sur des calculs angulaires simples permettant de dériver la redondance complète des capteurs, tout en préservant la couverture de surface et en optimisant la consommation énergétique des capteurs. Les performances de la méthode ont été évaluées en utilisant le simulateur ns-2. Afin de mettre en évidence son efficacité, nous avons comparé nos résultats à quelques travaux représentatifs de la littérature. Cette évaluation a permis de montrer que la méthode RND enregistre de bonnes performances.

Mots clés : redondance, couverture, redéploiement, ordonnancement, région vide.

Abstract

Wireless sensors networks are generally deployed randomly in harsh and inaccessible areas; this type of deployment creates redundancy in the network, which means that there are some regions monitored by two or more sensors at the same time. However, covering the same area will increase the reporting of redundant data, which will waste more energy. Thus, it is crucial to provide mechanisms that eliminate redundant sensors while maintaining the coverage of the area of interest. These sensors can be exploited through the scheduling activities that turn off redundant sensors to prolong the system lifetime. They can also be redeployed in order to repair appearing holes in the network. In this context, we have proposed the RND (*Redundant Node Detection*) method that resolves the redundancy detection problem. It is based on a fully localized approach, which provides more robustness, adaptability and scalability to the solution. In RND, sensors decide their redundancy based on a novel criterion, it uses simple angular calculations while preserving the network coverage. Performances of the proposed method have been evaluated using the ns-2 simulator. In order to highlight the effectiveness of the method, we have also compared our results with some existing works of the literature. Simulations show that RND achieves good performances.

Key words: redundancy, coverage, redeployment, scheduling, void region.

Remerciements

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon directeur de mémoire, Mr. Mahfoud BENCHAIËBA, pour son encadrement très efficace dans la conduite de ce travail. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour ses encouragements, sa disponibilité et tous ses précieux conseils.

Je remercie Mr. AHMED NACER, Professeur à l'USTHB, de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury.

Je tiens à remercier également Mr. ZAFOUNE, Maître de Conférences/A à l'USTHB, ainsi que Mr. TANDJAOUÏ, Maître de Recherche au CERIST, d'avoir accepté de juger mon travail.

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire Intelligence Artificielle de l'Unité d'Enseignement et de Recherche en Informatique (UERI) à l'EMP. Je tiens à remercier les responsables de m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce travail.

Mes derniers remerciements vont à mon époux et à mes parents qui m'ont toujours témoigné un soutien inestimable.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1.....	4
1.1. Introduction	4
1.2. Les réseaux de capteurs sans fil	4
1.2.1. Définition d'un réseau de capteurs	4
1.2.2. Applications des réseaux de capteurs	5
1.2.2.1. Application militaire	5
1.2.2.2. Application à la surveillance	6
1.2.2.3. Application environnementale	6
1.2.2.4. Application médicale	6
1.2.3. Anatomie d'un capteur sans fil	6
1.2.4. Architecture de communication : Pile protocolaire.....	7
1.2.5. Les différents facteurs de conception	8
1.3. La redondance dans les réseaux de capteurs	9
1.3.1. Types de redondance	9
1.3.1.1. La redondance spatiale	9
1.3.1.2. La redondance temporelle	10
1.3.1.3. La redondance d'information	10
1.3.2. Contribution de la redondance pour les réseaux de capteurs	10
1.3.2.1. La fiabilité	10
1.3.2.2. La sécurité	11
1.3.2.3. L'économie d'énergie	11
1.3.2.4. Le recouvrement de la couverture de surface.....	11
1.4. Conclusion.....	12
Chapitre 2.....	13
2.1. Introduction	13
2.2. Modélisation d'un réseau de capteurs	14
2.3. Définition formelle de la redondance	14
2.4. Classification des méthodes de détection de la redondance	15
2.4.1. L'approche géométrique.....	18
2.4.1.1. La méthode des secteurs sponsorisés	18
2.4.1.2. La méthode de couverture de périmètre	19
2.4.1.3. La méthode en grilles.....	25
2.4.1.4. La méthode de couverture des points d'intersection	27
2.4.1.5. La méthode RSE	29
2.4.1.6. La méthode de sectorisation.....	31
2.4.2. L'approche analytique.....	32
2.4.2.1. La méthode de Wu <i>et al.</i>	33
2.4.2.2. La méthode de Bulut <i>et al.</i>	34
2.4.2.3. La méthode LUC	35
2.5. Discussion.....	36

2.6. La coordination entre capteurs redondants	41
2.6.1. Schéma de backoff aléatoire	42
2.6.2. Construction du MIS (Maximal Independent Set)	43
2.7. Synthèse	44
2.8. Conclusion.....	45
Chapitre 3.....	46
3.1. Introduction	46
3.2. Spécification du problème et hypothèses	47
3.3. Approche de la solution.....	47
3.3.1. 1 ^{ère} phase : Le prétraitement.....	48
3.3.1.1. La découverte de voisinage.....	49
3.3.1.2. Le calcul des voisins effectifs	49
3.3.1.3. Vérification de la couverture de périmètre.....	51
3.3.2. 2 ^{ème} phase : Le calcul de la redondance locale.....	57
3.3.3. 3 ^{ème} phase : Coordination entre capteurs redondants.....	63
3.3.3.1. Un aperçu sur le MIS.....	65
3.3.3.2. La construction du MIS	66
3.4. Discussion.....	69
3.5. Conclusion.....	70
Chapitre 4... ..	71
4.1. Introduction	71
4.2. Méthodologie de simulation.....	72
4.3. Implémentation de la méthode RND	72
4.4. Paramètres de simulation utilisés	73
4.4.1. Paramètres du réseau	73
4.4.2. Paramètres de l'environnement de simulation	74
4.5. Métriques de performance.....	76
4.6. Résultats et interprétations	77
4.6.1. Nœuds redondants localement.....	77
4.6.2. Nœuds redondants globalement	80
4.6.3. Degré de couverture	82
4.6.4. Energie consommée	83
4.7. Discussion.....	84
4.8. Conclusion.....	85
Conclusion générale et perspectives	87
Références bibliographiques	90

Liste des figures

Figure 1.1. Architecture générale d'un nœud capteur sans fil.	5
Figure 1.2. Anatomie d'un capteur sans fil.....	7
Figure 1.3. Pile protocolaire.	8
Figure 2.1. Classification des méthodes de détection de la redondance.	17
Figure 2.2. Illustration du modèle des secteurs sponsorisés.....	18
Figure 2.3. Un scénario ignoré par le modèle des secteurs sponsorisés.	19
Figure 2.4. Calcul du segment de périmètre de si couvert par sj	20
Figure 2.5. Représentation des voisins effectifs.	21
Figure 2.6. La couverture de périmètre pour la détection de la redondance	22
Figure 2.7. L'évaluation de la couverture de périmètre.....	24
Figure 2.8. Le capteur sx est un candidat du capteur sy	25
Figure 2.9. Utilisation de l'approche en grilles pour la détection de la redondance.....	25
Figure 2.10. Représentation en grilles de la zone d'intérêt.	26
Figure 2.11. La couverture des points d'intersection.....	28
Figure 2.12. Capteurs hétérogènes.	29
Figure 2.13. Diagramme de <i>Voronoi</i>	30
Figure 2.14. Représentation des sommets et des intersections Voronoi.....	31
Figure 2.15. Représentation de la couverture des secteurs.	32
Figure 2.16. Modèle idéal d'une redondance complète.....	33
Figure 2.17. Représentation du calcul du ratio $Pn(i)$	34
Figure 2.18. Occurrence d'un vide de couverture.....	41
Figure 2.19. Le graphe d'états transitions.....	42
Figure 3.1. Pseudo-code de l'algorithme de découverte de voisinage.....	49
Figure 3.2. Principe de calcul des voisins effectifs.....	50
Figure 3.3. Pseudo-code de l'algorithme <i>Check effective</i>	51
Figure 3.4. Représentation des nœuds angulairement adjacents.	51
Figure 3.5. La couverture de périmètre de i dans la direction formée par j et k	53
Figure 3.6. Calcul de l'angle seuil.....	54
Figure 3.7. Représentation de l'angle réel.....	54
Figure 3.8. Les positions possibles du nœud dans les quatre quadrants.....	55
Figure 3.9. La vérification de la couverture de périmètre de i	56
Figure 3.10. Pseudo-code de l'algorithme <i>Void segment</i>	57

Figure 3.11. Formation des ensembles $Com - neighbor_{\mathbf{D}}(i, j)$ et $Com - neighbor_{\mathbf{G}}(i, j)$...	59
Figure 3.12. Formation du couple $Angularly - near_{ij}$	59
Figure 3.13. Un vide de périmètre sur le segment du nœud j	60
Figure 3.14. La couverture du segment de j par $Angularly - near_{ij}$	61
Figure 3.15. La non redondance du nœud i en présence du vide.	62
Figure 3.16. Pseudo-code de l'algorithme <i>Local redundancy</i>	63
Figure 3.17. Représentation d'un vide de couverture causé par la désactivation de deux capteurs (redondants) interdépendants.....	64
Figure 3.18. Le rôle des voisins effectifs dans la coordination entre capteurs redondants localement.	67
Figure 3.19. Illustration de la construction du MIS.	68
Figure 3.20. Pseudo-code de l'algorithme <i>GlobalRedundancy</i>	69
Figure 4.1. Processus de simulation.	72
Figure 4.2. Exemple de distribution aléatoire des nœuds employée dans une simulation (surface $200 \times 200 \text{ m}^2$, nœuds=400).....	76
Figure 4.3. La variation du nombre de capteurs redondants localement en fonction de la densité des capteurs dans une surface $50 \times 50 \text{ m}^2$	78
Figure 4.4. La variation du nombre de capteurs redondants localement en fonction de la densité des capteurs dans une surface $500 \times 500 \text{ m}^2$	79
Figure 4.5. La variation du nombre de capteurs redondants localement en fonction du rayon de couverture dans une surface $1000 \times 1000 \text{ m}^2$	80
Figure 4.6. Les graphes représentant le nombre de capteurs redondants globalement.....	81
Figure 4.7. La variation des degrés de couverture <i>initial</i> et <i>final</i> en fonction de la densité des nœuds.	83
Figure 4.8. La variation de l'énergie moyenne consommée par nœud en fonction de la densité du réseau.	84

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Résultats numériques des formules proposées [WU05].	34
Tableau 2.2. Tableau comparatif et récapitulatif des méthodes de détection de la redondance.....	40
Tableau 3.1. Format d'une entrée (voisin j) dans la table des voisins d'un nœud.....	49
Tableau 4.1. Paramètres de simulation utilisés.	75

Introduction générale

Depuis quelques décennies, le besoin d'observer et de contrôler des phénomènes physiques tels que la température, la pression, la luminosité ou d'autres grandeurs physiques est essentiel pour de nombreuses applications industrielles et scientifiques. Pour répondre à cette demande croissante, de nouveaux réseaux, appelés Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) viennent au secours de l'environnement et de l'industrie. L'utilisation des capteurs n'est pas une nouveauté, ce qui est nouveau c'est leur miniaturisation grandissante et l'abandon de l'encombrant câblage au profit des communications radio. Ces micro-capteurs sont de véritables systèmes embarqués. Le déploiement de plusieurs d'entre eux forme un réseau de capteurs sans fil à grande autonomie et à infrastructure non prédéfinie. Ces réseaux ont envahi plusieurs domaines d'application tels que le domaine militaire, médical, l'agriculture de précision et bien d'autres.

Toutefois, les réseaux de capteurs soulèvent de nombreuses problématiques de recherche tant par les applications potentielles qu'ils laissent entrevoir que par les diverses contraintes qu'ils imposent. Ces contraintes concernent la limitation des capacités de traitement, de stockage et surtout d'énergie parce qu'ils sont généralement alimentés par des batteries à capacités limitées. En effet, il est difficilement envisageable de recharger les batteries, en raison du déploiement des capteurs dans des zones hostiles ou difficilement accessibles. Par conséquent, la limitation énergétique des capteurs joue un rôle important dans la durée de vie du réseau.

Lorsque les nœuds capteurs épuisent leur énergie, des vides apparaissent dans le champ d'intérêt. Ces vides peuvent aussi être formés suite au déploiement aléatoire des nœuds ou à cause des dommages physiques accidentels ou intentionnels (tombée de grêle, écrasement par des engins, etc.) auxquels sont exposés les capteurs. Les régions vides affectent la qualité de couverture du terrain observé, et il devient impossible de détecter les événements se produisant dans ces régions. La capacité d'un réseau de capteurs à surveiller tous les points de la zone d'intérêt par au moins un capteur définit le problème de couverture. La notion de couverture est définie comme étant la mesure de la qualité de service (QoS) de la mission de détection d'un réseau de capteurs [DU05, GHA11].

Dans ce contexte, les applications ont tendance à déployer aléatoirement plus de nœuds que nécessaire pour assurer la couverture complète de la zone d'intérêt. Cet excès conduit à une redondance de capteurs, c'est-à-dire qu'il y a des régions surveillées par plusieurs capteurs au même temps, il s'agit de la redondance spatiale (physique). Il existe d'autres sortes de redondance, notamment la redondance temporelle (traitement multiple) qui consiste à exécuter une action plus d'une fois dans le temps, et la redondance d'information (code et signature) qui introduit une redondance dans la représentation de l'information, en ajoutant des données redondantes, tel que les bits de parité qui permettent de détecter les erreurs.

Nous nous intéressons à la redondance spatiale qui peut être exploitée pour deux objectifs essentiels dans les RCSF. Le premier concerne l'ordonnement d'activités qui consiste à mettre en veille un certain nombre de capteurs redondants afin de prolonger la durée de vie du réseau [WU05, BAI06, HUA07, BUL10, SHE11]. Le deuxième concerne la relocalisation qui s'intéresse à déplacer les nœuds redondants pour réparer la couverture des régions vides dans le réseau tout en respectant les contraintes de couverture et de connectivité [WAN05, LI06, LI07].

De ce qui précède découle l'intérêt primordial de prévoir des solutions de détection de la redondance des capteurs qui garantissent l'évaluation exacte de la redondance des nœuds, et la sélection d'un nombre maximal de capteurs redondants qui peuvent être désactivés ou déplacés simultanément tout en préservant la couverture et la connectivité de la zone d'intérêt.

Cependant, jusque-là le problème de détection de la redondance n'a pas été traité de manière explicite et directe dans la littérature. Il est souvent associé aux solutions apportées pour l'ordonnement d'activités des capteurs. Dans ces travaux, l'algorithme de détection de la redondance est proposé en amont du schéma d'ordonnement, et l'effort principal de ces travaux est accordé à proposer un schéma d'ordonnement d'activités optimal en termes de prolongement de durée de vie du réseau. Par ailleurs, les solutions de relocalisation supposent, lors du déploiement initial du réseau, l'existence d'un certain nombre de capteurs redondants, et ne proposent par conséquent aucune solution consacrée à part entière au problème de détection de la redondance.

L'enjeu principal d'une solution de détection de la redondance est d'éliminer tous les capteurs redondants du réseau tout en préservant la couverture de surface. Les travaux de la littérature se basent chacun sur un critère spécifique pour déterminer la redondance d'un capteur. En effet, certaines méthodes vérifient la couverture des points d'intersection générés par les zones de couvertures des nœuds voisins du nœud calculant sa redondance [WAN03, LUJ07, WUE08]. D'autres méthodes adoptent une approche en grille [BAI06, SAK10], dans laquelle la couverture des points de la grille se trouvant dans la zone de couverture d'un capteur permet de déterminer s'il est redondant ou non. Il y a des méthodes qui vérifient la couverture des segments de périmètres des voisins du nœud calculant sa redondance [JIA04, HUA07]. Ce sont là quelques exemples d'approches qui nous permettent de constater que l'efficacité de ces méthodes, et bien d'autres, dépend de l'exactitude de la procédure de vérification de la couverture de la zone de surveillance du capteur calculant sa redondance. Cependant, cette procédure repose sur une évaluation des distances qui peut devenir très compliquée lorsque le nombre de capteurs augmente dans le réseau. Par exemple, si le nombre de voisins d'un nœud donné est important, la vérification de la couverture de chaque point d'intersection entre les zones de couverture des voisins devient complexe. A la différence de ces travaux, nous proposons une nouvelle approche de vérification de la couverture affranchie de calcul de distance, et basée plutôt sur un calcul angulaire simple pour vérifier la couverture de périmètre d'un

capteur et sa redondance.

L'objectif de ce mémoire est de proposer une nouvelle méthode de détection de la redondance des capteurs. La méthode proposée adopte une approche de calcul géométrique et est classée parmi les solutions dites exactes. Elle consiste en trois phases : un prétraitement, un calcul de redondance locale et une coordination entre capteurs redondants.

Par opposition à une approche centralisée qui nécessite beaucoup de communications pour acheminer l'information à l'entité centrale, les deux premières phases obéissent à une approche totalement localisée, dans laquelle chaque capteur du réseau détermine sa redondance en se basant seulement sur la localisation de ses voisins directs, ce qui permet de diminuer les coûts énergétiques inhérents aux communications. L'aspect localisé de la méthode permet également d'obtenir une solution robuste car l'algorithme reste fonctionnel en cas de changement de topologie (dû aux pannes d'un nombre de nœuds). Un autre aspect est assuré grâce au caractère localisé de la méthode, c'est le passage à l'échelle qui permet à l'algorithme de s'adapter à l'augmentation du nombre de nœuds ou à un réseau de forte densité. Dans sa troisième phase, la méthode coordonne d'une manière distribuée les décisions de redondance parmi les capteurs redondants du réseau.

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre donne, en premier lieu, quelques généralités sur les RCSF, leurs domaines d'application, leur architecture et les différents facteurs liés à leur conception. En deuxième lieu, le chapitre présente une des caractéristiques intrinsèques aux RCSF, à savoir la redondance, en décrivant son apport dans ces réseaux.

Le deuxième chapitre propose une classification des travaux portant sur la détection de la redondance existants dans la littérature. Le chapitre dresse un état de l'art sur les algorithmes représentatifs du domaine pour chacune des classes. Une synthèse ainsi qu'une comparaison qualitative de ces travaux sont proposées à la fin du chapitre.

Le troisième chapitre présente notre contribution qui consiste en une nouvelle méthode de détection de la redondance des capteurs. La méthode exécute d'abord un prétraitement permettant de retenir seulement les capteurs du réseau couverts en périmètre. Ces derniers exécutent ensuite un calcul géométrique totalement localisé leur permettant de décider s'ils sont redondants ou non. Étant donné que la redondance d'un nœud dépend de ses voisins, les nœuds redondants voisins coordonnent leurs décisions de redondance afin de préserver la couverture de surface.

Le quatrième chapitre réalise une évaluation des performances de la méthode proposée avec le simulateur ns-2, et compare les résultats obtenus à quelques travaux représentatifs de la littérature.

Le mémoire se termine par une conclusion de notre travail et quelques perspectives de recherche futures.

Chapitre 1

Généralités sur les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF)

1.1. Introduction

L'évolution de l'informatique a été marquée par différentes étapes dans la miniaturisation. Dernièrement, sont apparus d'infimes systèmes micro-électromécaniques, des dispositifs à bas coûts intégrant les fonctionnalités de captage, de traitement et de communication. Ces dispositifs, appelés capteurs, sont déployés dans la nature afin de créer un réseau de capteurs à des fins aussi bien de contrôle que de surveillance.

Les réseaux de capteurs constituent une catégorie de réseau sans fil comportant un très grand nombre de nœuds, c'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un déploiement très dense et souvent aléatoire qui engendre un certain degré de redondance. La redondance induite par ce déploiement aléatoire représente une caractéristique intéressante pour ces réseaux, dans le sens où elle peut être exploitée pour prolonger la durée de vie du réseau, rétablir la couverture de surface ou encore assurer la fiabilité de l'application. Cette redondance est une redondance spatiale, nous verrons dans ce chapitre qu'il existe d'autres types de redondance, à savoir la redondance temporelle et d'information.

L'objectif de ce chapitre est de donner d'abord une vue générale sur les réseaux de capteurs, en présentant leurs domaines d'application, leurs architecture de communication et les facteurs liés à leurs conception. Nous abordons ensuite le concept de la redondance et explicitons son apport dans certains aspects des réseaux de capteurs.

1.2. Les réseaux de capteurs sans fil

1.2.1. Définition d'un réseau de capteurs

Un réseau de capteur sans fil (RCSF) est un type spécial de réseau ad-hoc défini par un ensemble coopérant de capteurs dispersés dans une zone géographique appelée zone de

captage, afin de surveiller un phénomène et de récolter des données d'une manière autonome.

Les capteurs utilisent une communication sans fil pour acheminer les données captées avec un routage multi-sauts vers un nœud considéré comme "point de collecte", appelé station de base. Cette dernière peut être connectée à une machine puissante via internet ou par satellite (Figure 1.1). L'utilisateur peut adresser ses requêtes aux capteurs en précisant l'information d'intérêt [MAK08].

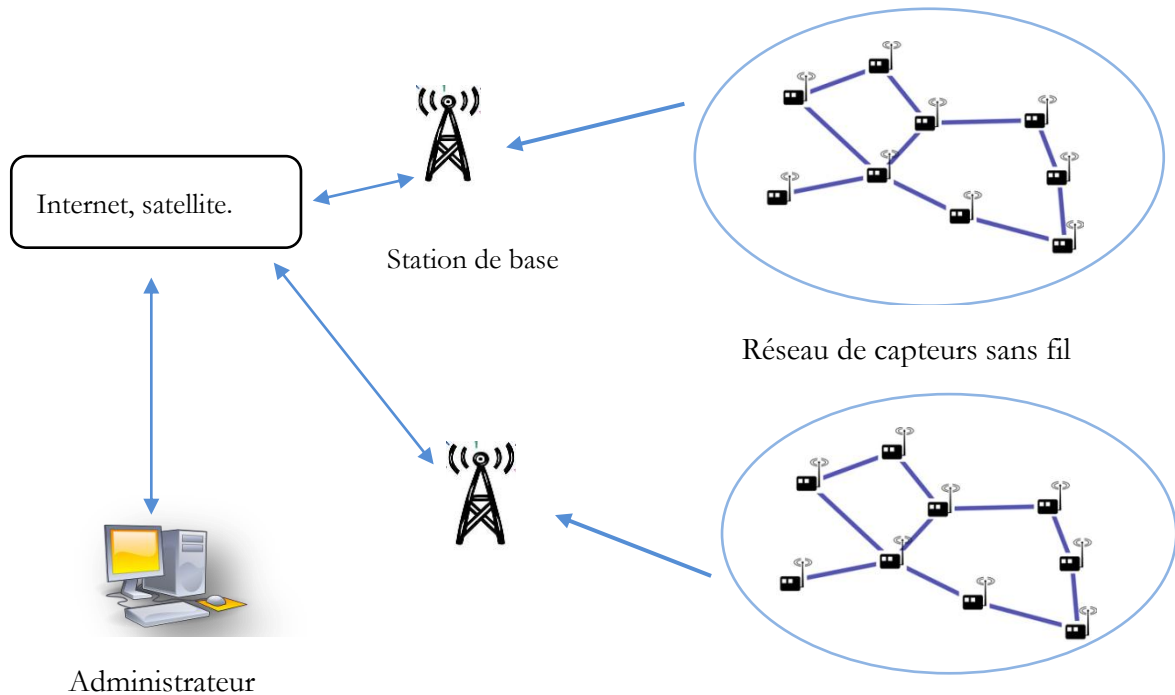


Figure 1.1. Architecture générale d'un nœud capteur sans fil.

1.2.2. Applications des réseaux de capteurs

Les réseaux de capteurs peuvent être programmés à un grand nombre de fins dans des domaines différents, tels que le domaine militaire, scientifique, industriel, médical, climatique, etc. Voici quelques exemples d'applications potentielles dans ces différents domaines [MAK08].

1.2.2.1. Application militaire

L'exploitation militaire est l'une des principales applications des réseaux de capteurs. Dans ce contexte, l'emploi des réseaux de capteurs peut aller des surveillances de routine des périmètres, jusqu'à assister des attaques aériennes ou terrestres et conduire des opérations d'espionnage. Comme exemple d'application dans ce domaine, on peut penser à un réseau de capteurs déployé sur un endroit stratégique ou difficile d'accès, afin de

surveiller toutes les activités des forces ennemies, ou analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations).

1.2.2.2. Application à la surveillance

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine du suivi de l'état des structures peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure.

1.2.2.3. Application environnementale

Les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour surveiller les changements environnementaux. Ils servent à déterminer les valeurs de certains paramètres à un endroit donné, comme par exemple : la température, la pression atmosphérique, etc. En dispersant des nœuds capteurs dans la nature, on peut détecter des événements tels que des feux de forêts, des tempêtes ou des inondations. Ceci permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours.

Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques, par exemple en déclenchant le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole.

1.2.2.4. Application médicale

Dans le domaine de la médecine, les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau.

Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques à l'aide de capteurs ayant chacun une tâche bien particulière. Les données physiologiques collectées par les capteurs peuvent être stockées pendant une longue durée pour le suivi d'un patient.

1.2.3. Anatomie d'un capteur sans fil

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, etc.), et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base. Il est composé de quatre unités de base (Figure 1.2) :

- **L'unité de captage :** Elle est généralement composée de deux sous-unités : le capteur et le convertisseur analogique-numérique (CANs). Le capteur fournit des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique, qui transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.

- **L'unité de traitement :** Elle acquiert les informations en provenance de l'unité de captage et les envoie à l'unité de transmission. Cette unité est également composée d'un processeur qui fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation conçu pour les capteurs, afin d'exécuter les différents protocoles de communication.
- **L'unité de transmission :** Elle effectue toutes les émissions et réceptions des données sur un medium sans fil. Elle peut être de type radiofréquence (RF) ou de type optique.
- **L'unité de contrôle d'énergie :** Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique pour alimenter tous ses composants. Cependant, en conséquence de sa taille réduite, la ressource énergétique dont il dispose est limitée et généralement irremplaçable.

Il existe des capteurs qui sont dotés d'autres composants additionnels : les systèmes de localisation tels que GPS (Global Position System) et un mobilisateur leur permettant le déplacement [MAK08].

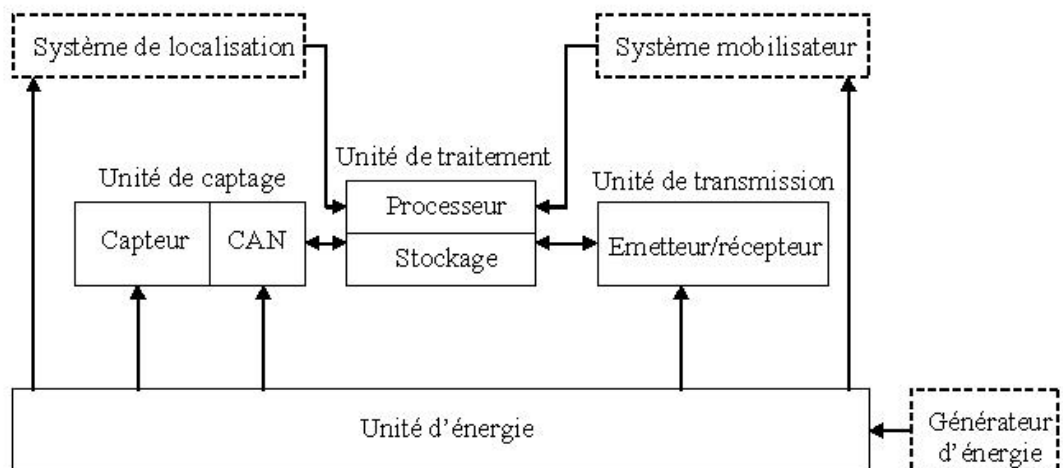


Figure 1.2. Anatomie d'un capteur sans fil.

1.2.4. Architecture de communication : Pile protocolaire

La pile protocolaire utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs du réseau est illustrée par la Figure 1.3.

Suivant la fonctionnalité des capteurs, différentes applications peuvent être utilisées et bâties sur la couche application. La couche transport aide à gérer le flux de données si le réseau de capteurs l'exige. Elle permet de diviser les données issues de la couche application en segments pour les délivrer. La couche réseau prend soin de router les données fournies par la couche transport. Le protocole MAC (*Media Access Control*) de la couche liaison assure la gestion de l'accès au support physique. La couche physique assure la transmission et la réception des données au niveau bit [KAZ10].

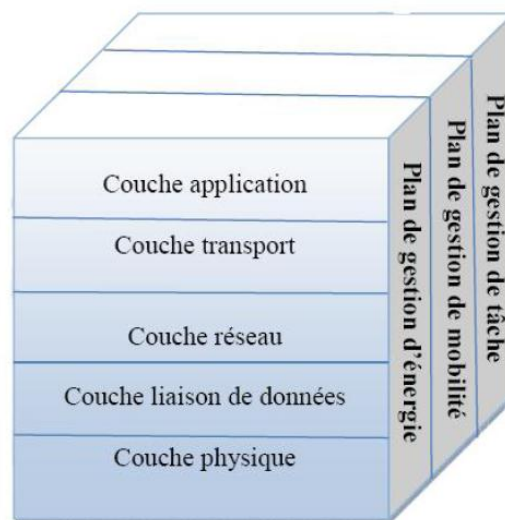


Figure 1.3. Pile protocolaire [KAZ10].

Les plans de gestion de l'énergie, de la mobilité et des tâches surveillent la puissance, le mouvement et la distribution des tâches, respectivement, entre les nœuds capteurs. Ces plans de gestion sont nécessaires, de sorte que les nœuds capteurs puissent fonctionner ensemble d'une manière efficace pour préserver l'énergie, router des données dans un réseau de capteurs mobile et partager les ressources entre les nœuds capteurs.

1.2.5. Les différents facteurs de conception

La conception de protocoles et de techniques pour les réseaux de capteurs est influencée par plusieurs contraintes [AKY02] :

- **La tolérance aux pannes** : La défaillance des capteurs ne devrait pas avoir une influence sur le fonctionnement du réseau. Des techniques peuvent être conçues pour évaluer le niveau de la tolérance aux fautes exigé par les réseaux de capteurs, ce niveau est adapté en fonction de l'hostilité du milieu dans lequel le réseau est déployé.
- **La topologie du réseau** : Elle est en constante évolution à cause du changement de l'état d'activité des capteurs (actif, mise en veille et passif). Il faut que les capteurs soient capables d'adapter leur fonctionnement afin de maintenir la topologie souhaitée. On distingue généralement trois phases dans la mise en place et l'évolution d'un réseau :
 - **Déploiement** : Les capteurs sont soit répartis de manière déterministe soit de manière aléatoire (lancés en masse depuis un avion, par exemple). Il faut alors que ceux-ci s'organisent de manière autonome ;
 - **Post-déploiement (exploitation)** : Durant la phase d'exploitation, la

topologie du réseau peut être soumise à des changements dus à des modifications de la position des nœuds ou bien à des pannes ;

- **Redéploiement** : L'ajout de nouveaux capteurs dans un réseau existant implique aussi une remise à jour de la topologie.
- **Le passage à l'échelle** : La plupart des protocoles sont conçus pour des réseaux de capteurs d'une grande taille. Cependant, ces protocoles sont dits efficaces si les performances des réseaux ne doivent pas chuter d'une manière drastique quand le nombre de capteurs augmente dans le réseau.
- **La consommation d'énergie** : L'économie d'énergie est une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. En effet, la recharge des sources d'énergie est souvent trop coûteuse et parfois impossible. Il faut donc que les capteurs économisent au maximum l'énergie afin de pouvoir fonctionner.
- **L'auto-configuration** : Les réseaux de capteurs sont généralement déployés aléatoirement dans des zones d'intérêt hostiles. Par conséquent, aucune intervention humaine ne peut être requise pour assurer leur organisation. L'auto-configuration de ces réseaux s'avère nécessaire pour leur bon fonctionnement.

1.3. La redondance dans les réseaux de capteurs

La redondance représente pour les réseaux de capteurs une caractéristique qui est à la fois avantageuse et pénalisante. Elle peut être exploitée pour améliorer la fiabilité de la détection, l'exactitude des données collectées ou encore augmenter la durée de vie du réseau. Par contre, elle engendre un signalement de données plus important et implique une charge de trafic supplémentaire. Ce constat motive les chercheurs à renforcer ses aspects positifs.

Le concept de la redondance n'est pas formellement défini sous tous ses aspects dans les réseaux de capteurs. De plus, cet attribut peut être défini de différentes façons, toutefois nous avons retenu la définition suivante qui nous semble être la plus appropriée pour le contexte des réseaux de capteurs :

La redondance est l'ajout de ressources supplémentaires qui peuvent produire des résultats similaires [CUR09].

1.3.1. Types de redondance

Dans l'objectif d'améliorer la cohérence des données, la redondance peut avoir plusieurs formes : spatiale (duplication de composant), temporelle (traitement multiple) et informationnelle (code et signature).

1.3.1.1. La redondance spatiale

La redondance spatiale (physique) signifie la possibilité d'obtenir l'information d'une position spécifique à partir de différentes sources. Elle se base sur le positionnement

géographique des nœuds capteurs dans la zone d'intérêt et elle implique la réplique des ressources dans la surface de couverture du réseau.

La redondance physique est inhérente au réseau de capteurs, et ce en raison d'un déploiement aléatoire des capteurs. De cette manière, il existe des capteurs qui observent une même portion de la zone à surveiller, donc l'information relevée à un emplacement est disponible à partir de plusieurs capteurs [CUR09].

1.3.1.2. La redondance temporelle

Elle est utilisée pour augmenter la précision des données collectées par le capteur et à masquer les erreurs dans la détection ou la communication, en exécutant une action plus d'une fois dans le temps [CUR09]. Toutefois, il existe des situations où la redondance temporelle ne peut pas toujours être mise en œuvre, par exemple dans un réseau de capteurs déployé dans un environnement caractérisé par des paramètres variables dans le temps. Dans ce cas, il n'y a pas d'intérêt à répéter la mesure.

La redondance temporelle peut être une redondance de détection ou bien de communication. Quand il s'agit d'une redondance de communication, cela consiste à envoyer le même paquet de données plus d'une fois, tandis qu'une redondance de détection temporelle est obtenue en effectuant plusieurs mesures par le même capteur d'une manière répartie dans le temps.

1.3.1.3. La redondance d'information

Elle introduit une redondance dans la représentation de l'information, en ajoutant des données redondantes, tel que les bits de parité qui permettent de détecter les erreurs ou bien des extra bits qui permettent de reconstruire l'information perdue [CUR09].

1.3.2. Contribution de la redondance pour les réseaux de capteurs

Les réseaux de capteurs sont denses et redondants. En effet, bien que les nœuds capteurs puissent être placés un à un de manière déterministe par un humain ou par un robot, le déploiement aléatoire est adopté dans la majorité des scénarios pour des raisons pratiques telles que le coût et le temps.

La redondance induite par ce déploiement aléatoire est mise à profit pour améliorer certains aspects des réseaux de capteurs, tel que la consommation d'énergie, la sécurité, la couverture de surface ou encore la fiabilité de l'application. Dans ce qui suit, nous présentons de quelle manière la redondance contribue à renforcer ces aspects.

1.3.2.1. La fiabilité

La redondance contribue non seulement à assurer la cohérence des informations collectées, mais également à obtenir des résultats fiables essentiellement lorsque les nœuds sont défectueux ou rencontrent un dysfonctionnement, ce qui permet la tolérance aux fautes.

Etant donné que les capteurs sont fréquemment déployés dans des environnements hostiles, des lectures incorrectes à partir de capteurs endommagés peuvent dégrader la fiabilité de l'application. De ce fait, la présence de plusieurs capteurs au même emplacement garantit une meilleure qualité de contrôle et de collecte de données, de plus les lectures obtenues à partir de capteurs adjacents permettent de vérifier l'exactitude des données locales.

1.3.2.2. La sécurité

L'exploitation de la redondance constitue une démarche appropriée pour renforcer la sécurité des réseaux de capteurs, car les capteurs peuvent être sujets à de nombreuses attaques (l'attaque *sinkhole*, l'attaque *wormhole*, l'attaque *Sybil*, etc.). De plus, ces attaques ne peuvent pas toutes être prévenues en utilisant seulement des méthodes cryptographiques [CUR09].

La sécurité dans les réseaux de capteurs nécessite de développer des approches spécifiques, en l'occurrence des approches qui utilisent la redondance des nœuds. Ces approches estiment que même si un nœud malicieux continue à envoyer des messages authentifiés (en utilisant des clés cryptées déjà stockées dans sa mémoire) il peut envoyer des informations erronées au sink.

Pour y remédier, la redondance spatiale peut être utilisée pour comparer les lectures locales avec celles obtenues des capteurs redondants, puis un système de décision basé connaissances est construit pour exclure les nœuds malicieux du réseau.

1.3.2.3. L'économie d'énergie

Comme les capteurs disposent de ressources énergétiques limitées, et que de plus cette source d'énergie se tarit et conditionne donc la durée de vie du réseau, l'optimisation énergétique doit être prise en considération quel que soit le problème traité.

La majorité des solutions proposées pour optimiser la consommation d'énergie exploite la redondance spatiale entraînée par le déploiement aléatoire, et ce en ordonnant l'activité des capteurs redondants. Cet ordonnancement consiste à alterner les charges de façon à épuiser les nœuds équitablement : pendant qu'une partie participe à l'application, les capteurs redondants sont dans un mode passif, économisant ainsi leur énergie.

1.3.2.4. Le recouvrement de la couverture de surface

L'utilisation des capteurs dans des zones sensibles rend impossible un déploiement déterministe. De plus une fois disséminés, il est courant que les capteurs rencontrent des défaillances, créant ainsi des régions non couvertes (régions *voids*), ce qui a pour conséquence d'altérer également la connectivité du réseau et de le partitionner. Les données collectées seront perdues et l'intégrité des données est dégradée [CHE09].

Une façon de rétablir la couverture de surface est de déplacer les capteurs redondants

les plus proches de la région touchée. Cette solution s'applique aux réseaux de capteurs mobiles, il s'agit de la *relocalisation de capteurs*. Elle contribue également à renforcer la tolérance aux défaillances des réseaux de capteurs.

1.4. Conclusion

Les réseaux de capteurs sont collaboratifs et orientés vers un domaine d'application précis, avec ce type de réseau un pas de plus est franchi dans la direction des réseaux sans fil.

Cependant ces réseaux doivent faire face à un certain nombre de contraintes, parmi lesquelles on peut citer la limitation d'énergie, le changement de topologie du réseau ou encore l'adaptation à l'environnement. Ces contraintes exigent des chercheurs la proposition de nouvelles techniques de gestion de réseau sans fil, ces dernières peuvent tirer profit de certaines caractéristiques intrinsèques des réseaux de capteurs tels que la redondance des nœuds. C'est ce que nous avons tenté de mettre en évidence en présentant quelques aspects des réseaux de capteurs qui exploitent cette caractéristique.

Nous avons considéré les différentes facettes de la redondance dans les réseaux de capteurs : Spatiale (physique), temporelle et une redondance d'information, mais il n'en demeure pas moins que c'est la redondance spatiale qui est prédominante dans ces réseaux, et ce en raison du déploiement aléatoire utilisé par une majorité d'applications. Dans le chapitre suivant, nous allons montrer de quelle manière cette redondance est détectée.

Chapitre 2

Les méthodes de détection de la redondance

2.1. Introduction

Après avoir présenté les différentes façons d'exploiter la redondance des capteurs, nous allons à présent définir de quelle manière cette redondance est évaluée. La redondance à laquelle nous nous intéressons est la redondance de couverture, qui est engendrée par la présence de plusieurs capteurs au même endroit de la zone d'intérêt. Toutefois, le problème de détection de la redondance n'existe pas dans la littérature de manière singulière. Il est traité comme étant un sous problème des deux problématiques suivantes :

- Les protocoles de relocalisation dans les réseaux de capteurs mobiles [WAN05, LI06, LI07] ;
- L'ordonnancement d'activités des capteurs dans les réseaux de capteurs statiques [WU05, BAI06, HUA07, BUL10].

Les protocoles de relocalisation procèdent en deux phases, dans la première phase il s'agit de trouver le nœud redondant le plus proche de la zone à réparer, et la seconde phase consiste à relocaliser le nœud redondant pour remplacer le capteur défaillant. Ces protocoles se basent sur l'hypothèse qu'un certain nombre de capteurs redondants est initialement disséminé dans le réseau, et ne proposent en conséquent aucune méthode de détection de la redondance.

Les algorithmes d'ordonnancement d'activités détectent d'abord les capteurs redondants du réseau, ensuite, ils appliquent à ces capteurs un schéma d'ordonnancement, pour les faire passer du mode actif au mode veille, et ceci dans le double but d'optimiser la consommation d'énergie et maximiser la durée de vie du réseau. Contrairement aux protocoles de relocalisation, ces algorithmes explicitent la procédure de détection de la redondance.

Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur les méthodes de détection de la redondance proposées avec les schémas d'ordonnancement. Pour effectuer une bonne analyse de ces méthodes, nous proposons de les classer selon l'approche adoptée pour l'évaluation de la redondance.

2.2. Modélisation d'un réseau de capteurs

Cette section présente la modélisation d'un RCSF adoptée par les travaux présentés dans ce chapitre. Un réseau sans fil est représenté par un graphe $G = (V, E)$, avec V l'ensemble des sommets (les *nœuds* du réseau) et $E \subseteq V^2$ l'ensemble des arêtes donnant les communications possibles : il existe une paire ordonnée $(u, v) \in E$ si le nœud u est capable de transmettre des messages à v [LEH09].

Chaque capteur possède une portée de communication notée R_c , ainsi qu'une portée de couverture R_s .

Il y a plusieurs modèles de couverture proposés dans la littérature. Dans [WAN10], l'auteur recense les modèles suivants : le modèle de couverture booléen appelé plus communément le modèle du disque unitaire (ou bien déterministe), le modèle de couverture atténué et le modèle de couverture tronqué. Dans le contexte des travaux portant sur les problèmes de couverture dans les RCSF, le modèle le plus utilisé est le modèle du disque unitaire. Dans ce modèle, il est supposé que deux nœuds peuvent communiquer si la distance qui les sépare est inférieure à R_c . D'où, l'ensemble E peut être défini comme suit :

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

La zone de surveillance $S(i)$ d'un nœud i est la surface observable par le nœud. La forme de $S(i)$ dépend du capteur proprement dit et il est difficile de la caractériser car elle dépend du matériel utilisé [AHM05]. La majorité des travaux existants dans la littérature considère que $S(i)$ correspond à un disque de centre i et de rayon R_s :

$$S(i) = \{p \in \mathcal{A} \mid \text{dist}(i, p) \leq R_s\}, \text{ où } p \text{ est un point de la zone de déploiement notée } \mathcal{A}.$$

2.3. Définition formelle de la redondance

Chaque méthode de détection de la redondance emploie une procédure spécifique pour évaluer la redondance d'un capteur, néanmoins le critère de redondance est le même pour toutes ces méthodes : *un nœud est redondant si sa zone de surveillance est couverte par les zones de surveillance de ses voisins*. Ce critère peut être formalisé de la façon suivante :

Un nœud est complètement redondant si $\bigcup_{j \in N(i)} S(j) \supseteq S(i)$. Cette expression est équivalente à : $\bigcup_{j \in N(i)} (S(j) \cap S(i)) \supseteq S(i)$, tel que $S(i)$ est la zone de surveillance du capteur i , $S(j)$ est la zone de surveillance du voisin de i et $N(i)$ est l'ensemble des voisins à un saut du capteur i .

Nous avons remarqué que l'ensemble $N(i)$ est défini de deux façons dans les travaux portant sur les problèmes de couverture :

- $N(i) = \{j \in \mathfrak{N} / d(i, j) < R_s\}$: La distance séparant le nœud i de ses voisins est inférieure au rayon de couverture R_s ;
- $N(i) = \{j \in \mathfrak{N} / d(i, j) < 2R_s\}$: La distance séparant le nœud i de ses voisins est inférieure à deux fois le rayon de couverture R_s .

Nous définissons aussi la redondance partielle qui est utilisée par la classe d'applications qui tolèrent la présence de quelques régions vides dans la zone d'intérêt [WU05]. La redondance partielle est définie comme suit : Si $\bigcup_{j \in N(i)} S(j)$ peut couvrir une partie de $S(i)$, c'est à dire :

$\bigcup_{j \in N(i)} (S(j) \cap S(i)) \neq \emptyset$ et $\bigcup_{j \in N(i)} S(j) \not\supset S(i)$ alors le capteur i est partiellement redondant.

2.4. Classification des méthodes de détection de la redondance

Les méthodes que nous allons présenter dans cette section sont à l'origine intégrées avec des algorithmes d'ordonnancement d'activités, en tant qu'étape en amont du schéma d'ordonnancement.

L'ordonnancement d'activités dans un réseau de capteurs consiste à alterner les charges de façon à épuiser les nœuds équitablement. Pendant qu'une partie participe à l'application, les capteurs redondants sont dans un mode passif, économisant ainsi leur énergie.

Les algorithmes d'ordonnancement procèdent en deux étapes :

- Les capteurs déterminent leur redondance en exécutant une *règle de redondance*. Dans les schémas d'ordonnancement, le terme employé est plutôt *une règle d'éligibilité*;
- Ensuite, le schéma d'ordonnancement est appliqué aux capteurs redondants, pour les faire passer du mode actif au mode veille, ceci dans le but d'optimiser la consommation d'énergie afin de maximiser la durée de vie du réseau.

L'ordonnancement d'activités des capteurs doit toutefois préserver le but essentiel du réseau, en faisant en sorte que quel que soit l'état des capteurs la zone d'intérêt doit être couverte le plus complètement possible [HEF07, LI08]. De plus, l'efficacité d'un algorithme d'ordonnancement dépend largement de l'efficacité de l'algorithme de détection de la redondance, c'est pour cette raison que ces derniers visent à détecter un nombre maximum de capteurs redondants.

Etant donné que nous nous intéressons au problème de détection de la redondance, nous allons donc étudier les méthodes utilisées avec les algorithmes d'ordonnancement, et

proposer une classification de ces méthodes selon l'approche utilisée pour déterminer la redondance des capteurs. Nous distinguons deux approches, à savoir : l'approche géométrique et l'approche analytique. Dans chaque approche, nous avons également catégorisé les travaux proposés selon la technique employée pour la détection de la redondance des capteurs (Figure 2.1).

Méthodes de détection de la redondance dans les réseaux de capteurs sans fil

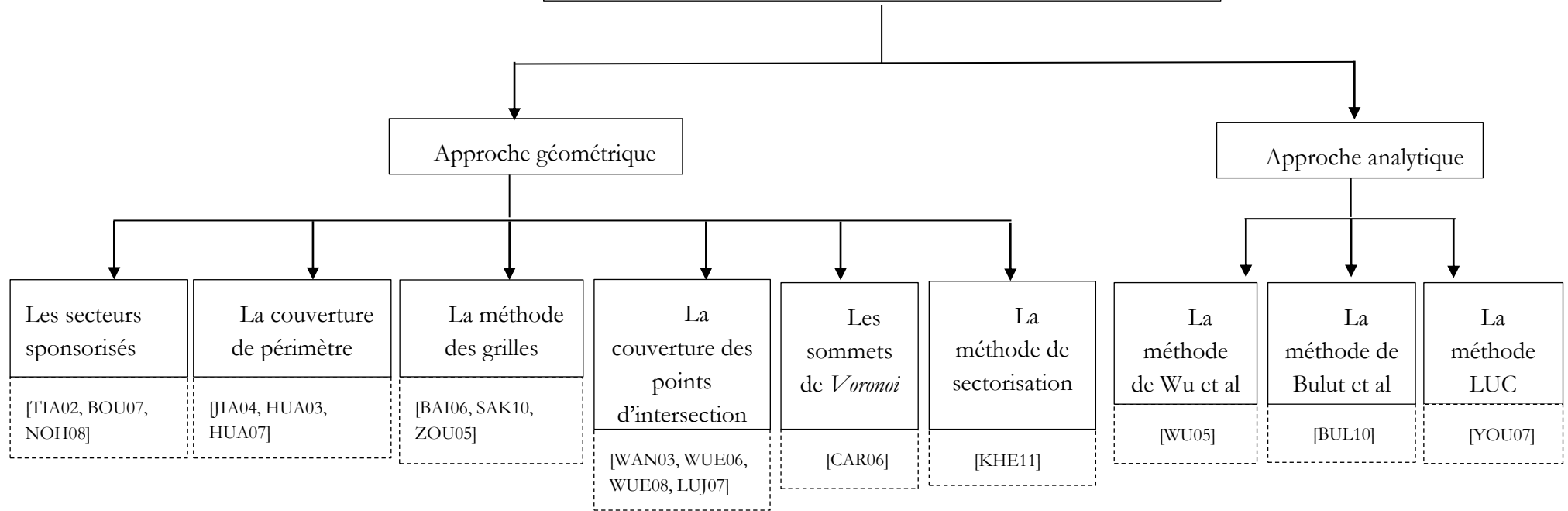


Figure 2.1. Classification des méthodes de détection de la redondance.

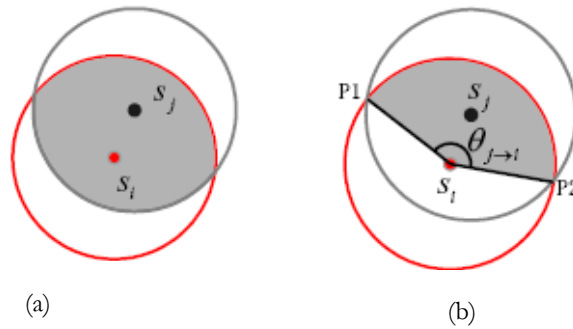
2.4.1. L'approche géométrique

Les méthodes basées sur l'approche géométrique requièrent la connaissance des informations de localisation des capteurs, et fondent leur analyse sur des calculs géométriques pour formaliser le problème de la détection de la redondance.

2.4.1.1. La méthode des secteurs sponsorisés

Tian *et al.* [TIA02] proposent le modèle des secteurs sponsorisés pour la détection des capteurs redondants. Dans ce modèle, un capteur s_j est appelé sponsor du capteur s_i si la distance qui les sépare est inférieure au rayon de surveillance R_s , autrement dit si $d(s_i, s_j) \leq R_s$.

La zone d'intersection des deux zones de surveillance des capteurs s_i et s_j représentée sur la figure 2.2 (a), sera plutôt représentée par un secteur comme indiqué sur la figure 2.2(b), car il est plus aisé de calculer la surface d'un secteur plutôt que la surface d'une forme elliptique.



(a) L'intersection du capteur s_i avec son sponsor s_j .

(b) Représentation du secteur sponsorisé.

Figure 2.2. Illustration du modèle des secteurs sponsorisés.

Le secteur sponsorisé du capteur s_j au capteur s_i est le secteur délimité par les rayons $s_i P_1$, $s_i P_2$ et l'arc P_1P_2 . Ainsi, l'aire du secteur sponsorisé sera représentée par son angle central $\angle P_1s_iP_2$ noté $\theta_{j \rightarrow i}$, et l'union de deux secteurs sera équivalente à fusionner deux angles centraux.

La règle de redondance avec les secteurs sponsorisés est comme suit :

Si l'union des secteurs sponsorisés des sponsors du capteur s_i atteint 2π , alors le capteur s_i est redondant.

Les auteurs dans [BOU07, NOH08] soulignent une limite de la méthode des secteurs sponsorisés dans le fait qu'elle considère seulement les voisins se trouvant dans la zone de couverture du capteur voulant évaluer sa redondance. De manière plus explicite, considérons le cas suivant :

- En supposant que le capteur s_1 veuille détecter sa redondance, seuls les voisins se trouvant à l'intérieur du rayon de surveillance R_s sont considérés. Les nœuds

situés à l'extérieur de la zone de surveillance mais se trouvant toujours dans la portée de communication du nœud s_1 sont ignorés, bien que ces nœuds contribuent à la redondance du capteur. La Figure 2.3 illustre le cas de deux nœuds voisins (s_2, s_4) et un nœud non sponsor s_3 . Ces trois capteurs couvrent complètement la zone de couverture du capteur s_1 , mais ce scénario n'est pas pris en compte par le modèle des secteurs sponsorisés.

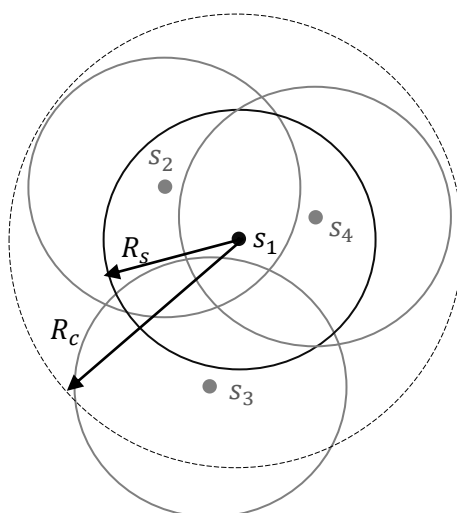


Figure 2.3. Un scénario ignoré par le modèle des secteurs sponsorisés.

Cette limite est due au fait que Tian *et al.* [TIA02] considèrent que $R_c = R_s$. C'est ainsi que Boukerche *et al.* [BOU07] étendent le rayon de communication jusqu'à deux fois le rayon de surveillance, et ce dans le double but de garantir que la couverture implique la connectivité du réseau [ZHA05], et afin d'améliorer les résultats réalisés par la méthode des secteurs sponsorisés, en incluant dans le calcul les nœuds voisins se trouvant en dehors de la zone de couverture, ces nœuds sont appelés *sponsors associés*.

2.4.1.2. La méthode de couverture de périmètre

La couverture de périmètre est utilisée pour la détection de la redondance. Nous avons distingué deux variantes de cette méthode, à savoir :

- Les méthodes qui se basent sur la valeur de la couverture de périmètre des voisins du capteur voulant évaluer sa redondance [HUA03] ;
- Les méthodes qui se basent sur la couverture de périmètre des segments des voisins [JIA04, HUA07].

Dans ce qui suit, nous allons présenter ces méthodes et expliciter leurs règles de redondance. Avant cela, nous définissons le concept de la couverture de périmètre et expliquons de quelle manière le périmètre couvert d'un capteur est défini.

a) Le périmètre couvert

Etant donné deux capteurs s_i et s_j , un point p sur le périmètre de s_i est couvert en périmètre par s_j si ce point est dans la zone de couverture du capteur s_j , c'est-à-dire que la distance entre p et s_j est inférieure ou égale à R_s . Ainsi, le capteur s_i est couvert en périmètre si tous les points de son périmètre sont couverts par au minimum un autre capteur.

En supposant que les deux capteurs s_i et s_j soient positionnés en (x_i, y_i) et (x_j, y_j) respectivement. Le calcul du périmètre couvert du capteur s_i par le capteur s_j se fait comme suit (Figure 2.4) :

- Calcul de l'angle de couverture : $\alpha = \angle s_j s_i P_2 = \angle P_1 s_i s_j = \arccos\left(\frac{d(s_i, s_j)}{2R_s}\right)$; (2.1)

- Calcul de l'angle entre la droite $\overline{s_i s_j}$ et l'axe des x : $\theta = \arctan\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}$; (2.2)

Détermination de l'arc de s_i couvert par s_j : Il est compris entre l'angle $\theta - \alpha$ et $\theta + \alpha$.

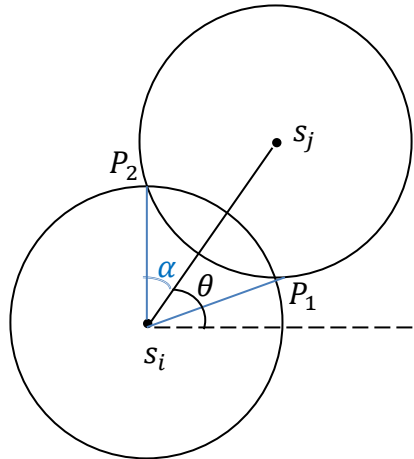


Figure 2.4. Calcul du segment de périmètre de s_i couvert par s_j .

Donc, l'arc de s_i compris dans l'intervalle $[\theta - \alpha, \theta + \alpha]$ est couvert en périmètre par s_j .

b) La méthode de Jiang et al

Les auteurs utilisent la couverture de périmètre pour la détection de la redondance, et introduisent également un nouveau concept permettant de réduire le cout induit par la communication entre les nœuds voisins du capteur voulant évaluer sa redondance, c'est le concept des *voisins effectifs*.

La méthode de Jian *et al.* [JIA04] est motivée par les insuffisances de la méthode des secteurs sponsorisés. Ainsi, les auteurs soulignent le point suivant : l'aire du secteur sponsorisé est toujours inférieure à l'intersection formée par les cercles de couverture. De ce fait, une partie de cette intersection n'est pas considérée dans le calcul de la

redondance.

Afin de remédier à cette lacune, Jian *et al.* [JIA04] n'utilisent plus la valeur de l'angle central mais se basent plutôt sur l'étendue du segment délimité par l'angle central pour le calcul de la redondance. Ils incluent également les voisins se trouvant en dehors du rayon de surveillance du capteur s_i . La méthode se base sur deux critères, le premier repose sur la couverture de périmètre du capteur s_i , et le second critère est exécuté pour décider de la redondance de s_i .

Dans ce qui suit, nous allons présenter ces deux critères mais avant cela nous définissons le concept des voisins effectifs utilisé par cette méthode.

- Le concept des voisins effectifs

Une conséquence de la densité des réseaux de capteurs, est qu'un capteur possède beaucoup de voisins, et l'intersection entre un capteur s_i et un voisin pourrait être complètement incluse par l'intersection entre s_i et un autre voisin. L'intersection entre s_i avec le premier voisin pourrait être ignoré dans le calcul de la redondance. De ce fait, les auteurs introduisent le concept des *voisins effectifs*. Ainsi, il devient suffisant d'interroger seulement les voisins effectifs pour décider de la redondance d'un capteur.

La Figure 2.5 illustre le concept des voisins effectifs. En supposant que s_{j1} et s_{j2} sont les voisins de s_i , et leurs cercles de couverture coupent s_i en P_{j11} , P_{j12} et P_{j21} , P_{j22} respectivement. Si le segment $P_{j11}P_{j12}$ est complètement inclus dans $P_{j21}P_{j22}$, alors s_{j1} n'est pas un voisin effectif et s_{j2} est un voisin effectif.

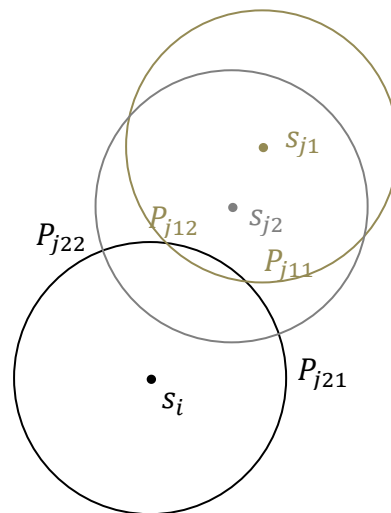


Figure 2.5. Représentation des voisins effectifs [JIA04].

- L'algorithme de redondance

Jian *et al.* [JIA04] désignent par $\theta_{j \rightarrow i}$ l'étendue de l'angle central de l'arc du capteur s_i couvert par s_j , tel que $\theta_{j \rightarrow i} = [\theta - \alpha, \theta + \alpha]$ (Figure 2.4).

Le premier critère défini par les auteurs stipule que si $\bigcup_{j \in N(i)} \theta_{j \rightarrow i} \neq [0, 2\pi]$, alors la zone de couverture de s_i n'est pas complètement couverte par ses voisins, et donc il n'est pas redondant. Cette première condition est vérifiée localement au niveau du capteur voulant évaluer sa redondance, et requiert seulement la connaissance des informations de localisation des nœuds voisins. Par conséquent, aucune autre communication entre les voisins n'est nécessaire.

Ce premier critère ne permet pas de décider de la redondance d'un capteur. De ce fait, les auteurs définissent une deuxième condition, qui précise que si le segment de chaque voisin effectif se trouvant à l'intérieur de la zone de surveillance du capteur s_i est couvert en périmètre par les autres voisins effectifs de s_i , alors le capteur s_i est redondant.

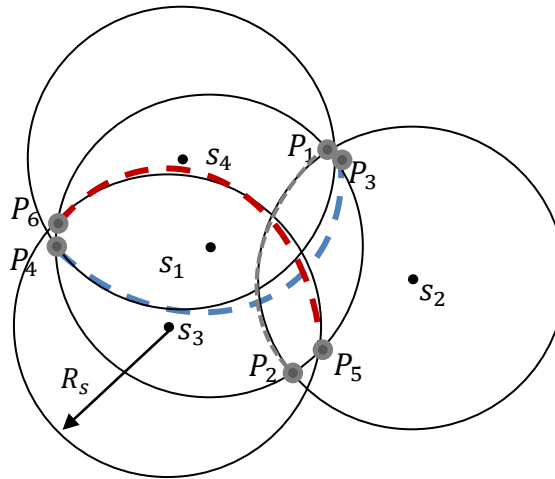


Figure 2.6. La couverture de périmètre pour la détection de la redondance [WAN10].

Sur la Figure 2.6, le capteur s_1 est redondant. En effet, le segment $P_1 P_2$ du périmètre de couverture du capteur s_2 et se trouvant dans la zone de couverture du capteur s_1 est couvert par les capteurs s_3 et s_4 (le segment $P_5 P_6$ est couvert par s_2 et s_4 , et le segment $P_3 P_4$ est couvert par s_2 et s_3).

c) Les méthodes de Huang et al

Huang *et al.* [HUA03] ont centré leur étude sur le problème de couverture d'une zone d'intérêt, et ont proposé une solution qui consiste à vérifier la couverture du périmètre de la zone de surveillance de chaque capteur pour déterminer la couverture de la zone d'intérêt. Les auteurs proposent, ensuite d'exploiter la valeur de la couverture de périmètre pour déterminer la redondance des capteurs.

Plus tard, Huang *et al.* [HUA07] proposent une autre règle de détection de la

redondance qui se base toujours sur le calcul du périmètre. Cette fois, le capteur voulant détecter sa redondance vérifie la couverture de périmètre des segments se trouvant à l'intérieur de sa zone de surveillance.

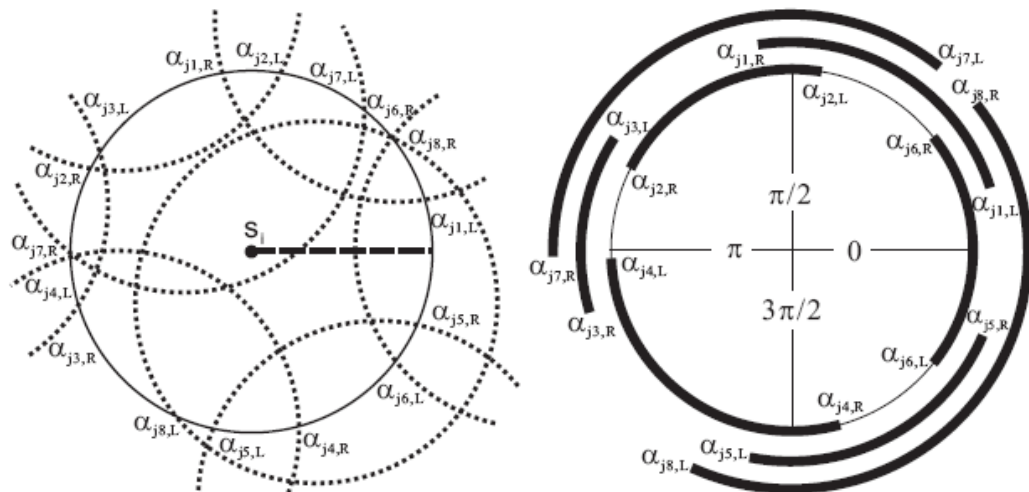
Dans ce qui suit, nous allons expliciter de quelle manière la couverture de périmètre est calculée, et préciser les deux règles de redondance proposées.

- **L'algorithme de calcul de la couverture de périmètre**

L'algorithme qui détermine la couverture du périmètre de s_i se déroule de la sorte :

- Pour chaque nœud s_j , tel que $d(s_i, s_j) < 2R_s$: calculer l'angle de couverture α_j , et déterminer le périmètre couvert par s_j représenté entre les angles $[\alpha_{j,L}, \alpha_{j,R}]$.
- Pour chaque voisin s_j de s_i , placer les point $\alpha_{j,L}$ et $\alpha_{j,R}$ sur un segment compris entre $[0, 2\pi]$ dans un ordre croissant, en identifiant chaque point de cette liste comme étant l'extrémité droite ou gauche de l'intervalle de couverture.
- Parcourir tous les éléments du segment $[0, 2\pi]$ de gauche à droite et déterminer la couverture de s_i .

A chaque fois qu'un élément $\alpha_{j,L}$ est rencontré sur la liste, la valeur de la couverture de périmètre doit être incrémentée de 1, et quand un élément $\alpha_{j,R}$ est rencontré la valeur de la couverture de périmètre est décrétementée. De cette manière, on évalue la couverture de périmètre de chaque capteur.



(a) Représentation de la couverture de périmètre du capteur s_i par ses voisins.



(b) Calcul de la couverture de périmètre du capteur s_i .

Figure 2.7. L'évaluation de la couverture de périmètre [HUA07].

La Figure 2.7(a) illustre la couverture du capteur s_i par ses voisins représentés par des pointillés. En transposant les bornes gauche et droite de chaque arc couvert sur le segment compris entre $[0, 2\pi]$ comme indiqué sur la figure 2.7(b), on peut déterminer que s_i est couvert en périmètre.

- **La redondance basée sur la couverture de périmètre des voisins**

La règle de redondance basée sur la couverture de périmètre est comme suit :

Un nœud s_i est redondant si le périmètre de la zone de surveillance de chaque voisin de s_i est toujours couvert même en supprimant le nœud s_i .

Alors, s_i communique avec ses voisins et leur demande d'évaluer leur couverture de périmètre sans qu'il ne soit pris en considération dans le calcul. Si la valeur de leur couverture de périmètre ne change pas, donc s_i est un nœud redondant.

La solution d'évaluation de la couverture de périmètre proposée par Huang *et al.* [HUA03], exige que chaque capteur communique avec tous les N nœuds distants au maximum de $2R_s$. La complexité de la solution est $O(N \log N)$. Toutefois, pour calculer sa redondance, un nœud s_i doit demander à ses voisins de réévaluer leur couverture de périmètre sans le considérer, donc un nœud doit calculer sa couverture de périmètre N fois, ce qui augmente la complexité de l'algorithme à $O(N^2 \log N)$.

- **La règle de redondance basée sur la couverture de périmètre des segments**

Contrairement aux travaux existants sur la couverture de surface, Huang *et al.* [HUA07] n'établissent aucune relation entre le rayon de communication R_c et le rayon de couverture R_s . Si un capteur s_x veut déterminer sa redondance, il vérifie la couverture de périmètre des segments de chacun de ses voisins. Soit s_y un voisin direct de s_x , i.e. $d(s_x, s_y) < 2R_s$, alors le segment $P(s_x, s_y)$ est le périmètre de la zone de surveillance de s_y qui est couvert par s_x tel qu'indiqué sur la Figure 2.8. Le capteur s_x calcule alors la couverture du segment $P(s_x, s_y)$. Si ce segment est couvert, le capteur s_x est appelé capteur *candidat* pour le nœud s_y . Dans ce cas, la règle de redondance est comme suit :

Si un capteur s_x est candidat de chacun de ses voisins directs, alors, il est redondant.

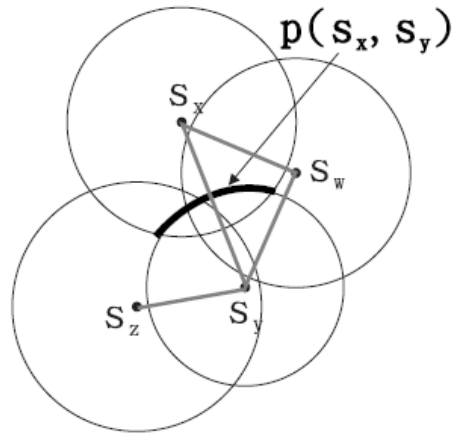


Figure 2.8. Le capteur s_x est un candidat du capteur s_y .

En revanche, vu qu'il n'y a pas de relation entre R_c et R_s le capteur s_x doit connaître également les voisins de s_y pour déterminer la couverture du segment $P(s_x, s_y)$. Ces voisins sont les voisins à deux saut du nœud s_x contribuant à la couverture de $P(s_x, s_y)$, tel que le nœud s_z .

2.4.1.3. La méthode en grilles

Elle constitue une démarche simple de détection de la redondance des capteurs, dans laquelle chaque capteur maintient une liste des points de la grille se trouvant dans sa zone de couverture. Si ces points sont couverts par ses voisins actifs, donc le capteur est redondant.

Comme indiqué sur la Figure 2.9, les points de la grille représentés par des cercles gras sont couverts par le capteur s_1 , et ces mêmes points sont également couverts par ses voisins. Le capteur s_1 est redondant si ses voisins s_2 , s_3 , s_4 et s_5 sont actifs.

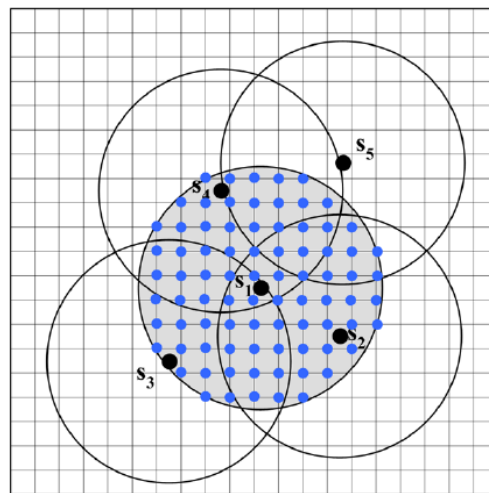


Figure 2.9. Utilisation de l'approche en grilles pour la détection de la redondance [WAN10].

Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques travaux qui se basent sur la structure en grilles de la zone d'intérêt pour la détection de la redondance.

a) La méthode de Bai et al

Bai *et al.* [BAI06] détectent les capteurs redondants dans un réseau hétérogène. Pour cela, ils divisent la surface en grilles pour couvrir la zone d'intérêt, comme illustré sur la figure 2.10. La valeur de d est assez petite tel qu'il y ait au minimum un point de la grille appartenant à la zone de surveillance interne de A , notée ISA (Inner Sensing Area). Par exemple, le ISA du capteur A est représenté par les huit points de la grille se trouvant dans la zone de surveillance de A .

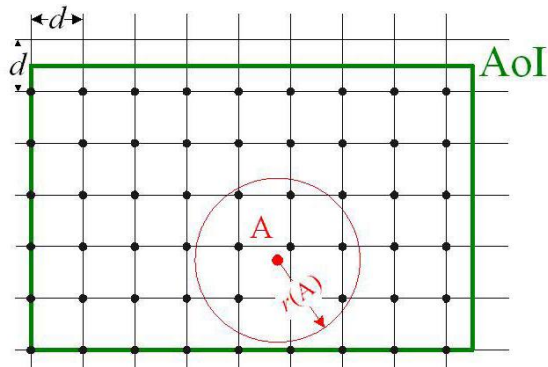


Figure 2.10. Représentation en grilles de la zone d'intérêt [BAI06].

Il s'agit alors de vérifier que chaque point de la grille appartenant à la zone de surveillance du nœud A est couvert par au moins un nœud voisin, et ce en comparant la distance qui sépare chaque point de la grille des capteurs voisins, si cette distance est inférieure au rayon de surveillance R_S alors le point est couvert.

b) La méthode SCRC

Sakib *et al.* [SAK10] proposent la méthode SCRC (Self Calculated Redundancy Check) qui représente la zone d'intérêt par l'ensemble $Q = \{q_0, q_i, \dots, q_m\}$, et le capteur est représenté par l'ensemble des points K_i tel que $K_i \subset Q$, ces points sont appelés points de détection (sensing points).

La particularité de cette méthode est qu'elle introduit le concept de la v -redondance, qui stipule que si un point q_i est couvert par au minimum $v + 1$ nœuds alors q_i est v -redondant. De cette manière, un capteur est redondant si tous les points ($K_i / K_i \subset Q$) de sa zone de surveillance sont v -redondants.

c) La méthode de Zou et al

Dans leur protocole de sélection des capteurs actifs centré sur la couverture [ZOU05], CCANS (Coverage-Centric Active Nodes Selection), les auteurs adoptent le modèle de couverture exponentielle. Ils se sont basés sur ce modèle pour évaluer la redondance des capteurs, en associant à chaque point de la grille une valeur de redondance de couverture obtenue avec la fonction de couverture exponentielle.

La couverture est représentée par la probabilité de détection d'une cible, située au point de la grille g_i , par un capteur s_k . Cette probabilité est notée p_i^k .

$$p_i^k = \begin{cases} e^{-\alpha d_i^k} & \text{si } d_i^k \leq R_s \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.3)$$

Tel que α représente les caractéristiques physiques de l'unité de captage, et d_i^k représente la distance entre le point de la grille g_i et le capteur s_k .

La formule suivante permet de dériver la probabilité de détection d'un point de la grille par un ensemble de capteurs :

$$p_i(S_i) = 1 - \prod_{s_k \in S_i} (1 - p_i^k) \quad (2.4)$$

S_i correspond à l'ensemble des nœuds qui peuvent détecter le point de la grille g_i , c'est-à-dire que $\forall s_k \in S_i, d_i^k \leq R_s$.

- Evaluation de la redondance de couverture

Les auteurs définissent la redondance de couverture ponctuelle ε_i^k du capteur s_k au niveau du point de la grille g_i , comme suit :

$$\varepsilon_i^k = \frac{p_i(S_i \setminus \{s_k\})}{p_i(\{s_k\})} \quad (2.5)$$

ε_i^k représente le ratio de couverture de tous les nœuds qui peuvent détecter g_i à l'exception de s_k , à la couverture fournie par s_k seulement. Lorsque $\varepsilon_i^k = 0$, aucun nœud dans $S_i \setminus \{s_k\}$ ne contribue à la couverture de g_i , seul s_k peut détecter le point de la grille g_i .

Afin de déterminer la redondance d'un capteur, un seuil de redondance de couverture est fixé par l'application, noté ε_{th} . Le capteur calcule la valeur de la redondance ε_i^k pour chaque point de la grille appartenant à sa zone de couverture A_k . Dans ce cas, le capteur s_k est redondant si $\varepsilon_i^k \geq \varepsilon_{th}, \forall g_i \in A_k$.

2.4.1.4. La méthode de couverture des points d'intersection

Wang *et al.* [WAN03] se basent sur la couverture des points d'intersection entre les voisins d'un nœud pour déterminer sa redondance. L'intersection des zones de couverture de deux capteurs créent deux points d'intersection sur leurs périmètres de couverture. Les points d'intersection considérés par cette méthode sont les points se trouvant à l'intérieur de la zone de couverture du capteur voulant évaluer sa redondance.

Comme indiqué sur la Figure 2.11, le point P_1 est créé par l'intersection des deux capteurs s_2 et s_3 , cependant les points se trouvant sur le périmètre des capteurs qui sont à l'origine de l'intersection ne sont pas considérés couverts par ces capteurs. Pour cela, le point P_1 n'est pas couvert par les capteurs s_2 et s_3 , mais il est couvert par s_4 . Ainsi, P_1 est considéré comme un point d'intersection couvert de la zone de couverture du capteur s_4 .

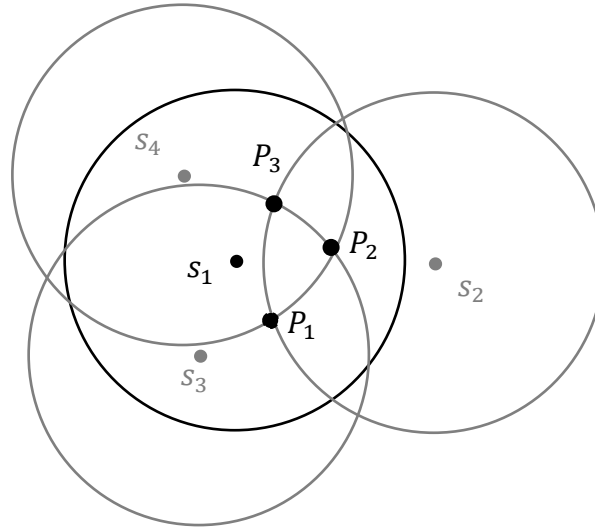


Figure 2.11. La couverture des points d'intersection.

La règle de redondance de la méthode de couverture des intersections est comme suit :

Si tous les points d'intersection se trouvant dans la zone de couverture du capteur S sont couverts, alors il est redondant.

Sur la Figure 2.11, il y a trois points d'intersection (P_1 , P_2 et P_3) dans la zone de couverture du capteur s_1 . Ces points sont tous couverts (P_2 est couvert par s_3 et P_3 est couvert par s_2), et donc s_1 est un capteur redondant.

Bien que l'algorithme de Wang *et al.* [WAN03] évalue avec précision la redondance de chaque nœud, la complexité des calculs est $O(n^3)$, tel que n est le nombre des voisins se trouvant à une distance inférieure à $2R_s$ du nœud calculant sa redondance. Par conséquent, Wueng *et al.* [WUE06] proposent l'algorithme EKE (Efficient K-Coverage Eligibility) qui permet de réduire la complexité des calculs en considérant de vérifier la couverture de quelques points d'intersection *candidats* au lieu de tous les points se trouvant dans la zone de couverture du capteur calculant sa redondance. Pour cela, ils classifient l'ensemble des voisins d'un nœud en deux ensembles appelés $R_voisins$ et $2R_voisins$, qui correspondent respectivement à l'ensemble des voisins du nœud i distant de R et à l'ensemble des voisins du nœud i distant de $2R$ tel que R est le rayon de couverture du nœud i .

De cette façon, si un nœud possède des $R_voisins$ et des $2R_voisins$, sa redondance peut être déterminée en évaluant le degré de couverture des points d'intersection entre les $R_voisins$ seulement. Ainsi, la complexité des calculs est limitée au nombre des $R_voisins$. Toutefois, l'évaluation du degré de couverture des points d'intersection des $R_voisins$ s'avère ne pas être suffisante pour évaluer la redondance d'un nœud, car d'autres cas d'intersection se présentent. Par conséquent, l'algorithme EKE n'évalue pas avec précision la redondance des capteurs et ne permet pas de préserver la couverture de la

zone d'intérêt [WUE08]. Pour remédier à cette lacune, les auteurs proposent l'algorithme AKCE (Accurate K-Coverage Eligibility) basé sur la découverte d'une petite *surface de décision* à l'intérieur de la zone de couverture de chaque capteur [WUE08]. Cette surface correspond à la zone dont les segments ne sont pas k -couverts par ses $R_{voisins}$ (k est le degré requis par l'application). Ainsi, si une telle surface existe tel qu'un point d'intersection de la surface possède un degré de couverture inférieure à K alors le nœud n'est pas redondant.

Jun *et al.* [LUJ07] étendent la technique de couverture des points d'intersection proposée dans [WAN03] pour la détection de la redondance de capteurs hétérogènes, c'est-à-dire des capteurs ayant des rayons de couverture R_s différents. Pour cela ils définissent, en plus des points d'intersection entre les capteurs, des points *échantillons* sur le périmètre de couverture des nœuds se trouvant à l'intérieur de la zone de couverture du capteur voulant évaluer sa redondance. Par exemple, sur la Figure 2.12 les points v et w sont des points échantillons. Il s'agit alors de vérifier également la couverture de ces points échantillons pour déterminer la redondance du capteur.

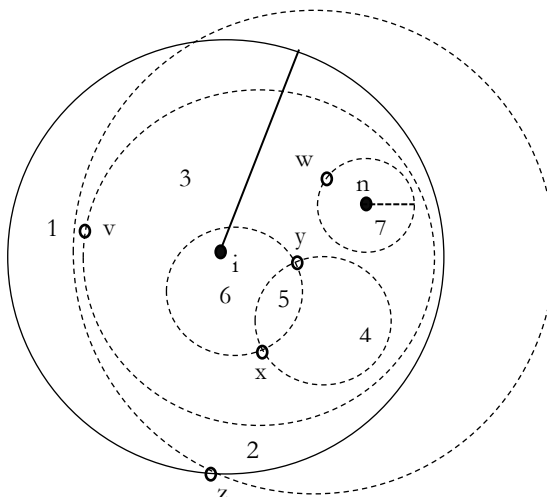


Figure 2.12. Capteurs hétérogènes.

2.4.1.5. La méthode RSE

Carbunar *et al.* [CAR06] utilisent le concept des diagrammes *Voronoi* pour détecter la redondance d'un capteur, et formalisent le problème d'élimination des nœuds redondants (RSE- Redundant Sensor Elimination) en proposant une solution basée sur le pavage de *Voronoi*.

Le diagramme de *Voronoi*, parfois appelé *tessellation de Dirichlet*, est une des structures géométriques les plus importantes en pratique. Il peut être informellement défini comme étant un partitionnement de l'espace en régions, où chacune de ces régions est le lieu de points de \mathbb{R}^2 le plus proche d'un objet donné P que de tout autre objet Q dans \mathbb{R}^2 [BAE04, DUD92].

Soit S un ensemble de n nœuds s_1, s_2, \dots, s_n dans \mathbb{R}^2 , $1 \leq i \leq n$. Le diagramme de

Voronoi de l'ensemble S , noté $Vor(S)$, représente la subdivision de l'espace en n cellules, une pour chaque nœud, tel que tous les points de la cellule correspondant à un nœud s_i sont plus près de ce nœud que n'importe quel autre nœud de S [CAR06] :

$$Cell(s_i) = \bigcap_{j=1, j \neq i}^n \{x \in \mathbb{R}^2 \mid dist(s_i, x) \leq dist(s_j, x)\}$$

$$Vor(S) = \bigcup_{s_i \in S} Cell(s_i)$$

Le diagramme de *Voronoi* d'une collection de nœuds partitionne l'espace en polygones. Les côtés d'un polygone de *Voronoi* sont définis par les bissectrices verticales des lignes reliant le nœud enveloppé par ce polygone aux autres nœuds voisins. La Figure 2.13 montre un exemple d'un polygone de diagramme de *Voronoi*.

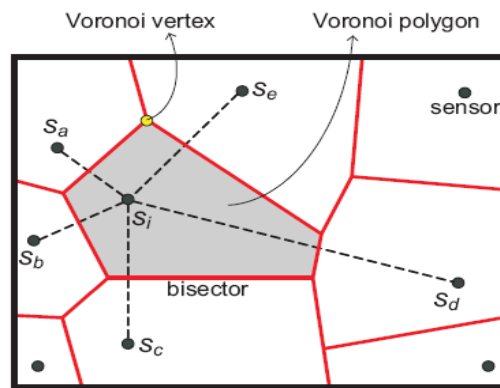


Figure 2.13. Diagramme de *Voronoi*.

- La frontière commune à deux cellules de Voronoi s'appelle une *arête* de Voronoi.
- Les extrémités des arêtes sont les *sommets* de Voronoi.
- Un site est voisin d'un autre site si les cellules de Voronoi de ces deux sites partagent une arête.

Nous citons les notations suivantes qui sont utilisées pour définir la règle de redondance d'un nœud avec la méthode RSE :

- Le digramme 2-Voronoi d'un capteur s est le diagramme Voronoi des voisins de s quand s est exclu. Sur la Figure 2.14, les lignes en bleu forment le diagramme 2-Voronoi du capteur s ;
- Les sommets 2-Voronoi (2-VV) du capteur s sont les sommets des régions 2-Voronoi de s ;
- Un point d'intersection 2-Voronoi (2-VIP) d'un nœud s est l'intersection entre une arête de la région 2-Voronoi de s et le périmètre de la zone de surveillance de s .

Comme illustré sur la Figure 2.14, le nœud s possède deux $2-VV$ ($2-V_1, 2-V_2$) et quatre $2-VIP$ ($2-VIP_1, 2-VIP_2, 2-VIP_3, 2-VIP_4$).

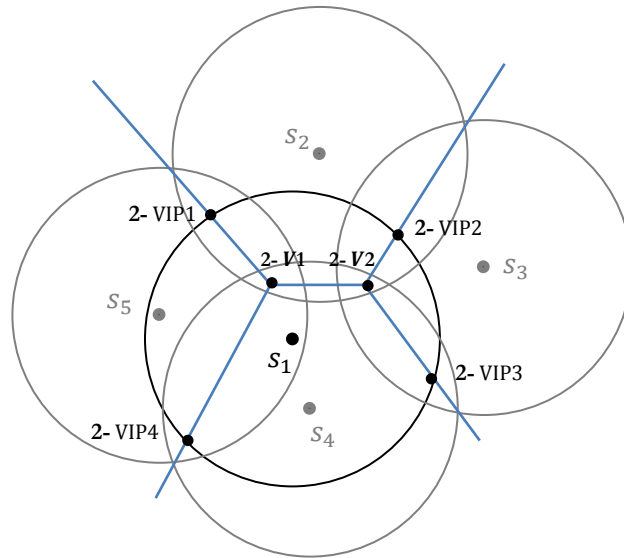


Figure 2.14. Représentation des sommets et des intersections Voronoi

La règle de redondance de la méthode RSE est comme suit :

Un capteur s est redondant si et seulement si tous ses $2-VV$ et $2-VIP$ sont couverts par ses voisins Voronoi.

Lors de la détection de sa redondance, le capteur s construit d'abord son diagramme 2-Voronoi, et vérifie ensuite si ses $2-VV$ et $2-VIP$ sont couverts par les voisins Voronoi qui les génèrent. Comme indiqué sur la Figure 2.14, le capteur s_1 est redondant étant donné que $2-VV_1$ et $2-VIP_{1,2,3,4}$ sont couverts par ses voisins Voronoi.

2.4.1.6. La méthode de sectorisation

Khedr *et al.* [KHE11] proposent l'algorithme de découverte de la redondance (*the redundant discovery algorithm*), qui détermine la redondance d'un capteur en effectuant une sectorisation de sa zone de couverture en six secteurs et en testant la couverture de chaque secteur. La règle de redondance de cette technique est comme suit :

Un capteur est redondant si ses secteurs ($sect_j \in \{1,2,3,4,5,6\}(s_i)$) sont couverts par la zone de surveillance de ses voisins.

En divisant la zone de surveillance en six secteurs égaux d'un angle de 60° , les auteurs ont prouvé qu'un secteur est couvert s'il contient un capteur à l'intérieur. Toutefois, il se peut que le secteur soit couvert même s'il ne contient pas de capteur à l'intérieur, dans ce cas il suffit de vérifier la couverture de la frontière du secteur (i.e. la distance entre chaque point de la frontière et le nœud voisin est inférieure à R_s). Si les points frontières du secteur sont couverts par le même nœud, alors le secteur est couvert par ce nœud. Sinon, le secteur est divisé en deux sous-secteurs égaux et les mêmes étapes sont répétées jusqu'à atteindre un secteur avec un angle limite.

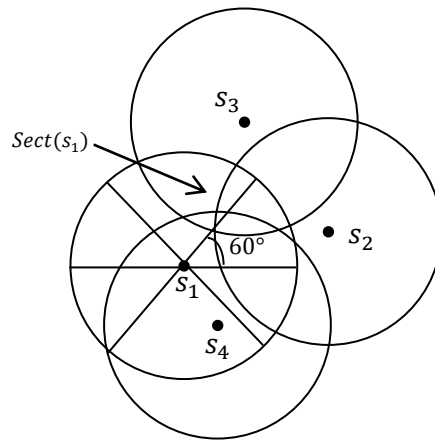


Figure 2.15. Représentation de la couverture des secteurs.

La découverte de la redondance se base sur la couverture des secteurs. L'algorithme de découverte de la redondance est exécuté par chaque nœud et passe par trois phases :

Phase 1 : le nœud envoie un message à ses voisins contenant sa position ;

Phase 2 : Le nœud divise sa zone de surveillance en six secteurs ;

Phase 3 : Pour chaque secteur, il considère qu'il est couvert s'il a un capteur à l'intérieur, sinon le nœud exécute les étapes suivantes :

- Si les points frontières du secteur sont couverts par le même nœud, alors le secteur est couvert par ce nœud ;
- Sinon, les étapes suivantes sont répétées jusqu'à ce que l'angle du secteur atteigne un seuil :
 - i. Le secteur est divisé en deux sous-secteurs égaux ;
 - ii. La couverture des points de la frontières du sous-secteur est vérifiée ;
 - iii. Si tous les points de la frontière sont couverts, retourner à (i). Sinon le nœud n'est pas redondant.

2.4.2. L'approche analytique

Les méthodes basées sur l'approche analytique n'utilisent aucune information de localisation pour la détection de la redondance, et ne requièrent pas non plus la connaissance des informations directionnelles ni la distance séparant les capteurs. Elles se basent seulement sur le nombre de voisins à un saut du capteur voulant évaluer sa redondance, et assument l'existence d'un mécanisme qui permet aux nœuds de connaître leur nombre de voisins à un saut [WU05, BUL10], par exemple en envoyant des messages *bello* contenant seulement l'identifiant des nœuds [CHO04].

Ces méthodes se basent sur un modèle de calcul probabiliste pour décrire la redondance des capteurs. L'utilisation du calcul probabiliste permet seulement d'estimer la redondance partielle des capteurs.

2.4.2.1. La méthode de Wu *et al*

Les auteurs dans [WU05] introduisent une formule simple pour estimer la redondance des capteurs, en définissant une borne inférieure et supérieure de la probabilité d'une redondance complète d'un capteur. Ils estiment également la probabilité d'une redondance partielle.

Dans ce qui suit, nous formulons le problème de redondance de cette méthode :

Wu *et al.* [WU05] reprennent le modèle des secteurs sponsorisés proposé par Tian *et al.* [TIA02] pour formaliser le problème de détection de la redondance. Ainsi, pour estimer la redondance complète, ils formulent le problème de la sorte : A est l'événement que S soit complètement couverte par les S(i) :

- Quelle est $\Pr \{A\}$?

$$1 - n0,609^{-n} \leq \Pr\{A\} \leq 1 - n0,609^{-n+1} + \varepsilon, \text{ avec } \varepsilon = \frac{n(n-1)}{2}(0,276)^{-n-1} \quad (2.6)$$

Les auteurs [WU05] prouvent que S est complètement couverte par les zones de surveillance S(i) de ses voisins, si et seulement si la première intersection entre le périmètre de S(i) et le périmètre de S est couverte par S(j) (j≠i). En d'autres termes, comme indiqué sur la Figure 2.16 les secteurs sponsorisés des nœuds X_i doivent se chevaucher pour couvrir complètement S.

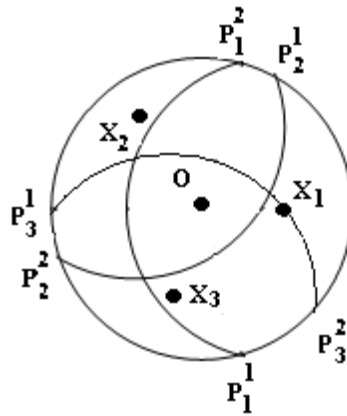


Figure 2.16. Modèle idéal d'une redondance complète.

Le problème de la redondance partielle est formulé comme suit :

Quel est le pourcentage de la zone de surveillance de O qui est couvert par ses n voisins ? Ce pourcentage n'est pas moins que :

$$1 - n0,609^{-n} - \left(\frac{n}{6} - 0,109\right) \cdot 0,109^{-n-1} \quad (2.7)$$

Le Tableau 2.1 présente les résultats numériques obtenus à partir des deux formules ci-dessus :

Nombre de voisins	Probabilité d'une redondance complète	Pourcentage de la surface redondante (\geq)
5	32.2% - 37.01%	91.62%
7	64.29% - 65.21%	96.89%
9	82.97% - 83.09%	98.85%
11	$\approx 92.28\%$	99.57%

Tableau 2.1. Résultats numériques des formules proposées [WU05].

Les résultats obtenus avec la redondance complète ne sont pas satisfaisants : un nœud a besoin de 11 voisins pour avoir une probabilité de 90% d'être complètement redondant, ce qui est assez coûteux. Les résultats obtenus avec la deuxième formule permettent de réduire la densité du réseau de manière considérable, car la redondance complète n'est pas exigée. En effet, si 90% de la zone de surveillance doit être couverte, seuls 5 voisins sont nécessaires.

Les deux formules donnent une bonne heuristique pour l'estimation du nombre de voisins nécessaires pour obtenir une certaine redondance.

2.4.2.2. La méthode de Bulut *et al*

Cette méthode estime la redondance des capteurs en calculant le ratio $P_n(i)$ du capteur i couvert par ses n voisins [BUL10]. Les auteurs estiment qu'en connaissant seulement le nombre de ses voisins, un capteur est en mesure de calculer $P_n(i)$. Dans ce qui suit, nous allons expliciter de quelle manière ce ratio est calculé :

En considérant un point P se trouvant à l'intérieur de la zone de couverture du capteur i , tel que P est à une distance x du centre de i . Afin que P soit couvert par un capteur $j \in N_i$, le capteur j doit se trouver dans la zone d'intersection des deux cercles centrés en i et P , cette zone est notée $A(x)$.

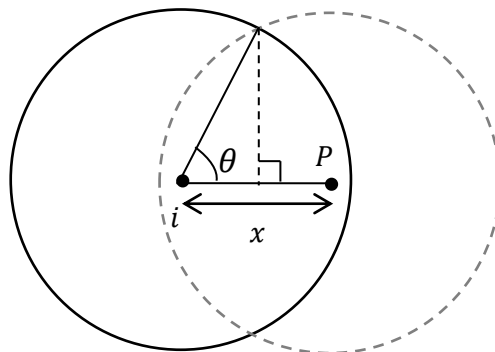


Figure 2.17. Représentation du calcul du ratio $P_n(i)$ [BUL10].

La probabilité que le point P soit couvert par le capteur j est $A(x) / \pi$, avec $A(x) = 2\theta - \sin 2\theta$, $\theta = \arccos \frac{x}{2}$ et $R_s = 1$. En incluant tous les points P de la zone de couverture du capteur i , $P_1(i)$ devient :

$$P_1 = \int_0^1 2\pi x \frac{A(x)}{\pi} dx = \frac{8}{\pi} \int_{\pi/3}^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta (2\theta - \sin 2\theta) d\theta = 0,586 \quad (2.8)$$

S'il y a n voisins à un saut, alors :

$$P_n = \int_0^1 2\pi x (1 - (1 - \frac{A(x)}{\pi})^n) dx \quad (2.9)$$

Lorsque $n = 2, 3, 4, 5, 6$ la formule (2.9) donne les résultats suivants : 0.808, 0.906, 0.952, 0.974, 0.986 .

De cette façon, si par exemple $N_i = 4$, le capteur est supposé avoir 95.2% de sa zone de couverture couverte par ses voisins.

2.4.2.3. La méthode LUC

Younis *et al.* [YOU07] proposent la méthode LUC (Location Unware Coverage) qui se base sur quatre tests pour vérifier la redondance d'un capteur. Deux tests (RTest-D1 et RTest-D2) sont géométriques, tandis que les deux autres tests (RTest-H1 et RTest-H2) sont destinés à un déploiement dense. Pour déterminer la redondance d'un nœud v , la méthode exploite les distances séparant ce nœud de ses voisins. Les auteurs assument qu'un nœud peut estimer les distances le séparant de ses voisins à un saut en utilisant quelques approches connues, telle que la force du signal RF reçu [BAH00]. Chaque nœud du réseau peut avoir trois états : actif, passif, indécis. Les tests de la méthode LUC sont les suivants :

- **RTest-D1** : Un nœud v est redondant s'il existe trois nœuds v_j , tel que (1) v_j sont les voisins à un saut du nœud v ($v_j \in N(v, R_s)$), (2) les nœuds v_j sont actifs, (3) les nœuds v_j sont deux à deux voisins, (4) le nœud v se trouve à l'intérieur du triangle formé par les nœuds v_j , (5) la frontière de la zone de couverture du nœud v est couverte par les frontières des nœuds v_j .
- **RTest-D2** : Un nœud v est redondant s'il existe trois nœuds v_j , tel que (1) $v_j \in N(v, 0.618 * R_s)$, (2) les nœuds v_j sont actifs, (3) les nœuds v_j ne sont pas deux à deux voisins (i.e. $v_j \notin \cup_{i \neq j} N(v_i, R_s)$).
- **RTest-H1** : Un nœud v est redondant si (1) il existe des nœuds actifs v_j tel que $j \geq 4$, (2) chaque voisin de v est un voisin d'un ou plusieurs nœuds v_j .
- **RTest-H2** : Un nœud v est redondant si le nœud v a au moins γ voisins actifs ou indécis, tel que (1) ses autres voisins sont au moins voisin avec un ou plusieurs nœuds

parmi ces γ voisins (i.e. $N(v, R_s) \subseteq \bigcup_{i=1}^{\gamma} N(v_i, R_s)$), (2) le nœud v a l'énergie minimale parmi ses γ voisins.

La méthode commence par une découverte de voisinage dans laquelle chaque nœud estime la distance le séparant de ses voisins à un saut. La procédure de vérification de la redondance se déroule selon l'ordre cité ci-dessus. Si le résultat d'un test détermine que le nœud est redondant, la procédure de vérification est terminée et le nœud passe à l'état passif. Par contre, si tous le résultat de tous les tests est négatif le nœud n'est pas redondant (état actif).

Le ratio de succès des deux premiers tests est seulement de 60% tel qu'indiqué par les simulations effectuées dans [YOU07]. Etant donné que les deux autres tests sont destinés à un réseau dense, la méthode LUC ne peut pas détecter tous les capteurs redondants du réseau. De plus, l'imprécision inhérente à l'estimation des distances peut influencer sur les performances du protocole.

2.5. Discussion

Les méthodes présentées dans ce chapitre possèdent toutes le même critère de redondance : Un capteur est redondant si sa zone de surveillance est couverte par la zone de surveillance de ses voisins. Néanmoins, chacune de ces méthodes s'appuie sur une règle, un modèle et des hypothèses spécifiques pour la détection de la redondance.

La méthode des secteurs sponsorisés suppose que $R_c = R_s$, ce qui limite le nombre de capteurs redondants pouvant être détectés par l'algorithme. Pour cela, toutes les méthodes qui lui ont succédées se sont basées sur l'hypothèse que $R_c \geq 2R_s$, et ce, afin d'augmenter le nombre de voisins impliqués dans le calcul de la redondance pour maximiser la couverture des nœuds. Par conséquent, le nombre de capteurs redondants détectés par ces méthodes est plus important par rapport à la méthode des secteurs sponsorisés.

La méthode de couverture de périmètre se base sur l'évaluation de la couverture de périmètre des voisins du capteur évaluant sa redondance (s_i). Il existe deux variantes de cette méthode, la première variante évalue la couverture de tout le périmètre des voisins à un saut de s_i , ce qui rend les calculs géométriques plus complexes. Par contre, la deuxième variante repose seulement sur la couverture de périmètre des segments des voisins se trouvant dans la zone de surveillance de s_i . Cette classe de méthodes offre la possibilité de détecter la redondance des capteurs tout en répondant au degré de couverture exigé par l'application.

La précision des méthodes basées sur la structure en grilles de la zone d'intérêt dépend de la longueur des cellules de la grille. Plus la taille de la cellule est réduite plus le nombre de capteurs détectés diminue, car le calcul de la redondance devient plus restrictif. Nous pouvons dire alors que ce critère de redondance n'est pas objectif, car la longueur de la cellule conditionnera le nombre de capteurs détectés par ces méthodes. De plus, cette approche doit spécifier la couverture de chaque point de la grille de la zone de couverture

du capteur évaluant sa redondance par chacun de ses voisins, ce qui est couteux en termes de temps, de calcul et de sauvegarde.

La méthode des points d'intersection ramène le problème de détection de la redondance au calcul du degré de couverture des points d'intersection. L'algorithme peut dynamiquement configurer le réseau pour fournir des degrés de couverture différents suivant le besoin de l'application. Toutefois, la complexité de calcul est $O(N^3)$, avec N le nombre de voisins se trouvant à une distance $2R_s$ du nœud évaluant sa redondance.

La méthode RSE utilise un outil de modélisation géométrique, les diagrammes *Voronoi*, pour formaliser le problème de détection de la redondance. Avec cette méthode, un nœud détermine sa redondance en communiquant seulement avec ses voisins *Voronoi*, ceci fait que l'algorithme RSE détecte avec précision tous les nœuds redondants du réseau. Si le nombre des voisins *Voronoi* est N alors la complexité de l'algorithme est $O(N \log N)$. En revanche, cette méthode induit un overhead supplémentaire pour deux raisons ; la première raison est la maintenance régulière des cellules *Voronoi* par les nœuds du réseau. La seconde raison est l'overhead initial engendré lorsque chaque nœud est contraint à découvrir ses voisins *Voronoi* et calculer sa cellule *Voronoi*.

La classe de méthodes de l'approche analytique aborde le problème de la redondance d'un point de vue mathématique, en proposant un modèle qui ne nécessite pas la connaissance des informations de localisation des capteurs du réseau. Ainsi, la redondance d'un capteur est déterminée en fonction du nombre de ses voisins [WU05, BUL10] ou bien de la distance le séparant de ses voisins [YOU07]. Pour cela, ces méthodes ne parviennent à détecter que la redondance partielle des capteurs. En effet, il est assez difficile de vérifier la redondance complète d'un capteur donné sans disposer des informations de localisation, par conséquent cette classe de méthodes est restreinte à des applications qui ne sont pas critiques dans lesquelles l'existence de certains points de la zone d'intérêt non couverts peut être tolérable.

Nous proposons un tableau de synthèse (Tableau 2.2) qui représente une comparaison qualitative entre les algorithmes étudiés dans ce chapitre. Cette comparaison est effectuée selon les métriques suivantes :

- **Modèle De Détection (MDD)** : Définit le type de détection du nœud, il peut être binaire (B) ou probabiliste (P) ;
- **Information De Localisation (IDL)** : Indique si l'algorithme de détection de la redondance utilise les coordonnées géographiques des nœuds capteurs ou non ;
- **R_s vs. R_c** : Définit la relation, si elle existe, entre le rayon de détection R_s et le rayon de communication R_c . Ce dernier peut être au minimum égal à deux fois le rayon de couverture $R_c \geq 2R_s$ lorsque les capteurs sont homogènes, ou bien si le réseau de capteurs est hétérogène, R_c est supposé être au moins deux fois plus grand que le rayon de couverture maximal des capteurs $R_c > 2R_{sMAX}$. Dans le cas où il n'y a pas de relation entre les deux, elle sera notée PRD (Pas de

Relation Directe) ;

- Degré De Couverture (DDC) : Décrit la couverture de chaque point p de la zone d'intérêt, elle peut être multiple (M) lorsque tout point p se trouve dans la zone de détection de plusieurs capteurs, dans ce cas on parle de la k –couverture ($k > 1$). En outre, on parle de la 1–couverture lorsque tout point p est couvert par un seul capteur, dans ce cas il s'agit d'une couverture simple (S) ;
- Taux De Redondance (TDR) : Représente le pourcentage de couverture redondante qui est assuré par l'algorithme. Ce taux peut être de 100%, dans ce cas il s'agit d'une *redondance complète* (C), c'est-à-dire que tous les points de la zone de couverture d'un capteur S_i sont couverts par ses nœuds voisins ; ou bien il peut s'agir d'une *redondance partielle* (P) dans le cas contraire ;
- Règle de redondance : Définit le critère sur lequel se base l'algorithme pour détecter la redondance d'un capteur.

Technique	Algorithme	MDD	IDL	R_c vs. R_s	DDC	TDR (%)	Règle de redondance
Secteurs sponsorisés	Tian <i>et al.</i> [TIA02]	B	nécessaire	$R_c = R_s$	S	C	L'union des angles centraux des secteurs sponsorisés atteint 2π .
	Boukerche <i>et al.</i> [BOU07]	B	nécessaire	$R_c \geq 2R_s$	S	C	
	Noh <i>et al.</i> [NOH08]	B	nécessaire	$R_c \geq 2R_s$	S	C	
Couverture de périmètre	Huang <i>et al.</i> [HUA03]	B	nécessaire	$R_c \geq 2R_s$	M	C	La valeur de la couverture de périmètre des voisins ne change pas en supprimant s_i
	Jian <i>et al.</i> [JIA04]	B	nécessaire	$R_c \geq 2R_s$	M	C	Le nœud s_i est candidat de chacun de ses voisins
	Huang <i>et al.</i> [HUA07]			PRD			
La structure en grille	Bai <i>et al.</i> [BAI06]	B	nécessaire	$R_c > 2R_{sMAX}$	S	C	Les points de la grille de la zone de couverture de s_i sont couverts par ses voisins
	SCRC [SAK10]	B	nécessaire	$R_c \geq 2R_s$	M	C	
	Zou <i>et al.</i> [ZOU05]	P	nécessaire	$R_c \geq 2R_s$	P_{th}	C	La probabilité de couverture de chaque point de la grille de la zone de couverture de s_i est supérieure à P_{th}
La couverture des points d'intersection	Wang <i>et al.</i> [WAN03]	B	nécessaire	$R_c \geq 2R_s$	M	C	Les points d'intersection se trouvant dans la zone de couverture de s_i sont couverts
	Lu <i>et al.</i> [LUJ07]	B	nécessaire	$R_c > 2R_{sMAX}$	M	C	Les points d'intersection et les points échantillons se trouvant dans la zone de couverture de s_i sont couverts
La méthode des diagrammes <i>Voronoi</i>	RSE [CAR06]	B	nécessaire	$R_c \geq 2R_s$	S	C	Les 2-VV et les 2-VIP du capteur s_i sont couverts par ses voisins voronoi
La sectorisation	Khedr <i>et al.</i> [KHE11]	B	nécessaire	$R_c \geq 2R_s$	S	C	Les six secteurs de s_i sont couverts par ses voisins

Technique	Algorithme	MDD	IDL	R_c vs. R_s	DDC	TDR (%)	Règle de redondance
Méthode analytique	Wu <i>et al.</i> [WU05]	B	Non nécessaire	$R_c = R_s$	S	P	La probabilité de couverture de S_i par ses voisins est supérieure au taux de couverture exigé par l'application
	Bulut <i>et al.</i> [BUL10]	B	Non nécessaire	$R_c = R_s$	S	P	
	Younis <i>et al.</i> [YOU07]	B	Non nécessaire	$R_c = 2R_s$	S	P	Au moins une règle parmi les quatre règles D1, D2, H1 et H2 donne un résultat positif.

(b)

Tableau 2.2. Tableau comparatif et récapitulatif des méthodes de détection de la redondance.

2.6. La coordination entre capteurs redondants

Les travaux portant sur la détection de la redondance, présentés précédemment, font partis intégrante des mécanismes d'ordonnement d'activités, qui ont pour but de résoudre le problème de couverture de surface dans les réseaux de capteurs sans fil. Ces mécanismes adoptent une approche distribuée ce qui permet d'obtenir des solutions robustes, adaptables et surtout assurant le passage à l'échelle. Cependant, l'exécution localisée du calcul de la redondance peut engendrer la création de vides de couverture, étant donné que la redondance d'un capteur dépend de ses voisins. En effet, si deux nœuds voisins décident d'être redondants simultanément, un vide de couverture apparaîtra dans le réseau, tel qu'indiqué sur la Figure 2.18.

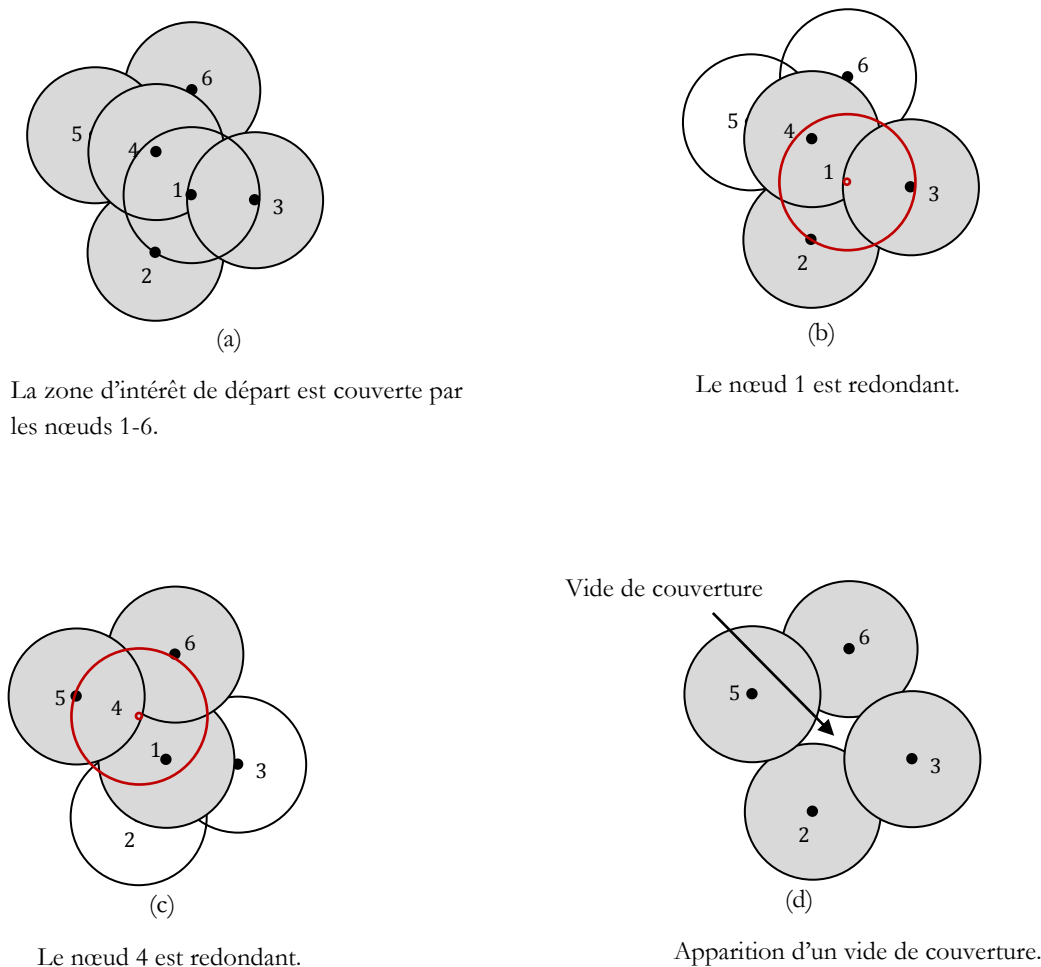


Figure 2.18. Occurrence d'un vide de couverture.

Dans la Figure 2.18, le nœud 1 (Fig.2.18 (b)) constate que sa zone de surveillance peut être couverte par les nœuds 2,3 et 4, il se déclare ainsi redondant. Au même moment, le nœud 4 (Fig.2.18 (c)) estime que sa zone de surveillance peut être couverte par les nœuds 1,5 et 6. Croyant que le nœud 1 est toujours actif, le nœud 4 décide qu'il est redondant également. C'est de cette façon qu'une région non couverte apparaît dans le réseau (Fig.2.18 (d)), car il y a une inter-dépendance dans la redondance des nœuds 1 et 4.

Afin de pallier à cette situation, la plupart des travaux de la littérature proposent d'introduire dans leurs protocoles d'ordonnancement d'activités un schéma dit de *backoff aléatoire* [TIA02, WAN03, WU05, BAI06, YUF06, HUA07, BUL10], seule une solution s'est attachée à résoudre ce problème en proposant une approche différente basée sur la détermination de l'ensemble maximal indépendant [CAR06]. Dans ce qui suit, nous décrivons ces deux techniques à travers quelques travaux représentatifs.

2.6.1. Schéma de backoff aléatoire

L'idée principale de la technique de backoff aléatoire, définie par Tian *et al.* [TIA02], est de faire en sorte que les nœuds du réseau utilisent des temps d'attente aléatoire avant de prendre les décisions d'activités, en intégrant également des messages et des états spécifiques au schéma adopté, et ce, dans le but d'éviter les décisions d'inactivités simultanées.

Dans ce schéma, les nœuds du réseau attendent un temps aléatoire t_d avant d'évaluer leur redondance. A l'expiration de ce temps, chaque nœud redondant diffuse un message *Off* à ses voisins à un saut. Les voisins recevant ce message et disposant d'un temps t_d plus long vont reconstruire leur table de voisins en supprimant le nœud redondant de leur voisinage. Bien que le temps de backoff t_d est choisi aléatoirement dans un intervalle W , il peut arriver que deux nœuds aient le même temps t_d , par exemple les nœuds 1 et 4 peuvent bien disposer du même backoff t_d (Figure 2.18 (a)). Par conséquent, une région vide apparaît dans le réseau lorsque ces deux nœuds se désactivent au même temps.

De ce fait, un autre temps de backoff t_w est introduit dans le schéma, durant lequel les nœuds redondants attendront avant de passer à l'état passif. Cette période d'attente suit immédiatement le calcul de la redondance, et permet au nœud 1 de recevoir le message *Off* provenant du nœud 4 (ou vice versa). De cette façon, si un message *Off* est reçu pendant le temps t_w le nœud 1 revient à l'état actif, sinon il devient passif à l'expiration du t_w . De ce schéma de backoff est dérivé un graphe d'états et de transitions tel qu'indiqué sur la Figure 2.19.

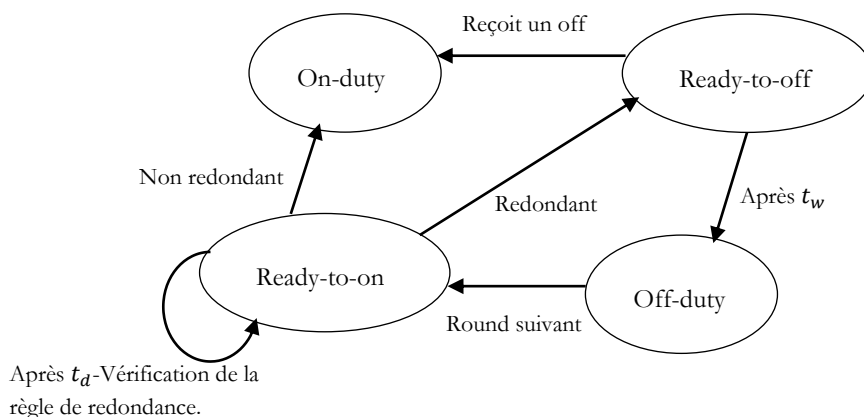


Figure 2.19. Le graphe d'états transitions.

Beaucoup d'autres protocoles d'ordonnancement d'activités existant dans la littérature [WAN03, WU05, BAI06, BOU07, HUA07, BUL10] exécutent un schéma d'attente aléatoire similaire à celui proposé par les auteurs de [TIA02], seuls le nombre d'états ou bien les types de messages échangés entre les nœuds du réseau peuvent différer.

Dans le mécanisme d'attente aléatoire proposé par Wang *et al.* [WAN03], les capteurs du réseau possèdent trois états : actif, sommeil, en écoute. Les transitions d'états se produisent suite à la réception de deux types de messages : *Join* et *Withdraw message*. Tout nœud actif (redondant) annonce son intention de passer à l'état sommeil en envoyant un message de retrait (*Withdraw*). Lorsque ce message est reçu par un autre voisin se trouvant dans le même état et ce durant un temps backoff t_w , celui-ci annule son changement d'état. C'est de cette manière que les décisions identiques simultanées sont évitées.

Huang *et al.* [HUA07] proposent un schéma de backoff dans lequel les capteurs redondants écoutent le réseau durant un temps t_{rand} , ajusté selon leur niveau d'énergie résiduelle. Si une requête de *sommeil* est reçue pendant ce temps, le capteur redondant réévalue sa redondance, sinon il envoie un message de *sommeil* à chacun de ses voisins et attend leurs acceptations pendant un temps t_s . Ainsi, les voisins peuvent répondre avec un message *Grant-Sleep* ou bien avec un *Reject-Sleep*. Lorsque le nœud redondant reçoit un *Grant-Sleep* de tous ses voisins, il diffuse un message *Confirm* et se désactive.

Il est à constater que le principe général des mécanismes de backoff reste le même. Nous en résumons les étapes comme suit :

- **Etape 1 :** Exécution de la règle de redondance. S'il est redondant, armer un temps d'attente aléatoire ;
- **Etape 2 :** Attente de l'expiration du temps d'attente. Si un message *Off* (*Withdraw*) est reçu, alors reconstruire la table des voisins et redevenir actif. Si le timer expire, aller à l'étape suivante ;
- **Etape 3 :** Diffusion d'un message *off* et entrer en état sommeil.

2.6.2. Construction du MIS (Maximal Independent Set)

La solution proposée par Carbutar *et al.* [CAR06] se base sur la construction de l'ensemble maximal indépendant, qui représente les capteurs redondants du réseau pouvant être désactivés au même temps sans créer de vide de couverture. Pour cela, les auteurs proposent de construire le graphe de redondance $G_R = (V_R, E_R)$ du réseau, où les sommets V_R sont les capteurs redondants et les arêtes E_R représentent les liens de voisinage, c'est-à-dire qu'il y a une arête $e \in E_R$ entre deux capteurs redondants si et seulement s'ils sont voisins. De cette manière, le problème de création de vide de couverture est équivalent à trouver l'ensemble maximal indépendant du graphe de redondance G_R . L'algorithme de Carbutar *et al.* [CAR06] procède en rounds, et à la fin de chaque round il y a des nœuds gagnants et des nœuds perdants. Un nœud gagnant est celui qui possède le plus petit nombre de voisins redondants. Ces nœuds envoient un

message à leurs voisins annonçant qu'ils sont gagnants. Ainsi, un nœud devient perdant lorsqu'il reçoit un tel message. Les nœuds gagnants sont retenus pour être désactivés.

L'idée derrière cette solution est de faire en sorte que deux sommets adjacents du graphe de redondance ne soient pas sélectionnés pour appartenir à l'ensemble maximal indépendant, en se basant sur une intuition simple : le retrait des nœuds gagnants a le moins d'impact sur le réseau, si ceux ayant le nombre de voisins redondants le plus petit sont désignés pour être désactivés.

2.7. Synthèse

La redondance d'un capteur dépend de l'état de ses voisins : Un capteur peut ne plus être redondant si un de ses voisins devient passif, s'il s'agit d'une solution d'ordonnancement d'activités, ou bien si le voisin se déplace pour réparer un vide de couverture. Dans ce contexte, les protocoles d'ordonnancement d'activités proposent des mécanismes d'attente aléatoire afin d'éviter les décisions de désactivation simultanées. Toutefois, ces mécanismes possèdent certaines exigences, en l'occurrence : la synchronisation en temps du réseau ainsi que l'échange d'un grand nombre de messages de contrôle.

En effet, étant donné que les schémas d'ordonnancement d'activités procèdent en rounds, les décisions d'activités des nœuds doivent être synchronisées à la fin du round afin qu'il n'y ait pas apparition de régions non couvertes dans la zone d'intérêt. Cependant, supposer une synchronisation en temps global dans un réseau de capteurs, qui est généralement assez dense, est coûteux en nombre de messages échangés et assez difficile à réaliser. De plus, les mécanismes de backoff aléatoire exigent l'échange d'un nombre important de messages de contrôle ce qui constitue une dépense d'énergie supplémentaire.

Les auteurs dans [CAR06] abordent le problème d'inter-dépendance de la redondance des capteurs redondants du réseau d'un point de vue différent, en proposant de sélectionner l'ensemble maximal indépendant (MIS) à partir du graphe de redondance du réseau. Cette solution emploie une heuristique pour trouver une approximation de l'ensemble maximal. Cette heuristique se base sur une intuition simple : le nœud redondant ayant le plus petit degré dans le graphe de redondance est sélectionné pour être désactivé ; Puisque l'élimination de ce nœud annulera la redondance d'un nombre minimal de nœuds redondants. Cette solution a l'avantage de ne pas nécessiter une synchronisation en temps global ni un échange de messages de contrôle.

Concernant les méthodes de détection de la redondance étudiées dans la première partie de ce chapitre (section 2.4), elles forment deux classes : la première classe comporte des méthodes qui se basent sur une approche géométrique pour déterminer la redondance d'un capteur, et la seconde regroupe des méthodes qui se basent sur une approche analytique associée à des calculs probabilistes pour calculer la redondance des capteurs.

Nous avons remarqué que la majorité des travaux utilise une approche géométrique pour la détection des capteurs redondants, car cette approche se base sur des calculs géométriques précis et garantit la détection d'une *redondance complète*, contrairement à l'approche analytique qui se base sur des heuristiques pour estimer une *redondance partielle* des capteurs, ce qui ne permet pas de préserver la couverture complète de la zone d'intérêt.

2.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les méthodes de détection de la redondance des capteurs. Cette étude nous a permis de dégager deux grandes approches adoptées par ces méthodes, et de proposer une classification des techniques employées pour la détection de la redondance. Sur la base de cette classification, nous avons effectué une comparaison qualitative de ces méthodes en termes de quelques critères jugés pertinents. Par ailleurs, la détection de la redondance ne s'arrête pas à un calcul localisé au niveau de chaque nœud. Les nœuds redondants doivent coopérer dans leur décision de redondance avec la contrainte de préserver la couverture de surface.

Les recommandations tirées de cette étude constituent une base pour la conception d'une méthode de détection de la redondance. De ce fait, nous avons fait le choix d'adopter une approche géométrique qui renforcera l'exactitude du calcul de la redondance et garantit, de surcroît, la préservation de la couverture de surface. La conception de cette méthode fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3

La méthode de détection de la redondance des capteurs RND

3.1. Introduction

La notion de couverture dans les réseaux de capteurs est définie comme étant la mesure de la qualité de service (QoS) de la mission de détection dans la région de déploiement. L'objectif est d'avoir tous les points de la zone d'intérêt couverts par au moins un capteur. Déployés en grand nombre dans des zones sensibles à surveiller et parfois hostiles, les capteurs se trouvent exposés à des dommages physiques accidentels ou intentionnels (tombée de grêle, bombardement, écrasement par des engins, etc.). Par conséquent, la couverture de surface peut être altérée en raison de ces pannes massives, ce qui amène à la création de régions non couvertes (région *void*).

Dès lors, et afin de maintenir une certaine qualité de service, ces régions vides peuvent être réparées par un redéploiement de capteurs. Cette tâche peut s'avérer fastidieuse et coûteuse voire même impossible du fait que les capteurs sont généralement largués dans des zones inaccessibles. A défaut de procéder au déploiement de nouveaux nœuds, il serait intéressant d'exploiter la redondance des capteurs, induite par le déploiement aléatoire, pour rétablir la couverture de surface en faisant déplacer des capteurs redondants vers les régions touchées.

Dans ce contexte, nous proposons une solution de détection de la redondance orientée redéploiement des régions vides. Comme mentionné dans le chapitre précédent, les méthodes de détection de la redondance adoptent deux approches : géométrique et analytique. En raison de l'exactitude de calcul assurée par l'approche géométrique, nous optons pour une méthode de détection de la redondance basée sur des calculs géométriques. Cette méthode que nous appelons RND (*Redundant Node Detection*), est complètement distribuée et garantit l'évaluation de la *redondance complète* des capteurs tout en préservant la couverture de la zone d'intérêt. La méthode veille également à optimiser

la consommation d'énergie des capteurs et les coûts de communication en exécutant une phase de prétraitement, en amont au calcul de la redondance, permettant ainsi de restreindre le calcul aux capteurs du réseau susceptibles d'être redondants.

Dans ce chapitre, nous définissons dans un premier temps le modèle d'environnement adopté et les hypothèses de travail. Ensuite, nous formalisons la procédure d'évaluation de la redondance de la méthode RND au travers d'une analyse géométrique détaillée mettant en évidence la procédure de calcul employée par la méthode.

3.2. Spécification du problème et hypothèses

Nous considérons un ensemble de capteurs $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ déployés de manière aléatoire dans une zone d'intérêt A euclidienne bidimensionnelle. Chaque capteur s_i a une portée de couverture R_s , c'est-à-dire qu'il peut surveiller n'importe quelle cible se trouvant à une distance inférieure ou égale à R_s . Le capteur s_i possède aussi une portée de communication R_c lui permettant de communiquer avec tout nœud se trouvant à une distance inférieure ou égale à R_c .

Nous formulons les hypothèses suivantes :

- Les capteurs possèdent le même rayon de couverture R_s , c'est-à-dire que la portée de couverture est homogène, et de même pour la portée de communication R_c ;
- L'antenne radio des capteurs est omnidirectionnelle avec une zone de couverture sous forme de disque ;
- Les capteurs sont équipés d'un dispositif leur permettant de connaître leur information de localisation ;
- L'ensemble des voisins à un saut du capteur s est $N(s) = \{n \in A / d(s, n) < 2R_s\}$, tel que A est l'ensemble des nœuds déployés dans la région. Ce sont les nœuds avec lesquels le capteur s possède un chevauchement dans la zone de couverture ;
- Le rayon de communication des nœuds (R_c) doit être au moins supérieur ou égale à deux fois leur rayon de capture (R_s) afin que chaque nœud puisse communiquer avec ses voisins à un saut.

3.3. Approche de la solution

La méthode RND adopte une approche de calcul totalement localisée au niveau des capteurs, dans laquelle chaque nœud décide de sa propre redondance en se basant seulement sur la connaissance des informations de localisation de ses voisins. Ce calcul localisé amène chaque capteur à informer ses voisins de sa redondance afin de coordonner sa décision de redondance avec ses voisins redondants ; et ce, afin de préserver la couverture de la zone d'intérêt.

La méthode proposée se base sur des calculs géométriques pour déterminer la

redondance des capteurs, et repose sur trois phases successives : un prétraitement suivi d'une décision de redondance locale basée sur une règle géométrique, et une phase de coordination entre capteurs redondants.

La phase de prétraitement élimine les nœuds du réseau qui ne sont pas susceptibles d'être redondants, dans le but d'éviter que ces derniers poursuivent le calcul de la redondance inutilement ce qui contribue à conserver l'énergie total du réseau. Lors de cette première phase, le capteur i vérifie localement si son *périmètre* de surveillance est complètement couvert par ses voisins. Cette vérification constitue une condition nécessaire mais pas suffisante pour décider de sa redondance. Ainsi une autre étape est requise, elle consiste à vérifier si la *zone de surveillance* du capteur i est complètement couverte par ses voisins. Le nœud i vérifie cette deuxième condition dans une seconde phase, en exécutant une règle géométrique qui lui permet de décider s'il est redondant ou pas, il s'agit à ce niveau de la méthode d'une redondance locale. Toutefois, si des nœuds voisins sont redondants alors cette redondance est problématique, car il y a une interdépendance dans leur redondance. Pour cela, une coordination entre les capteurs redondants voisins du réseau est nécessaire afin d'élire les nœuds redondants de manière à toujours conserver la couverture de la zone d'intérêt.

3.3.1. 1^{ère} phase : Le prétraitement

Durant cette phase, chaque nœud de la zone de déploiement commence par la découverte de voisinage en collectant les informations relatives à ses voisins directs, ensuite il vérifie sa couverture de périmètre afin de savoir s'il est susceptible d'être redondant. Pour cela, il exécute un calcul angulaire lui permettant de savoir s'il est couvert en périmètre par son voisinage immédiat. Cette approche d'évaluation de la couverture de périmètre est nouvelle du fait qu'elle ramène le problème de couverture de périmètre au simple calcul de deux angles associés à chaque paire de voisins. L'approche d'évaluation de la couverture de périmètre sera présentée à la section 3.3.1.3.

Une caractéristique des réseaux de capteurs est la densité des nœuds déployés, il en résulte qu'un capteur donné possède un nombre important de nœuds dans son voisinage. Puisqu'un voisinage assez dense rend l'échange entre un capteur et ses voisins plus coûteux, et peut également rendre les calculs plus complexes, nous utilisons le concept des *voisins effectifs* proposé dans [JIA04]. Ce concept consiste à distinguer, pour un nœud donné i , ses voisins *effectifs* et ses voisins *non effectifs* en termes de surface de chevauchement de leurs zones de couverture avec le nœud i , et ce, afin d'éliminer les voisins *non effectifs* du traitement pour réduire les coûts inhérents aux calculs de la redondance.

Cette section a pour objet de décrire le déroulement de la phase de prétraitement. Il en découle les étapes suivantes :

- La découverte de voisinage ;

- Le calcul des voisins effectifs ;
- La vérification de la couverture de périmètre.

3.3.1.1. La découverte de voisinage

Les capteurs découvrent leur voisinage à un saut en procédant à l'émission périodique de paquets de balisage (message *hello*). Ces messages contiennent des informations propres au nœud émetteur i : son identifiant (Id) et sa position géographique.

L'échange périodique des paquets de balisage permet aux nœuds de construire et mettre à jour leur table de voisins NT (*Neighbors Table*). En effet, lorsqu'un nœud ne reçoit pas de message *hello* d'un voisin après un temps T , il considère que le voisin en question n'est plus dans sa zone de communication et l'efface de sa table de voisins (Table 3.1). Le pseudo-code de la procédure de découverte de voisinage est donnée par la Figure 3.1.

Champ	Désignation
Id	Identifiant du nœud voisin
Position	Localisation géographique (x_j, y_j) du nœud voisin
ExpireTimeT	Durée de validité de l'entrée dans la table des voisins NT

Tableau 3.1. Format d'une entrée (voisin j) dans la table des voisins d'un nœud.

```

En recevant un paquet de balisage, le nœud  $i$  effectue un traitement local :
POUR chaque message hello reçu FAIRE
  Lire (Id, Position) à partir du paquet ;
  SI (ID  $\notin$  NT) ALORS                                     /* le voisin n'existe pas dans la table des voisins NT */
    Ajouter le voisin (Id, Position) ;                       /* nouveau voisin */
  SINON
    Mettre à jour le voisin (Id, Position) ;                 /* mise à jour la table NT */
  FINSI
FINPOUR

```

Figure 3.1. Pseudo-code de l'algorithme de découverte de voisinage.

3.3.1.2. Le calcul des voisins effectifs

Une conséquence de la densité des réseaux est qu'un nœud possède forcément beaucoup de voisins. De ce fait, la surface de chevauchement entre un capteur i et un voisin j pourrait être complètement incluse dans la surface de chevauchement de i avec un autre voisin k . Ainsi, le voisin j pourrait être ignoré dans le calcul de la redondance, ce nœud est appelé voisin *non effectif* [JIA04]. Le concept des voisins effectifs est utilisé par la méthode de couverture de périmètre de Jian *et al.* [JIA04] (Section 2.3.1.2). Nous reprenons ce concept dans notre méthode, en explicitant de quelle manière la sélection des voisins effectifs est effectuée. Pour cela, nous introduisons une définition formelle de ce concept.

Définition 1 (*Voisins effectifs*). Soient les nœuds j et $k \in N(i)$, l'angle θ_j (respectivement θ_k) délimité par l'axe des abscisses x et le vecteur \vec{ij} (respect. \vec{ik}) est la direction du nœud j (respect. k) par rapport à i , et l'angle $\alpha_j = \widehat{j\hat{i}P_1}$ (respect. $\alpha_k = \widehat{j\hat{i}P_2}$), tel que décrit dans

la Figure 3.2:

$$\theta_j = \arctan \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \quad (3.1)$$

$$\alpha_j = \arccos \frac{d(i,j)}{2R_s} \quad (3.2)$$

$$\theta_k = \arctan \frac{y_k - y_i}{x_k - x_i} \quad (3.3)$$

$$\alpha_k = \arccos \frac{d(i,k)}{2R_s} \quad (3.4)$$

L'étendue du segment de périmètre du nœud i qui est couverte par j est $[\theta_j - \alpha_j, \theta_j + \alpha_j]$, et l'étendue du segment de i qui est couverte par le nœud k est $[\theta_k - \alpha_k, \theta_k + \alpha_k]$.

Si $\theta_k - \alpha_k \geq \theta_j - \alpha_j$ et $\theta_k + \alpha_k \leq \theta_j + \alpha_j$, alors le nœud k est un voisin *non effectif* de i et j est un voisin *effectif* de i .

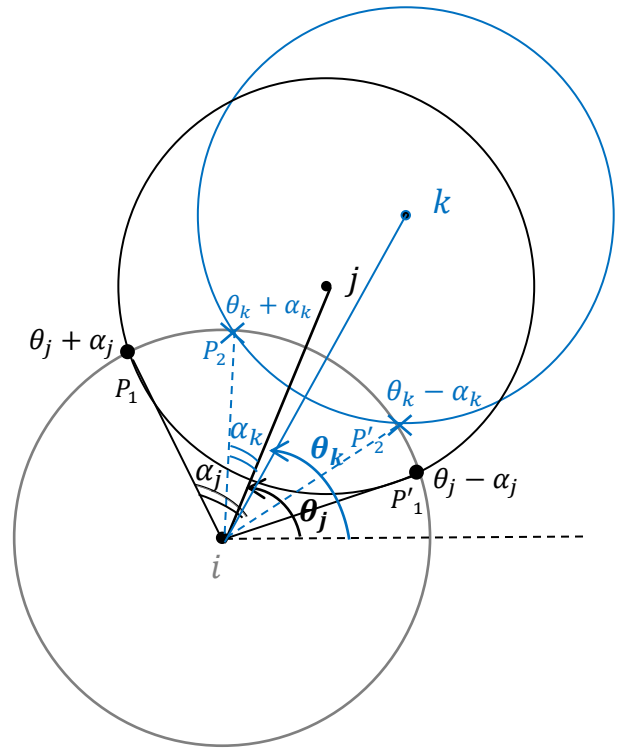


Figure 3.2. Principe de calcul des voisins effectifs.

L'algorithme *Check effective* permet de vérifier si un voisin est effectif ou non, son pseudo code est donné par la Figure 3.3. Une fois que les voisins effectifs sont déterminés par l'algorithme *Check effective*, le nœud i construit l'ensemble $N_{eff}(i)$ qui sera utilisé dans la suite de la méthode.

```

Le nœud  $i$  exécute les tâches suivantes :
POUR (chaque entrée  $j \in NT$ ) FAIRE
  Calculer les angles  $\theta_j$  et  $\alpha_j$  donnés par les formules (3.1) et (3.2) ;
   $Min_j \leftarrow \theta_j - \alpha_j$  ;
   $Max_j \leftarrow \theta_j + \alpha_j$  ;
   $Effectif \leftarrow TRUE$  ;
  POUR (chaque entrée  $k \in NT$  tel que  $k \neq j$ ) FAIRE
    Calculer les angles  $\theta_k$  et  $\alpha_k$  donnés par les formules (3.1) et (3.2) ;
     $Min_k \leftarrow \theta_k - \alpha_k$  ;
     $Max_k \leftarrow \theta_k + \alpha_k$  ;
    SI ( $Max_j \leq Max_k$  et  $Min_j \geq Min_k$ ) ALORS
      Le nœud  $j$  est un voisin non effectif ;
       $Effectif \leftarrow FAUX$  ;
      EXIT ;
    FINSI
  FINPOUR
SI ( $Effectif$  est TRUE) ALORS
  Ajouter  $j$  dans  $NT_{eff}$  ;
  /*  $NT_{eff}$  : table des voisins effectifs du nœud  $i$  */
FINSI
FINPOUR

```

Figure 3.3. Pseudo-code de l'algorithme *Check effective*.

3.3.1.3. Vérification de la couverture de périmètre

Sans perdre de vue notre objectif majeur qui est de déterminer la redondance d'un capteur, nous présentons une démarche déterministe permettant de vérifier la couverture de périmètre d'un capteur. A cet effet, le capteur peut discrétiser son périmètre de couverture en segments, il y a autant de segments que de paires de voisins. Ainsi, la vérification de la couverture de périmètre passe par l'évaluation de la couverture de chaque segment qui est assimilée à un simple calcul angulaire.

Avant de détailler la procédure de vérification de la couverture de périmètre, nous introduisons les définitions suivantes :

Définition 2 (*Voisins angulairement adjacents*). Soient j et $k \in N_{eff}(i)$, les nœuds j et k sont dits angulairement adjacents par rapport à i s'il n'existe aucun nœud $m \in N_{eff}(i)$ se trouvant dans la direction formée par l'angle \widehat{ki} (Figure 3.4).

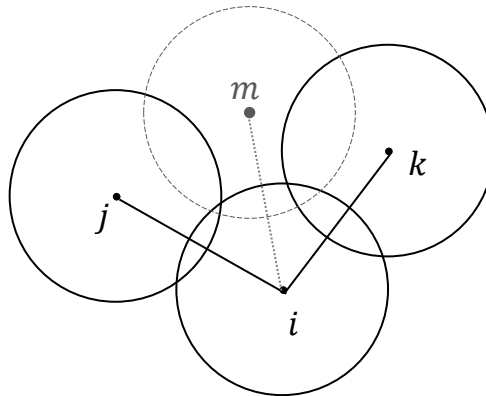


Figure 3.4. Représentation des nœuds angulairement adjacents.

Définition 3 (*Couverture de périmètre*). Considérons les deux nœuds i et j , soit P un point appartenant au périmètre du nœud i , on dit que le point P est couvert en périmètre par j s'il est dans la zone de couverture du nœud j , autrement dit si la distance euclidienne entre j et le point P est inférieure ou égale au rayon de couverture R_s ($d(P, j) \leq R_s$).

Si tous les points du périmètre de i sont couverts par au moins un voisin effectif alors le nœud i est couvert en périmètre.

Définition 4 (*Vide de périmètre*). Si au moins un point P du périmètre de i n'est pas couvert, alors on dit que le nœud i possède un vide de périmètre.

▪ La couverture de segment

Le problème de couverture de périmètre a été largement abordé dans les travaux portant sur le domaine de la couverture d'une zone d'intérêt. Dans ce contexte, lorsque tous les capteurs du réseau sont couverts en périmètre, alors la couverture de surface est automatiquement assurée. Dans notre travail, même si notre objectif est différent, nous vérifions tout de même la couverture de périmètre des capteurs comme étape en amont du calcul de la redondance, et cela dans le double objectif de restreindre les calculs aux capteurs du réseau potentiellement redondants et optimiser la consommation d'énergie du réseau. Pour cela, nous proposons une approche basée périmètre mais qui est différente de celles proposées dans [HUA03, JIA04, HUA07]. En effet, ces derniers travaux évaluent la couverture de tout le périmètre. Par contre, notre approche permet de ramener la vérification de la couverture de périmètre à la vérification de la couverture de chaque segment. Dès qu'un segment n'est pas couvert, il n'est plus nécessaire de vérifier les autres segments.

Considérons les nœuds $j, k \in N_{eff}(i)$, tel que j, k sont angulairement adjacents. Nous nous intéressons à la couverture du segment du nœud i dans la direction formée par ses deux voisins j, k . Donc, la question qui se pose est : "Quel est l'écart angulaire que devrait former les nœuds j, k afin de garantir la couverture du segment de i ?". Nous pouvons ramener le problème de couverture de segment à la détermination de l'angle de sommet i et délimité par les directions de j et k , au-delà duquel il y a apparition d'un vide sur le segment de i , appelons cet angle l'*angle seuil*.

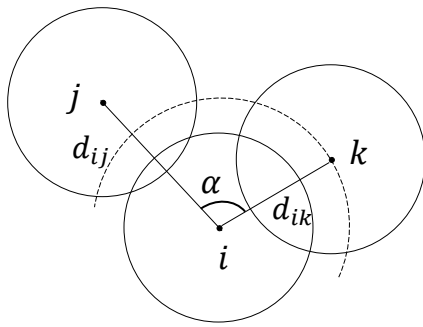
Soient d_{ij} et d_{ik} les distances séparant les nœuds j et k du nœud i respectivement. Ces distances sont données par les formules 3.5 et 3.6. Sur la Figure 3.5, nous avons représenté les différents cas de dispositions possibles que peuvent occuper les nœuds j, k étant données les distances invariantes d_{ij} et d_{ik} . En considérant seulement ces distances, notre objectif est de déterminer l'angle seuil.

$$d_{ij} = \sqrt{|x_i - x_j|^2 + |y_i - y_j|^2} \quad (3.5)$$

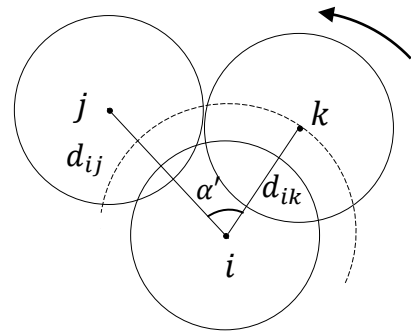
$$d_{ik} = \sqrt{|x_i - x_k|^2 + |y_i - y_k|^2} \quad (3.6)$$

Sur les Figures 3.5 (a) et 3.5 (b), nous remarquons que le nœud i possède un vide de périmètre dans la direction formée par les nœuds j et k : La direction du nœud k a tourné dans le sens anti-horaire pour la même distance d_{ik} (Figure 3.5(b)), mais pas suffisamment pour avoir une couverture de périmètre. Par contre, sur la Figure 3.5(c) le nœud i est couvert en périmètre. Ainsi dans cette figure, la variation de l'écart angulaire des nœuds j et k mène à l'angle seuil α_{seuil} qui est obtenu lorsque l'intersection entre j et k se situe sur le périmètre de i .

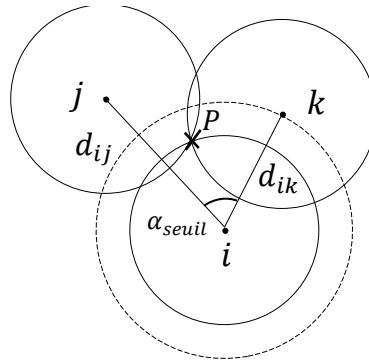
Ainsi, l'angle seuil est unique étant données des distances d_{ij} et d_{ik} . Il ressort clairement que pour qu'il n'y ait pas un vide sur le segment de i , qui est délimité par les nœuds j et k , l'angle formé par ces nœuds doit être inférieure ou égal à cet angle seuil.



(a) Position initiale du nœud k : $[(x_k, y_k), d_{ik}]$



(b) Autre position du nœud k : $[(x'_k, y'_k), d_{ik}]$



(c) Autre position du nœud k : $[(x''_k, y''_k), d_{ik}]$

Figure 3.5. La couverture de périmètre de i dans la direction formée par j et k .

Le calcul de l'angle seuil dépend des distances d_{ij} et d_{ik} et est donné par l'équation 3.7 (voir Figure 3.6) :

$$\alpha_{seuil}(d_{ij}, d_{ik}) = \alpha_j + \alpha_k = \arccos \frac{d(i,j)}{2R_s} + \arccos \frac{d(i,k)}{2R_s} \quad (3.7)$$

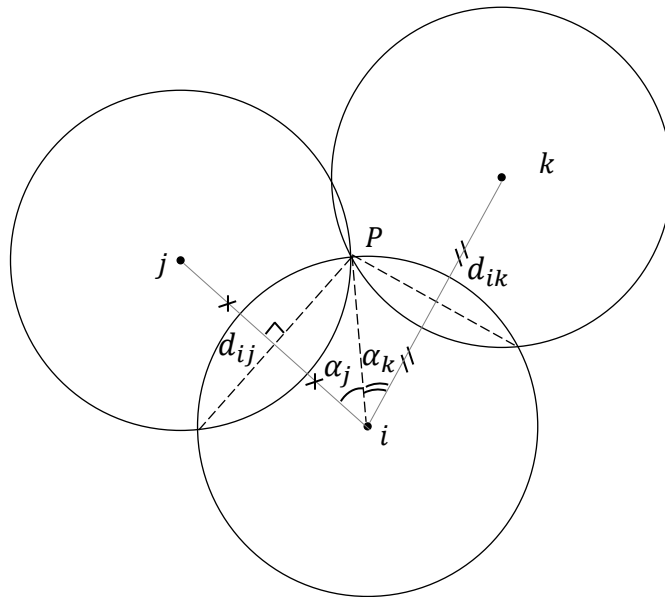


Figure 3.6. Calcul de l'angle seuil.

A ce niveau-là il est question de calculer l'écart angulaire réellement formé par j et k , appelons-le "angle réel" ($\alpha_{réel}$).

Cet angle réel est donc obtenu en fonction de l'information directionnelle des nœuds j et k indépendamment des distances les séparant de i . Soient $Dir_x(i, j)$ et $Dir_x(i, k)$ les directions de j et k respectivement par rapport à l'axe horizontal (Figure 3.7), nous pouvons exprimer l'angle réel en fonction de ces directions comme suit :

$$\alpha_{réel} = |Dir_x(i, j) - Dir_x(i, k)| \quad (3.8)$$

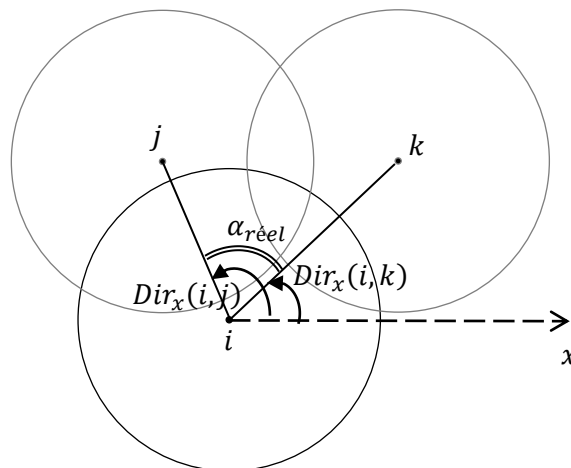


Figure 3.7. Représentation de l'angle réel.

Si nous nous plaçons dans le repère relatif ayant pour origine le nœud i , la valeur de l'angle réel dépendra de la position des voisins j et k par rapport aux quadrants formés par ce repère. La Figure 3.8 montre les différentes positions que peut occuper le nœud j

(ou bien k) dans les quatre quadrants. Ainsi, la valeur de $Dir_x(i, j)$ (respect. $Dir_x(i, k)$) est calculée en fonction du quadrant dans lequel se situe le nœud j (respect. k). A cet effet, nous utilisons la fonction $Arctg2(y, x)$ qui retourne $Arctg(y/x)$, autrement dit retourne l'angle entre l'axe des abscisses x et le point de coordonnées (x, y) , et ce en respectant le quadrant auquel appartient ce point, tel que :

$$Arctg2(y, x) = \begin{cases} Arctg(y/x) + \pi & \text{Si } x < 0 \text{ et } y > 0 \\ Arctg(y/x) - \pi & \text{Si } x < 0 \text{ et } y < 0 \\ Arctg(y/x) & \text{Si } x > 0 \\ \frac{\pi}{2} & \text{Si } x = 0 \text{ et } y > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & \text{Si } x = 0 \text{ et } y < 0 \end{cases}$$

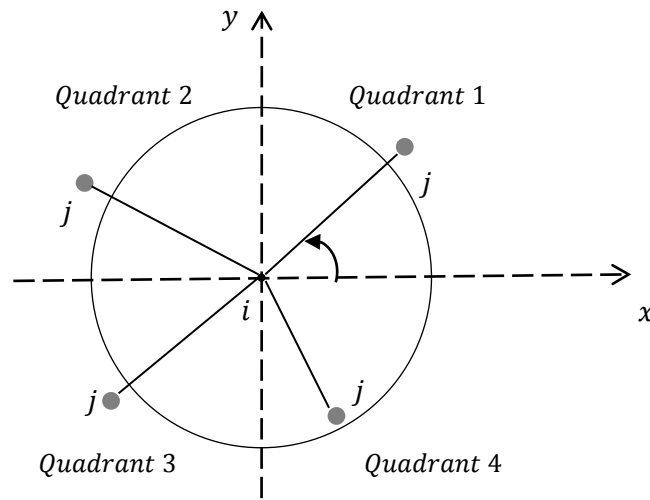


Figure 3.8. Les positions possibles du nœud dans les quatre quadrants.

En considérant un point l qui peut être soit j ou k ; les directions des nœuds j et k sont données par les formules :

$$Dir_x(i, l) = \begin{cases} Arctg2(y_l - y_i, x_l - x_i); & \text{Si } x_l \geq x_i \text{ et } y_l > y_i \\ Arctg2(y_l - y_i, x_l - x_i); & \text{Si } x_l < x_i \text{ et } y_l \geq y_i \\ Arctg2(y_l - y_i, x_l - x_i); & \text{Si } x_l < x_i \text{ et } y_l < y_i \\ 2\pi + Arctg2(y_l - y_i, x_l - x_i); & \text{Si } x_l \geq x_i \text{ et } y_l < y_i \end{cases} \quad (3.9)$$

Donc, en disposant que de l'information géographique de ses voisins j et k , le nœud i peut savoir si ses deux voisins couvrent le segment qu'ils délimitent ou non.

En effet, le nœud i calcule l'angle réel $\alpha_{réel}$ formé par j et k à partir de leurs

coordonnées, et le compare avec la valeur de l'angle seuil α_{seuil} . L'angle réel doit être au plus égal à la valeur de l'angle seuil, car au-delà de cette valeur il y a apparition d'un vide sur le segment de i défini par les nœuds j et k . Généralisons à présent ce résultat pour la couverture de tout le périmètre du nœud i .

Théorème 1

Un nœud i n'est pas couvert en périmètre s'il existe un couple, angulairement adjacents, $(j, k) \in N_{eff}(i)$ tel que $\alpha_{réel}(\widehat{kij}) > \alpha_{seuil}(d_{ij}, d_{ik})$.

Preuve : Nous démontrons par l'absurde le Théorème 1. Supposons que le nœud i est complètement couvert en périmètre par ses voisins effectifs. Donc, selon la définition de la couverture de périmètre, chaque point P du périmètre de i doit être couvert par au moins un voisin effectif. Soit (j, k) le couple de voisins angulairement adjacents dont l'angle réel $\alpha_{réel}(\widehat{jik})$ est supérieur à $\alpha_{seuil}(d_{ij}, d_{ik})$, dans ce cas il existe forcément un point appartenant au segment de périmètre délimité par l'angle (\widehat{jik}) qui n'est couvert par aucun des deux nœuds j et k , ni par aucun autre nœud de l'ensemble $N_{eff}(i)$. Ceci contredit le fait que le nœud i est complètement couvert en périmètre.

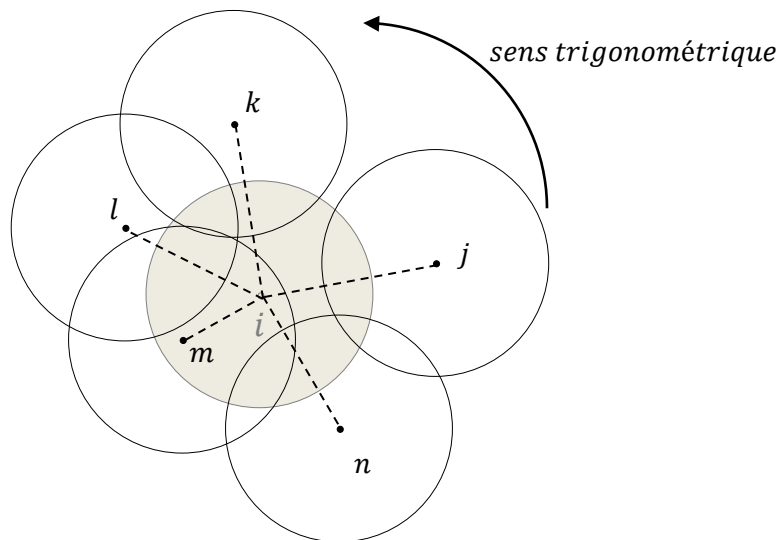


Figure 3.9. La vérification de la couverture de périmètre de i .

Le Théorème 1 ramène le problème de couverture de périmètre à un simple calcul angulaire. Ainsi, le nœud i vérifie localement s'il est couvert en périmètre en n'utilisant que les informations de localisation de ses voisins effectifs. Pour cela, il commence par ordonner l'ensemble de ses voisins à un saut dans le sens contraire aux aiguilles d'une montre, puis il élimine les voisins non effectifs. Ensuite, le nœud i prend ses voisins (effectifs) angulairement adjacents deux à deux, et calcule pour chaque paire de voisins ainsi formée, l'angle réel et l'angle seuil qui lui sont associés. Si au moins un couple de voisins forme un angle réel supérieur à l'angle seuil qui lui est associé ($\alpha_{réel} > \alpha_{seuil}$) (Le couple (j, k) sur la Figure 3.9), alors le nœud i possède un vide de périmètre dans la

direction définie par ce couple de voisins.

L'algorithme *Void segment* permet au capteur i de vérifier localement sa couverture de périmètre.

```

/* Tri de la table des voisins (NT) */
Trier table  $NT$  dans le sens contraire des aiguilles d'une montre ;
Exécuter l'algorithme Check effective ;
/* Vérification de la couverture des segments du périmètre de  $i$  */
POUR (toutes les paires de voisins effectifs  $(j, k)$  angulairement adjacents) FAIRE
    Calculer l'angle seuil  $\alpha_{seuil}(d_{ij}, d_{ik})$ ; /*formule (3.7)*/
    Calculer l'angle réel  $\alpha_{réel}(\widehat{jk})$ ; /*formule (3.8)*/
    SI  $(\alpha_{réel}(\widehat{jk}) > \alpha_{seuil}(d_{ij}, d_{ik}))$  ALORS
        Le segment délimité par  $j$  et  $k$  est non couvert ;
    FINSI
FINPOUR
SI ( $i$  ne possède au moins un segment non couvert) ALORS
    Le nœud  $i$  n'est pas couvert en périmètre ;
SINON
    Le nœud  $i$  est couvert en périmètre ;
FINSI

```

Figure 3.10. Pseudo-code de l'algorithme *Void segment*.

3.3.2. 2^{ème} phase : Le calcul de la redondance locale

Dans cette phase, les capteurs couverts en périmètre vérifient s'ils sont redondants en exécutant un critère de redondance. Ce critère permet au nœud i de savoir si sa zone de surveillance est couverte par ses voisins comme suit :

Si chaque segment de périmètre des voisins effectifs de i se trouvant dans la zone de couverture de i est couvert, alors le nœud i est redondant.

L'exécution du critère de redondance permet au nœud i d'évaluer la couverture de segment de ses voisins effectifs. Ce critère repose sur des calculs géométriques totalement localisés au niveau du capteur i . En effet, ce dernier requiert seulement la connaissance des coordonnées géographiques de ses voisins effectifs afin de calculer sa redondance. Pour cela, nous qualifions cette redondance de *redondance locale*.

Afin de vérifier sa redondance locale, le nœud i construit un couple de voisins *unique* associé à chaque voisin effectif, et se base sur la valeur de l'écart angulaire formé par ce couple pour décider de la couverture de segment du voisin en question. Dans ce qui suit, nous expliquons de quelle manière ce couple est obtenu, puis nous formalisons la procédure de vérification du critère de redondance. Avant cela nous introduisons les définitions suivantes qui sont utilisées pour le calcul de la redondance locale.

Définition 5 (*Ensemble des voisins communs*). Soit le nœud $j \in N_{eff}(i)$, l'ensemble *Com-neighbor* (i, j) est constitué des voisins communs des nœuds i et j . Formellement : Soit $j \in N_{eff}(i)$, $Com - neighbor(i, j) = \{m/m \in N_{eff}(i) \cap N_{eff}(j)\}$.

Soient le repère relatif ayant pour origine le nœud j et le cercle trigonométrique centré à l'origine j (voir Figure 3.11).

Définition 6 (*Ensemble des voisins communs gauche et droit*). L'ensemble $Com - neighbor_G(i, j)$ est constitué des voisins $l \in Com - neighbor(i, j)$ situés à gauche du vecteur \vec{ji} , tel que $|\alpha_l| \in [0, \pi[$ où $\alpha_l = \widehat{ji}l$ (Figure 3.11). $Com - neighbor_D(i, j)$ est l'ensemble des nœuds $k \in Com - neighbor(i, j)$ situés à droite du vecteur \vec{ji} , tel que $|\alpha_k| \in [\pi, 2\pi[$ où $\alpha_k = \widehat{kji}$ (Figure 3.11).

L'angle α_k , $0^\circ \leq \alpha_k \leq 180^\circ$, compris entre les vecteurs \vec{ji} et \vec{jk} est donné par :

$$\cos(\alpha_k) = \frac{\vec{ji} \cdot \vec{jk}}{\|\vec{ji}\| \|\vec{jk}\|} \quad (3.11)$$

L'angle α_l , $0^\circ \leq \alpha_l \leq 180^\circ$, compris entre les vecteurs \vec{ji} et \vec{jl} est donné par :

$$\cos(\alpha_l) = \frac{\vec{ji} \cdot \vec{jl}}{\|\vec{ji}\| \|\vec{jl}\|} \quad (3.12)$$

Dans ce qui suit, considérons l'angle α_k sachant que les formules sont similaires pour α_l . En remplaçant $\vec{ji} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$ et $\vec{jk} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}$ dans (3.11), nous obtenons :

$$\cos(\alpha_k) = \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2}{\sqrt{(x_1^2 + y_1^2)(x_2^2 + y_2^2)}} \quad (3.13)$$

$$\alpha_k = \cos^{-1} \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2}{\sqrt{(x_1^2 + y_1^2)(x_2^2 + y_2^2)}} \quad (3.14)$$

Etant donné que $\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = 1$, nous obtenons :

$$\sin(\alpha_k) = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_k} \quad (3.15)$$

La formule (3.15) permet de se positionner aisément sur le cercle trigonométrique ayant pour origine le nœud j . Ainsi, si $\sin(\alpha_k) > 0$ alors k est situé à gauche du vecteur \vec{ji} . Sinon, k est situé à droite de \vec{ji} .

Formellement :

$Com - neighbor_D(i, j) = \{m \in Com - neighbor(i, j) / -1 < \sin(\alpha_m) < 0\}$ et $Com - neighbor_G(i, j) = \{m \in Com - neighbor(i, j) / 0 < \sin(\alpha_m) < 1\}$.

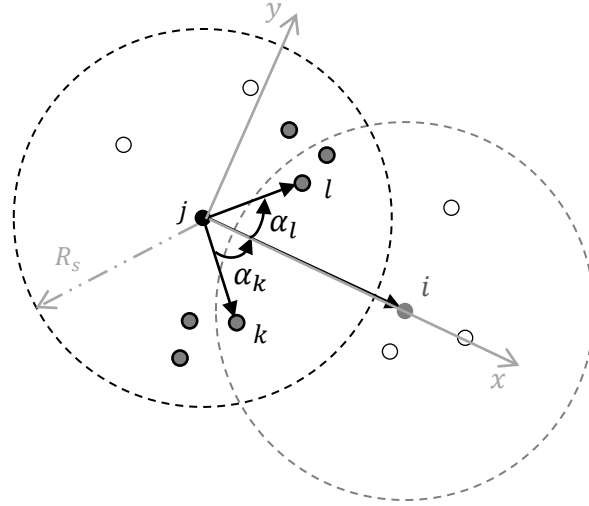


Figure 3.11. Formation des ensembles $Com - neighbor_D(i, j)$ et $Com - neighbor_G(i, j)$.

Définition 7 (Le couple *Angularly - near_i(j)*). Soit $j \in N_{eff}(i)$, *Angularly - near_i(j)* est constitué de l'unique couple de voisins (k, l) où $k, l \in N_{eff}(i) \cap N_{eff}(j)$, tel que :

$k \in Com - neighbor_D(i, j)$ avec $\alpha_k = Min \{ \alpha_u / u \in Com - neighbor_D(i, j) \}$

Et $l \in Com - neighbor_G(i, j)$ avec $\alpha_l = Min \{ \alpha_v / v \in Com - neighbor_G(i, j) \}$

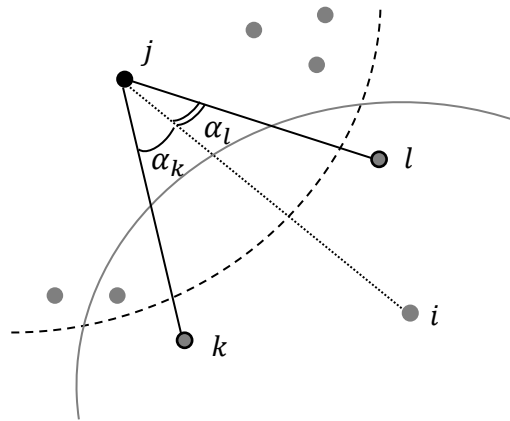


Figure 3.12. Formation du couple *Angularly - near_i(j)*.

Afin de trouver le couple de nœuds constituant *Angularly - near_i(j)*, le nœud j sélectionne parmi les nœuds de $Com - neighbor_G(i, j)$, c'est-à-dire les voisins communs de i et j situés sur le côté gauche du vecteur \vec{ji} , celui dont l'angle formé avec le vecteur \vec{ji} est le plus petit parmi tous les nœuds dans $Com - neighbor_G(i, j)$ (le nœud l sur la Figure 3.12). De façon symétrique, le nœud j sélectionne parmi les nœuds de $Com - neighbor_D(i, j)$ celui dont l'angle formé avec le vecteur \vec{ji} est le plus petit parmi tous les nœuds dans

$Com - neighbor_D(i, j)$ (le nœud k sur la Figure 3.12). Ce couple de nœuds est utilisé pour vérifier la couverture du segment de périmètre du voisin auquel il est associé.

Lemme 1

Soient $j \in N_{eff}(i)$ et $Angularly - near_i(j) = (k, l)$ (voir Figure 3.13), si le couple (k, l) ne couvre pas le segment de périmètre du nœud j se trouvant à l'intérieur de la zone de couverture du capteur i , alors le nœud j n'est pas couvert en périmètre.

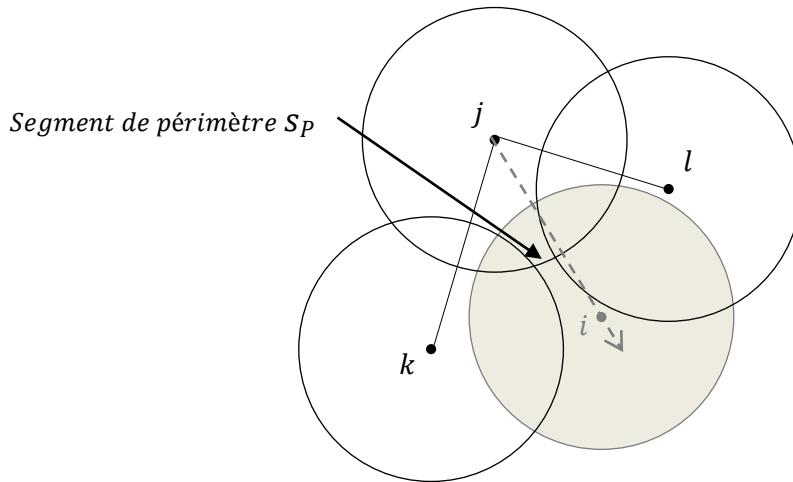


Figure 3.13. Un vide de périmètre sur le segment du nœud j .

Preuve : La démonstration de ce lemme passe par deux points : d'abord nous démontrons que si le segment de j n'est pas complètement couvert par le couple (k, l) alors il ne peut être couvert par aucun autre voisin de i . Ensuite, il s'agit de démontrer que si l'angle \widehat{kjl} est supérieur à $\alpha_{seuil}(\widehat{kjl})$ alors le segment de j possède un vide de périmètre.

- i. Désignons par S_p le segment de périmètre de j qui n'est pas couvert par le couple (k, l) et supposons que S_p est couvert par un autre voisin m .

Etant donné que $S_p \in \zeta(i)$, $\zeta(i)$ est la zone de couverture du nœud, alors le nœud m est un voisin commun de i et j ($m \in Com - neighbor(i, j)$). D'autre part, puisque m couvre S_p , il est clair que $\widehat{mji} < \widehat{kji}$ si $m \in Com - neighbor_G(i, j)$ (Figure 3.14-a), ou bien $\widehat{ijm} < \widehat{ijl}$ si $m \in Com - neighbor_D(i, j)$ (Figure 3.14-b). Donc, nous avons $Angularly - near_i(j) = (m, l)$ lorsque m est situé du côté gauche du vecteur \vec{ji} , ou $Angularly - near_i(j) = (k, m)$ quand m est situé du côté gauche du vecteur \vec{ji} . Ceci contredit le fait que S_p est couvert par un voisin m en dehors des nœuds constituant le couple $Angularly - near_i(j)$. Donc, il n'existe pas un autre voisin qui peut couvrir une partie du segment de j qui n'est pas déjà couverte par le couple de $Angularly - near_i(j)$.

- ii. La deuxième partie de la preuve, à savoir démontrer que si $\widehat{kjl} > \alpha_{seuil}(d_{jk}, d_{jl})$ alors le segment de j n'est pas couvert en périmètre, a fait l'objet du Théorème 1 et a été démontré à la Section 3.3.1.3.

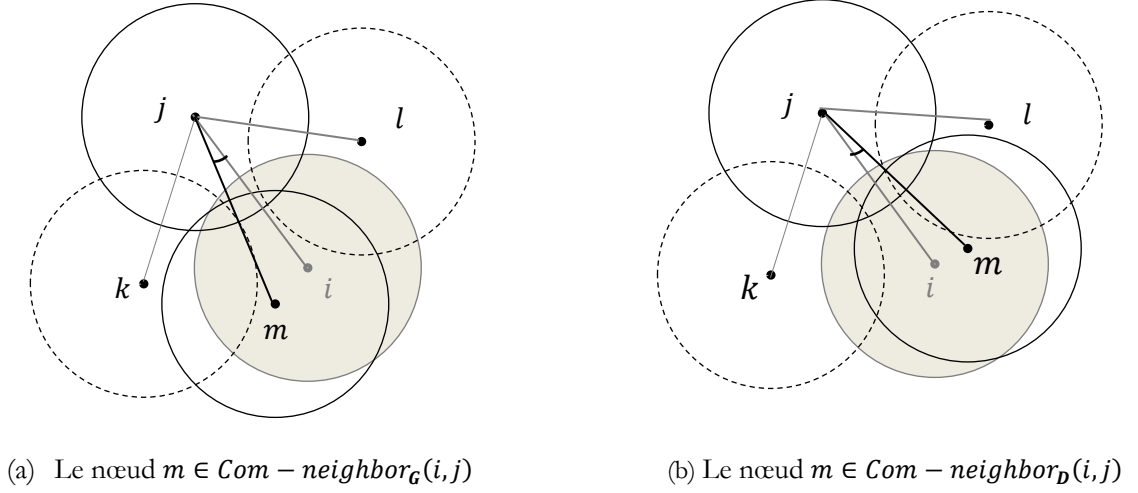


Figure 3.14. La couverture du segment de j par *Angularly - near_i(j)*.

Ce lemme permet au nœud i de savoir si le segment de périmètre se trouvant dans sa zone de surveillance $\zeta(i)$ de chacun de ses voisins est couvert par ses autres voisins effectifs. Pour cela, en formant le couple constitué des deux voisins communs gauche et droit de i et j dont l'écart angulaire avec le vecteur \vec{ji} est minimal ((m, l) sur la Figure 3.14-a), le nœud i saura si le nœud j est couvert en périmètre ou pas par ces deux nœuds. Si ces nœuds ne couvrent pas le segment de j , alors forcément il n'est couvert par aucun autre nœud du voisinage commun des nœuds i et j .

En résumé, ce lemme permet d'affirmer que le nœud j n'est pas couvert en périmètre si le segment de j n'est pas couvert par le couple de *Angularly - near_i(j)*. Ce dernier ne couvre pas le segment de périmètre de j si $\widehat{kjl} > \alpha_{seuil}(d_{jk}, d_{jl})$ tel que *Angularly - near_i(j) = (k, l)*; Ce résultat est dérivé du Théorème 1.

■ Calcul de la redondance locale

Rappelons qu'un nœud i couvert en périmètre n'a besoin que de l'information de localisation de ses voisins effectifs pour calculer sa redondance. Le critère de redondance défini dans notre méthode consiste à vérifier la couverture de périmètre de chaque voisin effectif se trouvant dans la direction de i . Pour cela le nœud i construit pour chacun de ses voisins j le couple de nœuds unique (*Angularly - near_i(j)*) et exécute une règle géométrique liée à ce couple afin de vérifier la couverture de périmètre du voisin associé.

Théorème 2

Un nœud i , couvert en périmètre, est non redondant si et seulement s'il existe $j \in N_{eff}(i)$ tel que j est non couvert en périmètre par *Angularly - near_i(j)*.

Preuve : Nous démontrons le Théorème 2 à travers les deux implications suivantes :

- i. (\Rightarrow) S'il y a un vide dans la zone de couverture du nœud i ($\zeta(i)$) alors il existe au moins un voisin j non couvert en périmètre.

Nous disons qu'il y a un vide v dans $\zeta(i)$ s'il existe au moins un point $P \in \zeta(i)$ tel que P n'est couvert par aucun voisin $j \in N_{eff}(i)$ (Figure 3.15-a). Puisque le nœud i est couvert en périmètre (Phase de prétraitement vérifiée), alors le vide v est forcément délimité par les périmètres des voisins de i . Ainsi, les segments des voisins j, k, m, n, l formant la bordure du vide ne sont pas couverts en périmètre.

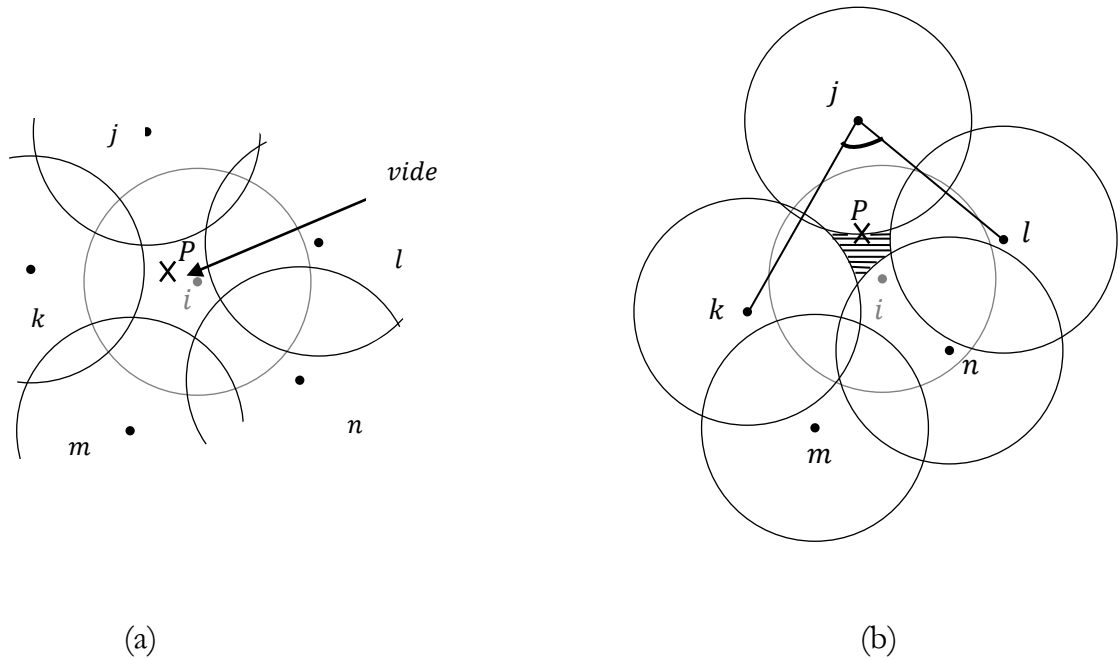


Figure 3.15. La non redondance du nœud i en présence du vide.

- ii. (\Leftarrow) Si le segment de j , tel que $j \in N_{eff}(i)$, n'est pas couvert par $Angularly - near_i(j)$ alors i possède un vide à l'intérieur de sa zone de surveillance, et est donc non redondant.

Etant donné que le segment de j n'est pas couvert par $Angularly - near_i(j)$ et en utilisant le Lemme 1, nous savons que $\widehat{kjl} > \alpha_{seuil}(\widehat{kjl})$, ainsi il existe au moins un point P appartenant au segment de j qui n'est pas couvert par le couple (k, l) , et de ce fait par aucun autre voisin du nœud i (Figure 3.15-b). Ainsi, le nœud i possède un vide dans sa zone de surveillance, ce qui prouve sa non redondance. Ce qui conclut la preuve du Théorème.

En se basant sur le Théorème 1 (section 3.3.1.3) et le résultat du Lemme1 (section 3.3.2), le Théorème 2 assure que s'il y a au moins un voisin effectif j de i dont le

périmètre n'est pas couvert par le couple de nœuds unique (k, l) qui est associé au nœud j (ie. $(k, l) \in \text{Angularly} - \text{near}_i(j)$) alors le capteur i n'est pas redondant.

Rappelons que le résultat représenté dans le Lemme 1 permet au nœud i de déduire la couverture de segment du voisin j à partir des angles $(\alpha_{\text{seuil}}, \alpha_{\text{réel}} = \widehat{kJl})$ formés par le couple de nœuds de $\text{Angularly} - \text{near}_i(j)$ associé à j . C'est de cette manière que le nœud i calcule les angles *réel* et *seuil* propres à chaque voisin effectif, si au moins un voisin possède un angle réel supérieur à l'angle seuil ($\alpha_{\text{réel}} > \alpha_{\text{seuil}}$) alors le nœud i déduit que ce voisin n'est pas couvert en périmètre, et de ce fait le nœud i ne peut pas être redondant.

L'algorithme *Local redundancy* permet au nœud de vérifier sa redondance locale :

```

SI (Le nœud  $i$  est couvert en périmètre) ALORS
  POUR (Chaque entrée  $j \in \text{NT}_{\text{eff}}(i)$ ) FAIRE
    Construire l'ensemble des voisins communs  $\text{Com} - \text{neighbor}(i, j)$ ;
    Exécuter l'algorithme Check effective sur l'ensemble  $\text{Com} - \text{neighbor}(i, j)$ ;
    Construire le couple  $(k, l)$  de  $\text{Angularly} - \text{near}_i(j)$ ;
    Calculer les angles  $\alpha_{\text{réel}}$  et  $\alpha_{\text{seuil}}$  associés au couple  $(k, l)$ ;
    SI  $(\alpha_{\text{réel}}(\widehat{kJl}) > \alpha_{\text{seuil}})$  ALORS
      Enregistrer l'identifiant du nœud  $j$  dans  $L_{\text{temp}}$ ;      /*  $L_{\text{temp}}$  est la liste temporaire des voisins  $j$  de  $i$  couvert en
                                                                périmètre par le couple  $(k, l)$  associé*/
    FINSI
  FINPOUR
SI ( $L_{\text{temp}} = \text{NT}_{\text{eff}}(i)$ ) ALORS
  Le nœud  $i$  est redondant localement;
SINON
  Le nœud  $i$  n'est pas redondant localement;
FINSI
FINSI

```

Figure 3.16. Pseudo-code de l'algorithme *Local redundancy*.

3.3.3. 3^{ème} phase : Coordination entre capteurs redondants

Dans la méthode RND, tous les nœuds du réseau commencent par vérifier s'ils sont couverts en périmètre (phase de *prétraitement*). Ensuite, seuls les nœuds couverts en périmètre calculent leur redondance (phase de *calcul de la redondance locale*). Ce calcul est totalement localisé au niveau de chaque capteur qui requiert seulement les informations de localisation de ses voisins. Cette approche localisée permet à la méthode d'être robuste (i.e. la panne d'un ou plusieurs capteurs n'influe pas sur le calcul), adaptable à un changement de topologie et assurant le passage à l'échelle.

Toutefois, si deux nœuds voisins sont redondants, alors un vide de couverture peut apparaître dans le réseau si ces nœuds se déplacent (ou bien se désactivent) simultanément. En effet, l'élimination (désactivation/déplacement) d'un nœud redondant peut entraîner la non redondance de son voisin redondant, car il y a une inter-dépendance dans leur redondance. Par exemple, sur la Figure 3.17 le nœud i est complètement couvert par les nœuds k, l et j ; le nœud j est également complètement couvert par les

nœuds n, m et i . Ainsi, les nœuds i et j sont redondants et se recouvrent mutuellement, c'est-à-dire que le nœud i contribue à la redondance du nœud j (et inversement). Donc, ils ne peuvent pas être éliminés au même temps.

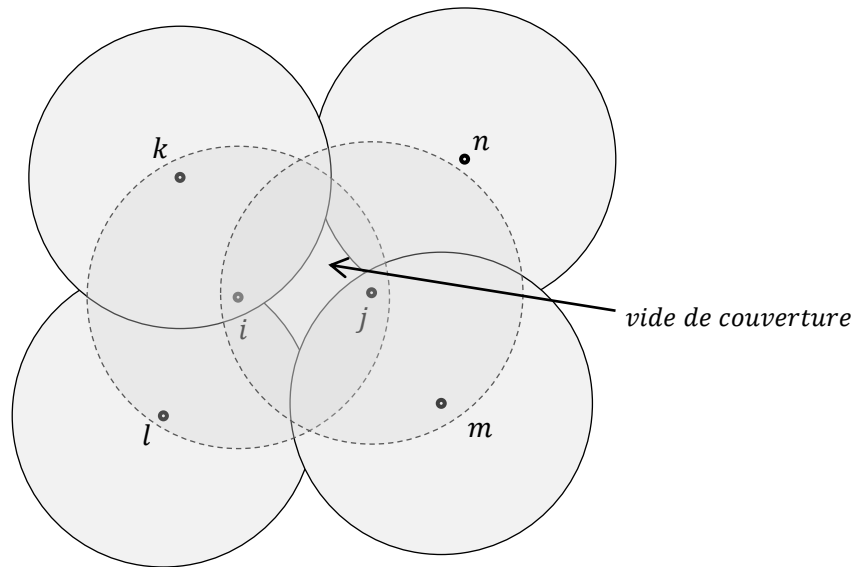


Figure 3.17. Représentation d'un vide de couverture causé par la désactivation de deux capteurs (redondants) interdépendants.

Dans ce contexte, il s'agit de prendre des précautions quand il s'agit d'éliminer des nœuds redondants voisins du réseau, et ce, en coordonnant les décisions d'élimination parmi les nœuds redondants voisins du réseau. Pour cela, il est nécessaire d'introduire dans la méthode, à la suite du calcul de la redondance locale, une *phase de coordination* entre les capteurs redondants localement.

Nous avons vu au chapitre 2 (section 2.5) que les solutions existantes dans la littérature utilisent pour la plupart un mécanisme de backoff aléatoire. Ce mécanisme a pour inconvénient d'induire des coûts de communication supplémentaire en raison de l'échange de messages indiquant l'état des nœuds redondants à des intervalles de temps aléatoire. De plus, les schémas de backoff sont appropriés pour les algorithmes d'ordonnancement d'activités qui visent à épuiser les charges des capteurs équitablement à travers des périodes de sommeil et de réveil alternées. En revanche Carburnar *et al.* [CAR06] proposent une solution différente basée sur une modification du problème du Maximal Independent Set (MIS) proposé dans [LUB85].

Le MIS représente l'ensemble maximal de sommets I d'un graphe non dirigé $G = (V, E)$ tel qu'aucune paire de sommets dans I ne sont adjacents [LUB85]. *Luby* [LUB85] a proposé un algorithme parallèle aléatoire pour la sélection de l'ensemble maximal indépendant. Dans cet algorithme, chaque sommet v est ajouté à I aléatoirement avec une probabilité $p(v)$ calculée. De ce fait, l'ensemble I n'est pas unique. Par contre, Carburnar *et al.* [CAR06] proposent une solution distribuée et déterministe au problème du MIS en

introduisant une heuristique permettant d'optimiser le nombre maximal de nœuds redondants pouvant être éliminés simultanément sans créer de vide de couverture dans le réseau. Ces nœuds forment l'ensemble maximal indépendant.

Dans la troisième phase de notre méthode, la coordination dans les décisions de redondance parmi les capteurs redondants localement du réseau se fait d'une façon distribuée. Nous proposons pour ce faire une modification de l'algorithme de Carbutar *et al.* [CAR06] de manière à considérer le concept des voisins effectifs dans la sélection du MIS. Nous qualifions cette redondance de redondance *globale* qui garantit la sélection des capteurs redondants en assurant un comportement global cohérent du réseau. En d'autres termes, les capteurs *redondants globalement* sont les capteurs redondants qui peuvent être éliminés simultanément tout en conservant la couverture de la zone d'intérêt du réseau.

Dans ce qui suit, nous formalisons le problème du MIS, puis nous présentons la solution de Carbutar *et al.* [CAR06] en faisant ressortir ses étapes. Notre contribution se situe à reconsidérer l'ensemble des arcs du graphe considéré par leur solution, dans le but d'augmenter le nombre de capteurs redondants globalement du réseau.

3.3.3.1. Un aperçu sur le MIS

Avant de détailler l'algorithme proposé dans [CAR06], nous donnons une définition formelle du MIS.

Définition 8 (*L'ensemble maximal indépendant*) [LUB85]: Soit un graphe $G = (V, E)$, un ensemble indépendant est un ensemble $S \subset V$ qui ne contient aucun arc de G , i.e. $\forall (u, v) \in E$ soit $u \notin S$ et/ou $v \notin S$. L'ensemble indépendant S est un ensemble maximal indépendant si pour tout $v \in V$ soit $v \in S$ ou $N(v) \cap S \neq \emptyset$ où $N(v)$ désigne les voisins de v .

Ainsi, un MIS est un ensemble maximal de nœuds dans un réseau tel qu'il n'y a pas deux nœuds qui soient des voisins. Étant donné que l'ensemble est maximal, chaque nœud du réseau est soit dans le MIS ou bien il est voisin d'un nœud dans le MIS.

Une façon simple de construire le MIS est que chaque nœud rejoigne l'ensemble si aucun de ses voisins n'a rejoint le MIS [KUH05]. Toutefois, ceci résulte en une exécution entièrement séquentielle et un temps de calcul linéaire car il y a un seul point d'exécution à chaque instant. De ce fait, il existe des algorithmes qui surpassent cette exécution séquentielle, en proposant de construire le MIS en parallèle [MOS05, GAN04]. Par exemple, dans un graphe composé de nœuds représentant des processeurs, un MIS définit un ensemble de processeurs pouvant opérer en parallèle sans interférence. Par ailleurs, le problème du MIS revêt un intérêt théorique remarquable dans le calcul distribué. La communauté des réseaux sans fil, en l'occurrence les réseaux ad hoc et les réseaux de capteurs sans fil, porte une attention particulière à ce problème en l'exploitant notamment pour le clustering afin de simplifier la gestion du réseau. En effet, le clustering induit par le MIS implique des propriétés intéressantes permettant de réduire la complexité des

algorithmes de routage et faciliter l'agrégation de données [KUH05].

3.3.3.2. La construction du MIS

La phase de *coordination* consiste à sélectionner, parmi les capteurs redondants localement, les capteurs redondants pouvant être éliminés simultanément sans créer un vide de couverture. Ces nœuds doivent former un MIS, puisque la caractéristique inhérente à cet ensemble est de ne pas contenir des nœuds voisins.

Dans [CAR06], les auteurs ont proposé une solution distribuée et déterministe, inspirée de l'algorithme aléatoire de *Luby* [LUB85], pour construire le MIS. Pour cela, Carbutar *et al.* [CAR06] associent un degré à tous les nœuds du graphe et se basent sur une intuition simple pour construire le MIS de façon déterministe : les nœuds ayant le plus petit degré (i.e. le nombre de voisins) sont retenus pour former le MIS. Cette heuristique permet également de maximiser la taille du MIS, car les nœuds ayant le plus petit degré excluent du MIS le moins de nœuds dans leur voisinage.

Toutefois, les auteurs dans [CAR06] présentent une description succincte de leur algorithme, ce qui ne permet pas d'appréhender clairement la procédure de construction du MIS. Pour cela, nous proposons de détailler les étapes de déroulement de leur algorithme, qui est une partie intégrante de cette troisième phase de *coordination*. Avant cela, nous précisons la modification que nous apportons au graphe modélisant le problème d'inter-dépendance des nœuds redondants, proposé dans [CAR06], et ce, afin de prendre en compte le concept des *voisins effectifs* employé dans notre méthode.

Soit $G_R = (V_R, E_R)$ le graphe de redondance du réseau, où V_R est l'ensemble des nœuds redondants et E_R est l'ensemble des arcs reliant deux nœuds voisins redondants [CAR06]. Puisque la zone de chevauchement d'un capteur redondant avec son voisin *non effectif* est obligatoirement couverte par un autre voisin *effectif*, alors l'élimination simultanée d'un nœud redondant et ses voisins *non effectifs* ne crée pas de vide dans la zone de couverture. En conséquence, il n'est pas nécessaire de coordonner les décisions de redondance entre les capteurs redondants et leurs voisins *non effectifs*. De ce fait, l'ensemble E_R comportera alors les arcs reliant les nœuds redondants avec leurs *voisins effectifs* seulement.

Illustrons ce mécanisme à travers l'exemple de la Figure 3.18 qui représente trois nœuds voisins redondants i, j et k tel que j est un voisin *effectif* de i , et k est un voisin *non effectif* de i (Figure 3.18(a)). Le retrait simultané du nœud i et son voisin *non effectif* k ne crée pas de vide de couverture dans la zone d'intérêt puisque la surface de chevauchement de leurs zones de couverture est couverte par le nœud j (Figure 3.18(b)). Par contre, un vide de couverture apparaît dans le réseau lorsque le nœud i et son voisin *effectif* j sont éliminés au même temps (Figure 3.18(c)).

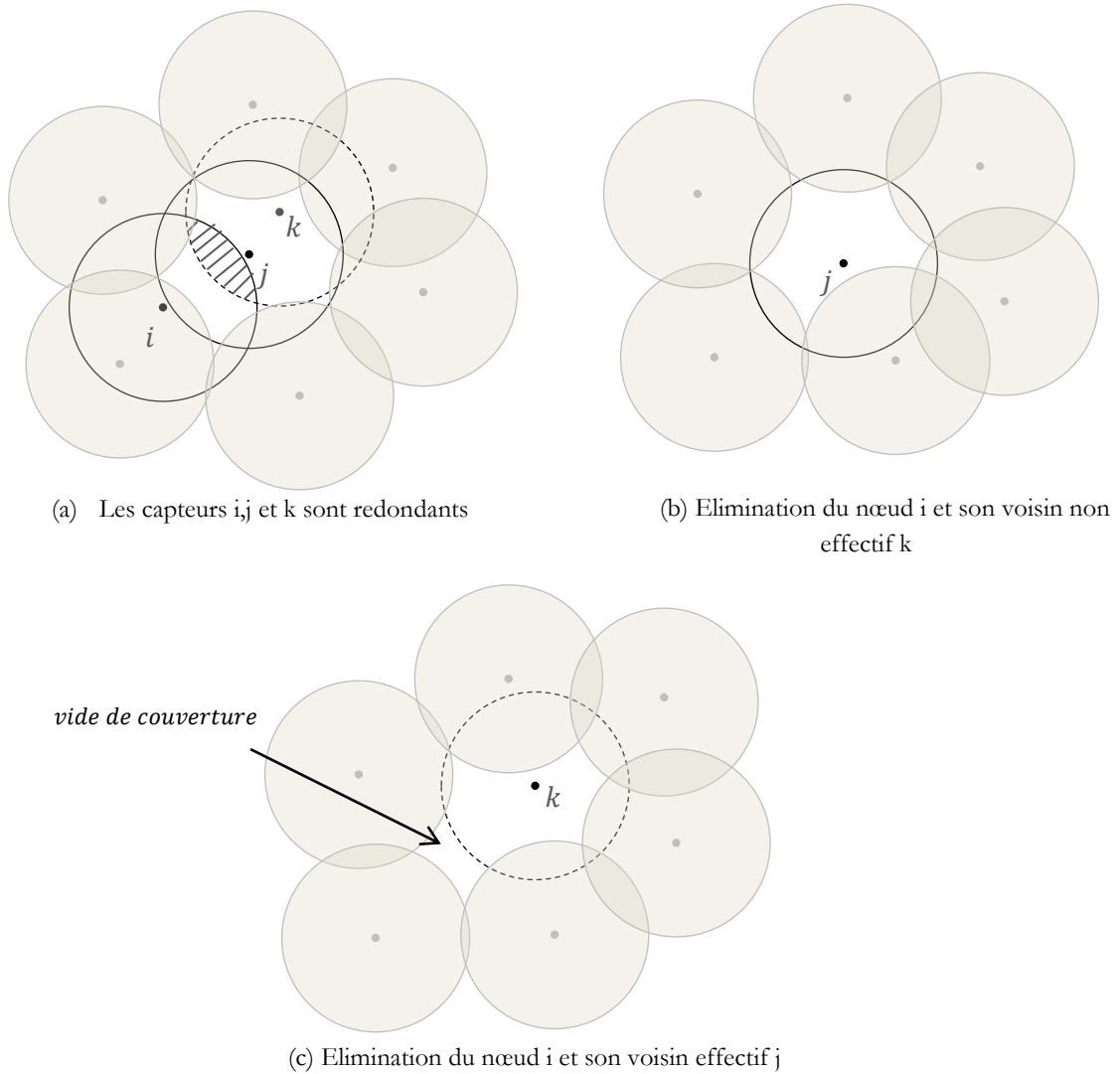


Figure 3.18. Le rôle des voisins effectifs dans la coordination entre capteurs redondants localement.

Donc, le problème de la redondance globale revient à trouver l'ensemble maximal indépendant du graphe $G_R = (V_R, E'_R)$, tel que E'_R représente l'ensemble des arcs reliant chaque nœud redondant avec ses voisins effectifs.

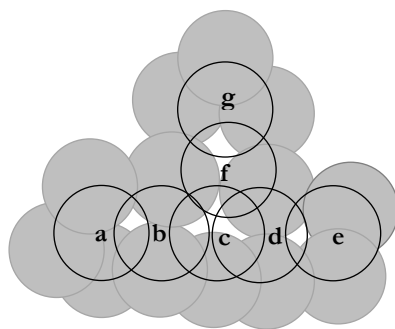
Dans cette phase de *coordination*, nous avons repris l'algorithme proposé par Carbutar *et al.* [CAR06] qui sélectionne, parmi les sommets du graphe de redondance, les nœuds redondants formant un MIS. La procédure de déroulement de leur algorithme constitue la base de cette phase. Nous modifions l'ensemble des arcs constituant le graphe de redondance du réseau, en considérant à chaque étape de l'algorithme, les *voisins effectifs* seulement. L'algorithme procède en rounds, les trois étapes suivantes définissent un round :

- **Etape 1 :** Chaque nœud redondant compte le nombre de ses voisins *effectifs* redondants à un saut, ce nombre définit le *degré* du nœud, celui-ci envoie ensuite un message contenant son identifiant et son degré à ses voisins effectifs redondants seulement.

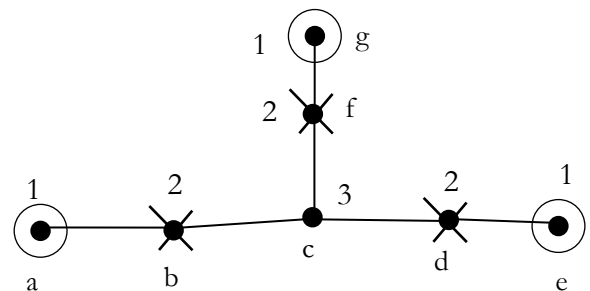
- **Etape 2 :** Lorsqu'un nœud redondant reçoit ce message de tous ses voisins redondants effectifs, il compare son degré avec les degrés de ses voisins. S'il possède la plus petite valeur, il se proclame gagnant.
- **Etape 3 :** Chaque nœud gagnant envoie à ses voisins effectifs un message annonçant qu'il est gagnant. Un nœud redondant recevant un tel message devient perdant. Les nœuds gagnants sont élus pour être éliminés du réseau (désactivés/déplacés), et les nœuds perdants ne sont plus redondants. Seuls les nœuds qui ne sont ni gagnants ni perdants participent au round suivant (Retour à l'étape 1).

L'algorithme converge et le nombre de rounds de cet algorithme est $o(\log n)$ tel que n est le nombre de sommets du graphe.

Considérons l'exemple de la Figure 3.19 qui représente le graphe de redondance (Figure 3.19-b) du réseau illustré par la Figure 3.19-a. Sur ce graphe, le nombre associé aux nœuds représente leur degré, les nœuds encadrés a, e, g représentent les gagnants du premier round, car ils ont le plus petit degré dans leur voisinage immédiat. Les nœuds barrés (b, d, f) représentent leurs voisins perdants. Le nœud c n'est pas un perdant étant donné qu'aucun de ses voisins directs n'est gagnant. Après ce premier round, le nœud c est l'unique sommet du graphe de redondance, et devient en conséquent un nœud gagnant. Donc les nœuds du réseau élus pour être éliminés simultanément sont les nœuds a, e, g et c .



(a) Les capteurs a, \dots, g sont redondants



(b) Le nombre associé aux nœuds représente leur degré dans le graphe de redondance.

Figure 3.19. Illustration de la construction du MIS.

A l'issue de chaque round, les nœuds gagnants forment un *ensemble indépendant*. A la fin de l'algorithme, les nœuds redondants sélectionnés pour être éliminés simultanément forment un *ensemble maximal indépendant*.

L'algorithme *GlobalRedundancy*, dont le pseudo-code est donné par la Figure 3.20, permet au nœud i de décider s'il est redondant globalement :

```

Chaque nœud redondant localement  $i$  effectue les opérations suivantes :
Calculer le nombre de ses voisins effectifs redondants ( $deg_i$ );
Envoyer ( $deg_i$ ) aux voisins effectifs redondants ;
Enregistrer les degrés ( $deg_j$ ) reçus par les nœuds voisins effectifs redondants ;
 $Etat_i \leftarrow L$ -redondant ;          /* L'état du nœud  $i$  est initialment redondant localement */
TANTQUE ( $Etat_i = L$ -redondant) FAIRE
     $deg_{MINj} \leftarrow \text{MIN}\{deg_j / j \in N_{eff}(i)\}$  ;
    SI ( $deg_i = 0$ ) ALORS          /*Le nœud  $i$  n'a pas de voisin (effectif) redondant */
         $Etat_i \leftarrow GL$ -redondant ;    /*Le nœud  $i$  est redondant globalement (gagnant)*/
    SI ( $deg_i \neq 0$ ) ALORS
        SI ( $deg_i < deg_{MINj}$ ) ALORS
             $Etat_i \leftarrow GL$ -redondant ;
            Envoyer  $Etat_i(off)$  aux voisins effectifs ;
        SINON
            SI ( $deg_i > deg_{MINj}$ ) ALORS
                SI (réception  $Etat_j(off)$ ) ALORS  $Etat_i \leftarrow$  Perdant ;
                SINON  $Etat_i \leftarrow L$ -redondant ;    /*Le nœud  $i$  participe au round suivant */
            FINSI
        FINSI
    FINSI
FINTANTQUE

```

Figure 3.20. Pseudo-code de l'algorithme *GlobalRedundancy*.

3.4. Discussion

Le contexte des réseaux de capteurs nous impose de réduire les sources de consommations d'énergie lors de la conception de protocoles. Pour cela, nous avons privilégié une approche totalement localisée. Par ailleurs, il nous a semblé inutile que des nœuds non couverts en périmètre poursuivent le calcul de leur redondance. Ces deux points de réflexion ont abouti à un déroulement en phases de la méthode. Les deux premières phases sont localisées au niveau de chaque nœud et la dernière phase adopte une approche distribuée.

Rappelons que la conception de la méthode RND fut motivée au premier abord par l'aspect redéploiement des régions vides, c'est-à-dire que les capteurs redondants, dotés d'une capacité de mobilité, se déplaceraient pour réparer la couverture d'un ou de plusieurs vides dans le réseau. Toutefois, le déroulement de la méthode en trois phases successives lui permet de s'appliquer à la fois à une solution d'ordonnancement d'activités et à une solution de réparation de vides. En effet, dans ces deux contextes, les deux phases de prétraitement et de calcul de la redondance locale restent inchangées, seule la phase de coordination doit être enrichie par des critères de sélection des nœuds redondants globalement spécifiques à chaque application.

Par exemple, en introduisant le critère d'énergie résiduelle en plus du degré associé à chaque nœud redondant dans le graphe de redondance, la méthode pourrait s'appliquer à

une solution d'ordonnement d'activités en garantissant d'alterner les charges équitablement dans le réseau tout en préservant la couverture de surface.

Une autre variante de l'algorithme peut être élaborée pour s'adapter à une application de relocalisation. De façon similaire, les changements seraient reportés seulement dans la dernière phase de la méthode, dans laquelle les nœuds redondants globalement seraient sélectionnés en fonction de la distance les séparant de la région vide ou encore de leur énergie restante après leur déplacement. Ainsi, le degré associé à ces nœuds dans le graphe de redondance n'est plus un critère déterminant dans la sélection des capteurs redondants globalement. Pour cela, nous pourrions ajouter les deux autres critères pour le choix des capteurs redondants à déplacer.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une nouvelle méthode appelée RND pour la détection des capteurs redondants dans un réseau de capteurs sans fil. Elle prend en compte les spécificités et les contraintes imposées par les réseaux de capteurs ; notamment la ressource énergétique limitée des capteurs ou encore la densité importante des nœuds déployés. En effet, l'exécution totalement localisée du calcul de la redondance permet à la solution d'assurer le passage à l'échelle et d'impliquer un coût énergétique assez faible. De plus, l'approche distribuée adoptée pour la coordination entre les nœuds redondants permet de réduire les overheads de communication contrairement aux solutions centralisées.

Nous avons donné les différentes phases de déroulement de la méthode, à savoir le prétraitement, le calcul de la redondance locale et la coordination entre les capteurs redondants de la phase précédente pour la sélection des capteurs redondants globalement, c'est-à-dire ceux pouvant être éliminés simultanément tout en préservant la couverture de la zone d'intérêt. La différence de notre contribution, par rapport aux travaux ultérieurs portant sur la détection des nœuds redondants dans les réseaux de capteurs sans fil, se résume dans les points suivants :

- Exécution d'un calcul de prétraitement permettant de restreindre le calcul aux nœuds potentiellement redondants.
- Proposition d'une démarche de calcul géométrique basée sur une règle simple de calcul angulaire.
- Adaptation de l'algorithme du MIS (*Maximal Independent Set*) pour la coordination entre les capteurs redondants en lui associant le concept des voisins effectifs.

Dans le prochain chapitre, nous évaluerons les performances de notre contribution. Pour cela, nous effectuons des simulations et nous comparons les résultats obtenus à d'autres solutions de la littérature représentatives de notre travail.

Chapitre 4

Evaluation des performances de la méthode RND

4.1. Introduction

Pour évaluer les performances d'une solution de détection de la redondance dans un réseau de capteurs sans fil, il n'est pas toujours possible d'accéder aux infrastructures nécessaires en raison de leur coût élevé. De plus, les expérimentations réelles n'offrent pas toujours une grande souplesse. Par exemple, il est difficile de gérer la distribution des nœuds déployés aléatoirement dans un grand terrain, et de générer volontairement des capteurs redondants pour mesurer les performances d'une méthode de détection de la redondance. Pour ces raisons, la simulation est une solution adéquate pour évaluer ce type de protocole, et en particulier notre solution. L'objectif d'une simulation est de prévoir le comportement du réseau en fonction d'un certain nombre de facteurs influents bien avant de procéder à un déploiement réel.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de l'évaluation des performances de notre méthode effectuée par simulation en utilisant le simulateur de réseaux NS2 (Network Simulator 2). Afin de réaliser une évaluation objective et significative, nous avons comparé nos résultats à quelques travaux de la littérature qui ont déjà été étudiés dans le chapitre d'état de l'art [JIA04, CAR06, KHE11]. Pour ce faire, nous reprenons dans nos simulations les mêmes paramètres du système (densité des nœuds déployés, rayon de couverture) et métriques de performance employés dans ces travaux. D'autres métriques sont ajoutées à nos simulations et visent à évaluer des performances propres à notre solution.

Dans nos comparaisons, nous avons retenu les travaux les plus représentatifs de notre travail, en termes de concepts utilisés ou encore de démarche de calcul. En effet, la méthode proposée par Jian *et al.* [JIA04] utilise le concept des *voisins effectifs* qui a été repris dans notre travail. Cette méthode adopte également une méthodologie de calcul de la redondance similaire à la nôtre dans laquelle la vérification de la redondance passe par

deux conditions, une condition *nécessaire mais pas suffisante* et une condition *suffisante*. Nous retenons aussi la méthode proposée dans [CAR06] car elle propose un mécanisme de *coordination*, entre les capteurs redondants, basé sur le problème de construction du MIS (*Maximal Independant Set*). De plus, cette méthode s'appuie sur un outil de modélisation géométrique performant, le diagramme *voronoï*, qui lui confère une exactitude dans l'évaluation de la redondance. Le travail proposé dans [KHE11] nous permet de vérifier le passage à l'échelle de notre solution, étant donné que les auteurs considèrent dans leur environnement de simulation une densité importante de capteurs dans une zone d'intérêt assez réduite.

4.2. Méthodologie de simulation

Le simulateur NS2 [UCB09] est un outil logiciel de simulation de réseaux informatiques. Il est bâti sur les idées de la conception par objet, de réutilisation du code et de modularité. Deux langages de programmation sont utilisés pour le développement de protocoles dans NS : C++ et Otcl. Les modules de base du simulateur et les principaux protocoles sont implémentés en C++. Une couche Otcl est ajoutée au noyau pour servir d'interface à l'utilisateur.

La mise en œuvre d'une simulation se fait via une étape qui décrit la topologie du réseau et le comportement de ses composants (le trafic), puis vient l'étape de simulation proprement dite et enfin l'interprétation des résultats en utilisant un langage script pour l'extraction de données, comme Perl par exemple, et des outils pour la visualisation de ces résultats (Figure 4.1).

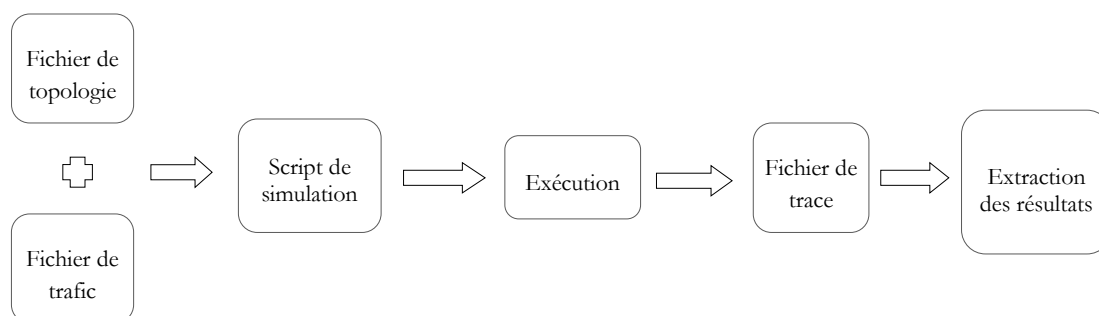


Figure 4.1. Processus de simulation.

4.3. Implémentation de la méthode RND

Pour l'implémentation de notre méthode, nous avons adopté l'approche objet offerte par Otcl. Chaque phase du protocole de détection de la redondance est associée à une méthode qui identifie les étapes constituant la phase.

La classe « rddClass », dont les instances sont des objets agents de calcul de la redondance AgentRDD, permet d'associer à chaque nœud un agent de calcul. La classe « AgentRDD » est la classe la plus importante de notre implémentation car elle regroupe les principales méthodes du protocole RND, en l'occurrence :

- `VoidAngle` : vérifie si un nœud est couvert en périmètre.
- `Voisins_Effectifs` : construit l'ensemble des voisins effectifs d'un nœud donné.
- `Ordernt_EntryList` : ordonne les voisins angulairement dans le sens anti-horaire.
- `VoidDirection` : détermine pour un nœud donné, parmi ses voisins effectifs, le couple de voisins formant un angle vide.
- `Check_Redundant` : calcule la redondance locale d'un nœud.
- `Annonce_RDD` : construit un paquet de type `PT_RDD_ANN` pour annoncer la redondance d'un nœud à ses voisins.
- `Synchronisation` : détermine la redondance globale d'un nœud.

4.4. Paramètres de simulation utilisés

Pour réaliser nos simulations, nous avons défini d'une part les paramètres du réseau relatifs aux couches physique, liaison de données et MAC. D'autre part, nous avons identifié les paramètres qui définissent les environnements dans lesquels les simulations ont été effectuées, et ce, afin de se situer dans le même contexte des algorithmes avec lesquels nos résultats seront comparés.

4.4.1. Paramètres du réseau

Dans le modèle énergétique de ns-2, l'énergie est implémentée comme étant un attribut du nœud et a une valeur initiale représentant le niveau d'énergie du nœud au début de la simulation [ISS09]. Cette énergie est utilisée pour chaque émission ou réception d'un paquet. Ainsi, elle est mise à jour selon la puissance d'émission et de réception du paquet. La classe du modèle d'énergie est définie dans le fichier "`ns/energymodel.cc`". Une autre classe est définie dans le fichier "`ns/wireless-phy.cc`", qui contient les fonctions qui diminuent l'énergie pour chaque paquet reçu `DecrRcvEnergy(txtime, P_tx)` et chaque paquet émis `DecrTxEnergy(rcvtime, P_rcv)` par un nœud. Ces deux fonctions ont comme paramètres le temps d'émission `txtime` et le temps de réception `rcvtime`. Les attributs `P_tx` et `P_rcv` représentent respectivement la puissance d'émission et de réception nécessaires pour l'interface physique PHY du nœud.

L'attribut `energy_` de chaque nœud représente la valeur d'énergie courante pendant la simulation. Au début de la simulation, la valeur de `energy_` est `initialEnergy_` qui représente l'énergie initiale du nœud. La mise à jour de l'énergie par ces fonctions est faite par le nœud comme suit :

Pour l'énergie d'émission : $energy_ = energy_ - txtime * P_{tx}$;

Pour l'énergie de réception : $energy_ = energy_ - rcvtime * P_{rcv}$.

Dans la couche physique, nous utilisons :

- Le modèle *WirelessChannel* comme type du canal de transmission. Ce modèle est utilisé pour interconnecter tous les nœuds dans un scénario de simulation et pour échanger des trames entre un émetteur et des récepteurs dans la zone de communication. Il ne gère ni l'interférence ni la collision.
- Le modèle *WirelessPhy* pour l'interface réseau sans fil. Lorsqu'une trame est reçue par *WirelessPhy* provenant de *WirelessChannel*, la puissance de réception P_t du module radio est vérifiée. Si P_t dépasse le seuil de détection (*Carrier SenseThreshold*), la trame est transmise au module MAC 802.11. Par contre, lorsqu'une trame est reçue du module MAC 802.11, cette dernière est envoyée directement au module *WirelessPhy*.
- Le modèle RF (*Radio Frequency*) qui nous renseigne sur la puissance P_t de chaque trame reçue par le module *WirelessPhy*. Cette puissance dépend du modèle de propagation et de la distance séparant l'émetteur du récepteur. Trois modèles de propagation existent dans ns-2, à savoir *TwoRayGround*, *FreeSpace* et *Shadowing* [CHQ06]. Dans nos simulations, nous avons utilisé le modèle *TwoRayGround*. Ce dernier considère qu'il existe un chemin direct entre l'émetteur et le récepteur (*Direct Path*) et un chemin de réflexion du sol (*Ground Reflection Path*).
- Le modèle *OmniAntenna* pour l'antenne assurant une émission dans toutes les directions.
- Le modèle *RADIO-NONNOISE* pour la couche radio. Notons que ce modèle ne prend pas en compte le bruit.

Dans la couche liaison de données, nous utilisons :

- Le modèle *Queue/DropTail/PriQueue* pour la file d'attente de la couche MAC. La taille de cette file est de 50 paquets.
- Le standard IEEE 802.11 dans la couche MAC. Tout paquet émis est précédé de messages RTS/CTS (*Ready To Send/Clear To Send*) pour réserver le médium et préparer la transmission des données. Les paquets de type diffusion (*broadcast*) ne sont ni précédés de messages RTS/CTS ni acquittés (ACK) par leurs récepteurs.

4.4.2. Paramètres de l'environnement de simulation

L'environnement dans lequel les simulations ont été effectuées peut être décrit à travers un certain nombre de paramètres. Pour comparer les performances de la méthode RND à d'autres algorithmes, nous avons réalisé les simulations dans des contextes d'exécution différents liés aux environnements dans lesquels ces algorithmes ont été évalués. Pour cela, nous utilisons des zones d'intérêt de dimension différentes : $50 \times 50 \text{ m}^2$, $100 \times 100 \text{ m}^2$, $200 \times 200 \text{ m}^2$ et $600 \times 600 \text{ m}^2$.

La méthode RND est exécutée lors du déploiement du réseau et fournit à l'application (ordonnancement ou relocalisation) les capteurs redondants à désactiver ou à déplacer. De ce fait, il faut prévoir la fin du calcul de la redondance afin de permettre à l'application d'exploiter au plus vite les capteurs redondants. Pour cela, nous avons introduit un mécanisme permettant de terminer les simulations lorsque la somme des nœuds redondants détectés par RND avec les nœuds restants (non redondants) atteint le nombre total des nœuds déployés dans le réseau.

Les paramètres variables utilisés dans les simulations sont les suivants :

- La densité des nœuds déployés : Elle représente le nombre de nœuds déployés dans la zone d'intérêt. La variation de ce paramètre permet de mesurer l'impact du nombre de capteurs déployés dans le réseau sur les performances de notre méthode.
- Le rayon de couverture : Il définit la portée de détection R_s d'un capteur, le rayon sera varié afin de monter l'influence de l'augmentation de ce paramètre sur le calcul de la redondance.

Notons que les valeurs prises par le rayon de communication R_c sont supérieures ou égales à deux fois le rayon de couverture R_s ($R_c \geq 2R_s$), afin que chaque capteur soit en mesure de communiquer avec ses voisins, ce sont les nœuds avec lesquels il possède un chevauchement des zones de couverture.

Chaque point de nos graphes est une moyenne de 10 simulations (itérations), effectuées dans les mêmes conditions. Ainsi, le résultat final pour une simulation est la moyenne des 10 itérations. Afin de se rapprocher de la réalité du contexte applicatif, nous considérons un déploiement aléatoire des capteurs dans la zone d'intérêt (Figure 4.2).

L'ensemble des paramètres utilisés dans les différentes simulations effectuées sont résumés dans le tableau 4.1.

Dimension de la surface	50×50 m ² -100×100 m ² -200×200 m ² - 600×600 m ²
Nombre de nœuds	[150-1000] nœuds
Rayon de couverture	[5-50] m
Couche MAC	IEEE 802.11
Couche radio	RADIO-NONOISE
Modèle de propagation	TwoRayGround
Modèle d'antenne	OmniAntenna
Modèle de file d'attente	Queue/DropTail/PriQueue
Canal de transmission	WirelessChannel
Interface réseau sans fil	WirelessPhy
Bande passante	200 Kb/s
Modèle d'énergie	energyModel de ns-2
Puissance d'émission	0.666 w
Puissance de réception	0.395 w

Tableau 4.1. Paramètres de simulation utilisés.

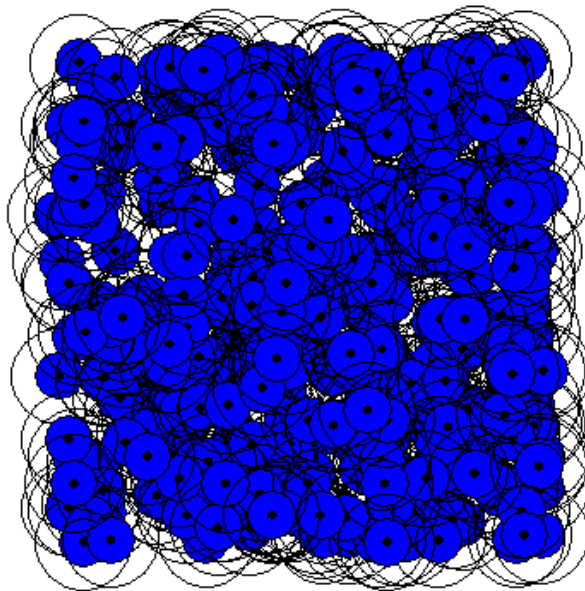


Figure 4.2. Exemple de distribution aléatoire des nœuds employée dans une simulation (surface 200×200 m², nœuds=400).

4.5. Métriques de performance

Afin d'évaluer les performances de notre méthode, nous avons réalisé un certain nombre de mesures. Certaines de ces mesures permettent de comparer les résultats obtenus avec notre méthode à quelques travaux représentatifs dans la littérature basant leur évaluation des performances sur ces mêmes métriques, à savoir : le nombre de capteurs redondants localement, le nombre de capteurs redondants globalement. D'autres mesures permettent de réaliser une évaluation propre à la solution, ces mesures sont le degré de couverture et l'énergie consommée du réseau.

- **Nœuds redondants localement (NRL)** : La métrique *NRL* représente le nombre de capteurs du réseau redondants localement. Elle est obtenue à l'issue de la phase de calcul de la redondance locale (phase 2) au niveau de chaque capteur.
- **Nœuds redondants globalement (NRG)** : La métrique *NRG* représente le nombre de capteurs redondants pouvant être éliminés simultanément sans perte de couverture de la zone d'intérêt. Cette métrique est obtenue à la suite de l'exécution de la phase de coordination entre les capteurs du réseau redondants localement.
- **Degré de couverture moyen (DCM)** : Cette métrique reflète la redondance de couverture de la zone de déploiement. Ainsi, un degré de couverture élevé induit un signalement de données plus important lorsque des événements se produisent, et par conséquent cette redondance de données implique une charge de trafic supplémentaire.

Le degré de couverture est une métrique qui confirme l'efficacité de la méthode RND, car elle représente la capacité de la méthode à réduire la redondance de

couverture du réseau et à préserver la couverture de surface. Elle est calculée en discrétisant la zone d'intérêt en grilles de longueur $1\text{m} \times 1\text{m}$. En assumant qu'un évènement se produise au centre de chaque grille, le degré de couverture est défini comme étant le nombre de nœuds qui détectent cet évènement, et le degré de couverture moyen représente la moyenne des degrés de tous les évènements, il est donné par : $dcm = \sum_{k=1}^{ng} dc_k / ng$, où dc_k désigne le degré de couverture de la grille k et ng le nombre de grilles.

Nous calculons le degré de couverture *initial* dci avant l'exécution de la méthode, qui représente le nombre de nœuds initialement déployés pouvant couvrir chaque évènement. Le degré de couverture moyen *initial* représente la moyenne du degré de chaque grille, il est donné par : $dcm_i = \sum_{k=1}^{ng} dci_k / ng$. Puis à la suite du calcul de la redondance, nous calculons le degré de couverture *final* dcf qui définit le nombre de nœuds restants dans le réseau (non redondants) pouvant détecter chaque évènement. Le degré de couverture moyen *final* est donné par : $dcm_f = \sum_{k=1}^{ng} dcf_k / ng$. Nous retenons ce facteur dans nos simulations afin de refléter la diminution de la redondance de couverture de la surface d'intérêt suite à l'exécution de la méthode RND.

- **Energie consommée par nœud (ECN)** : Cette métrique renseigne sur la consommation d'énergie moyenne des nœuds du réseau induite par l'exécution de la méthode RND. Elle est donnée par : $ecn = \sum_{k=1}^{nr} ec_k / nr$, où ec_k désigne l'énergie consommée par le nœud k et nr le nombre de nœuds formant le réseau.

4.6. Résultats et interprétations

4.6.1. Nœuds redondants localement

a) Variation du nombre de capteurs déployés dans le réseau

Les graphes de la Figure 4.3 indiquent la relation entre le nombre total de nœuds du réseau et le nombre de nœuds redondants localement détectés pour les valeurs suivantes du rayon de couverture $R_s=8, 10, 12, 20$ et 30 m. Nous comparons les performances de la méthode RND avec l'algorithme proposé par Jian *et al.* [JIA04]. Dans leur contexte de simulation, les capteurs, dont le nombre varie de 150 à 300 nœuds, sont déployés dans une surface de dimension $50 \times 50 \text{ m}^2$ et le rayon de couverture varie de 8 à 12 m.

Nous effectuons également d'autres mesures, sans comparaison, en considérant des valeurs plus grandes du rayon de couverture (20 et 30m), et ce afin de mettre en évidence l'impact de l'augmentation du rayon de couverture sur le nombre de capteurs redondants localement.

Nous remarquons que le nombre de capteurs redondants localement croît linéairement par rapport à la densité des nœuds du réseau. En effet, plus le nombre de capteurs déployés est important plus il y a de chevauchement entre les zones de couverture des

capteurs ce qui augmente le nombre de capteurs redondants. Par ailleurs, nous remarquons également que ce nombre augmente lorsque la portée de couverture des capteurs est plus grande, comme indiqué sur la Figure 4.3 (d) qui représente le nombre de capteurs redondants localement pour les valeurs du rayon de couverture $R_s=20$ et $30m$. Les deux courbes de chaque graphe de la Figure 4.3 sont pratiquement superposées. Ce résultat montre bien qu'au-delà d'une valeur de rayon de couverture le nombre de capteurs redondants arrive à saturation.

Les tracés des Figures 4.3 (a-b-c) montrent que nos deux algorithmes, formant respectivement la phase de *prétraitement* et la phase de *calcul de la redondance locale*, enregistrent de meilleures performances par rapport à l'algorithme de Jian *et al.* [JIA04], essentiellement lorsque la densité du réseau devient importante (à partir de 150 nœuds).

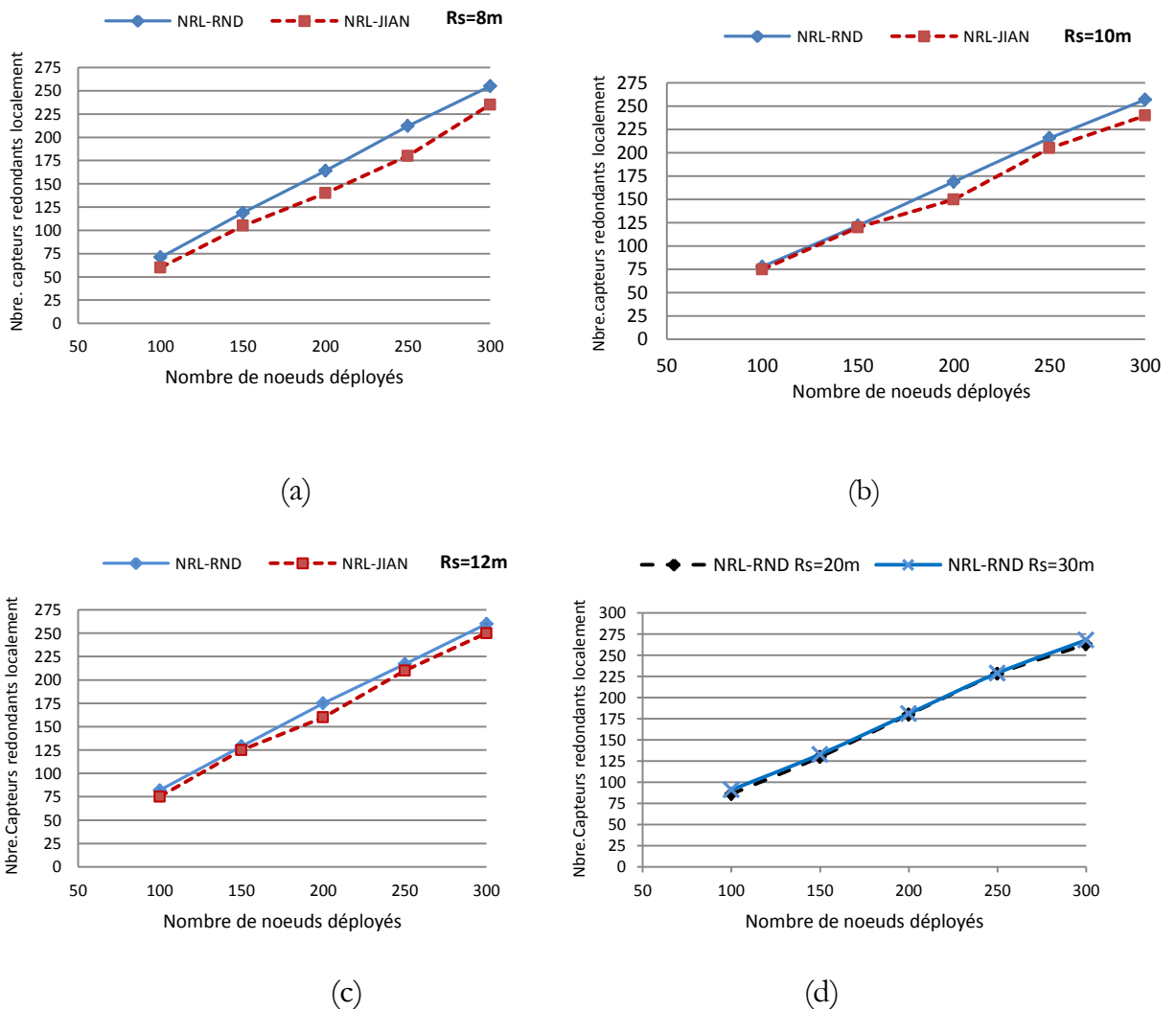


Figure 4.3. La variation du nombre de capteurs redondants localement en fonction de la densité des capteurs dans une surface $50 \times 50 m^2$.

L'algorithme de Jian *et al.* [JIA04] adopte une méthodologie de calcul de la redondance locale similaire à la nôtre (en deux phases) : sélection des nœuds couverts en périmètre et calcul de la redondance, mais nous constatons que les résultats obtenus avec notre

algorithmes dépassent ceux obtenus dans leur évaluation. Cette amélioration est due à l'exactitude du calcul angulaire employé dans notre méthode pour la vérification de la couverture des segments des voisins du capteur évaluant sa redondance, comparativement à la technique employée dans [JIA04], qui se base sur une évaluation de distances pour déterminer la couverture des segments des voisins. De ce fait, cette technique rend le calcul moins précis quand le nombre des voisins est important, ce qui justifie le fait que l'amélioration enregistrée par nos algorithmes est prononcée à partir d'une densité importante de nœuds.

La Figure 4.4 compare le nombre de capteurs redondants localement obtenus par la méthode RND avec la méthode RSE (*Redundant Sensor Elimination*) de Car *et al.* [CAR06]. Nous avons utilisé le contexte d'exécution de simulation de RSE dans lequel les capteurs sont aléatoirement déployés dans une zone d'intérêt d'une superficie 600×600 m², la portée de couverture est 50 m et le nombre de nœuds varie de 150 à 500. Les tracés obtenus montrent que les deux méthodes donnent des résultats quasiment identiques. En effet, l'utilisation des diagrammes *voronoi* confère à la méthode RSE une précision dans l'évaluation de la redondance. Ces résultats confirment bien que le calcul de la redondance locale effectué par la méthode RND est exact.

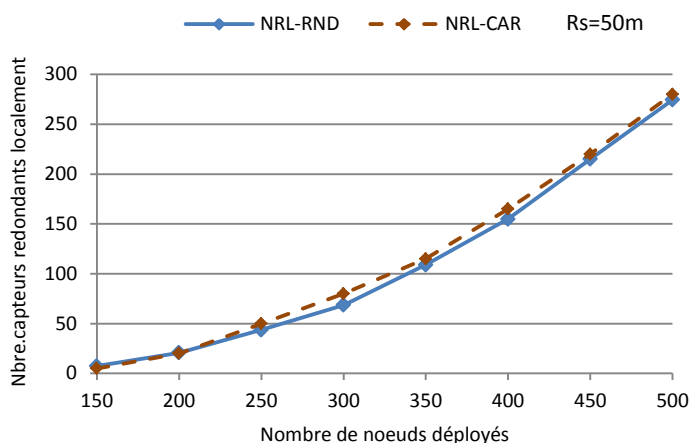


Figure 4.4. La variation du nombre de capteurs redondants localement en fonction de la densité des capteurs dans une surface 600×600 m².

b) Variation du rayon de couverture des capteurs

La Figure 4.5 montre l'impact de la variation du rayon de couverture sur le nombre de capteurs redondants détectés. Nous reprenons le contexte d'exécution de simulation utilisé dans [KHE11] afin de comparer nos résultats avec ceux obtenus dans leur évaluation. Dans ce contexte, 1000 capteurs sont déployés aléatoirement dans une zone d'intérêt de dimension 200×200 m² et la portée de couverture varie de 5 à 30 m. Nous constatons que les courbes obtenues avec les deux méthodes possèdent la même allure : le nombre de capteurs redondants augmente avec l'augmentation du rayon de couverture. Cette progression est importante lorsque le rayon de couverture varie de 5 à 10 m, mais au-delà de cette valeur la progression du nombre de capteurs redondants est plus faible et

se stabilise aux alentours de $R_s=20m$.

En revanche, la méthode RND affiche de meilleurs résultats comparativement à la méthode de Khedr. *et al.* [KHE11] essentiellement quand le rayon de couverture est inférieur à 20 m. Au-delà de cette valeur, le nombre de capteurs redondants du réseau atteint une valeur maximale et se stabilise. En effet, l'augmentation du rayon de couverture engendre une augmentation de la portée de couverture des nœuds, et par conséquent les surfaces de chevauchement entre les zones de couverture des nœuds sont plus importantes. De ce fait, le nombre de capteurs redondants est plus important, mais à partir d'une certaine valeur du rayon de couverture ce nombre n'augmente plus et se stabilise, car les nœuds restants doivent assurer la couverture de la zone d'intérêt. Par conséquent, on peut déduire qu'une portée de couverture relativement moyenne est suffisante pour détecter tous les capteurs redondants du réseau.

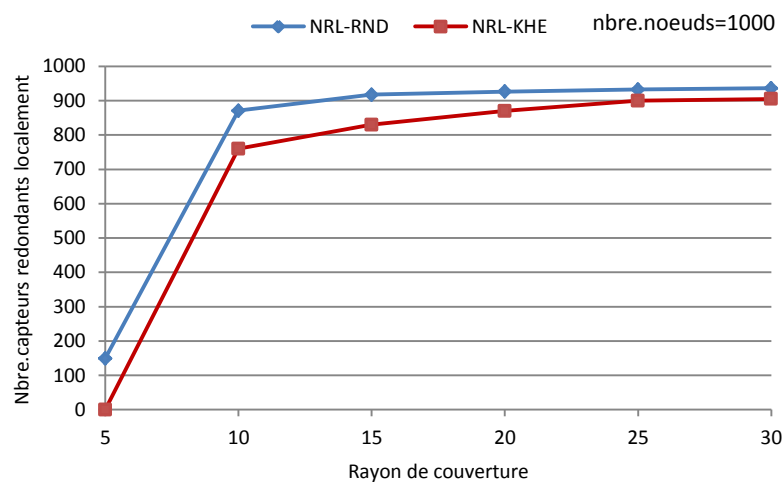


Figure 4.5. La variation du nombre de capteurs redondants localement en fonction du rayon de couverture dans une surface $200 \times 200m^2$.

La méthode de Khedr. *et al.* [KHE11] repose sur une technique de sectorisation qui consiste à diviser la zone de couverture d'un capteur jusqu'à ce qu'un seuil défini par l'application soit atteint. Par conséquent, la technique employée par la méthode constitue une approximation de calculs qui pénalise les performances enregistrées par cette méthode comparativement à nos résultats. La forte densité du réseau n'a pas un impact négatif sur les performances de la méthode. En effet, les résultats obtenus confirment que la méthode RND garantit le passage à l'échelle.

4.6.2. Nœuds redondants globalement

Les graphes de la Figure 4.6 mesurent la relation entre le nombre de nœuds déployés dans le réseau et le nombre de nœuds redondants globalement, c'est-à-dire les capteurs pouvant être désactivés (déplacés) simultanément. Nous comparons nos résultats avec la méthode RSE de Carbunar *et al.* [CAR06] et la méthode CPNS de Tian *et al.* [TIA02]. Nous avons également représenté, sur cette figure, une courbe représentant le nombre de

capteurs redondants localement détectés par la méthode RND afin de constater la proportion des capteurs redondants globalement par rapport aux capteurs redondants localement. Dans cette simulation, les capteurs sont déployés sur une zone de superficie $600 \times 600 \text{ m}^2$ et la portée de couverture est 50m.

D’abord, nous constatons sans grande surprise que le nombre de capteurs redondants localement est toujours supérieur au nombre de nœuds redondants pouvant être éliminés simultanément. Par ailleurs, nous remarquons que les résultats obtenus avec les méthodes RND et RSE sont similaires, et surpassent les résultats enregistrés par la méthode CPNS.

Rappelons que la méthode CPNS utilise pour la coordination des nœuds redondants le mécanisme de backoff aléatoire. Dans ce mécanisme, chaque nœud redondant attend un temps aléatoire avant et après le calcul de la redondance, et envoie à ses voisins des messages échelonnés indiquant son état. Ainsi, l’overhead de communication de ce mécanisme engendre des pertes de messages à cause des collisions entre les paquets, ce qui dégrade les performances de la méthode en termes de nombre de capteurs redondants globalement. D’autre part, les performances de CPNS sont d’autant plus réduites par l’algorithme approximatif employé par cette méthode pour la détection de la redondance, car il considère seulement un sous ensemble des voisins du nœud calculant sa redondance (ceux se trouvant à l’intérieur de sa portée de couverture). En revanche, les méthodes RND et RSE sont plus performantes que CPNS et détectent un nombre plus importants de capteurs redondants localement, ce qui contribue à augmenter le nombre de capteurs redondants globalement.

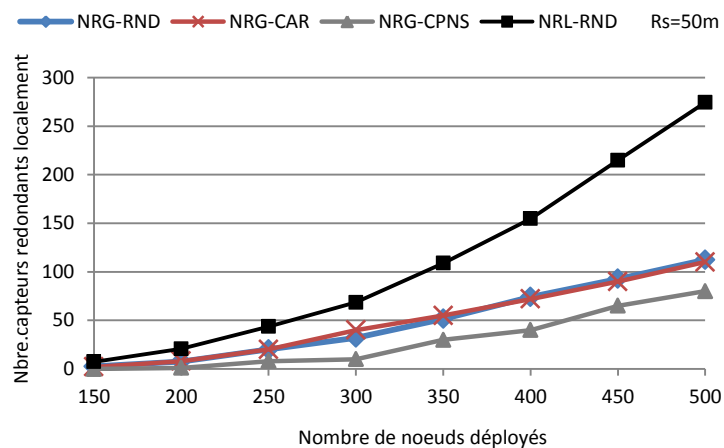


Figure 4.6. Les graphes représentant le nombre de capteurs redondants globalement.

Dans le but d’augmenter le nombre de capteurs redondants globalement obtenus avec la méthode RND, nous avons proposé d’améliorer l’algorithme du MIS (*Maximal Independent Set*) employé par la méthode RSE pour la coordination des capteurs redondants. De ce fait, nous avons jugé intéressant d’introduire le concept des voisins effectifs dans l’algorithme de coordination proposé dans la méthode RSE. Ainsi, la coordination des décisions de redondance s’effectue seulement avec les voisins redondants effectifs du nœud redondant. Autrement dit, chaque capteur redondant

coordonne sa décision seulement avec un sous-ensemble de ses voisins directs (ses voisins effectifs), puisque l'élimination simultanée d'un nœud redondant et son voisin non effectif ne crée pas de vide de couverture. Cependant, nous constatons que les résultats obtenus avec les deux méthodes RND et RSE sont pratiquement identiques.

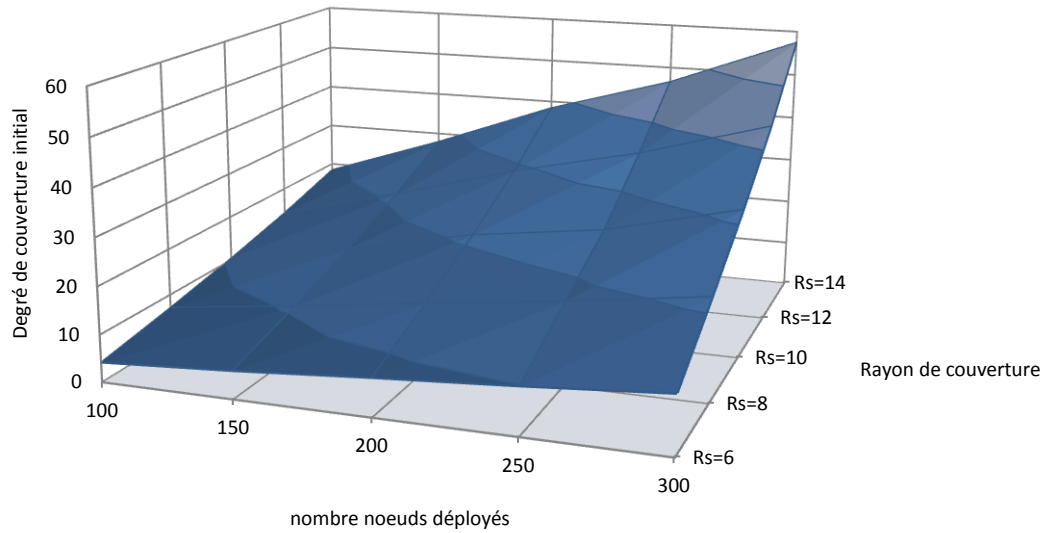
Nous expliquons ce résultat par le fait que le concept des voisins effectifs utilisé dans l'algorithme de coordination de la méthode RND et le concept des voisins *voronoi* utilisé dans la méthode RSE sont équivalents. C'est-à-dire que le voisin voronoi d'un nœud donné est forcément un voisin effectif et vice versa.

4.6.3. Degré de couverture

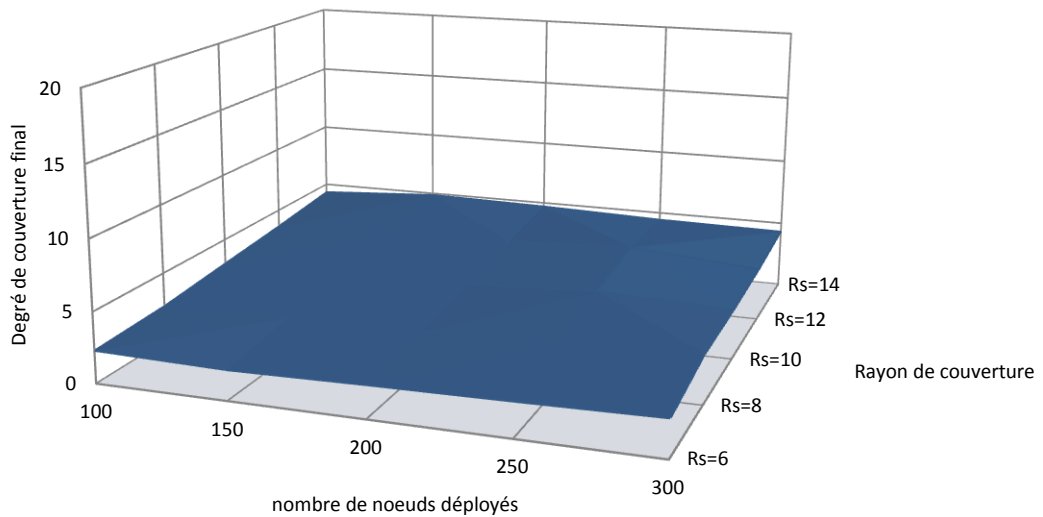
Cette évaluation est effectuée sans comparaison et concerne une mesure propre à la méthode RND. Nous considérons une surface de déploiement de superficie $50 \times 50 \text{ m}^2$. Cette surface est complètement couverte par les capteurs du réseau afin que le calcul du degré de couverture puisse nous renseigner correctement sur la capacité de la méthode RND à préserver la couverture totale de la zone d'intérêt.

Une fois que les nœuds redondants *globalement* du réseau sont sélectionnés, le degré de couverture moyen final réalisé par les nœuds non redondants est calculé et comparé au degré de couverture original lorsque tous les nœuds du réseau sont actifs. Les graphes des Figures 4.7(a) et (b) représentent respectivement la variation du degré de couverture initial et final en fonction du nombre de nœuds déployés et du rayon de couverture. Nous remarquons clairement que le degré de couverture initial du réseau croît avec l'augmentation de la densité du réseau et du rayon de couverture. En effet, plus les valeurs prises par ces deux paramètres sont grandes plus le chevauchement entre les zones de couverture des capteurs devient important, ce qui augmente le degré de couverture de la zone d'intérêt. En revanche, le degré de couverture final est stable, aux alentours de 3 et 4, pour toutes les valeurs de densité des nœuds et du rayon de couverture.

Ces résultats confirment bien, d'une part, que la méthode réduit la redondance de couverture de la surface et d'autre part que la couverture de la zone d'intérêt est préservée. En effet, pour toutes les mesures effectuées au niveau de chaque grille nous n'avons obtenu aucune valeur nulle du degré de couverture. Autrement dit, il n'y a aucun point de la surface d'intérêt qui n'est pas couvert après l'élimination des capteurs redondants globalement du réseau.



(a)



(b)

Figure 4.7. La variation des degrés de couverture *initial* et *final* en fonction de la densité des nœuds.

4.6.4. Énergie consommée

La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs concerne essentiellement les communications (transmissions et réceptions). De ce fait, l'énergie consommée au cours de l'exécution de la méthode RND est induite principalement par la découverte de voisinage et la phase de calcul de la redondance globale, qui toutes deux nécessitent une transmission et une réception de données. Le coût énergétique induit par la phase de calcul de la redondance locale est minime puisque les calculs s'effectuent de manière totalement localisée au niveau des capteurs.

Nous utilisons le modèle énergétique de ns-2 présenté à la section 4.4.1. La valeur du champ *initialEnergy_* pour chaque nœud est initialisée à *100 joules*. Nous faisons varier le nombre de nœuds déployés de 150 à 500 dans une surface de superficie $100 \times 100 \text{m}^2$, les résultats obtenus sont représentés par la Figure 4.8, dans laquelle les tracés correspondent à l'énergie moyenne consommée par nœud pour les valeurs du rayon de couverture R_S allant de 8 à 40m (par pas de 8).

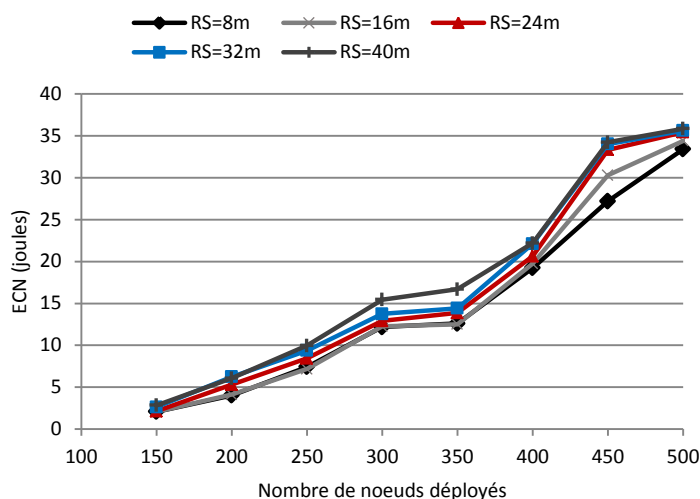


Figure 4.8. La variation de l'énergie moyenne consommée par nœud en fonction de la densité du réseau.

Nous constatons que l'énergie consommée par nœud augmente avec l'augmentation de la densité du réseau. Lorsque le nombre de nœuds du réseau ne dépasse pas 250, la consommation d'énergie est relativement faible, mais au-delà de cette valeur l'énergie moyenne consommée devient plus importante. En effet, l'augmentation de la densité du réseau engendre plus de redondance. En conséquent, il y a un nombre plus important de nœuds impliqués par l'exécution de la méthode et un coût de calcul supplémentaire sur le réseau. Par ailleurs, une portée de couverture plus grande implique une consommation d'énergie supplémentaire comme indiqué sur les différentes courbes de la Figure 4.8. Le voisinage de chaque capteur devient plus dense avec l'augmentation du rayon de couverture, ce qui a pour effet d'augmenter l'overhead de communication pour la découverte des voisins et la coordination entre les capteurs redondants.

4.7. Discussion

Comme mentionné dans les chapitres précédents, la couverture de surface est un aspect important dans les réseaux de capteurs, et la contrainte la plus forte est de préserver cette couverture dans n'importe quel problème traité. Ainsi, cet aspect doit être pris en considération pour la problématique de la détection de la redondance. Pour cela, l'évaluation des performances de la méthode RND considère des mesures relatives au nombre de capteurs redondants détectés, et également une autre mesure qui renseigne sur la capacité de la méthode à préserver la couverture de surface. Cette mesure qui concerne

le degré de couverture initial et final du réseau, a bien confirmé que la couverture de la zone d'intérêt est garantie après l'élimination des capteurs redondants globalement du réseau.

Pour mettre en évidence l'efficacité de la méthode RND, nous avons comparé nos résultats aux résultats obtenus par d'autres travaux de la littérature. Nous remarquons que notre algorithme de calcul de la redondance locale, *LocalRedundancy*, donne de meilleurs résultats que l'algorithme de Jian et al. [JIA04] et Khedr. *et al.* [KHE11]. Le critère de redondance de [JIA04] est basé sur la couverture de périmètre des segments des voisins du nœud calculant sa redondance. Cependant, la vérification de ce critère est complexe car elle repose sur la discrétisation du segment de périmètre de chaque voisin du nœud redondant, ce qui pénalise les performances de cette méthode en termes de nombre de capteurs redondants localement détectés. Par ailleurs, la comparaison avec le travail de [KHE11] a permis de mettre en évidence la scalabilité de notre algorithme *LocalRedundancy* qui enregistre de meilleurs résultats par rapport à l'algorithme de [KHE11] dans un environnement caractérisé par une forte densité de nœuds. En effet, l'algorithme de [KHE11] se base sur un critère de redondance approximatif, qui consiste à sectoriser la zone de couverture du nœud calculant sa redondance jusqu'à un certain seuil fixé par l'application.

La détection de la redondance ne s'arrête pas au calcul de la redondance locale, car un capteur redondant localement n'est pas forcément redondant d'un point de vue global. Pour cela, nous avons évalué le nombre de nœuds redondants globalement obtenus avec notre algorithme de calcul de la redondance globale, et nous avons comparé nos résultats avec la méthode RSE [CAR06] qui se base sur la construction du diagramme voronoi pour l'évaluation de la redondance.

Bien que notre objectif fût d'améliorer les performances de l'algorithme de [CAR06] en augmentant le nombre de capteurs redondants globalement du réseau, nous remarquons que les deux algorithmes donnent des résultats similaires. Le fait de considérer qu'un capteur redondant coordonne sa décision avec ses voisins *effectifs* seulement revient exactement à considérer qu'il effectue cette coordination avec ses voisins *voronoi*. Ce qui nous amène à déduire que les concepts de voisins *effectifs* et voisins *voronoi* sont équivalents.

4.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évalué les performances de la méthode RND et comparé les résultats obtenus à quelques algorithmes de la littérature, qui se basent sur une méthodologie spécifique pour l'évaluation de la redondance. Cette comparaison nous a permis de constater que les résultats enregistrés par la méthode RND, en termes de nombre de capteurs redondants localement détectés, sont meilleurs que ceux de Jian et al. [JIA04] et Khedr. *et al.* [KHE11]. En revanche, nos résultats sont équivalents à ceux obtenus avec la méthode RSE [CAR06] qui se base sur la construction du diagramme voronoi pour l'évaluation de la redondance. De ce fait, nous confirmons que la méthode

RND détecte avec précision tous les capteurs redondants du réseau, et fournit ainsi un nombre plus important de capteurs redondants à coordonner ce qui contribue à augmenter le nombre de capteurs redondants globalement.

La méthode proposée constitue une solution robuste et efficace pour détecter les nœuds redondants dans un RCSF. Les résultats obtenus ont prouvé également que la méthode assure le passage à l'échelle, ce qui constitue une caractéristique importante des réseaux de capteurs.

Conclusion générale et perspectives

Les réseaux de capteurs sont destinés, le plus souvent, à relever des informations dans des environnements hostiles ou difficilement accessibles sans aucune intervention humaine. Il est donc difficilement envisageable de remplacer les capteurs lorsqu'une panne survient, tel qu'un épuisement énergétique ou tout autre défaillance qui a pour conséquence de dégrader la couverture de surface. Dans ce cas, le réseau peut tirer profit de la redondance induite par le déploiement aléatoire des capteurs pour rétablir la couverture des régions touchées.

Le travail réalisé consiste à proposer une solution de détection des capteurs redondants dans un RCSF. Après avoir présenté un état de l'art sur les méthodes de détection de la redondance, nous avons proposé une classification de ces méthodes selon la technique employée pour l'évaluation de la redondance. Nous avons effectué une comparaison qualitative entre ces techniques, mais aussi entre les algorithmes utilisés par ces techniques.

Les recommandations tirées de cette comparaison nous ont permis de concevoir une méthode de détection de la redondance prenant en compte les aspects qui renforcent l'efficacité et l'exactitude du calcul de la redondance. Cette méthode appelée RND (*Redundant Node Detection*) est totalement localisée et se base sur des calculs géométriques pour évaluer la redondance des capteurs tout en veillant à minimiser le délai et le coût induits par l'évaluation de la redondance. La méthode exécute une phase de *prétraitement* afin de sélectionner les nœuds couverts en périmètre dans le but de restreindre le calcul de la redondance aux capteurs potentiellement redondants. Dans la deuxième phase, chaque nœud retenu préalablement exécute localement un calcul de *redondance locale* lui permettant de déterminer s'il est redondant ou non. Un capteur redondant localement n'est pas forcément redondant d'un point de vue global. Pour ce faire, la méthode coordonne d'une manière distribuée les décisions de redondance parmi les capteurs redondants voisins dans le réseau afin d'élire ceux pouvant être éliminés simultanément sans créer de vide de couverture.

Les performances de la méthode ont été évaluées par des séries de simulations. Nous avons présenté une comparaison entre nos algorithmes et d'autres existants dans la littérature, nous avons également évalué des mesures propres à la méthode. Les résultats expérimentaux ont validé la méthode RND, en mettant en évidence la précision du calcul de la redondance locale par rapport aux autres méthodes existantes. Ces résultats ont confirmé également que la solution assure le passage à l'échelle. En revanche, la série de simulations comparant le nombre de capteurs redondants globalement, obtenus avec notre algorithme, à celui de la méthode RSE [CAR06] a abouti à des résultats similaires. Ce point nous a amené à déduire que la coordination effectuée par un nœud redondant avec ses voisins voronoi est équivalente à celle effectuée avec les voisins effectifs. De ce fait, les deux concepts de *voisin voronoi* et *voisin effectif* sont équivalents.

Sur la base du travail réalisé, nous dressons les perspectives suivantes :

- Exploiter la solution dans un réseau constitué de capteurs hétérogènes, c'est-à-dire des nœuds qui ne possèdent pas forcément le même rayon de couverture. Cette variation du rayon de couverture serait à reporter dans la formule de calcul des angles *seuil* et *réel* associés au capteur calculant sa redondance, et ne changerait en rien le critère de redondance ou bien le déroulement de la méthode. Il est en revanche certain que la phase de prétraitement doit être enrichie pour considérer les cas particuliers inhérents à l'hétérogénéité de la portée de couverture, tel que le cas où la zone de couverture d'un capteur serait totalement incluse dans la zone d'un autre capteur ayant un plus grand rayon de couverture.
- Une autre perspective concerne le modèle de couverture utilisé qui est le modèle du disque déterministe qui assume que la zone de couverture est un disque uniforme de rayon R_s [WAN10]. Bien que très répandu, il ne peut pas être considéré comme réaliste. En effet, ce modèle suppose que si un évènement se produit à une distance inférieure ou égale à R_s , le capteur détectera cet évènement de façon déterministe. De même, lorsqu'un évènement se produit à une distance $R_s + \varepsilon$ ($\varepsilon > 0$) il n'est aucunement détecté par le nœud. Cependant, il est peu probable que la puissance du signal reçu chute brutalement à une valeur nulle. Pour toutes ces raisons, nous prévoyons de substituer au modèle déterministe un modèle de couverture probabiliste qui décrit le comportement des capteurs de façon plus réaliste. Plusieurs modèles peuvent être envisagés pour modéliser la nature probabiliste de la portée de couverture, notamment le modèle de couverture *exponentiel* [ZOU04], le modèle de couverture *atténué* qui se base sur une fonction polynomiale permettant de considérer les atténuations dans la qualité de couverture [LIU04], ou encore le modèle de couverture *atténué tronqué* qui suppose que la zone de couverture peut être modélisée par des disques concentriques de rayons différents, et à chaque disque lui correspond une probabilité fixe [AHM05].
- Dans les applications sensibles telles que les applications militaires, il est nécessaire d'assurer la couverture de chaque point dans la zone d'intérêt par plus d'un capteur pour assurer la tolérance aux pannes. Dans ce cas, il s'agit de la couverture multiple ou bien la k-couverture. Notre perspective serait de faire en sorte que la méthode RND s'adapte à des applications de couverture multiple (k-couverture) en calculant la (k+1)-redondance des capteurs (ce concept a été défini dans la section 3.4.1.3).
- Les séries de simulations comparant la méthode RND aux algorithmes de détection de la redondance proposés avec les protocoles d'ordonnement d'activités des capteurs ont confirmé l'efficacité de la méthode RND en termes de nombre de capteurs redondants localement détectés, essentiellement pour des réseaux de forte densité. Dans ce cas, il serait intéressant d'appliquer les algorithmes de RND dans ces protocoles d'ordonnement pour tirer profit de l'apport de la méthode en termes de prolongement de la durée de vie du réseau.

- La conception de la méthode RND a été motivée en premier lieu par le redéploiement des régions vides du réseau. Pour cela, nous envisageons dans la continuité de nos travaux de compléter la solution pour couvrir l'aspect redéploiement des régions *voids*. Une première réflexion concernant ce point a été faite, et nous a amené à considérer que la décision de redondance globale doit tenir compte de la proximité de la région vide par rapport aux nœuds redondants du réseau. Une ébauche de cette solution a été présentée dans la section 3.4 du document. Il serait intéressant de considérer également le cas de la réparation de plusieurs vides dans le réseau en garantissant une affectation optimale des nœuds redondants et tenant compte de la contrainte d'énergie.

Références bibliographiques

- [AHM05] N.Ahmed, S.S Kanhere and S.Jha, “Probabilistic Coverage in Wireless Sensor Networks”. In *Proc. Of IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pp. 672-681, Sydney, Australia, November 2005.
- [AKY02] I.F.Akyildiz, W.Su, Y.Sankarasubramaniam and E.Cayirci, “Wireless sensor networks : a survey”. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40(8), pp. 102-114, August 2002.
- [BAE04] A.E.Baert, “Les réseaux cellulaires de Voronoi”. *International Journal of Information Sciences for Decision Making*, pp.221-228, 2004.
- [BAH00] P.Bahl and V.N.Padmanabhan, “Radar : An in-building RF-based user location tracking system”. In *Proc. Of the IEEE Infocom Conference*, March 2000.
- [BAI06] H.Bai, X.Chen and X.Guan, “Preserving coverage for wireless sensor networks of nodes with various sensing ranges”. In *Proc. of the 06th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, pp. 54-59, April 2006.
- [BAR08] H.Barati, A.Movaghar, A.Barati, and A. mazreah, “A Review of Coverage and Routing for Wireless Sensor Networks”. In *Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 39, pp. 312, February 2008.
- [BOU07] A.Boukerche, X.Fei and R.B.Araujo, “An optimal coverage-preserving scheme for wireless sensor networks based on local information exchange”. *Journal of Computer Communications (Elsevier)*, pp. 2708-2720, October 2007.
- [BUL10] E.Bulut, Z. Wang et K. Szymanski, “The Effect of Neighbor Graph Connectivity on Coverage Redundancy in Wireless Sensor Networks”. In *Proc. Of International Conference on Communications (ICC)*, pp.1-5, South Africa, May 23-27, 2010.
- [CAO01] G. Cao and M. Singhal, “A Delay-Optimal Quorum-Based Mutual Exclusion Algorithm for Distributed Systems,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 12, no. 12, pp. 1256–1268, 2001.
- [CAR06] B. Cărbunar, A. Grama, J. Vitek, O. Cărbunar, “Redundancy and coverage detection in sensor networks”, *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, Volume 2, Issue 1, February 2006.
- [CHE09] K.Yu-Chen and L.Shih-Chieh, “A Fast Sensor Relocation Algorithm in Wireless Sensor Networks”, *International Conference on Sensor Networks, Information, and Ubiquitous Computing (ICSNIUC)*, Singapore, August 2009.
- [CHO04] R. Choudhury and R. Kravets, “Location-Independent Coverage in Wireless Sensor Networks”, *Technical Report, UIUC*, 2004.
- [CUR09] D.Curiac, V.Constantin,P.Dan, J.Lucian and D.Alexa ”Redundancy and Its Applications in Wireless Sensor Networks: A Survey”, *WSEAS Transactions on Computers*, Vol. 8, Issue 4, pp. 705-714, April 2009.
- [DU05] X.Du and F.Lin, “Maintaining differentiated coverage in heterogeneous sensor networks”, *EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking*, pp. 565-572, 2005.

- [DUD92] D. Du, F. Hwang, and S. Fortune, "Voronoi diagrams and Delaunay triangulations," *Euclidean Geometry and Computers*, pp.193-233, Singapore 1992.
- [FOT11] A.Fotouhi and M.Razzazi, "Redundancy and Coverage Detection in Wireless Sensor Networks in the Presence of Obstacles". In *Proc. Of the 34th International Convention (MIPRO)*, pp. 541-546, Opatija, Croatia, May 23-27, 2011.
- [GAN04] R. Gandhi and S. Parthasarathy, "Distributed Algorithms for coloring and connected Domination in wireless ad hoc networks". To appear in *foundations of software technology and theoretical computer science (FSTTCS)*, 2004.
- [HEF07] M.Hefeed and M.Bagheri, "Randomized K-coverage algorithms for dense sensor networks". In *Proc. Of IEEE Info-com*, pages 2376-2380, 2007.
- [HUA03] C.Huang and Y.Tseng, "The coverage problem in a wireless sensor network". In *Proc. of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications*, pp. 115-121, San Diego, CA, September 2003.
- [HUA07] C.Huang, Y.C.Tseng and H.L.Wu, "Distributed protocols for ensuring both coverage and connectivity of a wireless sensor network". *ACM Transactions on Sensor network (ToSN)*, Vol.3, March 2007.
- [ISS09] T.Issariyakul, E.Hossain, "Introduction to Network Simulator NS2". Springer Edition, ISBN 978-0-387-71759-3, 2009.
- [JIA04] J.Jiang and W.Dou, "A coverage-preserving density control algorithm for wireless sensor networks". In *Proc. of 3rd International Conference ADHOC-NOW*, Vancouver, Canada, July 22-24, 2004.
- [KUH05] F.Kuhn, T.Moscibroda, T.Nieberg and R.Wattenhofer, "Fast deterministic distributed maximal independent set computation on growth bounded graphs". In *Proc.Of the 19th International Conference on distributed computing*, Cracow, Poland, September 26-29, 2005.
- [KAZ10] R.Kazi Chandrima, "A Survey on Sensor Network". *International Journal of Computer and Information Technology (IJCIT)*, Vol. 1, July 2010.
- [KHE11] M. Khedr and H.Ramadan "Effective Sensor Relocation Technique in Mobile Sensor Networks". *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)* Vol.3, No.1, January 2011.
- [LEH09] M.Lehsaini, "Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique". Thèse pour obtenir le grade de docteur, Université de Franche-Comté ,2009.
- [LI06] X. Li and N. Santoro, "ZONER: A ZONE-based Sensor Relocation Protocol for Mobile Sensor Networks". In *Proc. of the 31st IEEE Conference on Local computer Networks (LCN)*, 2006.
- [LI07] X. Li, N. Santoro and I. Stojmenovic, "Mesh-Based Sensor Relocation for Coverage Maintenance in Mobile Sensor Networks". In *Proc. of the 4th International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing (UIC)*, 2007.
- [LI08] Y.Li and S.Gao, "Designing K-coverage schedules in wireless sensor networks". *Journal of Combinatorial Optimization*, 127-146, 2008.
- [LIU04] B.Liu and D.Towsley, "A study of the coverage of large-scale sensor networks". In

- Proc. of the 1st IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS), pp. 475-483, Fort Lauderdale, October 2004.
- [LUB85] M.Luby, "A simple parallel algorithm for the Maximal Independent Set Problem". In *Proc.Of Annual 17th ACM symposium on Theory of computing*, pp.1-10, 1985.
- [LUJ07] J.Lu, J.Wang et T.Suda,"Scalable coverage maintenance for dense wireless sensor networks". *EURASIP Journal of Wireless Communications and Networking*, 2007.
- [MAK08] A.Makhoul,"Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données", thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université de Franche-Comté, novembre 2008.
- [MOS05] T. Moscibroda and R.Wattenhofer, "Maximal independent sets in radio networks". In *Proc.Of the 23rd ACM Symposium on principles of distributed computing (PODC)*, 2005.
- [NOH08] Y.Noh, S.Lee and K.Kim, "Central angle decision algorithm in coverage-preserving scheme for wireless sensor networks". In *Proc.Of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2008.
- [SAK10] K.Sakib, Z.Tari and P.Bertok, "An Analytical Framework for Identifying Redundant Sensor Nodes from a Dense Sensor Network". In *Proc. of 13th International Conference on Computer and Information Technology*, 2010.
- [SHE11] W.Shen and Q.Wu, "Exploring Redundancy in Sensor Deployment to Maximize Network Lifetime and Coverage". In *Proc. Of 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, 2011.
- [TIA02] D. Tian and N.D. Georganas, "A Coverage-Preserving Node Scheduling Scheme for Large Wireless Sensor Network". In *Proc. of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02)*, Atlanta, Geogia, USA, September, 2002.
- [UCB09] Collaboration between researchers at UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, "The ns Manual", on line at: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, 2009.
- [WAN03] X. Wang, G. Xing, Y. Zhang, C. Lu, R. Pless, and C. Gill, "Integrated Coverage and Connectivity Configuration in Wireless Sensor Networks". In *Proc. of ACM SenSys 2003*, Los Angeles, LA, October 2003.
- [WAN05] G. Wang, G. Cao, T. L. Porta and W. Zhang "Sensor Relocation in Mobile Sensor Networks". In *Proc. of IEEE INFOCOM*, 2005.
- [WAN10] B. Wang, "Coverage Control in Sensor Networks", Springer Edition, ISBN 978-1-84996-058-8, February 2010.
- [WU05] K.Wu, Y.Gao, F.Li, and Y.Xiao, "Lightweight deployment-aware scheduling for wireless sensor networks". *ACM/Kluwer Mobile Networks and applications* , December 2005.
- [WUE06] M.Wueng and S.Hwang, "An Efficient K-coverage Eligibility Algorithm on Sensor networks: AKE". In *Proc. Of the 4th International Symposium on Parallel and Distributed Processing and Applications (ISPA)*, pp.418-429, Sorento, Italy, December 4-6, 2006.

- [WUE08] M.Wueng and S.Hwang, "AKCE: An Efficient and Accurate K-coverage Eligibility Algorithm in Wireless Sensor Networks". In *Proc. Of the IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of computers and Telecommunication System (MASCTOS)*, pp. 1-8, Baltimore, September 8-10, 2008.
- [YE03] F.Ye, G.Zhong, S.Lu, and L.Zhang, "PEAS: A robust energy conserving protocol for longlived sensor networks". In *Proc.Of the 23rd IEEE International Conference on Distributed Computing Systems*, 2003.
- [YOU07] O.Younis, M.Krunz, S.Ramasubramanian, "Coverage without Location Information". In *Proc.Of the IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)*, October 2007.
- [YUF06] J.Yufu, D.Tian-lin, L.Jiang, "A new solution to wireless sensor network density control problem". In *Proc. Of the 3rd annual IEEE communications society on sensor and ad hoc communications and networks*, Vol.3, pp. 886-891, Reston, VA, Sept 28, 2006.
- [ZHA05] H. Zhang and J. Hou, "Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks". To appear in *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 2005.
- [ZOU04] Y. Zou and K. Chakrabarty, "Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks". *Journal ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, Vol. 3, pp. 61-91, New York, 2004.
- [ZOU05] Y. Zou and K. Chakrabarty, "A distributed coverage and connectivity-centric technique for selecting active nodes in wireless sensor networks". To appear in *IEEE Transactions on Computers*, 2005.