



THÈSE EN COTUTELLE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE

L'UNIVERSITE DE PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR

L'UNIVERSITE GASTON BERGER DE SAINT-LOUIS

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES EXACTES ET LEURS APPLICATIONS

DOMAINE DE RECHERCHE : INFORMATIQUE

Présentée par

El hadji Serigne Mamour DIOP

Optimisation de la transmission d'images dans les réseaux de capteurs pour des applications critiques de surveillance

Soutenue le 17 Juin 2014
Devant la Commission d'Examen

JURY

M. Toufik AHMED	Pr. Université de Bordeaux	Rapporteur
M. Thomas NOEL	Pr. Université de Strasbourg	Rapporteur
M. Thierry GAYRAUD	Pr. Université de Toulouse	Examinateur
M. Bouabdellah KECHAR	HDR Université d'Oran, Algérie	Examinateur
M. Bernard POTTIER	Pr. Université de Bretagne Occidentale	Examinateur
M. Congduc PHAM	Pr. Université de Pau	Directeur
M. Ousmane THIARE	HDR Université de Saint-Louis	Directeur

Résumé

L'émergence de petites caméras CMOS et de microphones MEMS, à coût et puissance réduits, a contribué au développement d'une technologie permettant la transmission de flux multimédia (audio, image, vidéo) : les réseaux de capteurs multimédia. Cette technologie, offrant de nouvelles perspectives d'applications potentielles où la collecte d'informations visuelles et/ou acoustiques apporte une plus-value certaine, suscite un intérêt manifeste. Avec des données multimédia, la qualité de service devient désormais une exigence fondamentale pour la transmission dans un environnement contraint en ressources. Dans le contexte spécifique de cette thèse, nous considérons un déploiement par voie aérienne d'une grande quantité de capteurs image pour des applications critiques de surveillance telles que la détection d'intrusion ou des opérations de recherche et sauvetage. La prise en compte de la *criticité* des applications constitue un aspect important de cette thèse, novateur par rapport aux contributions déjà effectuées dans le domaine. Nos travaux se fondent sur une méthode d'ordonnancement adaptatif de l'activité des capteurs image qui fournit pour chacun d'entre eux son ensemble de cover-sets. La détection d'un événement dans le réseau déclenche la transmission d'une large quantité d'informations visuelles, émanant de plusieurs sources pour résoudre les ambiguïtés. L'objectif de cette thèse est d'optimiser cette transmission simultanée d'images causant des désagréments sur le réseau.

Nous avons tout d'abord proposé une stratégie de sélection des cover-sets pertinents à activer pour une transmission efficace des images capturées. Cette stratégie, basée sur des critères d'état et de voisinage, assure un compromis entre autonomie et criticité. Une extension multi-chemin de GPSR assure la remontée des images émises des sources sélectionnées au puits. Une seconde contribution, également une approche de sélection, se fonde sur les informations de chemins à 2 sauts pour la sélection des cover-sets. Contrairement à la précédente, elle accorde une priorité à

la criticité par rapport à la préservation de l'énergie, même si cette préservation est faite de manière indirecte. Un protocole de routage multi-chemin T-GPSR essentiellement basé sur les informations à 2 sauts est associé à la seconde approche de sélection. Une étude de performances de la mobilité du puits sur les propositions basées sur les informations à 2 sauts constitue notre troisième contribution.

Mots clés : Transmission d'images – Applications critiques – Qualité de service – Informations à 2 sauts – Réseaux de capteurs multimédia – Robots mobiles.

Abstract

Recent advances of inexpensive and low-power CMOS cameras and MEMS microphones have led to the emergence of Wireless Multimedia Sensor Networks (WMSNs). WMSNs promise a wide spectrum of potential applications which require to ubiquitously capture multimedia content (visual and audio information). To support the transmission of multimedia content in a resource constrained environment, WMSNs may require a certain level of quality of service (QoS) in terms of delay, bandwidth, jitter, reliability, quality level etc. In this thesis, we consider Wireless Image Sensor Networks (WISNs) where sensor nodes equipped with miniaturized visual cameras to provide accurate information in various geographical parts of an area of interest can be thrown in mass for mission-critical applications such as intrusion detection or search & rescue. An innovative and important aspect of this thesis is to take into account the criticality of applications. The network adopts an adaptive scheduling of image sensor node's activity based on the application criticality level, where each node computes its cover-sets. So, event detection triggers the simultaneous transmission of a large volume of visual data from multiples sources to the Sink. The main objective of this thesis is to optimize this simultaneous transmission of images that can degrade network performance.

With this goal in mind, we first proposed a multi-criteria approach to select the suitable cover-sets to be activated for reliable transmission of images in mission-critical applications. The proposed approach takes into account various parameters that affect the image quality at the Sink in a multi-hop transmission network and guarantees a compromise between autonomy and criticality. A modified version of GPSR routing protocol supporting the transmission of multimedia streams ensures the transfer of images from selected sources to the Sink. The second contribution consists in an optimized selection strategy based on 2-hop neighborhood information to determine the most relevant cover-sets to be activated to increase reliability for

image transmission. This selection approach prioritizes the application's criticality. A multipath extension of GPSR, called T-GPSR, wherein routing decisions are based on 2-hop neighborhood information is also proposed. A performance study of the sink mobility on proposals based on 2-hop information is our third contribution.

Keywords : Image transmission – Mission-critical – Quality of service (QoS) – 2-hop information – Wireless Multimedia Sensor Networks – Mobile robot Sink.

*A ma très chère famille qui a toujours fait figure du rocher sur lequel
j'ai pu m'accrocher dans les moments difficiles.*

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de thèse : M. Congduc PHAM pour la confiance accordée, ses critiques constructives, sa disponibilité, sa générosité, les conditions de travail octroyées ; M. Ousmane THIARE pour sa disponibilité, ses conseils et son soutien moral.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Messieurs Toufik AHMED et Thomas NOEL pour avoir rapporté cette thèse. J'adresse également mes remerciements à Messieurs Thierry GAYRAUD, Bouabdellah KECHAR et Bernard POTTIER pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail de recherche.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des membres du LIUPPA (Laboratoire Informatique de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour) en la personne du Pr. Philippe ANIORTE ; une mention spéciale à l'équipe T2i animée par le Pr. Thierry NODENOT et au département Informatique de la faculté des Sciences & Techniques de l'UPPA pour leur accueil chaleureux, leur sympathie, les échanges techniques et scientifiques, les moments agréables passés pendant ces années de thèse.

J'adresse également des remerciements à l'endroit de l'IRD et particulièrement à l'équipe UMMISCO de l'UGB en la personne du Professeur Mamadou Sy, à la section Informatique de l'UGB, et au LANI (Laboratoire d'Analyse Numérique et d'Informatique) de l'UGB, au Sénégal.

Je remercie vivement mes parents et toute ma famille pour m'avoir toujours soutenu et encouragé durant toutes mes études loin d'eux. Un grand merci à tout ceux qui contribué de manière directe ou indirecte à l'aboutissement de ce modeste travail.

Table des matières

1	Introduction générale	1
1.1	Contexte et objectifs	2
1.2	Structure de la thèse	8
2	Vers l'intégration d'aspects multimédia dans les réseaux de capteurs	11
2.1	Capteurs multimédia	12
2.2	Réseaux de capteurs multimédia	15
2.3	Routage dans les réseaux de capteurs multimédia	18
2.3.1	Classification	18
2.3.2	Routage géographique	19
2.4	Transmission d'images dans les réseaux de capteurs	23
2.4.1	Compression d'images	24
2.4.2	Transfert d'images	27
2.4.3	Réalisations au sein du LIUPPA	30
2.5	Conclusion	34
3	Indicateurs d'état et de voisinage	35
3.1	Contexte et enjeux	36
3.2	Stratégie de sélection	40
3.2.1	Méthodologie	40
3.2.2	Critères d'état et de voisinage	42
3.3	Processus d'activation de cover-sets	48
3.4	Mécanisme de routage	49
3.5	Résultats de simulation	49
3.5.1	Spécification des tests	50
3.5.2	Résultats	52

3.6	Conclusion	58
4	Indicateurs d'information de chemins à 2 sauts	61
4.1	Exploration des informations de chemins à 2 sauts	63
4.1.1	Le voisinage à 2 sauts	63
4.1.2	Sélection basée sur les informations de chemins à 2 sauts	66
4.1.3	Processus d'activation de cover-sets	68
4.2	Protocole de routage T-GPSR	68
4.2.1	Fonctionnement	68
4.2.2	Comparaison avec GPSR	70
4.3	Résultats de Simulation	71
4.3.1	Impact sur le taux de pertes	73
4.3.2	Impact sur la qualité des images reçues	74
4.3.3	Impact sur les délais de transmission	76
4.4	Conclusion	77
5	Mobilité des puits	79
5.1	Search & Rescue assisté par robot	80
5.2	Mobilité des puits dans les réseaux de capteurs	88
5.2.1	Avantages des puits mobiles	90
5.2.2	Défis de la mobilité des puits	91
5.2.3	Architectures de collecte via des puits mobiles	92
5.3	Collaboration robots-capteurs pour le Search & Rescue	93
5.3.1	Contexte	93
5.3.2	Spécification des tests	95
5.3.3	Résultats de simulation	97
5.4	Conclusion	99
6	Conclusion générale	101
	Bibliographie	107

Table des figures

1.1	Système de détection d'intrusion	3
1.2	Panoplie d'applications critiques	5
2.1	Anatomie d'un capteur	13
2.2	Prise de vue d'un MicaZ	13
2.3	Capteur Imote2 IPR2400 & Carte Multimédia IBM400	14
2.4	Présence d'un vide [1]	20
2.5	<i>Greedy Forwarding</i>	21
2.6	Variation de Q sur une image de 128×128 pixels	26
2.7	Variation de Q sur une image de 200×200 pixels	26
2.8	Architecture générale d'un nœud dans Castalia [2]	30
2.9	Topologie de 20 nœuds sur l'interface graphique de OMNeT++	31
2.10	Topologie de 20 nœuds sur le support graphique spécifique à notre modèle	32
2.11	Qualité visuelle d'une image selon sa proportion de pertes	33
3.1	Un capteur image	36
3.2	Modèle de couverture	37
3.3	Propagation d'alertes	38
3.4	Un WISN pour la détection d'intrusion	39
3.5	Illustration des voisinages à 1 et à 2 sauts	45
3.6	GPSR : processus d'établissement de chemins multiples	49
3.7	Variété de topologies réseau	50
3.8	Taux de pertes moyen pour une topologie de 30 nœuds	52
3.9	Taux de pertes moyen pour une topologie de 60 nœuds	53
3.10	Taux de pertes moyen pour une topologie de 80 nœuds	53
3.11	Taux de pertes moyen pour une topologie de 110 nœuds	54

3.12	Moyenne des images exploitables pour une topologie de 30 nœuds . .	55
3.13	Moyenne des images exploitables pour une topologie de 60 nœuds . .	55
3.14	Moyenne des images exploitables pour une topologie de 80 nœuds . .	56
3.15	Moyenne des images exploitables pour une topologie de 110 nœuds .	56
3.16	Délai moyen de transmission d'images	57
4.1	Illustration de l'ensemble des potentiels voisins à 1 et 2 sauts	65
4.2	2-Hop Greedy Forwarding	69
4.3	Un WISN constitué de 400 nœuds	72
4.4	Ratio des pertes de paquets image	73
4.5	Taux moyen de reception d'images	74
4.6	Statistiques des images exploitables	75
4.7	Statistiques des images complètes	75
4.8	Délai moyen de transmission d'image	76
5.1	Une série de catastrophes en image [3]	80
5.2	Difficulté et dangerosité des opérations de secours [3]	81
5.3	Variété de robots mobiles [3]	83
5.4	Formation d'une plateforme de navires robots [4]	85
5.5	Robot d'inspection CUMT-1[5]	86
5.6	Collaboration entre robots mobiles et capteurs fixes	94
5.7	Moyenne des chemins maintenus pour $F = 5s$	98
5.8	Moyenne des chemins maintenus pour $F = 10s$	98
5.9	Moyenne des chemins maintenus pour $F = 15s$	99

Introduction générale

Sommaire

1.1	Contexte et objectifs	2
1.2	Structure de la thèse	8

1.1 Contexte et objectifs

Du développement des systèmes micro-électromécaniques (MEMS) conjugué aux récentes avancées des technologies de communication sans fil, ont émergé de petits dispositifs dotés d'une certaine intelligence : les capteurs sans fil. Un capteur est une unité de traitement embarquée à faible coût, dotée de capacités de calcul, de mémoire et de communication. Ses opérations de base demeurent l'acquisition de données relatives à son environnement de déploiement, à leur traitement en local, et à leur acheminement vers une station de base pour l'analyse et la prise de décision. Pris individuellement un noeud capteur présente peu d'intérêt. C'est à travers une collaboration avec d'autres capteurs, opérant de manière autonome et communiquant via une communication sans fil à courte portée, que s'érige une infrastructure sophistiquée – de communication et de traitement – connue sous le nom de réseau de capteurs sans fil (*Wireless Sensor Network* ou WSN en Anglais) [6].

Un réseau de capteurs sans fil – réseau sans infrastructure établie – est constitué d'une grande quantité de nœuds capteurs déployés densément, de manière déterministe ou aléatoire, dans une région d'intérêt. Son objectif principal est la collecte d'un ensemble de paramètres de l'environnement immédiat des capteurs, tels que la température ou la pression atmosphérique, afin de les acheminer vers des points de traitement (puits de données ou Sink, une station souvent plus éloignée). Par leur réalisme et leur apport concret, les WSNs ont su se démarquer de leur origine ad hoc et attirer un nombre croissant d'industriels et d'organisations civiles où la surveillance et la reconnaissance de phénomènes physiques restent une priorité. La surveillance environnementale (agriculture, eaux, incendies de forêt, pollutions, ...), médicale (personnes âgées, veille sanitaire dans les troupeaux, ...), la gestion de crises (séismes, inondations, éruptions volcaniques, glissements de terrains, ...), la surveillance de processus et/ou de sites industriels, la domotique, tels sont quelques exemples d'une panoplie vaste et variée d'applications potentielles offertes par les réseaux de capteurs.

L'émergence de petites caméras CMOS et de microphones MEMS, à coût et puissance réduits, a contribué au développement d'une nouvelle génération de capteurs intégrant des aspects multimédia (image, audio, vidéo). Couplé à la flexibilité des réseaux de capteurs sans fil, cet apport de flux multimédia offre de nouvelles perspectives d'applications potentielles où la collecte d'informations visuelles et/ou acoustiques apporte une plus-value certaine : gestion de crises, détection d'intrusions, opérations de recherche et sauvetage, dénombrement, surveillance environnementale, smart city, pistage/tracking d'objets par vision, etc. Cette modalité de capture permet en outre de renforcer les applications actuelles de surveillance par une perception plus particulière des phénomènes dans des zones hostiles et/ou difficiles d'accès. Par exemple le déploiement d'un tel système dans un environnement de nids d'oiseaux permettrait à un ornithologue d'observer et d'étudier, sans intervention humaine, leur comportement [7]. Cette technologie permettant la transmission de flux multimédia dans les WSNs, est connue sous le vocable de réseau de capteurs multimédia sans fil (*Wireless Multimedia Sensor Network* ou WMSN en Anglais) [8]. Toutefois, l'introduction d'aspects multimédia pour la surveillance avec un réseau de capteurs sans fil nécessite des efforts significatifs pour développer des mécanismes de contrôle adaptés, et ce à tous les niveaux des couches protocolaires.

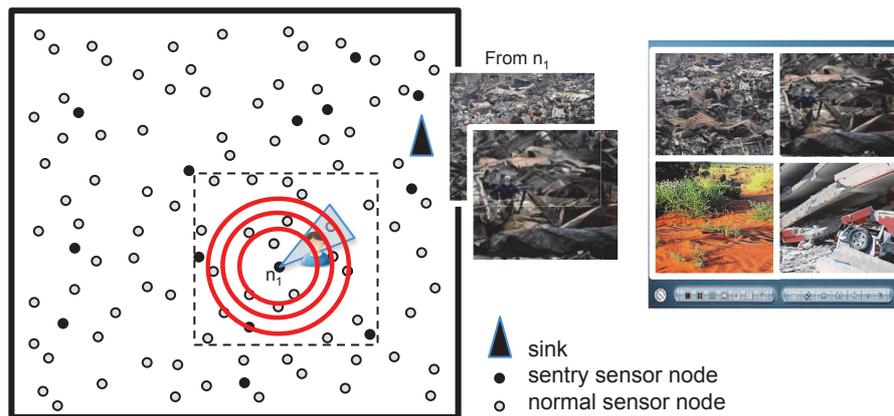


FIGURE 1.1 – Système de détection d'intrusion

Dans le contexte spécifique de cette thèse, notre attention se focalise unique-

ment sur les réseaux de capteurs image sans fil (*Wireless Image Sensor Networks* ou WISNs en Anglais) consistant en un déploiement massif par voie aérienne de capteurs image pour des applications critiques de surveillance. La Figure 1.1 illustre le scénario d'un déploiement aléatoire de capteurs visuels décrivant le genre d'applications adressées. Un WISN pourrait être déployé pour une application de détection d'intrusion ou de recherche et sauvetage (*Search & Rescue*) où les capteurs s'auto-organisent pour désigner des nœuds spéciaux ou *sentinelles* (nœuds noirs sur la partie gauche de la figure) visant une meilleure réactivité du réseau. Ce dernier peut en outre servir dans un contexte de *situation awareness* dont la finalité consiste à « *savoir ce qui se passe pour savoir quoi faire* ». Ainsi, les images capturées des nœuds distants sont collectées au Sink, visualisées, et éventuellement intégrées dans des systèmes d'information géographique (SIG), comme illustré sur la partie droite de la figure.

Un aspect important de cette thèse, novateur par rapport aux contributions déjà effectuées dans le domaine, est la prise en compte de la *criticité* des applications de surveillance. Dans des applications réelles, cette criticité est primordiale car de telles infrastructures doivent être capables de garantir un niveau de service donné. Cette gestion de la criticité est donc au cœur de nos propositions car des comportements normalement non souhaités (comme par exemple le drainage prématuré de l'énergie des capteurs) peuvent être justifiés dans le cas de missions critiques. Ces types d'application (cf. Figure 1.2) rejoignent le principe des systèmes critiques où une défaillance peut avoir des conséquences dramatiques : pertes humaines ou blessés graves, dommages matériels importants, conséquences graves pour l'environnement. Ces applications ont donc des besoins spécifiques du fait de leur forte criticité. Par exemple, la fréquence de capture des informations ou la fiabilité des informations transmises doit être en adéquation avec les besoins et objectifs de l'application finale. De telles infrastructures critiques de surveillance perdent très rapidement leurs intérêts si les événements importants ne sont pas correctement capturés.



FIGURE 1.2 – Panoplie d’applications critiques

Même si la surveillance reste le principal domaine d’application des réseaux de capteurs, peu de travaux considèrent réellement la criticité qui y est associée. La plupart des propositions actuelles vont privilégier la conservation de l’énergie, contrainte majeure des WSNs. D’un autre côté, la vitesse de capture peut être synonyme de qualité de surveillance, et donc de respect des objectifs finaux. Cet indice de qualité n’est pas universel mais dépend de manière intrinsèque de la criticité de l’application. Ainsi, il est important de pouvoir ajuster les paramètres de fonctionnement et l’organisation des nœuds afin de permettre un juste compromis entre autonomie, criticité et couverture. Dans les travaux précédents de l’équipe [9, 10, 11, 12, 13], une méthode d’ordonnement adaptatif de l’activité des capteurs image en fonction du niveau de criticité de l’application de surveillance a été définie. L’ordonnement d’activité dans les réseaux de capteurs vise à optimiser l’énergie – tout en maintenant la couverture et la connectivité – par la constitution d’un sous-ensemble de nœuds devant être actifs pour une période donnée, permettant ainsi aux autres de passer dans un mode passif, moins consommateur d’énergie. Ainsi dans cette

méthode, chaque capteur définit l'ensemble de ses capteurs voisins qui constituent un de ses ensembles couvrants (*cover-sets*), c'est-à-dire que ces nœuds permettent de couvrir une grande partie de sa zone de vue (voir section 3.1 pour de plus amples détails). L'autonomie d'un capteur image étant directement liée à sa vitesse de capture, l'idée principale est qu'un nœud en possession d'un nombre conséquent de *cover-sets* puisse accroître sa vitesse de capture car son champ de vue pouvant être surveillé par un de ses *cover-sets* après épuisement de son énergie. De ce mécanisme découlent des nœuds spéciaux appelés *sentinelles* (*sentry nodes*) – disposant d'une vitesse de capture plus élevée et souvent plus actifs que les autres – visant à augmenter la probabilité de capturer un événement, stimulant ainsi la réactivité du réseau qui est très cruciale dans ces applications critiques de surveillance.

Dans [13], les auteurs ont proposé plusieurs méthodes de construction des *cover-sets* et étudié leur performance en termes de taux de couverture de la zone originale. Nos travaux ici supposent l'utilisation de telles méthodes qui fournit pour chaque capteur son ensemble de *cover-sets*. Ainsi, à la détection d'un événement telle une intrusion par un capteur image v , ce dernier doit procéder à (1) la transmission éventuelle d'une ou de plusieurs images au Sink dépendant de sa vitesse de capture, (2) l'activation d'un de ses *cover-sets*, (3) la propagation d'une alerte sur son voisinage. Cette propagation d'alertes pourrait s'effectuer sur un voisinage à k sauts, $k \geq 1$. Cet état d'alerte des capteurs revient à augmenter leur vitesse de capture. De plus, les nœuds alertés deviennent de potentielles sources d'images, donc disposer à transmettre leurs captures éventuelles de l'intrus. En outre, sur activation d'un *cover-set*, les nœuds le constituant peuvent également effectuer la transmission de leurs propres captures de la scène vers le Sink afin de résoudre les ambiguïtés. Par conséquent, la détection d'un événement provoque la transmission simultanée d'une large quantité d'informations, parfois redondantes, émanant de multiples sources vers le puits de données. Ce phénomène peut conduire à des congestions réseau occasionnant ainsi une consommation énergétique plus importante, des pertes considé-

rables de paquets dégradant la qualité des images reconstruites au niveau du Sink. Cette situation est d'autant plus délicate étant donné la nature des informations collectées (des images) compte tenu de la quantité considérable de données mise en jeu. En fait, à la différence des capteurs traditionnels où 2 à 3 *octets* suffisent pour représenter les données scalaires (température, luminosité, pression, ...), l'ordre de grandeur du codage d'une image – intrinsèque à sa taille et à sa résolution – peut avoisiner les milliers d'octets. De plus, la plupart des technologies radio actuellement disponibles pour les WSNs restent confrontées à de fortes limitations en taille de paquets (un MTU¹ de 100 ou 150 octets) et en débit (typiquement 250*kbps* pour le standard 802.15.4 dans la bande de fréquence 2.4GHz). Ainsi une image de 16*Ko* génèrerait plus de 200 paquets pour une charge utile maximale de 80 octets.

Il devient alors nécessaire, dans des applications de surveillance impliquant des informations visuelles et notamment à forte criticité, de recourir à des techniques de codage adéquats face aux contraintes énergétiques des nœuds sollicités (codage et transmission d'images) et à la forte probabilité de pertes de paquets. Cependant, nos contributions par rapport à ce fait ne se focalisent pas sur les techniques de compression d'images. Il s'agit plutôt pour nous, après adoption d'un mécanisme de codage d'images approprié, de définir le bon schéma de routage par rapport aux cover-sets qui seront sélectionnés par exemple. En effet, plusieurs capteurs peuvent détecter le même événement et envoyer des données qui vont saturer le réseau. Des mécanismes de contrôle adaptés sont donc nécessaires pour une détection fiable d'événements et une transmission d'images efficace et efficiente. En effet dans un contexte d'applications critiques, pouvoir détecter les événements survenus est important, mais recevoir des images de qualité au Sink dans les délais impartis demeure vitale. L'optimisation de la transmission d'images dans les réseaux de capteurs, guidée par la criticité des applications, tel est l'objectif principal de cette thèse.

1. Maximum Transmission Unit : taille maximale d'un paquet pouvant être transmis en une seule (sans fragmentation) sur une interface.

1.2 Structure de la thèse

Le reste de ce manuscrit s'articule sur en cinq chapitres :

- *Chapitre 2* : ce chapitre se consacre pour l'essentiel à l'intégration d'aspects multimédia (audio, image, vidéo) dans les réseaux de capteurs. Après une présentation des capteurs multimédia, la technologie des réseaux de capteurs multimédia est introduite à travers les défis relatifs à sa conception. Une section passe en revue les protocoles de routage dédiés à cette technologie, et notamment le routage géographique. Une autre quant à elle se focalise sur le transport d'un flux multimédia spécifique, en l'occurrence des images. Ce chapitre s'achève par une présentation de quelques réalisations, relatives aux applications de surveillance sur un réseau de capteurs multimédia, au sein du LIUPPA².
- *Chapitre 3* : ce chapitre présente le contexte applicatif conduisant à la transmission d'une grande quantité d'images émanant de plusieurs sources lors de la détection d'un événement. Afin de résoudre ce phénomène facteur de congestion réseau, donc de dégradation des performances réseau, une section est consacrée à la définition d'une stratégie de sélection des sources pertinentes pour une meilleure qualité de réception des images capturées émises au Sink. Cette technique de sélection des cover-sets, guidée par une approche multi-critère, se fonde essentiellement sur des indicateurs d'état et de voisinage. Le transfert, au puits de données, des captures effectuées par les différentes sources sélectionnées est assuré par une extension multi-chemin du protocole de routage géographique GPSR.
- *Chapitre 4* : ce chapitre souligne en premier lieu les avantages offerts par l'exploitation des informations de chemins à 2 sauts, notamment dans le cadre d'un schéma de routage géographique. Toujours dans le contexte applicatif induisant un trafic intense d'informations visuelles, deux sections sont ainsi

2. Laboratoire d'Informatique de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, France

consacrées à deux autres contributions bénéficiant des avantages de l'exploitation des informations de chemins à 2 sauts. La première proposition est une stratégie de sélection guidée par la connaissance des informations de chemins à 2 sauts et accordant une priorité à la criticité par rapport à la préservation de l'énergie, même si cette préservation est faite de manière indirecte. Un protocole de routage intitulé T-GPSR, une extension de GPSR dont le processus de sélection du prochain saut repose essentiellement sur les chemins à 2 sauts, constitue la seconde contribution. Ce schéma de routage assure la remontée des captures émanant des sources spécifiées par l'approche de sélection vers le Sink.

- *Chapitre 5* : ce chapitre présente un bref recensement des récentes catastrophes naturelles ou accidentelles qui ont sévi à l'échelle planétaire avant d'introduire les systèmes de Search & Rescue assistés par robot. Cette section est ainsi consacrée pour l'essentiel aux systèmes de recherche et sauvetage assistés par robot et leur mise en œuvre à travers des exercices de simulation et des cas pratiques. En outre, un état de l'art de la mobilité des puits dans les réseaux de capteurs de manière générale est présenté. Ce chapitre se termine par une étude de performances des approches proposées et basées sur les informations de chemins à 2 sauts dans un contexte collaboratif entre des robots et des capteurs pour des opérations de recherche et sauvetage.
- *Chapitre 6* : ce chapitre conclut cette thèse et présente les perspectives de recherche relatives aux travaux présentés dans ce manuscrit.

Vers l'intégration d'aspects multimédia dans les réseaux de capteurs

Sommaire

2.1	Capteurs multimédia	12
2.2	Réseaux de capteurs multimédia	15
2.3	Routage dans les réseaux de capteurs multimédia	18
2.3.1	Classification	18
2.3.2	Routage géographique	19
2.4	Transmission d'images dans les réseaux de capteurs	23
2.4.1	Compression d'images	24
2.4.2	Transfert d'images	27
2.4.3	Réalisations au sein du LIUPPA	30
2.5	Conclusion	34

Ce chapitre se consacre pour l'essentiel à l'intégration d'aspects multimédia (audio, image, vidéo) dans les réseaux de capteurs. Après une présentation des capteurs multimédia, la technologie des réseaux de capteurs multimédia est introduite à travers les défis relatifs à sa conception. Une section passe en revue les protocoles de routage dédiés à cette technologie. Une autre quant à elle se focalise sur le transport d'un flux multimédia spécifique, en l'occurrence des images. Ce chapitre s'achève par une présentation de quelques réalisations, relatives aux applications de surveillance sur un réseau de capteurs multimédia, au sein du LIUPPA.

2.1 Capteurs multimédia

Du développement des systèmes micro-électromécaniques (MEMS) conjugué aux récentes avancées des technologies de communication sans fil, ont émergé de petits dispositifs dotés d'une certaine intelligence : les capteurs sans fil. Un capteur est une unité de traitement embarquée à faible coût, dotée de capacités de calcul, de mémoire et de communication. Leurs capacités sont néanmoins limitées dû en grande partie à leur miniaturisation. Ses opérations de base demeurent l'acquisition de données relatives à son environnement de déploiement, à leur traitement en local, et à leur acheminement vers une station de base pour l'analyse et la prise de décision. Le panorama de modèles commercialisés sur le marché n'influe en rien sur l'anatomie d'un capteur (cf. Figure 2.1) se résumant à quatre unités fondamentales [6] :

- *Unité d'acquisition* : assure la collecte des informations de l'environnement local (pression, intensité de la luminosité, vibrations, humidité, température, etc.) et leur transformation en grandeurs numériques compréhensibles par l'unité de traitement ;
- *Unité de traitement* : composé d'un processeur généralement associé à une mémoire (microcontrôleur), ce module est chargé de la logique de l'application, de l'exécution éventuelle de traitement sur les informations prélevées (compression, filtrage, agrégation, etc.), et parfois de la gestion des protocoles de communication ;
- *Unité de communication* : basé essentiellement sur des technologies sans fil à courte portée, ce module est garant des émissions et réceptions via un médium sans fil ;
- *Unité énergétique* : il s'agit le plus souvent d'une batterie, source d'alimentation de tous les autres composants du capteur.

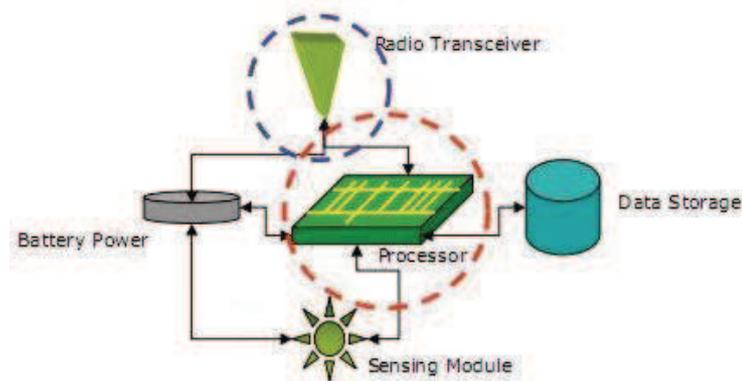


FIGURE 2.1 – Anatomie d'un capteur

Par ailleurs, des modules supplémentaires peuvent intervenir en fonction des applications envisagées : une *unité de localisation* déterminant la position géographique du nœud, des *éléments de mobilité* pour sa mobilité éventuelle, un *générateur d'énergie* pour remédier aux contraintes énergétiques, etc. La gamme de capteurs MicaZ (cf. Figure 2.2), Mica2, Imote2 et TelosB de la marque Crossbow¹ demeurent parmi les plateformes de capteurs les plus populaires.



FIGURE 2.2 – Prise de vue d'un MicaZ

1. <http://www.xbow.com/>

L'émergence de petites caméras CMOS et de microphones MEMS, à coût et puissance réduits, a contribué au développement d'une nouvelle génération de capteurs intégrant des aspects multimédia (image, audio, vidéo). On assiste ainsi à la transition d'une technologie de capteurs dédiés à la mesure de paramètres scalaires (humidité, magnétisme, vibrations) vers un modèle plus évolué, doté de capacité d'acquisition de flux multimédia. Cyclops et Stargate sont deux exemples concrets de ce type de capteurs multimédias communicants. Un capteur vidéo Imote2² possédant une carte multimédia³ illustré à la Figure 2.3 est quelques une des plateformes utilisées au sein du LIUPPA pour l'expérimentation d'applications de surveillance vidéo.

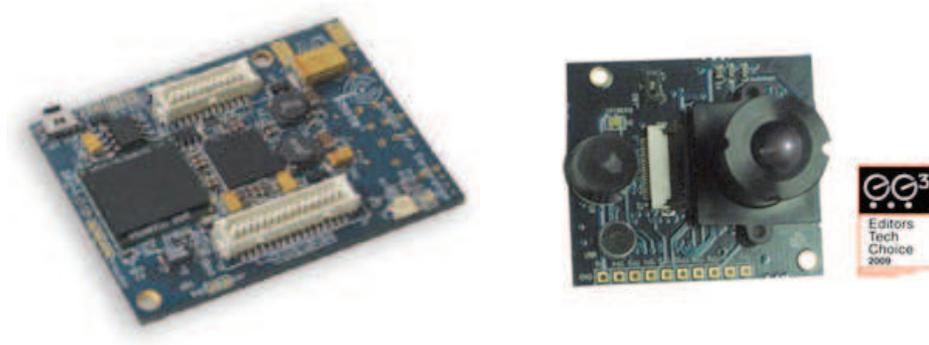


FIGURE 2.3 – Capteur Imote2 IPR2400 & Carte Multimédia IBM400

Cette nouvelle génération de capteurs conduit à l'émergence d'une technologie novatrice permettant la transmission de flux multimédia dans les WSNs : les réseaux de capteurs multimédia sans fil. Les réseaux de capteurs multimédia suscitent un intérêt manifeste par leur fort potentiel en termes d'applications de surveillance : détection d'intrusions, dénombrement, vigilance environnementale, *smart city*, pistage (*tracking*) d'objets par vision, *situation awareness*, etc. Ils connaissent également un réel engouement dans le contexte de prévision et de réponse aux catastrophes naturelles ou accidentelles. L'intégration d'aspects multimédia permet aussi de renforcer

2. <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=253>

3. <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=280>

les applications classiques sur les WSNs par une perception plus particulière des phénomènes dans des zones hostiles et/ou difficiles d'accès. Par exemple, l'acquisition possible d'images certifiant l'existence d'un incendie dans une région d'intérêt dans le cas d'une surveillance d'incendies de forêt est un plus non négligeable pour palier aux indications limitées des capteurs traditionnels (température, humidité, gaz).

2.2 Réseaux de capteurs multimédia

A la différence des applications traditionnelles, les applications multimédia sont caractérisées par un volume conséquent de données : alors que 2 à 3 *octets* suffisent à pour un capteur scalaire représenter des données, l'ordre de grandeur du codage d'une image, intrinsèque à sa taille et à sa résolution, peut avoisiner les milliers d'octets. Cette ordre de grandeur devient plus élevée dans le cas d'une vidéo. Ainsi, l'introduction d'aspects multimédia pour la surveillance avec un réseau de capteurs sans fil nécessite des efforts significatifs pour développer des mécanismes de contrôle adaptés, et ce à tous les niveaux des couches protocolaires.

Avec des données multimédia, la qualité de service (*Quality of service* ou QoS) devient désormais une exigence fondamentale pour la transmission dans un environnement contraint en ressources. En effet, les limitations sont nombreuses :

- *Efficacité énergétique* : l'énergie demeure la contrainte majeure des réseaux de capteurs. En effet, les capteurs sont alimentés par des batteries à capacité limitée, la plupart du temps irremplaçables dû à la dangeriosité ou à la difficulté d'accès de l'environnement de déploiement. Du fait de la quantité de données générées, la transmission de flux multimédia provoque un trafic intense de contenu multimédia et un traitement plus coûteux. Ce phénomène conduit à une consommation énergétique importante pouvant occasionner l'annihilation prématurée du réseau. Par conséquent, préconiser des algorithmes contribuant à la prolongation de la durée vie du réseau est crucial.

- *Bande passante* : le streaming de flux multimédia nécessite une bande passante très élevée par rapport à la capacité actuelle des capteurs. En effet, alors qu'un streaming vidéo peut nécessiter des débits supérieurs à l'ordre de 500kbps , le débit maximale d'un nœud capteur est de 250kbps avec le standard 802.15.4. Des études ont montré que le débit réel utile est de l'ordre de 70kbps [14]. Par conséquent des solutions matérielles et logicielles sont nécessaires pour une fourniture suffisante en bande passante afin de supporter la transmission de flux multimédia.
- *Latence* : la sensibilité aux délais est également une préoccupation majeure dans les applications multimédia temps réel. Les données émises doivent être correctement reçues au Sink dans les délais impartis ; autrement elles deviennent obsolètes. Les applications de streaming vidéo temps réel requièrent des garanties strictes de délai bout à bout, de bande passante et de gigue [15].

En outre, l'usage de dispositifs contraints en ressources tels que les capteurs est facteur de défis supplémentaires :

- La génération d'un grande quantité de paquets par image dû à un MTU assez réduit ;
- Les interférences, au niveau radio, découlant du voisinage dans la politique de relais des paquets ;
- Les collisions fréquentes, au niveau MAC (*Media Access Control*), entre ces voisins relayant les paquets dû à un temps de transmission élevé ;
- Consommation accrue d'énergie due à la forte exposition des voisins à l'écoute passive ;
- La forte propension à la perte et/ou suppression de paquets occasionée pour une faible taille des mémoires tampon (*buffers*) aux niveaux des nœuds intermédiaires ;
- Le mode de communication *many-to-one* entraînant une hypersollicitation du voisinage du Sink causant son drainage énergétique précipité.

L'objectif principal d'un WSN de manière générale est la collecte d'un ensemble de paramètres de l'environnement immédiat des capteurs et leur acheminement vers des points de traitement pour l'analyse et la prise de décisions. De ce fait, la propagation et la délivrance des données demeurent la fonctionnalité fondamentale dans ce type de réseau. Du fait de son importance, cette fonctionnalité doit ainsi prendre en considération les propriétés inhérentes des capteurs afin d'assurer les meilleures performances du système : durée de vie, fiabilité, temps de réponse, etc. Comparés aux réseaux de capteurs scalaires, les WMSNs nécessitent des protocoles de routage temps réel (le plus souvent) spécifiques pour assurer une délivrance de flux multimédia (image, audio, vidéo). En effet, les WMSNs sont caractérisés par un volume important de données lesquelles peuvent disposer de niveaux de priorité différents. En parallèle, toute tentative de conception doit pouvoir garantir un certain niveau de QoS dépendant fortement de l'application envisagée sur un environnement réseau contraint en ressources. Ces paramètres de QoS peuvent inclure les exigences de la bande passante pour le streaming audio/vidéo, la qualité des informations multimédia (qualité de perception d'une vidéo, qualité visuelle d'une image, qualité sonore), la fiabilité, les délais de transmission bout-en-bout, la robustesse, l'efficacité énergétique etc. Par conséquent, des protocoles adéquats sont nécessaires afin de répondre aux besoins spécifiques de ce type de réseau.

Le routage multi-chemin est souvent considéré comme une solution efficace pour optimiser les performances de communication dans les technologies sans fil multi-saut à forte charge, en particulier les réseaux de capteurs multimédia. Ce schéma de routage consiste à l'établissement de plusieurs chemins entre une paire (source, destination) pour acheminer des données. La répartition des flux d'information (*load balancing*), la fiabilité de transmission des données, l'agrégat des ressources disponibles (bande passante par exemple), tels sont quelques avantages offerts par cette technique [16, 17, 18]. Cependant, le principal inconvénient du routage multi-chemin demeure les interférences inter-chemins qui peuvent en découler. Quelques études se

sont penchées sur la réduction des interférences émanant de l'établissement de chemins multiples : [19, 20, 21].

La section suivante fait le tour d'horizon des algorithmes de routage conçus pour supporter le transfert de flux multimédia dans les réseaux de capteurs multimédia.

2.3 Routage dans les réseaux de capteurs multimédia

2.3.1 Classification

Une classification selon deux grandes approches des protocoles de routage dédiés aux WMSNs est proposée dans la littérature : approches hiérarchiques et approches basées sur la localisation. Une topologie plate préconise une organisation du réseau où tous les capteurs détiennent les mêmes rôles. A la différence d'une topologie plate, les approches hiérarchiques prônent une structuration des nœuds du réseau en plusieurs niveaux de responsabilité. La plupart des protocoles hiérarchiques de routage se fondent sur l'une des méthodes les plus prisées de structuration d'un réseau qui est le clustering [22]. Le clustering permet la formation d'un backbone virtuel visant à améliorer l'utilisation des ressources rares du réseau telles que la bande passante et l'énergie. La répartition des nœuds en clusters, tout en augmentant la résistance au facteur d'échelle, permet une réduction de la complexité des algorithmes de routage, une optimisation de la ressource radio à travers une gestion locale supervisée par un chef de cluster (*cluster-head*), une facilité d'agrégation des données et une optimisation de la consommation énergétique globale. La littérature regorge de protocoles de routage basés sur le clustering et dédiés aux WMSNs. [23, 24, 25, 26] en sont quelques uns plus récents. Cependant, ces approches suscitent quelques problèmes liés à l'élection des cluster-heads et de manière générale à la maintenance des clusters. Nous nous attarderons un peu plus sur la dernière famille laquelle s'avère pertinente par rapport à nos travaux et plus judicieuse pour la transmission de flux multimédia dans les WSNs. Une phase opérationnelle nécessitant uniquement l'usage d'informations locales, une facilité de passage à l'échelle, une minimisation

des coûts de mémoire et de communication, des délais de délivrance réduits, tels sont les principaux avantages que procure la classe d’approches basées sur la position, communément appelée routage géographique.

2.3.2 Routage géographique

Le concept clef du routage géographique, réside dans l’usage des informations de position des nœuds pour l’acheminement des données collectées, des sources vers la destination. Le principe de ce schéma de routage repose sur les règles suivantes :

- chaque nœud peut déterminer sa propre position ;
- la position de la destination finale est connue de tous les nœuds.

Ces coordonnées géographiques, nécessaires aux décisions de routage, peuvent être virtuelles comme dans [27, 28, 29, 30]. Cependant, du fait de la forte criticité des applications considérées où l’habilité à localiser la source d’un phénomène demeure un atout majeur – par exemple dans l’optique d’optimiser le déploiement et la coordination des secours dans le cadre d’un sinistre – adhérer à la solution des coordonnées réelles s’avère plus pertinent. L’acquisition de la position physique d’un nœud s’opère soit par équipement d’un dispositif GPS, soit par estimation grâce à des algorithmes de localisation tels que [31, 32, 33, 34]. Dans cette famille d’approches, trois stratégies de progression gloutonne dédiées à l’établissement dynamique d’une route pour la transmission d’un paquet de la source vers sa destination existent dans la littérature :

- la progression gloutonne basée sur la *proximité*, s’appuyant sur la distance euclidienne ou la projection sur la ligne virtuelle entre le nœud courant et la destination [35, 36, 37] ;
- la progression gloutonne basée sur un *écart angulaire* auto-adaptatif vis-à-vis de la ligne virtuelle tracée entre le nœud courant et la destination [38, 39] ;
- la progression gloutonne *hybride* combinant les deux approches susmentionnées [40].

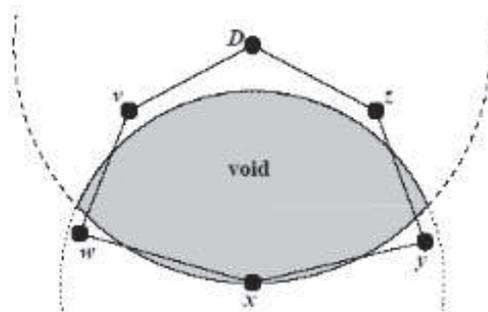


FIGURE 2.4 – Présence d'un vide [1]

Cependant l'inconvénient majeur de ce type de schéma demeure la présence des vides (*voids*) ou "trous" (*holes*) (partie grise de la Figure 2.4) entraînant l'échec des progressions gloutonnes. La formation des vides découlent soit du déploiement aléatoire du réseau (vides statiques), soit de la défaillance de nœuds ou la présence d'obstacles radio (vides dynamiques). Afin de remédier à ce problème, la plupart des algorithmes de routage géographique intègrent des mécanismes d'anticipation dans la détection des vides et leur contournement ([37, 41, 42, 43, 44]). L'idée clef est d'éviter l'obstacle de la manière la plus prompte et la plus économique en termes d'énergie. Nous faisons une brève description du plus ancien des algorithmes de routage à savoir GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*)[1].

Originellement conçu pour les réseaux Ad-Hoc mobiles (*Mobile Ad Hoc Networks* ou MANETs), le protocole de routage réactif GPSR s'est très rapidement vu adapter aux réseaux de capteurs. GPSR dispose d'une technique de *Transmission Gloutonne* (*Greedy Forwarding*) pour l'avancée des paquets vers la destination. Basé sur la métrique de proximité par calcul de distance, ce mode glouton fait référence à la sélection du voisin le plus proche de la destination comme prochain saut pour le transfert d'un paquet. En fait, par une découverte de voisinage préalable grâce l'échange de messages *beacon*, chaque nœud dispose des coordonnées géographiques de ses voisins immédiats. La Figure 2.5 illustre un scénario où une source S , positionnée au point de coordonnées (x_s, y_s) , désire transmettre un paquet de données

destiné au nœud $D(x_d, y_d)$. Le paquet est ainsi transmis et relayé saut par saut en procédant à chaque étape à la sélection du voisin le plus proche de la destination. Occasionnellement, *Greedy Forwarding* peut rencontrer quelques désagréments

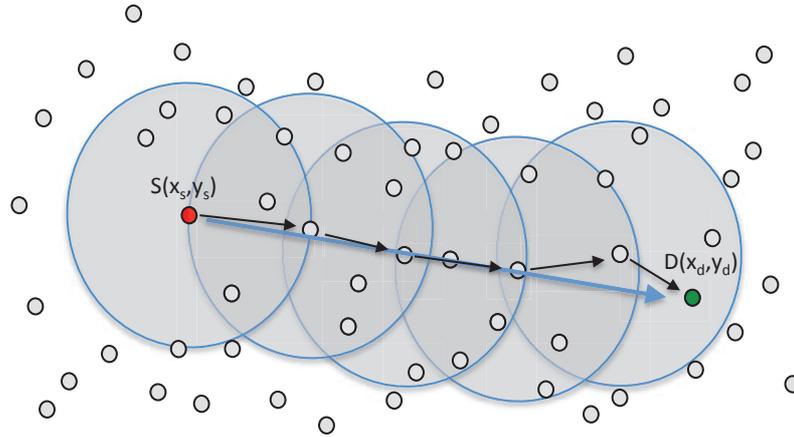


FIGURE 2.5 – *Greedy Forwarding*

dans la mesure où le nœud courant peut se trouver plus proche de la destination finale que tous ses voisins, et que cette dernière reste inaccessible en un unique saut : présence d'un vide. GPSR recourt à la *Transmission de Périphérie* (*Perimeter Forwarding*) basée sur la *règle de la main droite*. Ce mode consiste, à l'échec de *Greedy Forwarding*, à router le paquet autour du trou dans le sens contraire des aiguilles d'une montre jusqu'à atteindre un nœud capable d'effectuer la progression gloutonne. Nous nous concentrons maintenant sur les protocoles de routage géographiques conçus plus spécifiquement pour les WMSNs.

TPGF (*Two-Phase geographical Greedy Forwarding*) est un protocole de routage multi-chemin reposant sur les informations géographiques afin de faciliter l'établissement de chemins disjoints à la demande [35]. Cet algorithme détermine le plus court chemin vers la destination avec évitement des vides par marquage. Par une exécution répétée ce protocole est capable de définir, à la demande, les meilleurs chemins disjoints vers le Sink. TPGF opère en deux phases : une première pour l'exploration des chemins potentiels vers le puits, et la seconde pour l'optimisation de ces che-

mins. Son extension, MPMPS (*Multi-Priority Multi-Path Selection*) [36], introduit quant à elle des niveaux de priorité sur les chemins établis. Ce protocole définit des niveaux de priorité pour chacun des flux audio et vidéo en fonction de l'application considérée : par exemple une plus haute priorité du flux vidéo dans un contexte de détection d'intrusion, par contre le flux audio le remporte dans le cadre d'une surveillance sous marine. Les chemins sont ensuite établis en fonction de la priorité de chaque flux. Ces approches orientées QoS assurent un approvisionnement suffisant en bande passante des applications multimédia. Cependant leur inconvénient majeur demeure la limite en termes de résistance en facteur d'échelle car reposant sur une cartographie complète de la topologie du réseau. AAEEGF (*Application Aware Energy Efficient Geographic Greedy Forwarding*), une récente extension de TPGF, assure un compromis entre efficacité énergétique et sensibilité aux délais [45].

AGEM (*Adaptive Greedy-Compass Energy-Aware Multipath*) est un protocole de routage géographique efficace en énergie avec angle de vue adaptatif, basé sur le multi-chemin pour la transmission de flux vidéo dans les réseaux de capteurs multimédia [38]. Ce protocole dispose d'un mode opératoire double : une transmission gloutonne basée sur une adaptation de l'angle de vue vis-à-vis de la destination et une transmission en marche-arrière pour contourner les vides. Le processus de sélection du prochain saut dans AGEM s'appuie sur un ensemble de paramètres : l'énergie résiduelle, le nombre de sauts déjà effectués par le paquet, la distance par rapport aux voisins, l'historique des paquets appartenant au même flux et déjà routés. Son extension [40] introduit quant à elle une progression gloutonne hybride. AGEM et son extension assurent une consommation d'énergie uniforme et répondent aux contraintes de QoS.

Chen et al. ont proposé DGR (*Directional Geographical Routing*) pour aborder le problème du streaming vidéo H.26L en temps réel sur un WMSN contraint en ressources (bande passante, énergie, ...) consistant en quelques capteurs vidéo et

plusieurs capteurs scalaires [39]. Par la combinaison d'un schéma de routage multi-chemin avec la technique de codage d'erreur FEC (*Forward Error Correction*), le protocole DGR construit en fonction de l'application un nombre proportionnel de chemins disjoints pour un nœud vidéo afin de transmettre des flux vidéo protégés en parallèle dans un environnement peu fiable restreint en bande passante. Afin de répondre aux caractéristiques de la transmission vidéo, les chemins multiples dans DGR contribuent à l'équilibrage de la charge, l'agrégation de bande passante et la réduction de délais de transmission de paquets. En outre, DGR diffuse ces chemins dans toutes les directions sur le voisinage de la source (un vidéo capteur) pour remédier aux interférences inter-chemins. Ce qui implique que certains paquets sont susceptibles d'emprunter des chemins construits à partir de voisins plus éloignés du Sink que la source elle-même. Cependant, DGR repose sur l'hypothèse qu'à tout moment un et un seul capteur vidéo transmet ses données au puits : donc pas de transmission simultanée de flux vidéo. Cette hypothèse quelque peu déraisonnable limite fortement le déploiement de ce protocole sur un réseau à grande échelle. Fu et al. ont abordé le problème des chemins sans interférence dans les WMSNs. Le protocole de routage multi-chemin proposé intègre un mécanisme de contrôle des interférences afin d'augmenter la fiabilité [46].

La prochaine section présente le transport d'un flux multimédia spécifique, en l'occurrence des images, à travers des approches collaboratives de compression et de transmission.

2.4 Transmission d'images dans les réseaux de capteurs

La collecte et la transmission d'informations visuelles sur un WSN provoque le drainage des ressources rapide des capteurs. Sur un capteur, le transceiver radio, à travers ses opérations de transmission et la réception des données, demeure l'unité la plus "vorace" en énergie [6, 47, 48]. Ainsi, une quantité moindre de données à transmettre entraîne directement moins d'opérations à effectuer de la part du

transcepteur radio, et ainsi moins d'énergie consommée. Par conséquent, il devient nécessaire de recourir à des techniques visant à réduire la quantité des données à transmettre.

Des approches de traitement spécifique de données ont été proposées dans la littérature pour la prolongation de la durée de vie du réseau. L'agrégation de données, l'une des techniques les plus prisées, est un mécanisme clef pour les réseaux de capteurs. Elle vise à réduire la charge de trafic acheminé dans le réseau ainsi que la consommation d'énergie à travers une factorisation de l'information transmise par les nœuds [49]. Cette factorisation consiste ainsi à combiner des informations provenant de plusieurs sources tout au long du chemin menant au puits. Reposant sur un arbre où les nœuds sont responsables de l'agrégation, le protocole COUGAR [50] est un exemple type d'agrégation de données distribuée. Toutefois, malgré son efficacité dans un contexte de données scalaires, recourir à l'agrégation pour la réduction d'une quantité de données visuelles s'avère déraisonnable.

2.4.1 Compression d'images

La compression se révèle être la solution la plus appropriée pour la réduction d'une quantité d'informations visuelles. La compression d'images consiste à réduire la redondance des données d'une image afin d'en minimiser le nombre de paquets correspondants pour une transmission plus rapide par exemple. Cette compression peut s'effectuer de manières diverses : avec ou sans perte de données, centralisée ou distribuée. La compression avec perte de données demeure la plus pertinente pour des transmissions à bas débit et pour la réduction des coûts en termes de mémoire et de transmission. Bien que la compression participe à l'amélioration des performances réseau, un taux de compression maximal peut dégrader fortement la qualité de l'image restituée. De plus, cette compression à taux maximal ne minimise pas toujours la consommation énergétique globale du réseau puisque la compression consomme parfois plus que la communication [51]. Certains algorithmes de compres-

sion se fondent sur l'identification des parties importantes d'une image afin de définir le schéma de priorisation adéquat. Cependant, dans un contexte d'applications critiques où la capacité à exploiter les informations visuelles d'une image à la réception est capitale, toutes les parties d'une image pourraient être essentielles pour lever les ambiguïtés. La littérature fourmille de protocoles de compression d'images destinés aux WMSNs dont [52] est un des plus récents. Cependant, même si la compression est une partie intégrante de nos travaux, elle n'en est pas le cœur.

Dans le cadre d'une collaboration avec une équipe du CRAN⁴ spécialisée dans le traitement d'images, nous tirons profit d'une méthode de compression optimisée – développée en son sein – à faible coût et adaptée aux dispositifs contraints en ressources [53, 54]. La robustesse de cette méthode réside dans sa flexibilité par rapport à l'ordre de réception des paquets d'une image favorisant le routage multi-chemin et une plus grande tolérance aux pertes de paquets au niveau du décodeur. La technique proposée garantit une faible consommation d'énergie pour la compression et une petite taille de fichier avec un filtrage de facteur de qualité (Q) compris entre 1 et 100. Echelle de paramétrage spécifiant la qualité visuelle, un facteur de qualité de 1 fournirait la taille de fichier la plus réduite avec une dégradation conséquente de la qualité de l'image alors qu'un Q de valeur 100 produirait la plus importante grandeur associée à la meilleure qualité visuelle possible [52]. Les figures 2.6 et 2.7 dépeignent respectivement une image de 128×128 et 200×200 pixels avec une variation successive du facteur de qualité Q . Ces illustrations exposent également le nombre de paquets générés en prenant une charge utile maximale de 90 octets, la taille de la version compressée de l'image ainsi que le PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) par rapport à l'image originale (en octets). Il apparaît clairement qu'une valeur de $Q = 20$ présente encore une qualité visuelle satisfaisante tout en fournissant à la fois de bons ratios de compression : 5.89 pour la résolution 128×128 et 6.14 pour 200×200 . Une telle valeur de Q associée à une résolution de $128 * 128$ reste

4. Centre de Recherche en Automatique de Nancy, France

pertinente pour une application de détection d'intrusions très sensible aux délais de transmission, alors qu'une résolution de 200×200 se révèle plus appropriée dans un contexte de situation awareness moins contraint en délai.

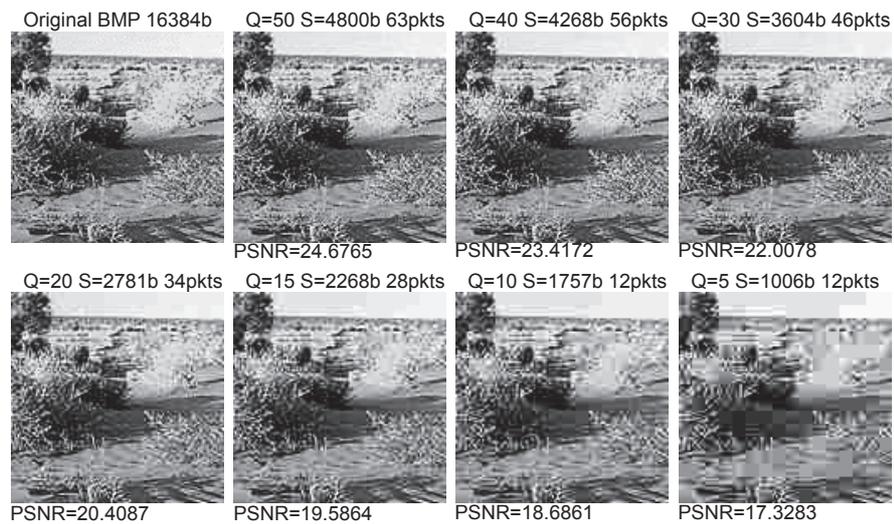


FIGURE 2.6 – Variation de Q sur une image de 128×128 pixels

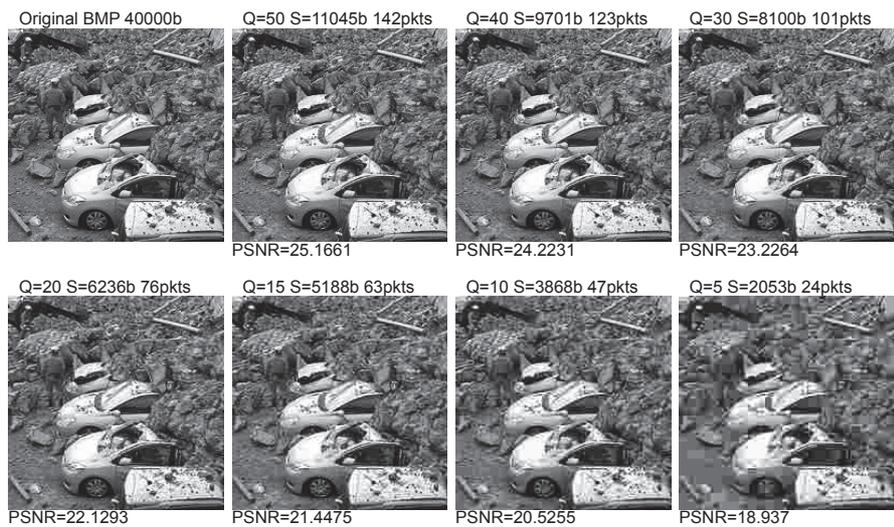


FIGURE 2.7 – Variation de Q sur une image de 200×200 pixels

2.4.2 Transfert d'images

Dans la littérature, la plupart des schémas de transfert d'images dans les WMSNs consiste en des approches collaboratives de compression et de transmission lesquelles peuvent être classifiées en deux grandes familles : approches orientées corrélation et approches sans corrélation.

2.4.2.1 Approches orientées corrélation

De manière générale la corrélation d'images consiste à mesurer le champ de déplacement d'une image par rapport à une image de référence. Sur la base de la corrélation entre de deux ou plusieurs images, cette famille d'approches exploite les zones de chevauchement (*overlapping*) des captures effectuées émanant de capteurs image différents afin de réduire la quantité de données à transmettre. Cette corrélation devient plus prononcée lorsque les nœuds équipés de caméras capturent des scènes similaires, et notamment lorsque ces sources sont voisines. Deux cas de figures dépendant du type de réseaux se présentent dans cette famille.

A. Cas des réseaux homogènes

Dans cette sous-catégorie, l'homogénéité caractérise le réseau. En d'autres termes, le réseau est uniquement constitué de nœuds équipés de caméras, dotés des mêmes propriétés et en charge des mêmes responsabilités. Par conséquent, toute collaboration n'est envisageable qu'entre capteurs image pour le traitement et la transmission des images. Wagner et al. ont proposé un schéma de compression distribuée d'images [55] avec une transmission à faible résolution des zones de chevauchement au récepteur et l'usage de techniques de récupération à haute résolution pour leur reconstruction. Chen et al. ont eu recours à une technique de communication intercapteur pour la transmission des zones de chevauchement des captures émanant de plusieurs capteurs images [56]. L'efficacité en énergie caractérisée par ces schémas ne peut être atteinte qu'avec une quantité suffisante de capteurs image offrant de larges

régions chevauchées. Cependant, la décision du niveau de chevauchement nécessite l'échange d'une quantité significative de données entre les capteurs image adjacents lequel pourrait être vu comme du gaspillage considérable de ressources.

B. Cas des réseaux hétérogènes

L'hétérogénéité du réseau définit cette sous-catégorie à la différence de la précédente. Le réseau est ainsi constitué de quelques capteurs image et de plusieurs capteurs scalaires appelés nœuds normaux. Cette sous-catégorie préconise une collaboration entre plusieurs capteurs image et un nœud normal pour le traitement et la transmission des captures effectuées. Chow et al. se sont appuyés sur un nœud normal le long du chemin pour le traitement des captures émises par les nœuds image adjacents [57]. Ce nœud normal décompresse d'abord les images reçues et combine ensuite les portions qui se chevauchent afin de générer une nouvelle version de la scène sur cette région. Enfin, il procède à la compression de la nouvelle image avant d'effectuer sa transmission. Un tel schéma peut garantir des économies d'énergie lorsque les nœuds image sont assez distants de la destination et génèrent de larges zones de chevauchement. De plus, il ne repose pas sur une connaissance préalable de la structure de corrélation des capteurs image. Cependant, le nœud normal utilisé dans cette approche doit être doté d'une forte puissance de calcul et de mémoire. Un algorithme beaucoup plus récent appartient à cette sous-catégorie : EEPMQR (*Energy Efficient Prioritized Multipath QoS Routing*) [58]. La particularité EEPMQR réside dans la priorisation des régions sans chevauchement sur les régions chevauchées. Il établit ainsi plusieurs chemins de priorité différente sur la base d'une combinaison de métriques : la disponibilité des buffers, l'énergie résiduelle, le nombre de sauts, le niveau de pertes le long du chemin.

2.4.2.2 Approches sans corrélation

Cette catégorie d'approches, caractérisée également par l'hétérogénéité du réseau, préconise par contre une collaboration entre un capteur image et un ou plu-

siieurs nœuds normaux. Dans des WMSNs contraints en ressources, Wu et al. ont observé la consommation d'énergie significative des algorithmes de compression d'images [59]. Ainsi, ils ont proposé une distribution de la charge de la transformée d'ondelettes des images à travers plusieurs groupes de nœuds normaux le long du chemin de la source à la destination en se fondant sur le concept de calcul distribué parallèle. Cependant, ce schéma ne considère pas le bilan énergétique des nœuds normaux. En outre, les auteurs de [60] ont proposé un protocole de transmission d'images semi-fiable afin de réduire la consommation énergétiques des nœuds relayant les paquets jusqu'au collecteur. Les économies d'énergie sont obtenues en préparant à la source des paquets de différentes priorités grâce à une transformée d'ondelettes de l'image, puis en conditionnant l'acheminement des paquets, saut par saut, suivant leur priorité et l'état de charge des batteries [61]. Wang et al. ont défini une approche similaire basée sur une transformée d'ondelettes offrant différents niveaux de fiabilité durant la transmission d'une image : une haute fiabilité de transmission pour les ondelettes à coefficients significatifs [62].

Les auteurs de [63] ont développé un schéma hiérarchique de transmission d'images efficace en énergie s'appuyant sur les informations de voisinage à 2 sauts. Cette architecture définit un modèle de consommation d'énergie conforme à la transmission d'images où un nœud normal intervient dans le traitement et le transfert des images émanant du capteur image adjacent au chef de cluster. Le recours à des nœuds relais pour la compression et la transmission des images provenant des sources, au lieu des cluster-heads comme dans une structure traditionnelle de clustering, lui confère une prolongation de la durée de vie du réseau par évitement des problèmes de trou d'énergie (*hole energy*). Etant donné une architecture de clustering à 2 sauts, la sélection du nœud relais dépend fortement de la distance entre le cluster-head et le Sink pour favoriser une consommation d'énergie équilibrée du cluster. Dans la même lancée, Zuo et al. ont proposé une approche de clustering également basée sur le voisinage à 2 sauts pour une transmission efficace en énergie dans les WMSNs [64].

A la différence de la structure précédente caractérisée par la présence d'un unique nœud relais (le nœud normal) entre un capteur image et son cluster-head dans l'optique de réduire la consommation d'énergie, cette approche en introduit beaucoup plus. En fait plusieurs nœuds normaux appelés "redirecteurs" interviennent pour la compression et l'acheminement d'une image vers le chef de cluster associé. Un équilibrage de la consommation énergétique dans tout le réseau est assuré par l'ajustement adaptatif du rayon de transmission du capteur image dans chaque cluster et la répartition des tâches en fonction de l'énergie résiduelle des nœuds normaux. Toutefois, la prolongation de la durée de vie du réseau est significative uniquement dans le cas d'une forte densité de nœuds.

2.4.3 Réalisations au sein du LIUPPA

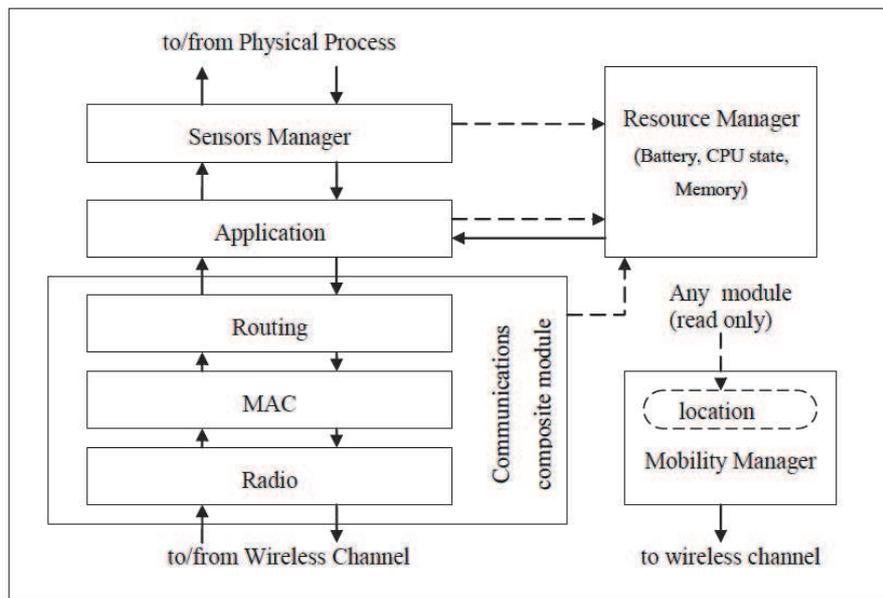


FIGURE 2.8 – Architecture générale d'un nœud dans Castalia [2]

Les validations des travaux du LIUPPA s'appuient principalement sur Castalia [2]. Castalia est un framework de simulation à événements discrets généralement conçu pour les réseaux contraints en ressources, et spécialement pour les WSNs et les BANs (*Body Area Networks*). Basé sur la plateforme OMNeT++ [65], Castalia

se fonde également sur une approche orientée composant avec l'intégration de fonctionnalités dédiées aux réseaux de capteurs. Ce simulateur définit une structure de nœud (composant principal) correspondant à un ensemble de modules hiérarchisés et interconnectés (cf. Figure 2.8) et fournit une description complète des scénarios basée sur le langage NED. Richesse, réutilisation, extensibilité, scalabilité, facilité à paramétrer, telles sont quelques caractéristiques contribuant à la popularité de Castalia. Toutefois, l'inconvénient majeur de ce simulateur demeure la pénurie d'algorithmes de routage.

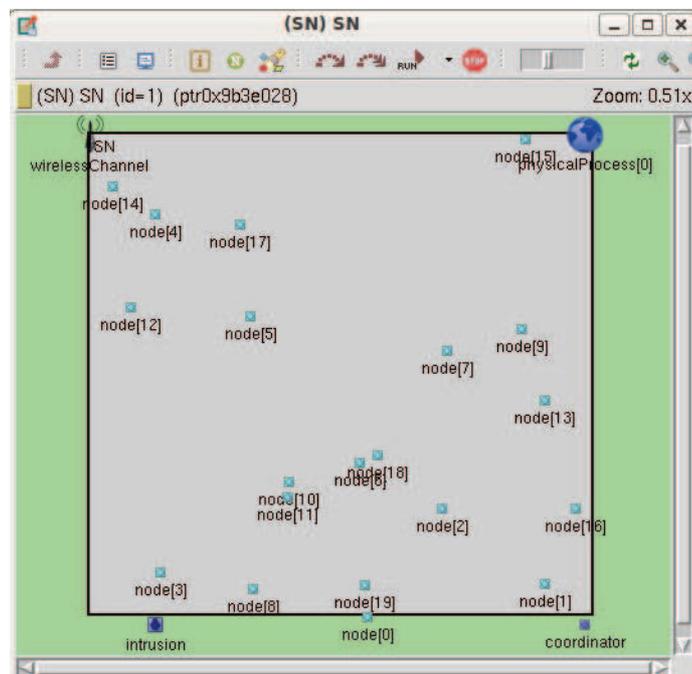


FIGURE 2.9 – Topologie de 20 nœuds sur l'interface graphique de OMNeT++

Un modèle de simulation de capteurs vidéo, intitulé *Video Model* et dédié aux applications critiques de surveillance vidéo telles que la détection d'intrusions, a été développé au sein du LIUPPA. Pour de telles applications, ce modèle implémente une transmission d'images réelles avec une prise en compte de toutes les couches de la pile protocolaire. Le modèle dispose de deux supports graphiques : l'interface graphique héritée de OMNeT++ et un support graphique spécifique. Les Figures

2.9 et 2.10 illustrent la compatibilité entre l'interface graphique de OMNeT++ et le support graphique spécifique à notre modèle via un déploiement, sur une zone $75m \times 75m$, de 20 nœuds avec les propriétés suivantes : une profondeur de vue fixée à $25m$ avec un angle de vue $2\alpha = 36^\circ$.

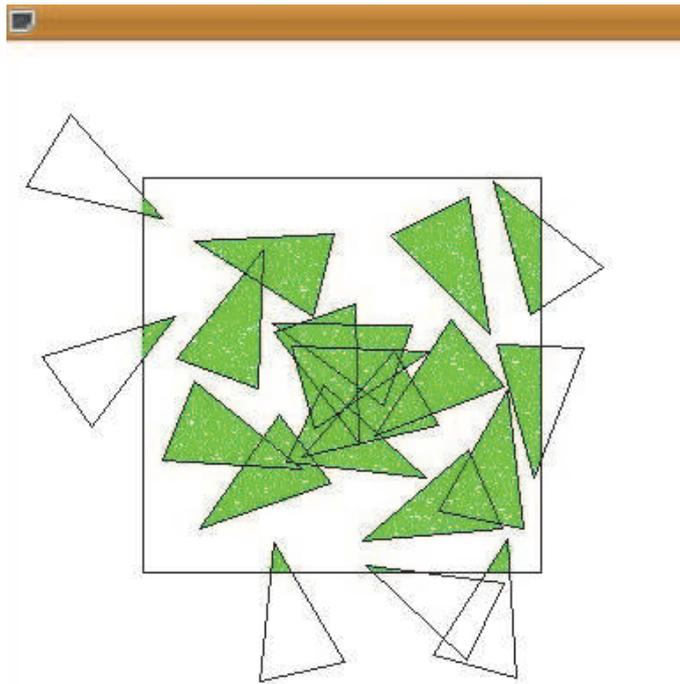


FIGURE 2.10 – Topologie de 20 nœuds sur le support graphique spécifique à notre modèle

Après une intégration de la technique de compression présentée à la section 2.4.1 au sein de *Video Model*, nous avons effectué des simulations afin d'étudier l'impact du taux de perte sur la qualité de l'image reçue au Sink. Pour ce faire, une image de 320×320 pixels avec 256 niveaux de gris pour une taille de 17199 octets a été définie. Afin de se placer dans des conditions réelles par rapport aux contraintes matérielles des capteurs, une image est envoyée en 302 paquets, les uns à la suite des autres, à partir d'un nœud source afin d'être reconstruite au niveau du Sink en fonction de sa proportion de paquets perdus. Les paramètres liés à la consommation d'énergie ont été mesurés sur des capteurs Cyclops où la méthode d'encodage des

images a été implémentée [54].

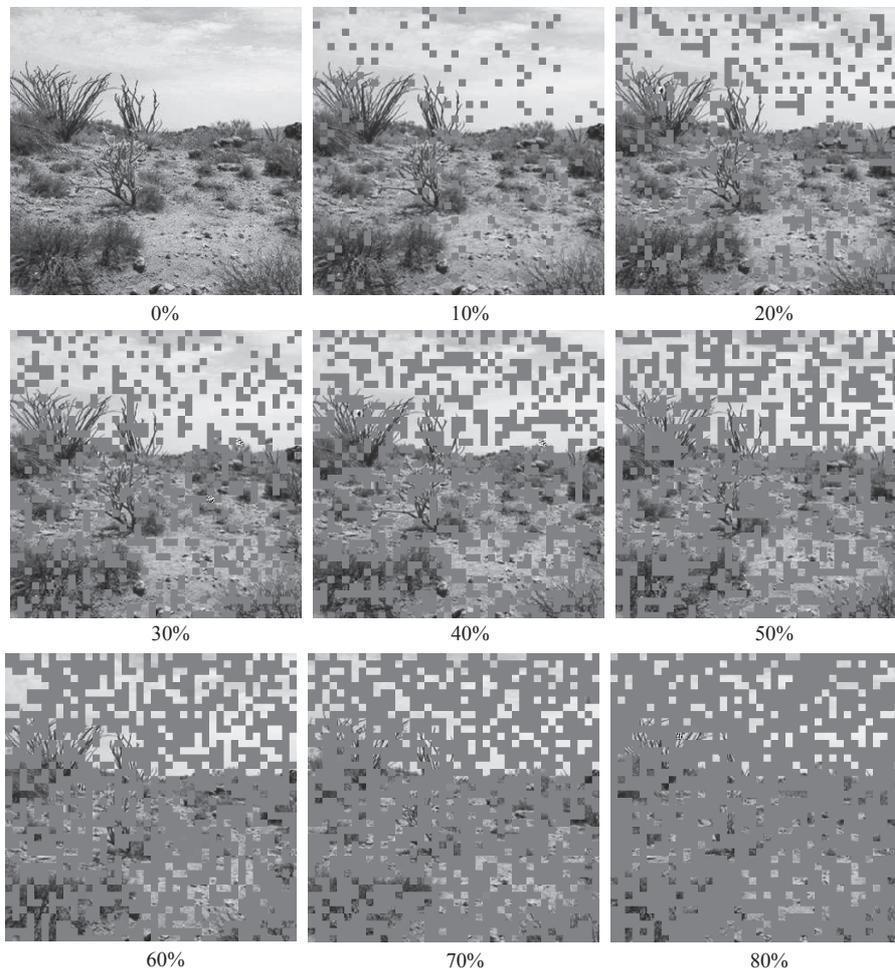


FIGURE 2.11 – Qualité visuelle d'une image selon sa proportion de pertes

La Figure 2.11 résume les simulations effectuées en illustrant l'image reconstruite au niveau du puits selon sa proportion de pertes de paquets. Nous observons qu'à partir de 60% de ratio de pertes l'image devient inexploitable. Bien que la qualité d'une image soit fortement dépendante de l'application considérée, nous nous fixons un seuil d'exploitabilité pour la suite de nos travaux. Devient alors inexploitable toute image dont le ratio de pertes dépasse 60%. Autrement, elle est caractérisée comme exploitable (*usable*) pour un processus d'identification par exemple.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a introduit la notion d'aspects multimédia à travers des capteurs nouvelle génération : les capteurs multimédia. Après une présentation des contraintes inhérentes aux réseaux de capteurs multimédia, le routage dans ce type de technologie, et notamment le routage géographique, a été passé en revue. D'aucuns visent une fourniture suffisante en bande passante, d'autres la fiabilité, et d'autres encore une combinaison de métriques de QoS. Pour les besoins de nos travaux, un algorithme robuste de compression d'images a été évoqué. En outre, différentes familles d'approches collaboratives de compression et de transmission ont été décrites pour le transport d'un flux multimédia spécifique : des images. La plupart de ces approches sont hiérarchiques : approches orientées corrélation, approches sans corrélation. Cependant, les approches orientées corrélation peuvent s'avérer coûteux en traitement. De plus, les approches hiérarchiques peuvent souffrir de problèmes liés à l'élection des cluster-heads et, de manière générale à la maintenance des clusters. Quelques travaux réalisés au sein du LIUPPA ont clos ce chapitre. Il s'agit d'un modèle de simulation d'applications de surveillance vidéo telle la détection d'intrusion. Réalisée sur ce modèle, une simulation des pertes sur la transmission d'une image pour en mesurer la qualité visuelle a été présentée.

Indicateurs d'état et de voisinage

Sommaire

3.1	Contexte et enjeux	36
3.2	Stratégie de sélection	40
3.2.1	Méthodologie	40
3.2.2	Critères d'état et de voisinage	42
3.3	Processus d'activation de cover-sets	48
3.4	Mécanisme de routage	49
3.5	Résultats de simulation	49
3.5.1	Spécification des tests	50
3.5.2	Résultats	52
3.6	Conclusion	58

Ce chapitre présente le contexte applicatif (évoqué à la section 1.1) conduisant à la transmission d'une grande quantité d'images émanant de plusieurs sources lors de la détection d'un événement. Afin de résoudre ce phénomène facteur de congestion réseau, donc de dégradation des performances réseau, une section est consacrée à la définition d'une stratégie de sélection des sources pertinentes pour une meilleure qualité de réception des images capturées émises au Sink. Cette technique de sélection des cover-sets, guidée par une approche multicritère, se fonde essentiellement sur des indicateurs d'état et de voisinage. Le transfert, au puits de données, des captures effectuées par les différentes sources sélectionnées est assuré par une extension multi-chemin du protocole de routage géographique GPSR. Une évaluation des propositions susmentionnées dont les critères de performance associés se résument au taux de pertes des images reçues au Sink, à leur qualité visuelle ainsi qu'à leurs délais de transmission, clôt ce chapitre.

3.1 Contexte et enjeux



FIGURE 3.1 – Un capteur image

Nous considérons un réseau de capteurs image sans fil consistant en un déploiement massif par voie aérienne de capteurs image pour des applications critiques de surveillance. La Figure 3.1 est l'illustration d'un capteur image dans une roquette afin de s'assurer que la caméra embarquée ne soit à la renverse après largage. L'hypothèse selon laquelle les nœuds image capturent constamment à la vitesse maximale lors de leur activation, se révèle irréaliste, même dans un contexte d'applications critiques. C'est ainsi que, dans les travaux précédents de l'équipe [9, 10, 11, 12, 13], un modèle d'ordonnancement adaptatif de l'activité des capteurs image en fonction du niveau de criticité de l'application de surveillance a été définie. Chaque capteur définit l'ensemble de ses voisins immédiats qui constituent un de ses ensembles couvrants (*cover-sets*), c'est-à-dire que ces nœuds permettent de couvrir une grande partie de sa zone de vue. Dans la Figure 3.2, le champ de vue (Field of View ou FoV) du nœud V est représenté par le triangle (abc). En considérant uniquement les nœuds V , V_1 ,

V_2 et V_3 , l'ensemble possible des cover-sets de V est $Co(V) = \{\{V\}, \{V_1, V_2, V_3\}\}$. La cardinalité de $Co(V)$ pourrait être plus grande en considérant des nœuds voisins supplémentaires, V_4, V_5 and V_6 par exemple (cf. Figure 3.2). L'autonomie d'un capteur image étant directement liée à sa vitesse de capture, l'idée principale est qu'un nœud en possession d'un nombre conséquent de cover-sets puisse accroître sa vitesse de capture car son champ de vue pouvant être surveillé par un de ses cover-sets après épuisement de son énergie. De ce mécanisme découlent des nœuds spéciaux appelés *sentinelles* (*sentry nodes*) – disposant d'une vitesse de capture plus élevée et souvent plus actifs que les autres – visant à augmenter la probabilité de capturer un événement, stimulant ainsi la réactivité du réseau qui est très cruciale dans des applications de surveillance.

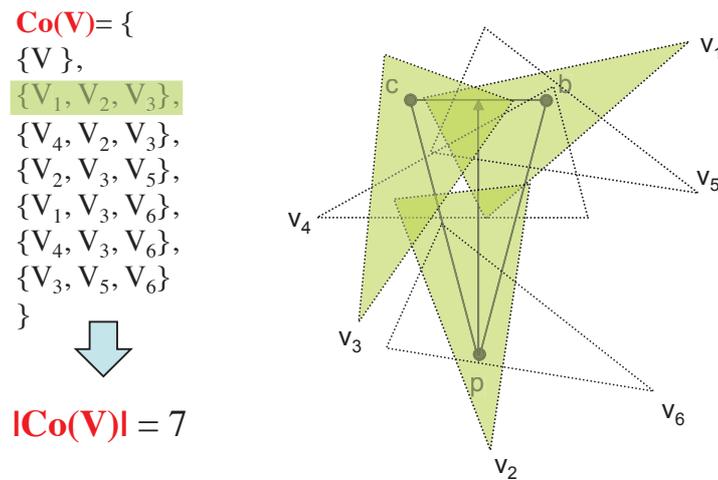


FIGURE 3.2 – Modèle de couverture

Dans [13], les auteurs ont proposé plusieurs méthodes de construction des cover-sets et étudié leur performance en termes de taux de couverture de la zone originale. Nos travaux ici supposent l'utilisation de telles méthodes qui fournissent pour chaque capteur son ensemble de cover-sets.

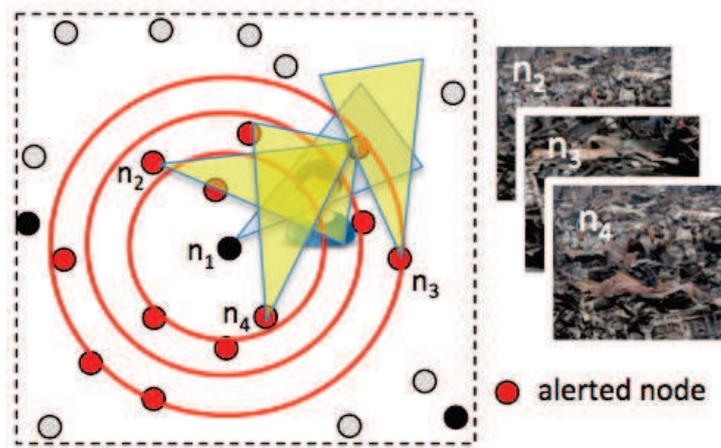


FIGURE 3.3 – Propagation d’alertes

Ainsi, à la détection d’un événement telle une intrusion par un capteur image v , ce dernier doit procéder à (1) la transmission éventuelle d’une ou de plusieurs images au Sink dépendant de sa vitesse capture, (2) l’activation d’un de ses cover-sets, (3) la propagation d’une alerte sur son voisinage. Cette propagation d’alertes pourrait s’effectuer sur un voisinage à k sauts, $k \geq 1$. La Figure 3.3 fait une esquisse d’un processus d’alertes initié par n_1 dans lequel ses nœuds voisins sont en état d’alerte (nœuds rouges) suite à la détection d’un intrus. Cet état d’alerte des capteurs revient à augmenter leur vitesse de capture. De plus, les nœuds alertés – n_2 , n_3 et n_4 par exemple sur la figure – deviennent de potentielles sources., donc disposer à transmettre leurs captures éventuelles de l’intrus. En outre, sur activation d’un cover-set, les nœuds le composant effectuent également le transfert de leurs propres captures de la scène vers le Sink afin de résoudre les ambiguïtés.

Le scénario d’une application type, illustré par la Figure 3.4, consiste en un système de détection d’intrusion sur un WISN. En l’absence d’intrusions, la plupart des nœuds du réseau restent en mode veille : le niveau de risque doit décroître ($R^0 \simeq 0$), et par conséquent les vitesses de capture restent faibles. Cependant, les nœuds sentinelles maintiennent un taux de capture élevé pour une meilleure réactivité du réseau (partie gauche de la figure). Suite à la détection d’une intrusion,

tous les nœuds actifs accroissent leur niveau de risque R^0 au maximum en passant en mode alerte (partie droite de la figure). Ce mode consiste en des alertes initiées par les nœuds actifs, sur leur voisinage, de la traversée potentiellement imminente de l'intrus sur leur zone. Ainsi, un suivi de la cible s'effectue avec une transmission éventuelle d'images au Sink au fur et à mesure qu'elle se déplace. Après une période d'alerte, les nœuds reviennent progressivement à un état de veille s'ils ne détectent pas d'intrusions supplémentaires afin de sauvegarder leur énergie. Cependant, comme le décrit la partie basse de la figure, les nœuds tout au long du chemin de l'intrus continuent de détecter sa présence et se maintiennent ainsi en mode alerte.

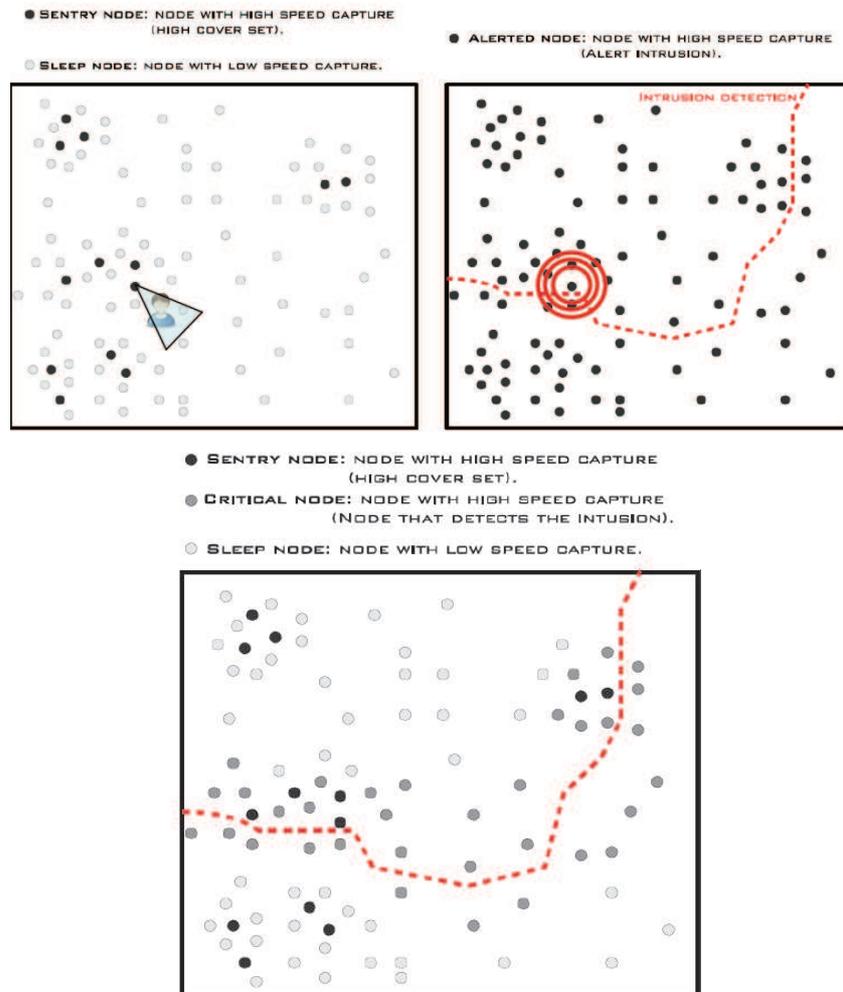


FIGURE 3.4 – Un WISN pour la détection d'intrusion

En résumé, la détection d'un événement provoque la transmission simultanée d'un large spectre d'informations visuelles, parfois redondantes, émanant de multiples sources vers le puits de données. Ce phénomène peut conduire à des congestions réseau occasionnant ainsi une consommation énergétique plus importante, des pertes considérables de paquets dégradant la qualité des images reconstruites au niveau du Sink. En effet, à la différence des capteurs scalaires où 2 à 3 *octets* suffisent pour représenter les données, l'ordre de grandeur du codage d'une image, intrinsèque à sa taille et à sa résolution, peut avoisiner les milliers d'octets. De plus, la plupart des technologies radio actuellement disponibles pour les WSNs restent confrontées à de fortes limitations en taille de paquets (un MTU de 100 ou 150 octets) et en débit (typiquement 250kbps pour le standard 802.15.4 dans la bande de fréquence 2.4GHz). Ainsi une image de 16Ko génèrerait plus de 200 paquets pour une charge utile maximale de 80 octets. Il devient alors nécessaire de définir le bon schéma de routage par rapport aux cover-sets qui seront sélectionnés par exemple. En effet, plusieurs capteurs peuvent détecter le même événement et envoyer des données qui vont saturer le réseau de transmission. **Une première contribution consiste à l'étude des caractéristiques des cover-sets en termes d'autonomie et de qualité de service.** Il s'agit ainsi de définir des stratégies de sélection des cover-sets à activer, socle du schéma de routage à adopter pour un transfert optimisé des captures effectuées. La suite de ce chapitre présente une stratégie de sélection guidée par une approche multicritère sur des indicateurs d'état et de voisinage.

3.2 Stratégie de sélection

3.2.1 Méthodologie

L'analyse multicritère désigne un ensemble de méthodes permettant d'agrèger plusieurs critères dans l'objectif de privilégier une ou plusieurs décisions. La diversité de ces méthodes réside dans la manière d'intégrer les jugements relatifs à chaque critère afin d'aboutir à la décision la plus pertinente. Une classification selon trois grandes approches est alors proposée dans la littérature : agrégations complète, par-

tielle et locale [66]. De par sa simplicité et son efficacité, la moyenne pondérée, l'une des techniques les plus connues d'agrégation complète, est le fil conducteur de notre système d'attribution de score aux cover-sets.

Définition 4.1 : Soient $Co(v) = \{Co_1(v), \dots, Co_i(v), \dots, Co_n(v)\}$ l'ensemble des n cover-sets du nœud image v et $M = \{M_1, \dots, M_j, \dots, M_k\}$ un ensemble de k métriques. Nous définissons le score d'un cover-set $Co_i(v)$, noté $Score(Co_i(v))$, comme :

$$Score(Co_i(v)) = \frac{\sum_{j=1}^k P_{i,j}}{k}, 1 \leq i \leq n \quad (3.1)$$

où $P_{i,j}$ est la pondération de la métrique M_j dans le cover-set $Co_i(v)$.

Un aspect majeur, inhérent aux réseaux de capteurs sans fil, demeure la contrainte énergétique. La rareté de cette ressource a un impact direct sur les schémas de sélection et de routage à adopter. En effet, dans la plupart des applications considérées, les capteurs sont densément disséminés par voie aérienne dans des zones hostiles ou difficiles d'accès. Par conséquent, aucune intervention humaine n'est envisageable, et l'unique source d'énergie dont dispose les nœuds – leur batterie – se trouve ainsi irremplaçable. Consistant en un ensemble de capteurs, un cover-set peut alors se voir attribuer un niveau d'énergie, déterminant ainsi sa durée de vie.

Définition 4.2 : Nous définissons la durée de vie du cover-set $Co_i(v)$ d'un nœud image v , notée $E(Co_i(v))$, comme :

$$E(Co_i(v)) = \min_{u \in Co_i(v)} E(u) \quad (3.2)$$

où $E(u)$ est l'énergie résiduelle du nœud u . Notre algorithme de sélection du meilleur cover-set repose ainsi sur la définition suivante.

Définition 4.3 : $Co_t(v) \in Co(v)$ est défini comme le meilleur cover-set du nœud

image v *ssi* :

$$Score(Co_t(v)) = \max_{Co_i(v) \in Co(v), i \neq t} Score(Co_i(v)) \quad et \quad (3.3)$$

$$E(Co_t(v)) \geq E_{threshold}$$

où $E_{threshold}$ est l'énergie seuil requise à un cover-set pour les processus d'activation et de transmission. Cependant, étant donné leur multiplicité, la pertinence et la cohérence des critères associées à la méthode de classification doivent refléter les objectifs de l'application.

3.2.2 Critères d'état et de voisinage

Notre approche multicritère adhère au principe des architectures *cross-layer* (inter-couches) où l'échange d'informations entre couches adjacentes ou non adjacentes pour optimiser les performances de transmission est autorisée. Ces mécanismes, très prisés dans les réseaux de capteurs [26, 67, 68], méritent une précaution particulière quant au choix des données à partager. Toute information, complexe ou difficile à obtenir dans un réseau comportant une quantité considérable de nœuds, est à éviter. Par exemple, la charge du réseau et/ou des liens est une donnée assez difficile à estimer, particulièrement sur un réseau sans fil où la taille des files de réception n'est pas simplement corrélée à la charge du réseau étant donné les phénomènes d'interférence ou de contention sur le support radio [69]. Des paramètres accessibles comme le nombre de voisins à 1 et à 2 sauts sont pris en considération dans notre proposition et reliés à la distance euclidienne par rapport à la destination (le nœud Sink). Cette distance reste également facile à obtenir dans un contexte de capteurs équipés de GPS ou habilités à jauger leur position grâce à des nœuds ancrés dotés de capacité de géolocalisation [70]. Ainsi, notre contribution repose sur six critères répartis en deux classes :

- l'*autonomie* ou la durée de vie formulée par la cardinalité et la dépendance des cover-sets ;
- la *criticité* exprimée au moyen de la fiabilité et des délais de communication.

3.2.2.1 Autonomie

Par définition, un cover-set pour un nœud v donné est un sous-ensemble de ses voisins immédiats couvrant une majeure partie, voire la totalité, de la surface de son champ de vue. Ainsi, une caractéristique manifeste pour tout cover-set peut être sa cardinalité, c'est-à-dire le nombre de nœuds le constituant. D'où le choix porté à la cardinalité comme métrique initiale, notée M_1 . Un cover-set contenant moins d'éléments a moins d'impact sur la durée de vie globale du réseau. Par conséquent, en termes de cardinalité, moins un cover-set est pourvu de nœuds plus sa préférence s'accroît. Ce qui nous conduit à la règle suivante :

Soient $Co_i(v) \in Co(v)$ et $Co_j(v) \in Co(v)$, $i \neq j$:

$$|Co_i(v)| < |Co_j(v)| \Rightarrow P_{i.1} > P_{j.1} \quad (3.4)$$

Le modèle de construction des cover-sets ne garantit en aucun cas leur indépendance. En d'autres termes, les cover-sets générés pour un capteur image donné ne sont pas nécessairement disjoints. Donc un nœud peut devenir une composante de plus d'un cover-set. Notre étude se limite à la dépendance des cover-sets d'un même nœud (dépendance intra-cover-set). Toutefois, nous précisons que cette interdépendance peut également affecter des cover-sets de nœuds différents (dépendance inter-cover-set). Ainsi, une métrique intéressante à ce niveau est le degré de d'influence, notée M_2 , c'est-à-dire le nombre de nœuds partagés avec les autres cover-sets du même nœud. Plus un cover-set partage ses éléments, plus il influe sur la durée de vie des autres cover-sets impliqués, et en conséquence sur la longévité du réseau. D'où la règle suivante :

Soient $Co_i(v) \in Co(v)$ et $Co_j(v) \in Co(v)$, $i \neq j$:

$$I_{degre}(Co_i(v)) < I_{degre}(Co_j(v)) \Rightarrow P_{i.2} > P_{j.2} \quad (3.5)$$

L'objectif d'une analyse multicritère est d'éclairer un processus décisionnel au moyen d'un score unique par l'association d'un ensemble de critères souvent hétéroclites en termes de qualité (qualitatif contre quantitatif) ou d'unités de mesure.

Pour assurer la concordance avec notre score, les métriques considérées doivent être maximisées. Une étape de normalisation, consistant à la transposition des valeurs de la cardinalité et du degré d'influence (respectivement $P_{i,1}$, $P_{i,2}$), devient alors nécessaire. Les formules de normalisation, permettant respectivement la maximisation des deux premières métriques et la transformation de toutes les grandeurs impliquées sur une même échelle de comparaison, sont décrites ci-dessous :

$$\forall j \in [1, 2], P_{i,j} = \max_i(P_{i,j}) - P_{i,j} \quad (3.6)$$

$$\forall j \in [1, 6], P'_{i,j} = \frac{P_{i,j} - \min_i(P_{i,j})}{\max_i(P_{i,j}) - \min_i(P_{i,j})} \quad (3.7)$$

où $\min_i(P_{i,j})$ et $\max_i(P_{i,j})$ représentent respectivement les valeurs minimale et maximale du critère M_j dans les cover-sets. Alors que la première normalisation – (3.6) – présente la maximisation des métriques relatives à l'autonomie, la (3.7) fournit la transposition de l'ensemble des critères de notre approche sur une échelle comparable de 0 à 1.

3.2.2.2 Criticité

Dans la méthode d'ordonnancement adaptatif de l'activité des capteurs, chaque nœud recueille des informations sur son voisinage immédiat lors de la phase d'initialisation du réseau. Les informations collectées sont entre autres l'identifiant, la position GPS, la direction de la caméra, l'angle de vue et la profondeur de champ de la caméra, le niveau de criticité initial, l'énergie résiduelle, etc. Cette phase d'initialisation correspond plus ou moins à la découverte de voisinage rencontrée dans la plupart des protocoles. Cette étape nécessite un échange de messages à un coût relativement faible. Disposant ainsi des informations sur son voisinage direct, il devient alors facile à chaque nœud d'acquérir les connaissances sur son voisinage à 2 sauts par échange de tables de voisinage. La détermination des critères de sélection des cover-sets associés à la classe criticité s'appuient sur ce mécanisme. Pour ce faire, chaque nœud se doit d'identifier les membres de ses cover-sets et ainsi récupérer les

informations associées à leur table de voisinage. Du fait de la forte criticité des applications considérées, des exigences cruciales en termes de qualité de service, telles que la fiabilité des informations visuelles véhiculées ainsi que leur rapidité d'acquisition, demeurent notre baromètre d'appréciation des cover-sets pour une transmission efficace et efficace.

A. Fiabilité

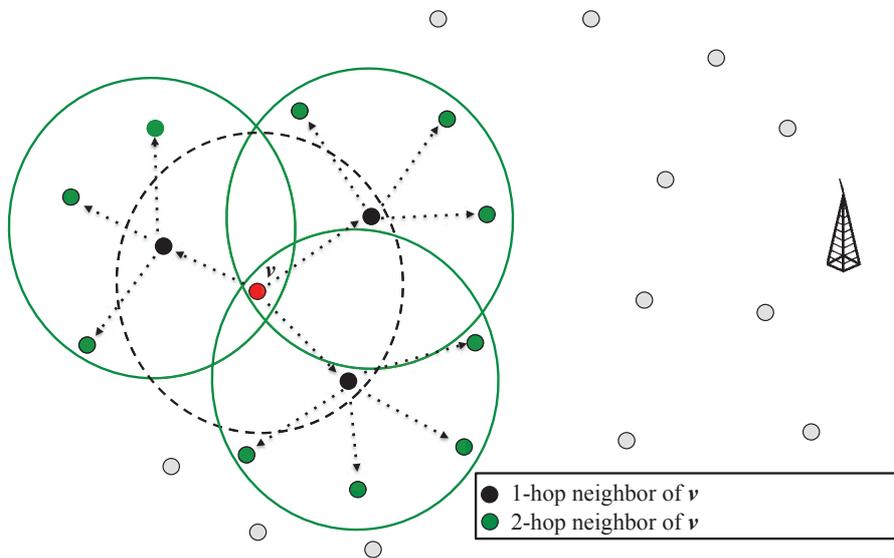


FIGURE 3.5 – Illustration des voisinages à 1 et à 2 sauts

La détection d'un événement par un nœud déclenche la transmission simultanée, dans le réseau, d'un large volume de données visuelles provenant de plusieurs sources. Ce phénomène peut conduire à des congestions réseau occasionnant ainsi une consommation énergétique plus importante, des pertes considérables de paquets dégradant la qualité des images reconstruites au niveau du Sink. **Une originalité de notre approche réside dans le fait de lier la vitesse de capture des nœuds au nombre de routes nécessaires pour un transfert efficace des images capturées.** En effet, les vitesses de capture peuvent être différentes d'un capteur à un autre, et particulièrement d'un niveau de criticité à un autre. Etant

donné la dynamicité de l'ordonnancement des capteurs image dans ce type d'application, la détermination de la pertinence d'un cover-set dépend fortement de son taux de capture. Par conséquent, plus un nœud dispose de captures à transmettre, plus un nombre important de chemins vers la destination est souhaitable. Dans notre contexte, un voisin disponible pour un membre d'un cover-set est tout voisin hormis le nœud propriétaire du cover-set et les autres éléments du cover-set considéré. La Figure 3.5 donne une illustration des voisins à 1 et 2 sauts d'un nœud v . Nous définissons ainsi deux critères estimant, de manière probabiliste, le degré de satisfaction d'un cover-set à un routage multi-chemin : le voisinage disponible à 1 et à 2 sauts (notés respectivement M_3 et M_4). Ces métriques obéissent aux pondérations suivantes :

Soient $Co_i(v) \in Co(v)$ et $v_t \in Co_i(v)$:

$$P_{i.3} = \sum_{t=1}^{|Co_i(v)|} \frac{Nb1HA vNeighbors(v_t)}{NbOptimalPaths(v_t)} \quad (3.8)$$

$$P_{i.4} = \sum_{t=1}^{|Co_i(v)|} \frac{Nb2HA vNeighbors(v_t)}{Nb1HA vNeighbors(v_t)} \quad (3.9)$$

où $Nb1HA vNeighbors(v_t)$ et $Nb2HA vNeighbors(v_t)$ représentent respectivement le nombre de voisins disponibles à 1 et à 2 sauts du nœud v_t , et $NbOptimalPaths(v_t)$ le nombre de chemins optimaux de v_t , lequel est proportionnel à sa vitesse de capture.

Les pondérations évoquées (3.8, 3.9) évaluent la probabilité d'un cover-set à disposer respectivement autant de chemins à 1 et à 2 sauts requis par son taux de capture. Dans (3.9), le ratio $\frac{Nb2HA vNeighbors(v_t)}{Nb1HA vNeighbors(v_t)}$ exprime la probabilité que les voisins immédiats de v_t possèdent autant de voisins que nécessaire afin d'établir des chemins disjoints vers le Sink. En admettant par exemple que $Nb1HA vNeighbors(v_t) = 4$, si $Nb2HA vNeighbors(v_t) = 4$ alors le ratio vaut 1, et il existe potentiellement un chemin à 2 sauts vers le Sink pour chacun des voisins immédiats. La considération du cover-set devient plus intéressante si ce rapport est supérieur à 1 ; ce qui vou-

drait dire qu'il existe potentiellement plus d'un chemin à 2 sauts vers le puits de données par voisin. **Cependant, il n'y a pas de garanties strictes puisque qu'un unique voisin immédiat peut très bien disposer de l'intégralité des voisins à 2 sauts de v_t .** Nous restons alors confronter à la difficulté d'obtenir et de prendre en compte des informations très précises. D'où le privilège accordé à une approche probabiliste lequel procure l'avantage d'être très simple et de ne nécessiter qu'un faible coût en termes d'échange de messages. La méthode intègre également le principe de concept *à la demande* : comme tous les nœuds connaissent leurs voisins à 2 sauts, chacun envoie une requête à ses cover-sets afin de récupérer cette liste de voisins.

B. Latence

La rapidité d'acquisition des données pour l'exécution des actions requises est capitale dans les applications critiques de surveillance. Il devient alors nécessaire de minimiser les délais de transmission en préconisant l'usage du plus court chemin avec un délai de bout-en-bout minimum [38]. Ainsi, nous estimons le degré de satisfaction à un routage géographique multi-chemin optimal des cover-sets en établissant deux autres critères : le voisinage disponible à 1 et à 2 sauts les plus proches du Sink (respectivement M_5 et M_6). Le système de pondération est similaire aux précédents (3.8, 3.9).

Soient $Co_i(v) \in Co(v)$ et $v_t \in Co_i(v)$:

$$P_{i.5} = \sum_{t=1}^{|Co_i(v)|} \frac{NbC1HAvNeighbors(v_t)}{NbOptimalPaths(v_t)} \quad (3.10)$$

$$P_{i.6} = \sum_{t=1}^{|Co_i(v)|} \frac{NbC2HAvNeighbors(v_t)}{NbC1HAvNeighbors(v_t)} \quad (3.11)$$

où $NbC1HAvNeighbors(v_t)$ et $NbC2HAvNeighbors(v_t)$ représentent respectivement le nombre de voisins disponibles à 1 et à 2 sauts du nœud v_t les plus proches de la destination.

3.3 Processus d'activation de cover-sets

Après la sélection du meilleur cover-set pour un nœud v , il s'en suit son activation pour l'exécution des tâches de captures et de transmission. Cette phase consiste, pour le nœud v propriétaire du cover-set, à alerter les membres du cover-set pour l'exécution des tâches ci-dessus. Dans le message d'activation, des informations supplémentaires comme les nœuds à éviter peuvent y être intégrées en faveur du protocole de routage qui va assurer la remontée des données visuelles vers les puits. Il faut rappeler que les phases de construction des cover-sets, d'ordonnement et de sélection s'effectuent au niveau applicatif. Ces informations de sélection sont entre autres les éléments du cover-set à activer et le propriétaire qui sont déjà des sources. L'utilisation des nœuds relais communs aux éléments du cover-set peuvent aussi être régulée en indiquant aux membres avec plus de nœuds relais non partagés d'utiliser ces derniers, et de céder le reste aux membres les moins pourvus. Le nœud propriétaire du cover-set agit ainsi tel un superviseur. Toutefois les protocoles de routage à utiliser sont le plus souvent indépendants, donc peuvent fonctionner sans la prise en compte de ces informations. Leur prise en compte peut néanmoins optimiser le processus d'établissement des chemins multiples, et ainsi améliorer ainsi les performances de communication.

La section suivante évoque le mécanisme de routage adopté pour le transfert, par les sources sélectionnées, des captures effectuées vers le Sink.

3.4 Mécanisme de routage

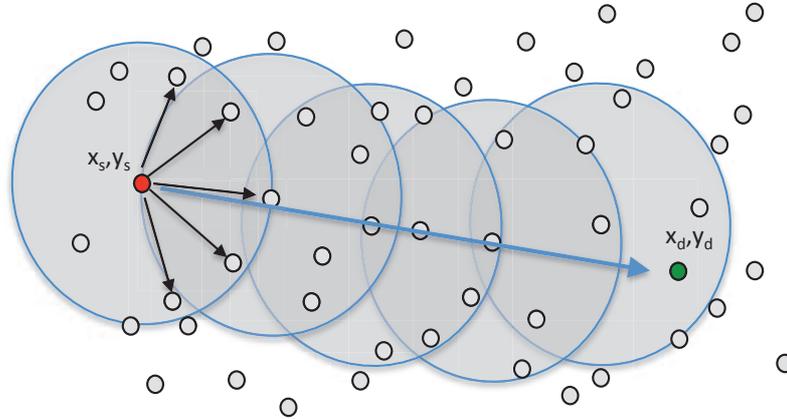


FIGURE 3.6 – GPSR : processus d'établissement de chemins multiples

GPSR s'avère inapproprié aux WMSNs comme protocole de routage. En effet, l'usage d'un unique chemin – souvent le plus court – pour une paire (source, destination) entraîne le drainage énergétique des nœuds le long de cette route [39] conduisant à l'altération de la connectivité ainsi qu'à la réduction de la durée de vie du réseau. Ce phénomène est d'autant plus critique dans le contexte où la détection d'un événement provoque la transmission simultanée d'un nombre important d'images amplifiant les risques de congestion et de contention dans le réseau. Notre amélioration de GPSR consiste à exploiter le concept de multi-chemin afin de répondre aux exigences de la transmission de flux multimédia. Cette fonctionnalité multi-chemin lui confère une plus grande fiabilité et un équilibrage de la charge. Le principe réside dans l'exécution répétée de GPSR, satisfaisant la relation *vitesse de capture & nombre de chemins nécessaires*, pour la découverte de plusieurs routes disjointes par rapport à une paire (source, destination) (cf. Figure 3.6).

3.5 Résultats de simulation

L'évaluation des performances de notre proposition est réalisée sur le framework de simulation à événements discrets Castalia. Basé sur la plateforme OMNeT++,

Castalia est conçu pour les réseaux de capteurs. Nous présentons dans cette section les spécificités des tests et discutons les résultats. Le taux de pertes, la qualité des images reçues au Sink, les délais de transmission, tels sont les critères de performance associés à nos simulations.

3.5.1 Spécification des tests

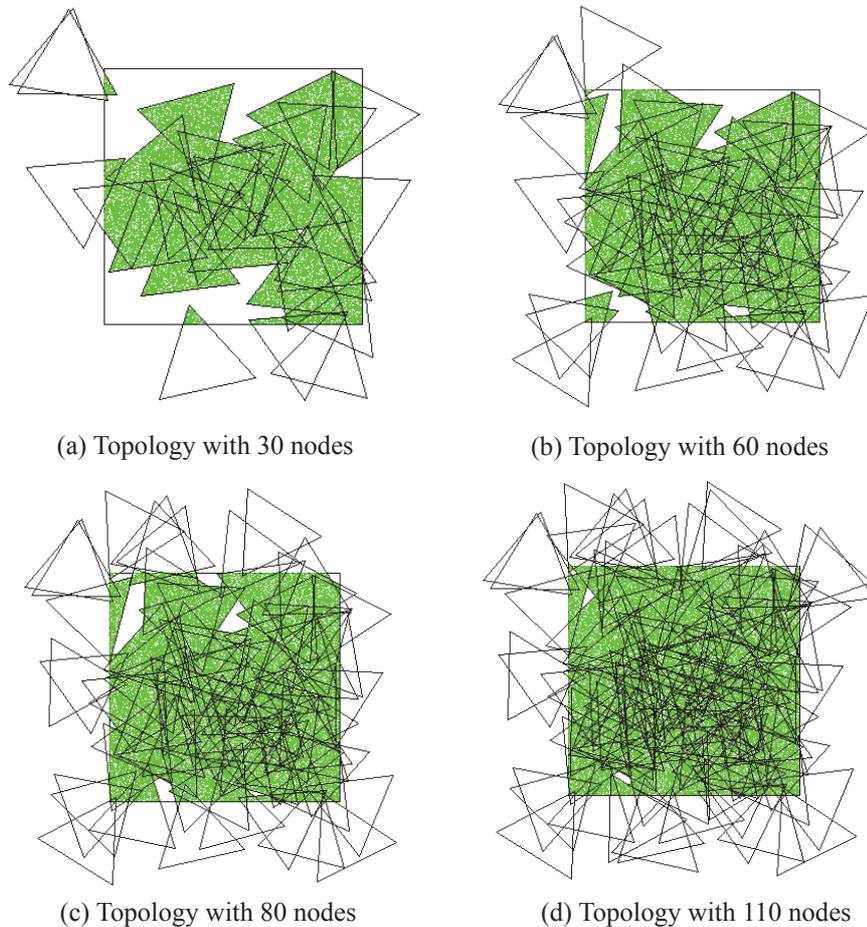


FIGURE 3.7 – Variété de topologies réseau

Nous avons considéré un WISN homogène où des capteurs image sont déployés aléatoirement sur une zone géographique de $75m \times 75m$. Les nœuds possèdent les mêmes propriétés : un rayon de communication de $30m$, une profondeur de vue fixée à $25m$ avec un angle de vue $2\alpha = \pi/3$. Une grande densité du réseau favorisant la

génération d'un grand nombre de cover-sets par nœud, différentes topologies ont été définies par variation successive de la taille du réseau. Ce qui facilite la comparaison entre différentes stratégies de sélection de cover-sets. La Figure 3.7 met en évidence les topologies réseau considérées avec la position des nœuds et leur champ de vision. La couche MAC applique la méthode d'accès au média CSMA/CA avec un débit radio de 250kbps .

Dans la suite, le modèle d'ordonnement de l'activité des capteurs est exécuté sur chacune des topologies, et le mécanisme de sélection sur les cover-sets générés par topologie. Par une variation successive du taux de capture des cover-sets (de 1 à 3img/s), l'analyse des performances de notre proposition repose ainsi sur l'impact de l'utilisation des informations de sélection par le protocole de routage adopté. Pour chacune des topologies concernées, nous édifions deux scénarios pour la transmission des images via les cover-sets sélectionnés :

- *No_Info* : ce scénario adopte le protocole de routage géographique GPSR pour le transfert des captures émanant des sources sélectionnées vers le puits de données. Cependant, aucune information supplémentaire provenant des autres couches n'est prise en compte au niveau routage.
- *With_Info* : le transfert des images est assuré par la version modifiée de GPSR utilisant un support de transmission multi-chemin (cf. section 3.4). A l'inverse du précédent scénario, ce scénario prend en compte des informations de sélection pour établir plus efficacement les chemins vers le puits.

Comme évoqué dans la section 3.1 la détection d'un événement, par un nœud sentinelle par exemple, provoque l'afflux d'images provenant de multiples sources vers le Sink. Notre modèle de simulation implémente une transmission d'images réelles avec une prise en compte de toutes les couches. Nous tirons profit du format d'image – présenté à la section 2.4.1 – adapté aux WSNs combinant une robustesse face aux pertes, une faible consommation pour la compression et une petite taille de fichier. Ainsi la définition d'une image est de 320×320 pixels avec 256 niveaux de

gris pour une taille de 17199 octets. Afin de se placer dans des conditions réelles par rapport aux contraintes matérielles des capteurs, la version compressée de l'image générée par la méthode d'encodage (cf. section 2.4.1) est envoyée en 302 paquets. Les paramètres liés à la consommation d'énergie ont été mesurés sur des capteurs Cyclop où la méthode d'encodage des images a été implémentée [54].

3.5.2 Résultats

3.5.2.1 Impact sur le taux de pertes

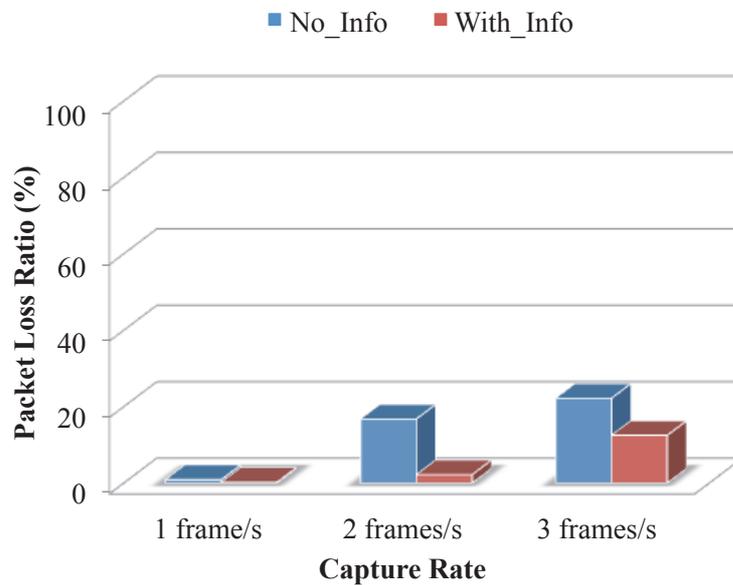


FIGURE 3.8 – Taux de pertes moyen pour une topologie de 30 nœuds

Les Figures 3.8, 3.9, 3.10 et 3.11 illustrent l'atténuation du taux de pertes de paquets, en fonction de la topologie considérée, lors de la prise en compte des informations de sélection (scénario *With_Info*), particulièrement lorsque le trafic devient intense (hausse de la vitesse de capture). Ce fait s'explique par la distribution des flux et l'utilisation d'informations de sélection favorisant ainsi une nette réduction des congestions réseau. Par conséquent, plus des informations issues d'autres couches sont prises en compte, plus la réduction des pertes devient conséquente.

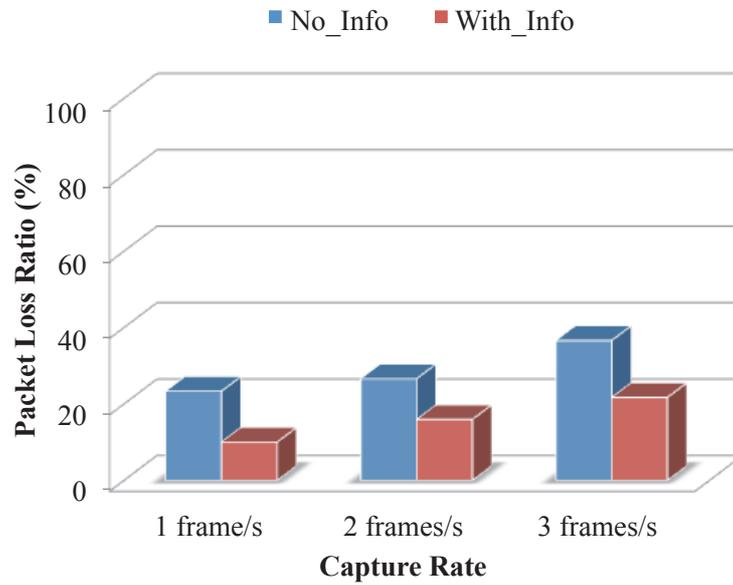


FIGURE 3.9 – Taux de pertes moyen pour une topologie de 60 nœuds

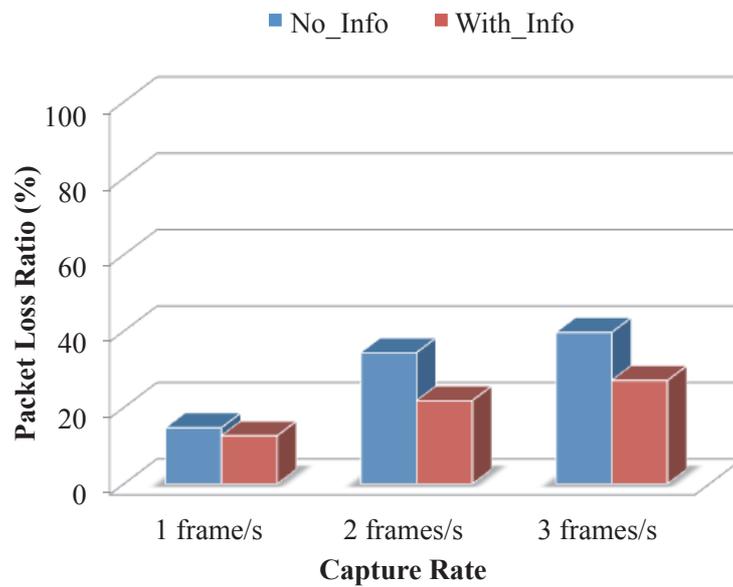


FIGURE 3.10 – Taux de pertes moyen pour une topologie de 80 nœuds

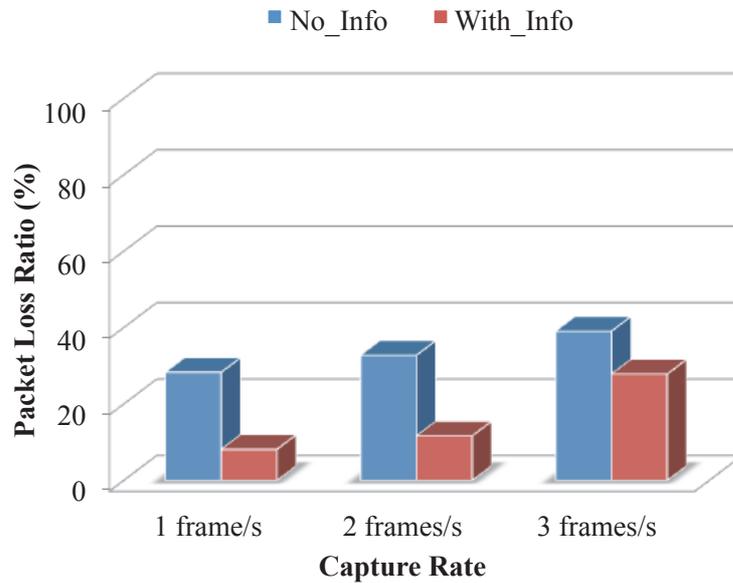


FIGURE 3.11 – Taux de pertes moyen pour une topologie de 110 nœuds

Cependant, même si les pertes de paquets deviennent moins fréquentes du fait de l'usage d'informations supplémentaires, le phénomène demeure. Ces pertes peuvent être dues à la participation simultanée de quelques nœuds dans plusieurs des cover-sets activés. Ce qui provoque une quantité d'images plus importante à transmettre de la part de ces nœuds. Si un nœud v , avec une vitesse de capture $y \text{ img/s}$, apparaît par exemple dans x des cover-sets activés, alors v enverra $x * y \text{ img/s}$. Une issue prometteuse à ce niveau serait l'exploration de la dépendance inter-cover-set.

3.5.2.2 Impact sur la qualité des images reçues

Dans un contexte d'applications critiques, pouvoir détecter les événements survenus est important, cependant recevoir des images de qualité au niveau du puits de données est cruciale. La réception d'une quantité conséquente d'images au Sink n'implique pas nécessairement leur exploitabilité. Le taux de pertes de paquets d'une image reçue influe considérablement sur sa qualité. Ainsi au niveau du Sink, une image est soit complète (aucune perte subie), soit altérée.

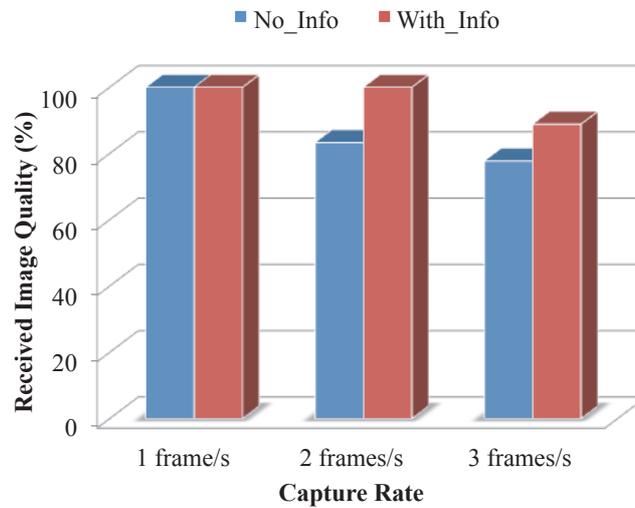


FIGURE 3.12 – Moyenne des images exploitables pour une topologie de 30 nœuds

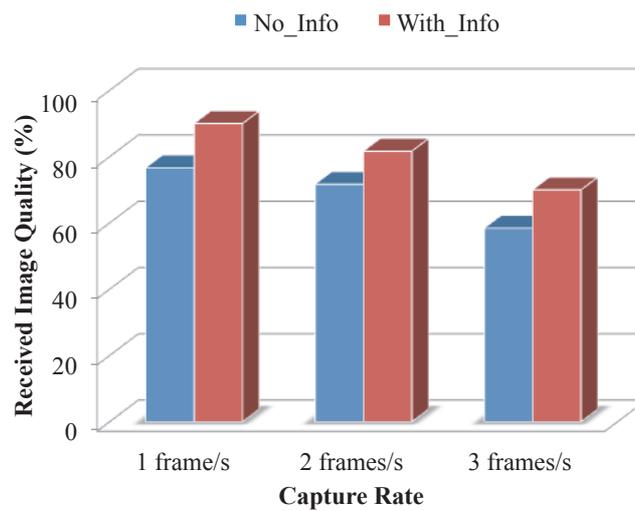


FIGURE 3.13 – Moyenne des images exploitables pour une topologie de 60 nœuds

Nous nous référons au seuil d'exploitabilité (moins de 60%) d'une image selon sa proportion de pertes, défini à la section 2.4.3. En fonction des topologies considérées, les Figures 3.12, 3.13, 3.14, et 3.15 illustrent une amélioration plus nette de la qualité des images reçues au Sink (au moins 60% d'images exploitables) lors de la prise en compte des informations de sélection des cover-sets.

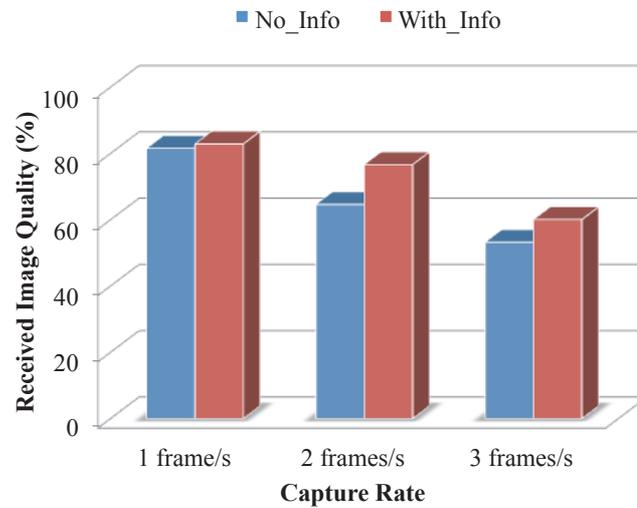


FIGURE 3.14 – Moyenne des images exploitables pour une topologie de 80 nœuds

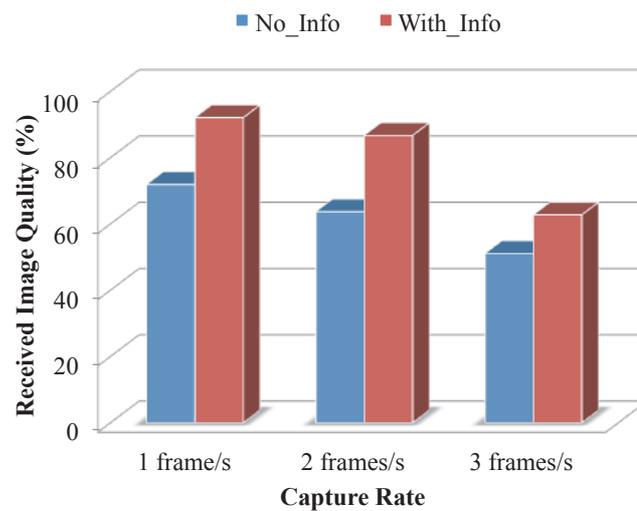


FIGURE 3.15 – Moyenne des images exploitables pour une topologie de 110 nœuds

3.5.2.3 Impact sur les délais de transmission

Dans un contexte d'applications critiques, recevoir des images de qualité au Sink dans les délais impartis demeure capitale. La proportion des pertes subies impacte directement sur les délais de réception des images. Le décodeur utilisé dispose d'une capacité de visualisation d'une image quelque soit le nombre de paquets reçus et leur

ordre de réception. Néanmoins, l’affichage de l’image est déclenché par un temporisateur activé dès la réception du premier paquet d’une image. Cette visualisation devient immédiate à la réception du dernier paquet image. En fonction du schéma de pertes, la latence de transmission peut égaler le temporisateur d’affichage lequel est fixé 10s. Lorsque le taux de pertes est faible, le temps de transmission reste généralement faible et dépend du nombre de sauts. Dans nos simulations, le temps minimal de réception d’une image complète au Sink, dans le meilleur cas, est de 1.14s. Toutefois, cette latence peut rester très faible dans le cas particulier où la majorité des paquets sont perdus mais que le dernier soit correctement reçu. Si le Sink possède une grande puissance de calcul, il peut décoder et afficher en temps réel l’image et prendre en compte les paquets au fur et à mesure qu’ils arrivent. Le délais moyen de transmission s’allonge de l’ordre de 1s lorsque les informations de sélection ne sont pas prises en compte au niveau routage (cf. Figure 3.16). Pour une meilleure perception de cette illustration la comparaison doit s’effectuer par paire : *No_Info* et *With_Info* avec une vitesse de capture de 1 *img/s* (noté *No_Info_1f/s* et *With_Info_1f/s* respectivement), et ainsi de suite.

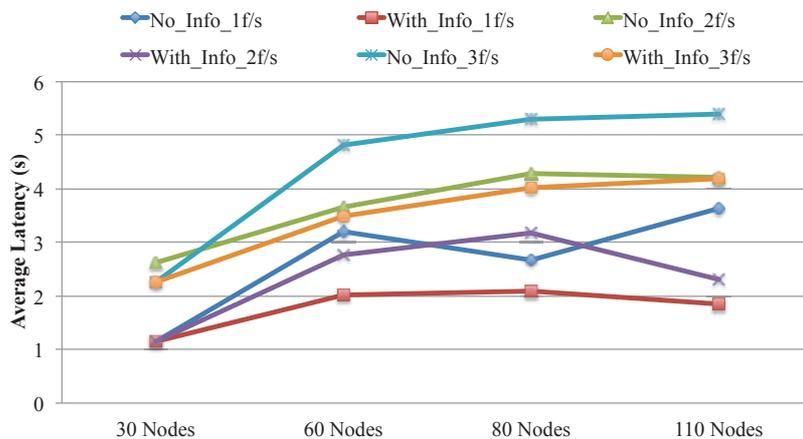


FIGURE 3.16 – Délai moyen de transmission d’images

3.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté un mécanisme de sélection des cover-sets pertinents à activer pour une transmission fiable d'une grande quantité d'images en situation critique. Cette stratégie de sélection, guidée par une approche multicritère, se fonde essentiellement sur des métriques d'état et de voisinage réparties en deux classes, cruciales dans les applications critiques : l'autonomie et la criticité. Ces critères, inhérents aux cover-sets, sont entre autres la cardinalité, la durée de vie ainsi que des informations de voisinage, affectant la qualité des images dans un contexte de communication multi-saut. Cette phase de sélection, étape cruciale dans le processus d'optimisation de la transmission des images, permet également de renforcer le schéma de routage à adopter dans l'établissement de chemins disjoints pour un transfert fiable des captures effectuées. Toutefois, il reste tout à fait concevable de modifier dynamiquement les poids assignés aux métriques en fonction du niveau de criticité de l'application envisagée.

En outre, un mécanisme de routage, consistant à doter GPSR d'une fonctionnalité d'équilibrage de la charge favorisant la transmission de flux multimédia, a été la seconde contribution présentée dans ce chapitre. Le point focal de ces propositions réside dans la liaison d'un ensemble de paramètres intrinsèques à la vitesse de capture et à la dynamique de la topologie réseau. Des simulations ont été effectuées sur le simulateur à événements discrets Castalia à travers une variété de topologies et de vitesse de captures pour un système de détection d'intrusions. Les résultats de ces simulations révèlent que notre approche contrôlée de sélection des cover-sets combinée au mécanisme de routage adapté à la transmission de flux multimédia accroît la fiabilité des données dans un contexte de trafic intensif, et ainsi la qualité visuelle des images reconstruites au Sink. Cette amélioration devient encore plus nette lors de la prise en compte, par le protocole de routage, des informations de sélection dans l'établissement des chemins menant au puits de données.

Malgré les résultats satisfaisants des simulations effectuées – faible ratio de pertes, faible latence de transmission, et bonne qualité visuelle des images reconstruites au Sink – les contributions évoquées ne sont pas exemptes d'imperfections, particulièrement dans le cas d'une vaste zone de surveillance. Une meilleure gestion des nœuds partagés (ceux communs à plusieurs cover-sets) dans le processus d'activation par l'exploration de la dépendance inter-cover-set serait une issue prometteuse dans la réduction *(i)* des congestions induites par l'hypersollicitation de ces nœuds comme sources, *(ii)* des interférences inter-chemins rencontrées dans l'établissement de routes multiples. En outre, afin de tirer profit de l'exploitation des informations de chemins à 2 sauts, le prochain chapitre présente une seconde stratégie optimisée de sélection et un mécanisme de routage pour l'appréciation de la pertinence des cover-sets à activer dans l'optique d'une transmission efficace et efficiente des captures effectuées. Contrairement à la première approche de sélection mettant en exergue un compromis entre l'autonomie et la criticité, cette seconde stratégie accorde une priorité à la criticité par rapport à la préservation de l'énergie, même si cette préservation est faite de manière indirecte.

Indicateurs d'information de chemins à 2 sauts

Sommaire

4.1	Exploration des informations de chemins à 2 sauts	63
4.1.1	Le voisinage à 2 sauts	63
4.1.2	Sélection basée sur les informations de chemins à 2 sauts	66
4.1.3	Processus d'activation de cover-sets	68
4.2	Protocole de routage T-GPSR	68
4.2.1	Fonctionnement	68
4.2.2	Comparaison avec GPSR	70
4.3	Résultats de Simulation	71
4.3.1	Impact sur le taux de pertes	73
4.3.2	Impact sur la qualité des images reçues	74
4.3.3	Impact sur les délais de transmission	76
4.4	Conclusion	77

Ce chapitre souligne en premier lieu les avantages offerts par l'exploitation des informations de chemins à 2 sauts, notamment dans le cadre d'un schéma de routage géographique. Toujours dans le contexte applicatif induisant un trafic intense d'informations visuelles, deux sections sont ainsi consacrées à deux autres contributions bénéficiant des avantages de l'exploitation des informations de chemins à 2 sauts. La première proposition est une stratégie de sélection des cover-sets à activer. A la différence de la première approche de sélection basée sur la taille du voisinage, cette stratégie est guidée par la connaissance des informations de chemins à 2 sauts et privilégie la criticité des applications. Un protocole de routage intitulé T-GPSR, une extension de GPSR dont le processus de sélection du prochain saut repose essentiellement sur les chemins à 2 sauts, constitue la seconde contribution de ce chapitre. Ce schéma de routage assure la remontée des captures émanant des sources spécifiées

par l'approche de sélection vers le Sink. Une évaluation des propositions présentées termine ce chapitre.

4.1 Exploration des informations de chemins à 2 sauts

4.1.1 Le voisinage à 2 sauts

La littérature propose un grand nombre d'algorithmes de communication exploitant les informations du voisinage à 2 sauts pour divers objectifs. D'aucuns s'appuient sur ces informations afin d'optimiser la diffusion des paquets de contrôle par la détermination d'ensembles dominants pour réduire, voire éradiquer, les transmissions redondantes source de collisions [71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79]. Le protocole de routage proactif OLSR (Optimized Link State Routing) pour les MANETs en est une parfaite illustration. OLSR définit le concept de relais multipoints (MPR) consistant à établir une couverture minimale à 2 sauts avec les voisins à 1 saut. Cet ensemble des voisins, MPR, pour un nœud donné correspond à l'ensemble minimal des voisins à 1 saut permettant d'atteindre tous ceux à 2 sauts. OLSR offre ainsi des routes optimales en termes de nombre de sauts, construites sur la base des MPR [80]. D'autres algorithmes se fondent plutôt sur la connaissance du voisinage à 2 sauts pour des besoins de localisation. Tel est le cas de l'algorithme distribué ADNL (Accurate Distributed Node Localization) pour la localisation collaborative multisauts dans les WSNs [31].

De récentes études se sont penchées sur les performances asymptotiques des schémas de routage géographique basés sur les informations du voisinage à k niveaux, où $k = 1, 2, 3, \dots$ [81]. Ces investigations révèlent une nette amélioration de la fiabilité des transmissions entre une paire (source, destination) lors de la prise en compte d'informations supplémentaires ainsi qu'une réduction significative du nombre de sauts requis. Cette amélioration généralement substantielle de $k = 1$ à $k = 2$, devient de plus en plus petite de k à $k + 1$ sauts pour $k \geq 2$. Les auteurs de [31] ont corroboré ce fait par la suffisance d'une connaissance du voisinage à 2 sauts afin d'aboutir à des résultats satisfaisants en termes de précision. En outre, le maintien d'une valeur basse de k conduit à réduire le nombre de messages échangés et la complexité, avec l'avantage du gain d'énergie. C'est ainsi que quelques protocoles

de routage à temps réel [82, 83, 84] pour les réseaux de capteurs ont émergé, guidés par l'usage des informations à 2 sauts. Afin d'atteindre la qualité de service désirée, certains combinent cette connaissance au mapping des délais de transmission de paquets à une certaine vitesse. D'autres approches s'appuient sur ces informations pour l'établissement d'un maximum de plus courts chemins dans les systèmes à réveil cyclique [85].

Utilisant les informations à 2 sauts, notre stratégie de sélection étudie la pertinence des cover sets à activer dans l'optique d'une transmission efficace et efficiente des captures effectuées. A l'image des architectures cross-layer, ce mécanisme fait usage, au niveau applicatif, des connaissances acquises afin de déterminer les sources les plus appropriées pour un transfert d'une large quantité de paquets image. **Une originalité de notre approche réside dans le fait de lier la criticité (les taux de capture) au nombre de chemins à 2 sauts nécessaires pour une transmission efficace des images.** Cette méthode définit ainsi des critères permettant d'apprécier la probabilité des transmissions multi-chemin à 2 sauts requises pour une vitesse de capture donnée. Par conséquent, cette stratégie s'avère judicieuse pour des applications critiques de surveillance par une considération primaire et explicite de la criticité.

Dans un contexte de capteurs équipés de GPS ou habilités à estimer leur position grâce à des nœuds ancrés dotés de capacité de géolocalisation [70], chaque nœud a connaissance de ses coordonnées géographiques ainsi que celles du Sink. A l'instar de la découverte de voisinage rencontrée dans la plupart des protocoles sur les WSNs ou des algorithmes distribués, notre phase d'initialisation consiste en la collecte d'informations sur le voisinage immédiat des capteurs image. Spécifiquement à notre sphère d'applications de surveillance, ces informations recueillies sont entre autres l'identifiant, la position GPS, la direction de la caméra, l'angle de vue et la profondeur de champ de la caméra, le niveau de criticité initial, l'énergie résiduelle,

etc. Cette liste n'est pas exhaustive, et d'autres paramètres peuvent être sollicités au besoin. Il devient alors facile, et à un coût relativement faible, de l'étendre aux voisins à 2 sauts puisque chaque nœud peut diffuser sa table de voisinage à la fin de l'étape d'initialisation.

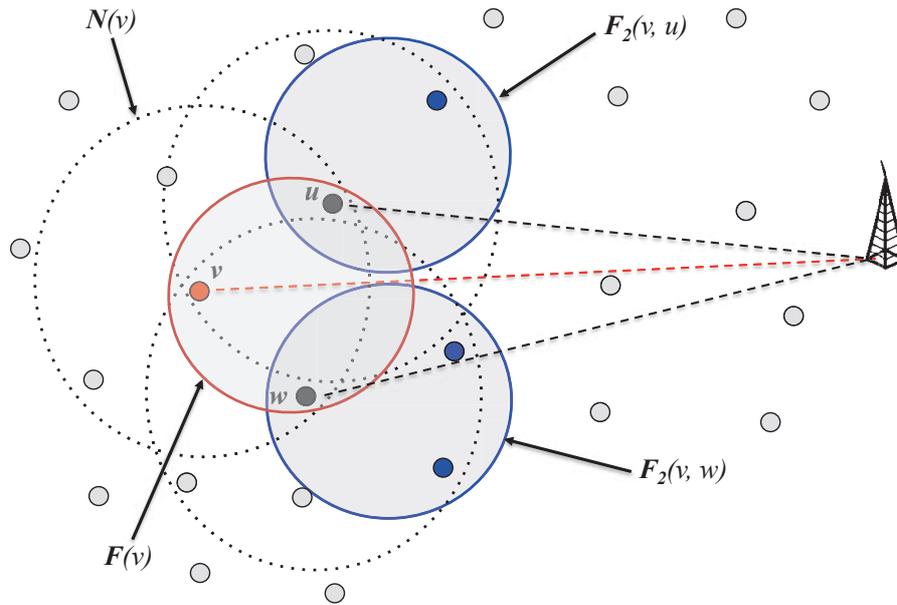


FIGURE 4.1 – Illustration de l'ensemble des potentiels voisins à 1 et 2 sauts

Afin de mieux appréhender le voisinage à sauts, quelques définitions s'imposent. Soit $\mathbf{N}(v)$, illustré dans la Figure 4.1, l'ensemble des voisins directs de nœud image v . $\mathbf{F}(v)$ désigne l'ensemble des potentiels relais à 1 saut de v , i.e. les voisins immédiats les plus proches du Sink :

$$\mathbf{F}(v) = \left\{ u \mid d(u, Sink) < d(v, Sink), u \in N(v) \right\} \quad (4.1)$$

où $d(u, Sink)$ représente la distance euclidienne par rapport à la destination. $\mathbf{F}_2(v)$ correspond à l'ensemble des potentiels relais à 2 sauts de v . Par exemple, le sous-ensemble des potentiels voisins à 2 sauts de v passant par le nœud u (voir Figure

4.1) est défini comme suit :

$$\mathbf{F}_2(v, u) = \left\{ k \mid d(k, Sink) < d(u, Sink), u \in F(v), k \in N(u) \right\} \quad (4.2)$$

4.1.2 Sélection basée sur les informations de chemins à 2 sauts

Notre principe des schémas multi-chemin rejoint [39] par la subdivision d'un unique paquet en plusieurs pour un transfert parallèle via divers chemins disjoints, de préférence, menant au Sink. Une innovation majeure dans notre contribution est de lier la vitesse de capture au nombre de chemins à 2 sauts nécessaires : plus un nœud dispose de captures à transmettre, plus un grands nombre de chemins vers la destination est désirable. Cela est d'autant plus vrai la dynamicité de l'ordonnement de l'activité des capteurs image induit celle de leur vitesse de capture. En outre, dans la mesure où les applications concernées sont très sensibles aux délais de transmission, prôner conjointement le multi-chemin avec l'usage des routes à délai de bout-en-bout minimum (les plus courts chemins) devient crucial. A travers l'usage des informations du voisinage à sauts – guidé par le taux de capture des nœuds impliqués – notre algorithme de sélection spécifie un tout premier critère : R_{2-hop} . Cette métrique mesure la probabilité d'un cover set à établir autant de chemins disjoints à 2 sauts requis par la vitesse de capture. R_{2-hop} pour un cover set $Co_i(v)$ d'un capteur image v obéit ainsi à la pondération suivante :

$$R_{2-hop}(Co_i(v)) = \frac{1}{|Co_i(v)|} \sum_{w=1}^{|Co_i(v)|} \frac{|F_2(w)|}{NbOptimalPaths(w)}, w \in Co_i(v) \quad (4.3)$$

où $|F_2(w)|$ désigne le nombre des potentiels voisins à 2 sauts de w ; et $NbOptimalPaths(w)$ le nombre de chemins optimaux de w , lequel reste proportionnel à son taux de capture ; w étant un nœud d'un cover-set de v .

La métrique R_{2-hop} , à elle seule, ne garantit pas nécessairement une optimisation des performances dans le processus de détermination de chemins multiples disjoints. Détenir une valeur élevée de R_{2-hop} pour un cover set, i.e. disposer suffisamment de chemins disjoints à deux sauts, est très rentable. Néanmoins, il s'avère difficile, voire impossible, de définir des routes disjointes afin de réduire les interférences inter-chemins lorsque les potentiels voisins à 2 sauts possèdent peu de nœuds intermédiaires (les potentiels voisins immédiats) et que la plupart d'entre eux se trouvent communs dans le cover set. Ainsi un cover set avec un nombre important de potentiels voisins à 1 saut non partagés par voisin à 2 sauts devient plus approprié dans un contexte multi-chemin pour la répartition des flux. Par conséquent, un second critère R_{relay} , défini par la formule suivante, ponctue cette analyse :

$$R_{relay}(C_{O_i}(v)) = \frac{1}{|C_{O_i}(v)|} \sum_{w=1}^{|C_{O_i}(v)|} \frac{|F(w)|}{|F_2(w)|}, w \in C_{O_i}(v) \quad (4.4)$$

où $|F(w)|$ et $|F_2(w)|$ représentent respectivement le nombre des potentiels voisins à 1 et à 2 sauts de w . Le ratio $\frac{|F(w)|}{|F_2(w)|}$ exprime la probabilité qu'un potentiel voisin à 2 sauts dispose de plusieurs nœuds intermédiaires (relais) non partagés. Supposons par exemple que l'élément $w \in C_{O_i}(v)$ possède 3 potentiels voisins à 2 sauts, i.e. $|F_2(w)| = 3$. Un nombre de nœuds intermédiaires non partagés égal à 3 conduirait à un ratio d'une valeur de 1. Il en existe donc potentiellement un pour chacun des voisins à 2 sauts. La pertinence d'un cover set s'accroît ainsi au fur et à mesure de la croissance de ce ratio. Là encore, nous restons alors confrontés à la difficulté d'obtenir et de prendre en compte des informations très précises. D'où le privilège accordé à une approche probabiliste lequel procure l'avantage d'être très simple et de ne nécessiter qu'un faible coût en termes d'échange de messages.

Chaque cover set se voit ainsi attribué une valeur spécifiant sa qualité de transmission (Transmission Quality ou TQ) laquelle permet leur classification. Cette qualité de transmission spécifie la pertinence d'un cover set à effectuer un transfert efficace d'images vers le Sink. Notre système d'attribution de score aux cover sets,

TQ , est fonction des deux critères définis lesquels sont associés à des coefficients indiquant leur degré d'importance :

$$TQ(Co_i(v)) = \alpha \times R_{2-hop}(Co_i(v)) + \beta \times R_{relay}(Co_i(v)) \quad (4.5)$$

où $\alpha + \beta = 1$. La pertinence d'un cover set dépend alors fortement de sa qualité de transmission TQ . Plus la valeur TQ d'un cover set est élevée, meilleures en seront les conditions de transmission des paquets image : pertes moindres, faible latence, etc. Toutefois, la valeur TQ d'un cover set n'est pas définitive. En effet dépendant fortement du voisinage, et particulièrement à 2 sauts, cette valeur doit également être actualisée lors des mises à jour périodiques de voisinage par exemple.

4.1.3 Processus d'activation de cover-sets

Le processus d'activation des cover-sets est identique à celle présentée à la section 3.3.

La prochaine section présente un schéma de routage, basé aussi sur les informations de chemins à 2 sauts, pour une potentielle affiliation avec cette stratégie de sélection.

4.2 Protocole de routage T-GPSR

4.2.1 Fonctionnement

T-GPSR (*Two-Hop based Greedy Perimeter Stateless Routing*) est une extension de GPSR consistant à favoriser la transmission de flux multimédia, notamment d'images, dans les WSNs. A l'instar des architectures *cross-layer*, ce schéma de routage bénéficie des informations collectées au niveau applicatif durant les phases d'ordonnancement d'activité des nœuds (voisinage immédiat) et de classification des cover sets (voisinage à 2 sauts). Il reste néanmoins habilité, à l'image de la plupart des algorithmes de routage, à initier une découverte de voisinage indépendamment

des autres couches. T-GPSR incorpore un mode supplémentaire de transmission gloutonne de proximité par calcul de distance, reposant essentiellement sur le voisinage à 2 sauts : *2-Hop Greedy Forwarding*. Dans cette stratégie, la transmission d'un paquet de données, initiée par un nœud source v et destinée au Sink, s'effectue par le potentiel voisin à sauts le plus proche de la destination dans $F_2(v)$. Ainsi, le paquet émanant de v est transmis à ce potentiel voisin à 2 sauts comme principal récepteur, via un potentiel transmetteur à un saut dans $F(v)$ comme relais. A la réception du paquet par le nœud relais choisi dans $F(v)$, aucun processus de sélection de prochain saut n'est nécessaire : le relais doit juste transmettre le paquet au récepteur principal qui y est associé.

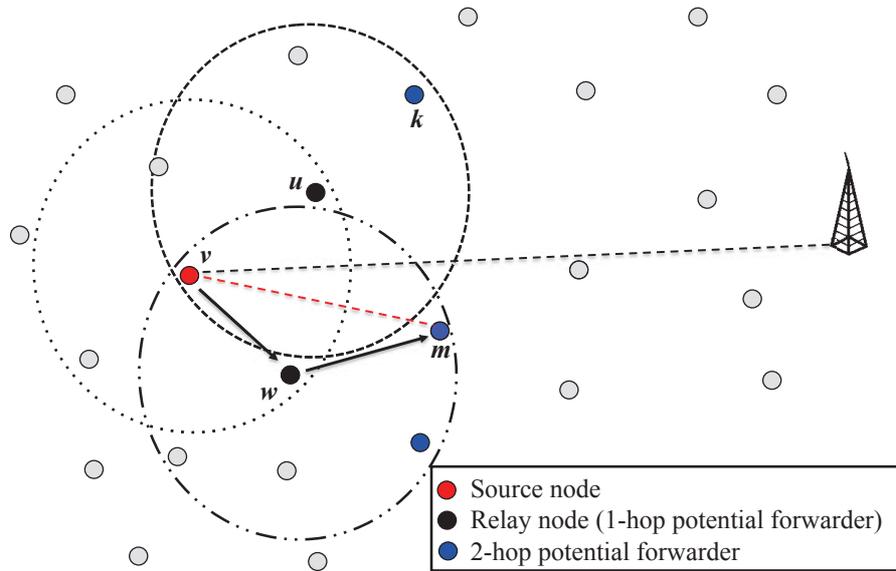


FIGURE 4.2 – 2-Hop Greedy Forwarding

La Figure 4.2 illustre l'avancée d'un paquet de v vers le récepteur principal sélectionné $m \in F_2(v)$, via le relais $w \in F(v)$ où $m \in F_2(v, w)$. En outre, un récepteur principal se comporte telle une source dès la réception d'un paquet de données associé. L'exécution de ce processus est ainsi reproduite jusqu'à l'arrivée de l'information au Sink. Par conséquent, les décisions de routage s'opèrent uniquement tous les 2 sauts contribuant ainsi à minimiser la latence dans le cas où un nombre

important de sauts est nécessaire pour atteindre le puits de données. 2-Hop Greedy Forwarding peut rencontrer quelques désagréments dans le contexte où la source v ne dispose d'aucun transmetteur potentiel à 2 sauts, c'est-à-dire $|F_2(v)| = 0$. A cet effet, T-GPSR adopte la progression gloutonne Greedy Forwarding de GPSR sur $F(v)$ et ajoute un champ additionnel au paquet indiquant au nœud qui sera sélectionné d'exécuter directement le mode périmètre dès la réception du paquet car il fera face à un vide. Ce qui permet à cet algorithme de routage d'anticiper les vides un saut à l'avance.

4.2.2 Comparaison avec GPSR

T-GPSR présente plusieurs avantages comparé à GPSR. Dans la mesure où les applications concernées sont très sensibles aux délais de transmission, prôner l'usage des chemins à délai de bout-en-bout minimum se révèle décisif. Alors que Greedy Forwarding choisira le nœud u comme prochain saut, ensuite k , 2-Hop Greedy Forwarding déterminera m comme récepteur principal, lequel reste le plus proche transmetteur potentiel à 2 sauts de la source v (cf. Figure 4.2). L'usage d'un unique chemin – souvent le plus court – pour une paire (source, destination) entraîne le drainage énergétique des nœuds le long de cette route [39] conduisant à l'altération de la connectivité ainsi qu'à la réduction de la durée de vie du réseau. Ce phénomène est d'autant plus critique dans le contexte où la détection d'un événement occasionne la transmission simultanée d'un nombre important d'images amplifiant les risques de congestion et contention dans le réseau. En ce sens, T-GPSR exploite les facultés du concept multi-chemin par l'intégration d'une fonctionnalité d'équilibrage de la charge conjuguée à l'usage des plus courts chemins. Une exécution répétée de T-GPSR, basée sur la relation *vitesse de capture & nombre de chemins nécessaires*, conduit à la découverte de plusieurs routes disjointes reposant sur les voisins à 2 sauts, dans $F_2(v)$ par exemple. Néanmoins, l'établissement des différents chemins d'un couple (source, destination) peut s'appuyer sur le voisinage immédiat, $F(v)$, dans le cas où la cardinalité de $F_2(v)$ s'avère nulle : $|F_2(v)| = 0$. La fonctionnalité

d'équilibrage de la charge de T-GPSR opère aussi sur le voisinage direct, c'est-à-dire au niveau des relais. Par exemple, à chaque sélection d'un nœud $x \in F_2(v)$ comme récepteur principal dans 2-Hop Greedy Forwarding, l'algorithme procède au choix d'un relais différent dans $F(v)$.

4.3 Résultats de Simulation

Nous procédons dans cette section à l'évaluation des performances de la technique de sélection basée sur les informations de chemins à 2 sauts (cf. section 4.1.2) combinée au schéma de routage T-GPSR pour une transmission d'images optimisée. A travers la plateforme de simulation à événements discrets Castalia, notre baromètre d'appréciation des performances demeure le taux de pertes, la qualité des images reconstruites au niveau Sink ainsi que leur délai de transmission. Nous avons considéré un WISN homogène où 400 capteurs image sont déployés aléatoirement sur une vaste zone géographique de $400m \times 400m$. Les nœuds possèdent les mêmes propriétés : un rayon de communication de $30m$, une profondeur de vue fixée à $25m$ avec un angle de vue $2\alpha = 60^\circ$. La position des nœuds ainsi que leur champ de vision dans la topologie réseau considérée sont mis en évidence par la Figure 4.3. Trois scénarios ont été ainsi définis sur cette topologie :

- *Scenario 1* : aucun algorithme de sélection n'étant requis, chaque nœud sentinelle sélectionne par exemple le premier cover-set actif de sa table de courants, lequel adoptera ensuite le protocole de routage GPSR pour la transmission des captures effectuées.
- *Scenario 2* : ce scénario adopte (i) au niveau applicatif, la stratégie de sélection basée sur les informations de routage à 2 sauts pour le choix des cover-sets à activer, et (ii) la version modifiée du schéma de routage GPSR utilisant un support de transmission multi-chemin (cf. section 3.4) pour la remontée des informations visuelles vers le Sink.
- *Scenario 3* : à l'instar du *Scenario 2* par l'application de la technique de sélection basée sur les informations de chemins à 2 sauts, ce scénario exécute

l'algorithme T-GPSR pour la couche routage.

La stratégie de sélection pouvant opérer comme un socle pour le schéma de routage à adopter, le niveau routage dans les scénarios *Scenario 2* et *Scenario 3* y puise des informations pour l'établissement efficace des chemins à emprunter. Tous les scénarios définissent CSMA/CA comme méthode d'accès au média avec un débit radio de 250kpbs .

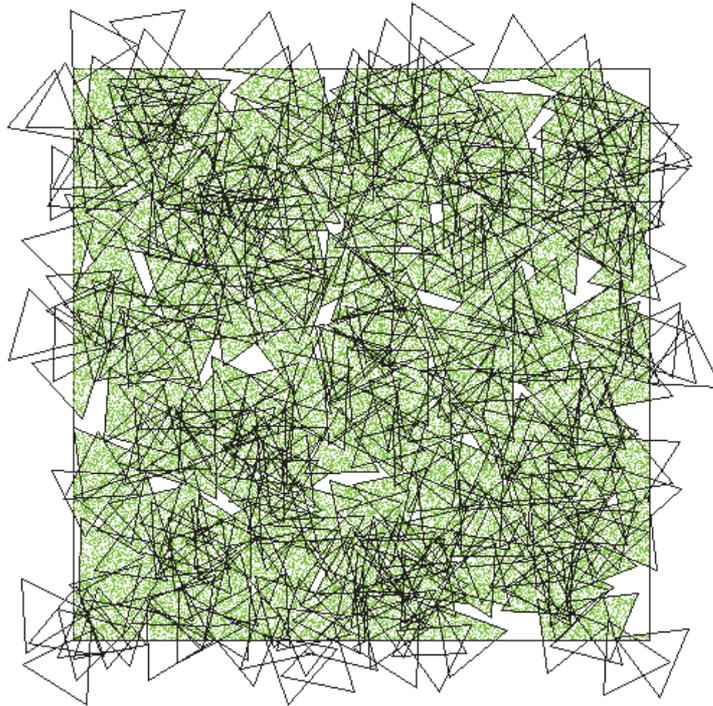


FIGURE 4.3 – Un WISN constitué de 400 nœuds

Dans notre contexte, la détection d'un événement par un nœud sentinelle provoque un afflux d'images provenant de multiples sources (les cover sets activés par exemple) vers le Sink. Notre modèle de simulation implémente ainsi une transmission d'images réelles avec une prise en compte de toutes les couches de la pile protocolaire. Nous adoptons le format d'image – présenté à la section 2.4.1 – adapté aux WSNs combinant une robustesse face aux pertes, une faible consommation pour la compression et une petite taille de fichier avec un filtrage de facteur de qualité (Q).

Comme évoqué dans la section 2.4.1, une valeur de $Q = 20$ associée à une résolution de 128×128 reste pertinente pour une application de détection d'intrusions très sensible aux délais de transmission, alors qu'une résolution de 200×200 se révèle plus appropriée dans un contexte de *situation awareness* moins contraint en délai. Dans la suite, nous étudions le pire cas par l'adoption d'une image de 320×320 pixels avec 256 niveaux de gris, de taille brute 102400 octets. Le schéma d'encodage avec un facteur de qualité fixé à 50 génère ainsi une version compressée de 16621 octets consistant en 205 paquets image. En outre, aucun ordre de réception des paquets d'une image au niveau du Sink n'est requis, favorisant ainsi l'usage de la transmission multi-chemin.

4.3.1 Impact sur le taux de pertes

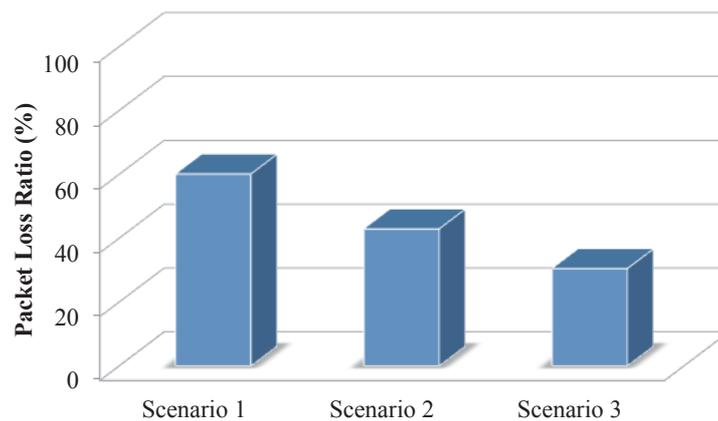


FIGURE 4.4 – Ratio des pertes de paquets image

Un taux moyen de pertes de paquets n'excédant pas les 40% et un pourcentage de réception d'images au Sink dépassant les 60% caractérisent les scénarios *Scenario 2* et *Scenario 3* comme illustré dans la Figure 4.4. Ce phénomène résulte de l'intégration d'une fonctionnalité de distribution de la charge au niveau routage ainsi que de la prise en compte des informations de sélection favorisant une transmission plus fiable des données. Les pertes de paquets s'atténuent encore plus dans le *Scenario 3* comparé au *Scenario 2*, générant une plus grande proportion d'images reçues hausse

de l'ordre de 20%. Cette plus forte atténuation des pertes s'explique par l'exploitation des informations à 2 sauts dans T-GPSR conduisant à un accroissement de la fiabilité. Les pertes sont en grande partie dues au nombre conséquent de transmissions d'images corrélées aux taux de capture, et à leur simultanéité occasionnant ainsi des congestions réseau et des interférences inter-chemins. Des mécanismes de régulation des vitesses de capture au niveau des cover sets activés et/ou de transmission contrôlée sur un voisinage fini, seraient une piste prometteuse pour des résultats plus satisfaisants.

4.3.2 Impact sur la qualité des images reçues

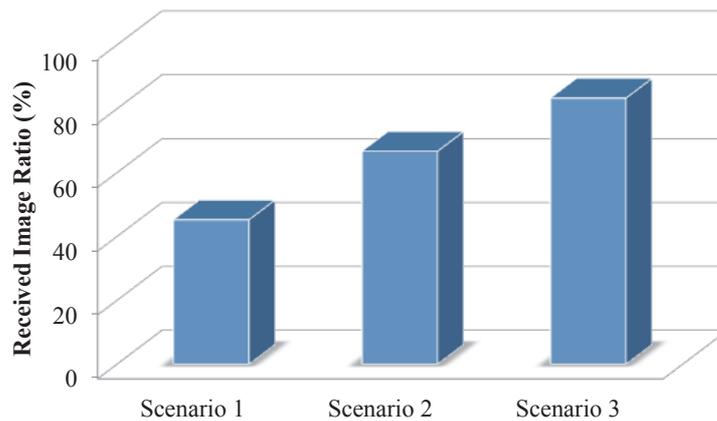


FIGURE 4.5 – Taux moyen de réception d'images

Comme évoqué précédemment, la réception d'images de qualité correspondant aux événements survenus, dans un contexte d'applications critiques, s'avère vitale. La Figure 4.5 présente un taux de réception d'images au Sink de plus de 70% dans les scénarios *Scenario 2* et *Scenario 3*. Cependant, recevoir une quantité considérable d'images au niveau du Sink n'implique pas nécessairement leur exploitabilité. C'est plutôt la proportion des pertes subies par une image qui détermine effectivement sa qualité visuelle. Ainsi, à sa réception au Sink, une image est soit complète (aucune perte subie), soit altérée. Là encore nous nous référons au seuil d'exploitabilité (moins de 60%) d'une image selon sa proportion de pertes, défini à la section

2.4.3. Autrement, elle est caractérisée comme exploitable (*usable*), pour un processus d'identification par exemple. Sur la base de cette convention, la Figure 4.6 présente une proportion accrue d'images exploitables, parmi celles reçues au puits, dans les scénarios *Scenario 2* et *Scenario 3* comparés au *Scenario 1*. De plus, la majorité des images exploitables dans ces deux scénarios reste complète (aucune perte constatée) : cf. Figure 4.7. Une fois de plus, le *Scenario 3* fournit de meilleures performances reflétant ainsi l'intérêt de l'exploitation du voisinage à 2 sauts tant dans le processus de sélection que dans le routage.

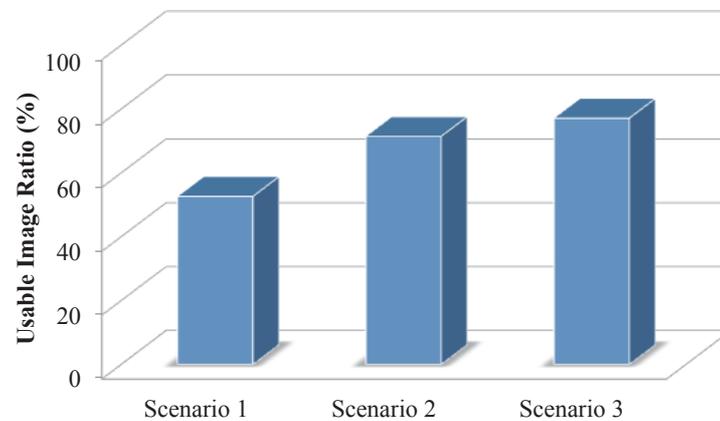


FIGURE 4.6 – Statistiques des images exploitables

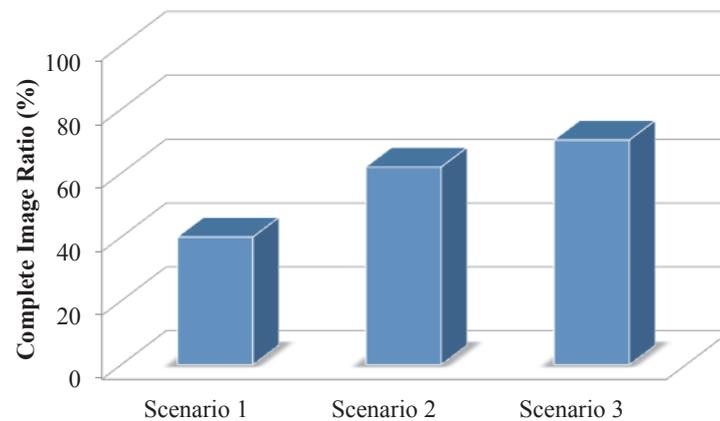


FIGURE 4.7 – Statistiques des images complètes

4.3.3 Impact sur les délais de transmission

Parvenir à des délais de communication minimaux combinés à une qualité de réception sans équivoque, est capitale dans un contexte d'applications critiques. L'étendue des pertes subies impacte directement sur les délais de réception des images au Sink. Comme évoqué dans la section 3.5, le décodeur adopté est doté d'une capacité de visualisation d'une image quelque soit le nombre de paquets reçus et leur ordre de réception. Néanmoins, l'affichage de l'image est déclenché par un temporisateur activé dès la réception du premier paquet d'une image. Cette visualisation devient automatique à la réception du dernier paquet image. En fonction du schéma de pertes, la latence de transmission peut égaler le temporisateur d'affichage lequel est fixé 10s. Lorsque le taux de pertes est assez faible, le temps de transmission reste généralement faible et dépend du nombre de sauts. Dans nos simulations, le temps minimal de réception d'une image complète au Sink, dans le meilleur cas, est de 0.94s. Toutefois, cette latence peut rester très faible dans le cas particulier où la majorité des paquets sont perdus mais que le dernier soit correctement reçu. Si le Sink possède une grande puissance de calcul, il peut décoder et afficher en temps réel l'image et prendre en compte les paquets au fur et à mesure qu'ils arrivent. La Figure 4.8 illustre les délais moyens de transmission des différents scénarios impliqués.

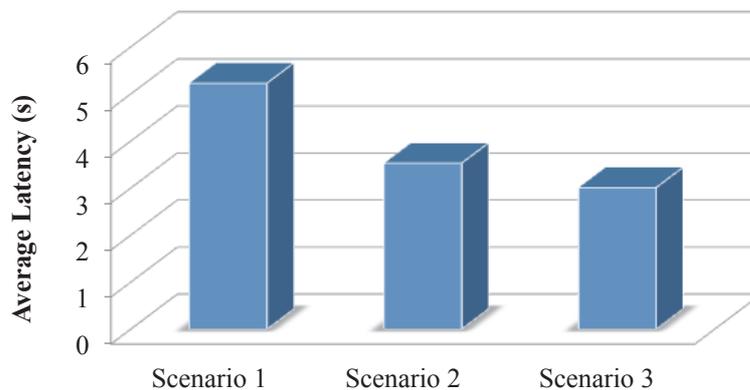


FIGURE 4.8 – Délai moyen de transmission d'image

4.4 Conclusion

Ce chapitre a proposé une approche optimisée de sélection de cover-sets bénéficiant des avantages de l'exploitation des informations de chemins à 2 sauts. L'objectif de cette stratégie est d'accroître la fiabilité de transmission des données visuelles par la réduction des congestions et contentions découlant d'une charge intensive du réseau lors de la détection d'un événement. Contrairement à la première approche de sélection mettant en exergue un compromis entre l'autonomie et la criticité, cette stratégie privilégie plutôt la criticité.

Ce chapitre a également présenté un mécanisme de routage géographique T-GPSR. T-GPSR est une extension de GPSR intégrant une progression gloutonne supplémentaire dont le processus de sélection du prochain saut repose essentiellement sur la connaissance du voisinage à 2 sauts. T-GPSR est également dotée d'une fonctionnalité d'équilibrage de la charge favorisant ainsi la transmission de flux multimédia. L'idée clef de ces contributions réside dans la liaison d'un ensemble de paramètres intrinsèques à la vitesse de capture et à la dynamique de la topologie réseau. Les simulations ont montré l'efficacité d'une telle association dans le cadre d'un trafic dense d'images pour un système de détection d'intrusions par exemple : faible taux de pertes de paquets, très bonne qualité des images reçues au Sink avec des délais de transmission réduits.

La conjugaison de la stratégie de sélection et de T-GPSR contribue à l'atténuation considérable des pertes, et par surcroît à l'amélioration la qualité visuelle des images, malgré une certaine persistance des pertes de paquets sous l'effet des congestions et interférences. Une issue prometteuse à ce niveau pourrait être l'exploitation des approches de gestion de file d'attente pour un meilleur contrôle de la transmission multi-saut de données visuelles sensibles aux délais. Dans le prochain chapitre, nous étudions l'impact de la mobilité du puits sur les propositions ci-dessus.

Mobilité des puits

Sommaire

5.1	Search & Rescue assisté par robot	80
5.2	Mobilité des puits dans les réseaux de capteurs	88
5.2.1	Avantages des puits mobiles	90
5.2.2	Défis de la mobilité des puits	91
5.2.3	Architectures de collecte via des puits mobiles	92
5.3	Collaboration robots-capteurs pour le Search & Rescue	93
5.3.1	Contexte	93
5.3.2	Spécification des tests	95
5.3.3	Résultats de simulation	97
5.4	Conclusion	99

Ce chapitre présente un bref recensement des récentes catastrophes naturelles ou accidentelles qui ont sévi à l'échelle planétaire avant d'introduire les systèmes de Search & Rescue assistés par robot. Cette section est ainsi consacrée pour l'essentiel aux systèmes de recherche et sauvetage assistés par robot et leur mise en œuvre à travers des exercices de simulation et des cas pratiques. En outre, un état de l'art de la mobilité des puits dans les réseaux de capteurs de manière générale est présenté. Ce chapitre se termine par une étude de performances des approches proposées et basées sur les les informations de chemins à 2 sauts dans un contexte collaboratif entre des robots et des capteurs pour des opérations de recherche et sauvetage.

5.1 Search & Rescue assisté par robot

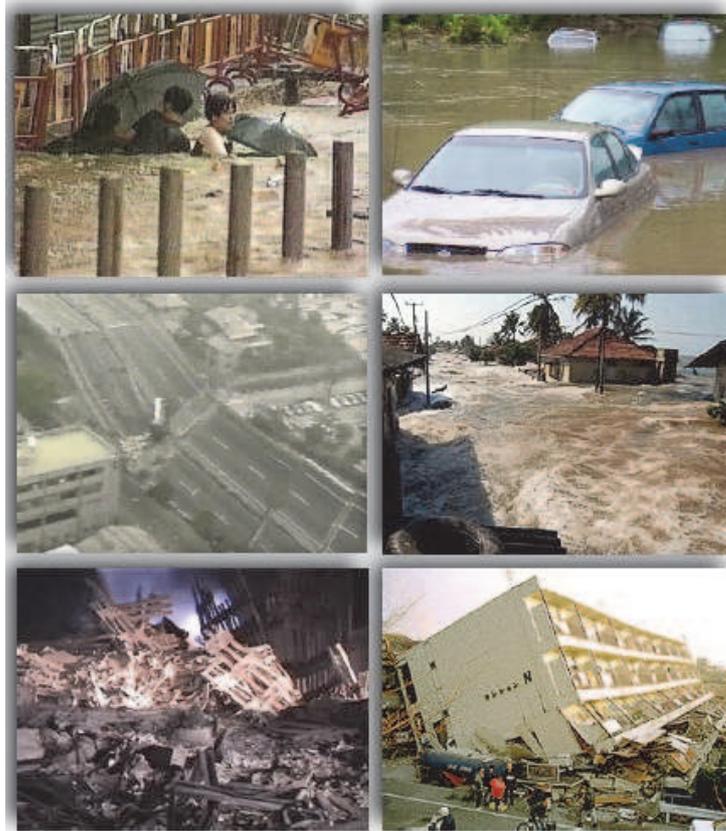


FIGURE 5.1 – Une série de catastrophes en image [3]

Ces dernières années, des catastrophes naturelles (ou accidentelles) dévastatrices ont sévi à l'échelle planétaire, et de surcroît à une fréquence phénoménale : séismes, tsunamis, inondations, glissements de terrain, incendies de forêt, éruptions volcaniques, cyclones, etc (cf. Figure 5.1). Ces phénomènes, en nette accentuation de nos jours, corroborent les prévisions des experts du WCDR'2005¹ quant à son aggravation dans le futur avec comme principal facteur le changement global du climat. Le violent séisme de 2010 avec à son actif plus de 250.000 victimes, laisse, jusqu'à nos jours, Haïti dans une situation humanitaire préoccupante. Dans la même année, l'explosion d'une plateforme pétrolière dans le golfe du Mexique – au large de la

1. World Conference on Disaster Reduction, www.unisdr.org/2005/wcdr/wcdr-index.html



FIGURE 5.2 – Difficulté et dangerosité des opérations de secours [3]

Louisiane aux Etats-Unis – a été à l'origine d'un désastre écologique sans précédent. Un séisme suivi d'un tsunami a dévasté, en 2011, les régions côtières du nord-est du Japon. La vague géante a emporté des localités entières et provoqué une série d'accidents nucléaires aux conséquences encore incertaines. L'impact de cette double catastrophe fut considérable sur l'économie de l'archipel : coût de reconstruction estimé aux environs de 417 milliards d'euros. Durant cette même période, la Russie a été confrontée à une répétition d'intenses incendies de forêt dont le plus virulent a fait état d'une soixantaine de victimes, des millions d'hectares de forêts dévastées, des dizaines de villages ravagés, d'une capitale (Moscou) asphyxiée par une épaisse fumée. En outre, des aéroports se sont retrouvés fermés au gré des vents transportant le nuage de cendres né de l'éruption volcanique de l'Eyjafjöll : espace aérien européen fermé pendant un mois, 100.000 vols annulés, 800 millions de passagers

bloqués. Tels sont quelques des effroyables sinistres recensés récemment sur la planète, source RFI². Des études, [3], soulignent la forte urbanisation actuelle – 53,5% des humains en 2014 selon les chiffres de l'INED³ (soit plus de 3,8 milliards) – comme facteur déterminant des conséquences notoires de ces crises :

- *Accroissement considérable des victimes et des dégats matériels ;*
- *Complexité des opérations de prévention et d'intervention : environnement urbain moins bien connu, dangers pour les équipes de secours, risques d'effondrement, risques d'incendie plus importants, scènes de panique (cf. Figure 5.2 ;*
- *Difficulté, voire impossibilité, à obtenir des informations fiables en temps-réel.*

Face à cette situation préoccupante, s'atteler au perfectionnement, voire à la rénovation, des systèmes de prévision de catastrophes et d'alerte, d'intervention en zone sinistrée ou de suivi de l'évolution des phénomènes, devient une préoccupation urgente. Les avancées technologiques de la robotique mobile en ont fait un candidat idéal.

De manière générale, le concept de *mobilité* fait référence à la capacité d'une entité à se mouvoir. L'atout majeur de la robotique mobile réside ainsi dans la capacité à évoluer face à la dangerosité du milieu, sa nocivité ou sa difficulté d'accès. Le déploiement de robots mobiles pour une approche d'au plus près de glaciers – intervention humaine dangereuse ou très risquée – afin d'en mesurer la fonte en est une parfaite illustration. La Figure 5.3 dépeint une variété de robots mobiles spécifiés par le milieu sollicité, leur taille et leurs capacités. Par analogie aux capteurs ne représentant individuellement que des machines rudimentaires, une intelligence ambiante émerge de l'assemblage des robots. Ces énormes progrès en robotique modulaire ont révolutionné le domaine de recherche d'intervention en zones sinistrées et/ou radioactives : les systèmes de Search & Rescue assistés par robot. De par

2. www.rfi.fr

3. Institut National d'Etudes Démographiques, www.ined.fr



FIGURE 5.3 – Variété de robots mobiles [3]

son fort potentiel, la recherche et le sauvetage assisté par robot a suscité un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique et de secouristes conduisant ainsi à un nombre considérable de contributions tant du point de vue matériel (*hardware*) que logiciel (*software*).

La recherche et le sauvetage assisté par robot préconise le déploiement de robots mobiles adaptés dans l'élaboration d'opérations de secours à des personnes en situation de détresse : les trouver, déterminer leur état, leur emplacement, d'identifier les dangers potentiels tout autour pour les secouristes, etc. Par l'exploration de la zone de recherche avec un certain degré d'autonomie de navigation, ces dispositifs sont capables de fournir des informations de leur environnement immédiat à un poste de commandement le plus souvent sous supervision humaine, aux abords de la zone sinistrée. Ces dispositifs mobiles sont pourvus d'un module de communication sans fil favorisant la transmission de données multimédia (image, audio,

vidéo). Le robot espion *Recon Scout XT* du leader mondial des systèmes tactiques robotisés *ReconRobotics*⁴ en témoigne par sa capacité de transmission d'images de 30m en milieu fermé, et pouvant atteindre 90m lorsqu'il évolue en plein air [86]. Un scénario plausible pourrait être le déploiement d'une flotte de robots mobiles autonomes après une catastrophe aérienne pour la cartographie de la zone et la recherche de survivants par exemple. S'appuyant uniquement sur des interactions locales et de manière complètement distribuée, ces unités mobiles sont capables de s'organiser sans intervention avec une entité extérieure pour l'exploration de la zone sinistrée. De cette auto-organisation peut découler une structure globale virtuelle où les robots peuvent déterminer, à la localisation d'une victime, le plus à même parmi eux à assumer le rôle de leader afin de mener à bien la tâche assignée : la prise en charge d'une victime par exemple. Cette structure devient ainsi plus robuste et plus coopérante en milieu hostile qu'un groupe d'individus.

Un scénario idéal, mettant en exergue une variété de tâches assignées aux robots dans une mission de recherche et sauvetage, est énoncé dans la compétition RoboCup Rescue⁵ orchestrée par l'initiative internationale de la recherche et de l'éducation RoboCup⁶. Cette compétition vise à promouvoir la recherche collaborative pour le développement de robots adaptés aux opérations de sauvetage en milieu urbain (*Urban Search And Rescue* ou USAR). Bien que trop ambitieuse par rapport à l'état de l'art actuel de la robotique, la vision sur les capacités octroyées aux robots à déployer suite à une catastrophe afin de minimiser les risques encourus par les secouristes tout en augmentant les chances de survie des victimes est décrite comme suit sur la page web du concours :

- *Négocier en toute autonomie au travers des structures compromises et effondrées ;*
- *Trouver des victimes et déterminer leur état ;*

4. www.reconrobotics.com

5. <http://robotarenas.nist.gov/competitions.htm>

6. <http://www.robocup.org/>

- *Cartographier leur emplacement ;*
- *Procurer des provisions et gérer les communications ;*
- *Identifier les dangers ;*
- *Mise en place de capteurs (acoustiques, thermiques, sismiques, détecteurs de substances dangereuses, etc.) ;*
- *Fournir l'étayage structurel.*

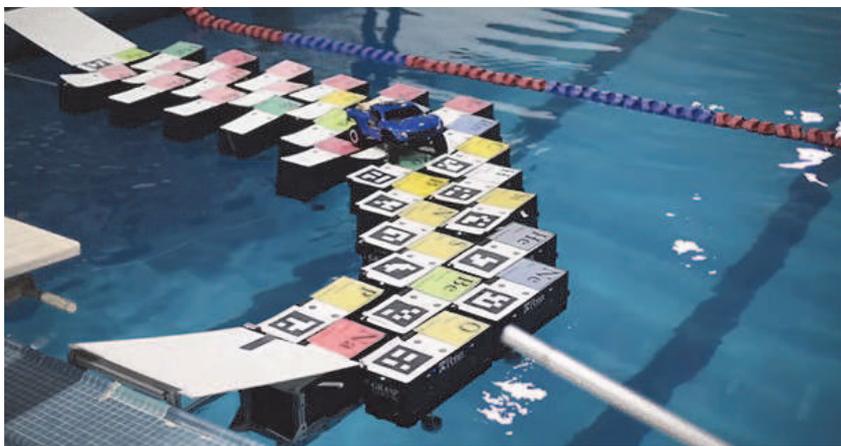


FIGURE 5.4 – Formation d'une plateforme de navires robots [4]

Même si cette vision est trop ambitieuse par rapport à l'état de l'art actuel de la robotique, des nombreuses études tentent d'y converger. C'est ainsi qu'en partenariat avec la *DARPA*⁷, des chercheurs de l'Université de Pennsylvanie ont procédé à la simulation d'une opération de sauvetage par des robots [4]. La tâche principale assignée aux robots est de tout mettre en œuvre pour secourir Bruce, la personne blessée (une poupée en bois). En d'autres termes, il s'agit de procéder à sa recherche par une exploration de la zone indiquée, ainsi qu'à son évacuation éventuelle à bord d'une mini voiture autonome. Cet exercice, dont la vidéo est mise en ligne sur le site de l'établissement⁸, démontre la fascinante coordination des capacités de trois différentes entités (des robots mobiles autonomes, des drones aériens et de surface)

7. <http://www.darpa.mil/>

8. <http://www.upenn.edu/spotlights/robot-boats-rescue-mission>

dans le processus de sauvetage de Bruce. En résumé, cette vidéo décrit un quadri-coptère transportant Bruce avant de le déposer délicatement sur le véhicule prévu pour son évacuation. Ensuite, comme l'illustre la Figure 5.4, s'y joignent les navires robots dont l'assemblage se concrétise par l'émergence d'une plateforme sur l'eau faisant office d'une voie de circulation menant au poste de commandement situé de l'autre côté de la piscine.

Au delà des exercices de simulation, des interventions réelles ont été réalisées ces récentes années. Une application concrète, pertinente par rapport à nos travaux, demeure le déploiement de robots de sauvetage pour une mission de premier secours après le séisme de magnitude 6,6 qui a frappé la province du Sichuan (Sud-Ouest de la Chine) en 2013 [5]. A cet effet, trois robots d'inspection de l'institut d'automatisme de Shenyang ont été dépêchés dans les zones sinistrées. Durant cette opération, deux de ces robots – des CUMT-1 (cf. Figure 5.5) – s'occupaient de la fouille des décombres à la recherche d'éventuels signes de vie, tandis qu'au même moment le drone survolait la zone pour des prises de vue aériennes à transmettre en temps réel au poste de commande pour analyse.



FIGURE 5.5 – Robot d'inspection CUMT-1[5]

Malgré les avancées technologiques conséquentes, la robotique mobile se trouve confrontée à quelques limites dont la principale, d'ordre technique, demeure l'autonomie des robots. Nous soulignons ici l'autonomie énergétique des robots, et non leur autonomie décisionnelle par rapport à leur environnement de déploiement. En effet, alimentées par une source d'énergie embarquée (leurs batteries), ces entités disposent d'une autonomie énergétique limitée interdisant toute utilisation prolongée. *Recon Scout XT*, malgré tout son potentiel ne se voit attribuer qu'une heure d'autonomie. Toutefois, certains robots sont aptes à jauger leur niveau d'énergie et programmer une recharge éventuelle à un point de ravitaillement. Cependant, dans un contexte d'opérations de secours ou d'intervention caractérisées par une exploration à large échelle, cette autonomie énergétique des robots s'avère rapidement insuffisante et difficile, voire impossible, à renouveler au sein de la zone de surveillance. Par conséquent, une optimisation des processus d'exploration devient imminente dans le cadre des applications de Search & Rescue assistées par robot. En outre, le coût de tels systèmes peut devenir exorbitant étant donné les composants matériels sophistiqués dont sont dotés les robots [87]. A titre d'exemple, les prix actuels des robots pompiers – *Thermite* et *Guardian* – de la compagnie aérienne *Howe And Howe*⁹ sont respectivement 98 500\$ et 125 000\$. Ce qui explique le nombre restreint de ces dispositifs dans le déploiement de ce type d'application. De plus l'intégrité de la mission peut être compromise par la perte ou la défaillance d'un unique robot [87]. **C'est ainsi que dans le cadre d'une collaboration avec une équipe japonaise spécialisée dans les systèmes de recherche et sauvetage assistés par robot, nous procédons à l'étude d'approches alternatives, combinant des capteurs et des robots mobiles d'intervention (comme puits de données), dans l'optique d'atteindre de bonnes performances tout en réduisant les coûts de déploiement.**

9. <http://www.howeandhowe.com/>

5.2 Mobilité des puits dans les réseaux de capteurs

L'objectif principal d'un WSN est la collecte de paramètres de l'environnement immédiat des capteurs déployés et leur acheminement via une architecture multi-saut vers une station (parfois plusieurs) souvent plus éloignée, le puits de données. Ce point de collecte statique, garant de l'exécution des opérations nécessaires de formation et de maintenance du réseau, est habilité à communiquer avec le centre de traitement via Internet ou par satellite pour l'analyse des informations remontées par les différents capteurs et la prise de décision ultérieure. Par conséquent, toute défectuosité de ce point névralgique, potentiellement induite par un mauvais positionnement, des changements dans l'environnement après déploiement ou des défauts de connectivité, conduit à l'isolement du réseau, donc à son annihilation [15]. C'est ainsi que dans la plupart des contributions, certaines particularités exprimées le plus souvent sous forme d'hypothèses sont octroyées aux puits de données :

- *Puissance de communication* : le Sink est doté d'une puissance de transmission largement supérieure à celle des autres nœuds du réseau. D'aucuns stipulent même que son rayon de communication pourrait atteindre l'ensemble des capteurs répartis dans la zone d'intérêt. Ce qui est, en notre sens, irréaliste. La génération d'un système de coordonnées dynamiques dans [27] où chaque nœud est affecté à un cluster, déduit des m émissions omnidirectionnelles (les couronnes) et n directionnelles (les secteurs) du puits, en est une parfaite illustration.
- *Autonomie énergétique* : la contrainte majeure dans les WSNs est la capacité énergétique assez limitée des capteurs due en grande partie à leur taille. Le puits de données demeure l'unique équipement du réseau à disposer suffisamment d'énergie afin de mener à bien les responsabilités qui lui incombent : passerelle avec le monde extérieur, initiateur des tâches de formation et de maintenance du réseau, etc. Toutefois, dans un contexte de difficulté ou dangerosité d'accès de la zone de surveillance, le recours aux sources disponibles

de l'environnement du Sink (vent, énergie solaire) pour son ravitaillement est envisageable.

- *Capacité mémoire* : un réseau de capteurs consiste en un déploiement de plusieurs milliers de capteurs dans une région d'intérêt : c'est la notion d'échelle. Cette forte densité du réseau se traduit par une importante poussée de transmissions de données vers le Sink. Ce phénomène est d'autant plus délicat si la nature des informations véhiculées consiste à du contenu multimédia (image, audio, vidéo) compte tenu du volume de données mis en jeu. Par conséquent, contrairement aux nœuds capteur dotés de capacités de mémoire et de calcul limitées, le puits de données doit posséder une large mémoire pour le stockage des informations reçues.

A l'inverse de ses origines ad hoc caractérisées par un mode de communication point à point (*peer-to-peer*), les WSNs exigent l'acheminement des informations collectées de sources multiples à un point de collecte : c'est le paradigme de communication de type "plusieurs vers un" (*many-to-one*). En d'autres termes, toute procédure de collecte de données engendre une convergence du trafic vers ce point sensible du réseau, le puits de données. De plus, seul un nombre restreint de nœuds capteurs comptent le puits dans leur voisinage immédiat. Par conséquent, ces derniers assurent la transmission de leurs propres mesures ainsi que la remontée des données collectés des multiples capteurs hors de portée du Sink. Du fait d'une hypersollicitation, ces nœuds proches du Sink épuisent plus rapidement leur réserve énergétique occasionnant l'annihilation prématurée du réseau par l'isolement du puits de données. Ce phénomène est plus communément connu sous le vocable de problèmes de goulot d'étranglement. Des simulations effectuées dans [88] corroborent les études sur les limites des schémas de collecte via des puits stationnaires [89, 90]. Une forte concentration de la consommation énergétique dans le voisinage immédiat du puits augmentant progressivement dans le temps jusqu'à l'isolement du Sink en est le résultat exprimé. La mobilité des puits s'avère ainsi judicieuse face à l'engorgement du voisinage du Sink par la répartition de la charge entre les nœuds dans l'optique

d'accroître la durée de vie du réseau [91, 92]. L'introduction du concept de mobilité des puits se révèle également pertinente, voire indispensable, dans le cadre de certaines applications. L'exploration d'une zone sinistrée à la recherche de survivants par un secouriste équipé d'un PDA [93] en est un parfait exemple.

5.2.1 Avantages des puits mobiles

Le puits de données, statique dans un WSN traditionnel, demeure l'unique entité du réseau immunisée aux contraintes de ressources (capacités en mémoire, traitement, communication, bande passante, énergie, etc.). La mobilité du puits, consistant à son déplacement périodique dans la zone d'intérêt pour la collecte de données, peut être réalisée par la fixation du Sink à une entité mobile telle qu'un humain, un animal, un véhicule ou un robot. Les auteurs de [94] résument comme suit les avantages potentiels expliquant l'intérêt d'un tel concept par rapport au "immobilisme" des puits dans les réseaux de capteurs :

- *Prolongation de la durée de vie du réseau* : la mobilité du puits s'avère une très bonne alternative face à l'engorgement du voisinage immédiat du Sink occasionnant son isolement éventuel. L'autosuffisance énergétique demeure la contrainte majeure dans les WSNs. Caractérisée un mode de communication *many-to-one* à travers une architecture multi-saut, la dissémination des données dans un WSN à puits stationnaire conduit au drainage des ressources rarissimes des nœuds, notamment leur énergie. Par conséquent, le recours aux puits mobiles conduit également à la prolongation de la durée de vie globale du réseau par la répartition de la charge entre les nœuds et le rapprochement d'au plus près des sources réduisant considérablement le nombre de sauts à effectuer.
- *Amélioration du débit et de la fiabilité des données* : l'exploitation de puits mobiles peut également conduire à l'amélioration du débit et de la fiabilité des données véhiculées dans le réseau. En effet, le rapprochement d'au plus près des sources provoque non seulement la réduction de la distance de collecte

(en nombre de sauts), mais aussi celle des erreurs de transmission et des risques de collision [95]. Cette minimisation des risques de retransmissions est à l'origine de l'amélioration du débit. En outre, l'usage des puits mobiles augmente également la connectivité en permettant la collecte d'informations à partir des segments isolés du réseau induits par un déploiement aléatoire ou une défaillance des nœuds [96].

- *Sécurité* : à l'inverse des puits statiques, la mobilité du Sink pose moins de problème de sécurité. En effet, dans un contexte de réseaux de capteurs à puits statiques des attaques réseau, peuvent cibler ce point névralgique facilement localisable.

5.2.2 Défis de la mobilité des puits

L'usage de puits mobiles pour la collecte de données dans un WSN, malgré tous les avantages évoqués, n'est pas sans conséquence. En effet, la mobilité soulève plusieurs défis à relever pour une conception et une mise en œuvre efficace d'un schéma de collecte. Voici quelques défis spécifiques à l'introduction de puits mobiles dans les WSNs [97] :

- *Contact avec le puits* : dans un contexte de mobilité du puits, une communication des capteurs stationnaires au Sink mobile nécessite la présence de ce dernier dans leur rayon de communication. Cependant, cette détection du puits mobile est fortement affectée par sa vitesse de déplacement et les cycles de réveil des nœuds du réseau [95]. De plus, une vitesse de déplacement rapide du puits conduit à de courtes liaisons entre ce dernier et son voisinage immédiat occasionnant potentiellement des pertes considérables.
- *Localisation du puits* : le but d'un WSN étant la remontée des informations collectées vers le Sink, cet objectif ne peut alors être atteint sans une localisation préalable de ce point focal. Contrairement à un réseau de capteurs à puits statique, les nœuds n'ont à priori aucune connaissance de la position courante du Sink dans un contexte à puits mobile. Pour ce faire, à l'image

des procédures de gestion de la mobilité (Mobility Management) dans les réseaux cellulaires où une mise à jour de localisation s'opère lorsqu'un terminal change de zone localisation, la position du Sink doit être mise à jour dans le tout le réseau pour assurer la connectivité. Une fréquence régulière des mises à jour de la localisation du puits dans le réseau pourrait réduire les délais de transmission car permettant l'ajustement des chemins en conséquence. Cependant, elle génère un coût important en nombre de messages échangés, donc une consommation énergétique importante précipitant la déconnexion des éléments du réseau. D'un autre côté, des mises à jour peu fréquentes de la position courante du puits conduiraient à des pertes de paquets considérables (paquets jetés) due à une progression importante du Sink depuis sa dernière position.

La section suivante présente l'éventail des architectures de collecte de données via des puits mobiles.

5.2.3 Architectures de collecte via des puits mobiles

Le découverte de la position courante du puits mobile, l'établissement des routes et le transmission des données constituent, de manière générale, les étapes déterminantes d'un processus de collecte via des puits mobiles dans les WSNs. Ces dernières années, de nombreuses propositions sur la dissémination de données via des puits mobiles ont vu le jour. Ces architectures de collecte peuvent être classées en trois grandes catégories en fonction du modèle de mobilité [95] :

- *Architecture à mobilité aléatoire* : le modèle de mobilité aléatoire est identifié par la fixation du Sink à une entité mobile n'ayant aucune notion sur sa mobilité (trajectoire, vitesse, ...) : un animal par exemple. Les architectures de collecte basées sur ce type de modèle de mobilité du puits sont caractérisées par une totale autonomie de ce dernier en termes de vitesse et de trajectoire, rendant sa position prochaine fortement imprévisible [93, 98].
- *Architecture à mobilité déterministe* : le modèle à mobilité déterministe, le

plus simple d'entre eux, préconise que le puits suit toujours une certaine trajectoire. Cette trajectoire pourrait être la périphérie de la zone de surveillance, une ligne droite, un chemin circulaire, ou une zone de rendez-vous consistant en un sous-ensemble de nœuds destinés à collecter les données du reste du réseau. Dans les schémas de collecte basés sur ce modèle, les capteurs le long de la trajectoire du puits sont capables de calculer son temps de passage et optimiser en conséquence leurs tâches de récolte et de transmission de données : [99, 100]. Les parkings "intelligents" le long des routes où le puits mobile (le conducteur) récolte des informations sur la disponibilité des places de stationnement d'une région d'intérêt est un parfait exemple d'application de cette famille.

- *Architecture à mobilité contrôlée* : le modèle à mobilité contrôlée désigne une situation où le puits (ses mouvements) est sous le contrôle d'une entité extérieure au réseau [94, 101]. En fonction des objectifs de l'application et de la connaissance de l'environnement, le puits est capable d'adapter ses mouvements (vitesse et trajectoire) afin d'arriver à de meilleurs résultats.

La section suivante présente l'approche collaborative entre des robots et des capteurs pour des applications de Search & Rescue.

5.3 Collaboration robots-capteurs pour le Search & Rescue

5.3.1 Contexte

Dans le cadre spécifique cette thèse, nous préconisons une collaboration entre des capteurs et des robots mobiles d'intervention pour le déploiement d'opérations de Search & Rescue en zone sinistrée. Nous considérons ainsi un WISN consistant en un déploiement massif, sur la zone à scruter, de capteurs image aptes à capturer et transmettre des informations visuelles à la demande ou sur détection d'un événement pertinent. La Figure 5.6 illustre le scénario d'un déploiement aléatoire de capteurs visuels sur différentes régions géographiques d'une zone d'intérêt. Ce WISN déployé

pourrait être assigné à un contexte de *situation awareness* pour des applications de recherche et sauvetage par exemple où les images capturées des nœuds distants sont collectées au niveau d'un centre de contrôle, visualisées, et éventuellement intrégréées dans des systèmes d'information géographique (SIG). Par conséquent, l'optimisation par exemple du déploiement des robots mobiles par la prise en compte de l'état du terrain pour la sélection de la technologie robot la plus adéquate, pourrait tirer profit de la collecte de telles informations. Ainsi, en fonction du déplacement des robots une fois déployés dans la zone sinistrée, les nœuds capteur image pourraient être utilisés pour fournir des informations visuelles des zones éloignées des robots. L'exécution, de la part des robots, de tâches avancées de traitement sur ces images récoltées pourrait servir soit à la reconnaissance d'événements pertinents (présence de victime humaine par exemple), des dangers potentiels environnants mais également à l'optimisation des déplacements. En outre, la transmission de données émanant des robots autonomes vers le centre de contrôle sous supervision humaine pourrait aussi bénéficier de l'usage du réseau de capteurs déployé comme relais.

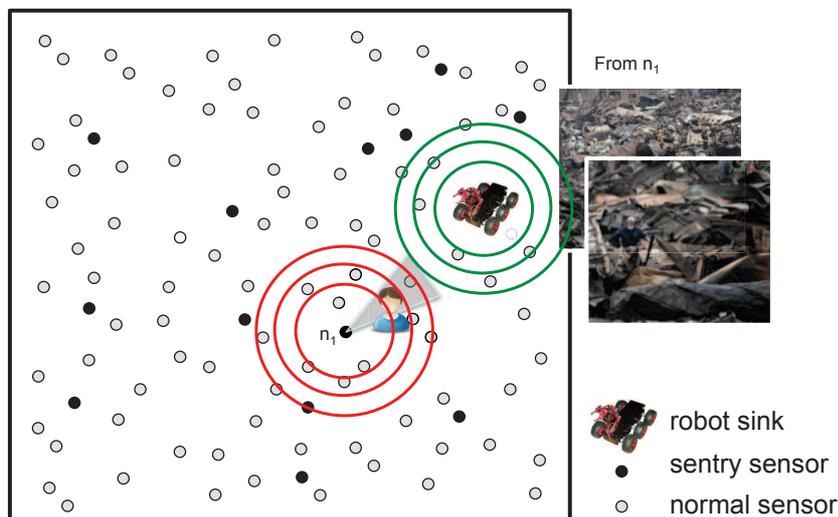


FIGURE 5.6 – Collaboration entre robots mobiles et capteurs fixes

En résumé, notre politique d'intégration aboutit à un réseau collaboratif de robots et capteurs, consistant en des :

- *Capteurs statiques* : il s'agit de capteurs image disséminés en grande quantité par voie aérienne sur la zone sinistrée et équipés capacité infrarouge par exemple, pour détecter une présence. Ces nœuds sont aptes à capturer et transmettre des informations visuelles dès le déclenchement d'une alerte.
- *Robots mobiles* : ce sont des robots autonomes d'intervention disposant de grandes capacités – notamment de traitement et de mémoire – pour agir comme un puits de données. Ils sont capables d'exécuter des tâches avancées de traitement sur ces images récoltées pourrait servir soit à la reconnaissance d'événements pertinents (présence de victime humaine par exemple) et des dangers potentiels. Ces robots peuvent être des véhicules autonomes dont les mouvements ne sont pas limités par leur taille physique.

Notre objectif dans cette section n'est pas de proposer une architecture de collecte de données via des puits mobiles. Il s'agit plutôt de réaliser une étude de performances sur la mobilité des puits dans un contexte collaboratif entre des robots et des capteurs pour des opérations de Search & Rescue. L'idée principale est de pouvoir déterminer les limites de fonctionnement d'un schéma de collecte de données visuelles via des robots sinks mobiles sur les approches proposées basées sur les informations de chemins à 2 sauts. A travers un ensemble de simulations, nous cherchons à déterminer les valeurs limites, pour lesquelles le système reste stable, de paramètres pertinents tels que la vitesse de déplacement des puits, la fréquence de mise à jour de leurs positions. Cette étude pourrait permettre dans le cadre d'un déploiement d'opérations de recherche et sauvetage requérant une collaboration entre des robots et des capteurs, d'effectuer une configuration optimale des paramètres du système et d'améliorer les algorithmes contrôlant cette coopération.

5.3.2 Spécification des tests

Sur une zone sinistrée de $400m \times 400m$, 400 capteurs image sont déployés aléatoirement par voie aérienne pour un premier balayage de la scène. Les nœuds possèdent les mêmes propriétés : un rayon de communication de $30m$, une profon-

deur de vue fixée à $125m$ avec un angle de vue $\alpha = 60^\circ$. L'"immobilisme" caractérise également les capteurs image disséminés : position fixe, aucune rotation envisageable de la caméra embarquée. Une fois les capteurs déployés sur la zone, chaque nœud détermine son voisinage et ses cover-sets au moyen du modèle d'ordonnement présenté à la section 3.1. Le choix des sources pertinentes à activer s'obtient par l'application de la stratégie de sélection basée sur les informations de chemins à 2 sauts (cf. 4.1.2). La couche routage adopte T-GPSR pour la remontée des images vers le Sink alors que la couche MAC définit CSMA/CA comme méthode d'accès au média avec un débit radio de $250kpbs$.

La politique dissémination de données au robot sink mobile est réactive dans notre contexte de Search & Rescue, donc les chemins au puits ne sont pas connus à priori. Ils sont déterminés à la détection d'un événement pertinent, une présence humaine par exemple. Cependant pour les besoins de cette étude d'impact nous adoptons un schéma de collecte périodique. En d'autres termes toutes les sources sélectionnées transmettent une image toutes les $20s$. La définition des images à transmettre est de 320×320 pixels avec 256 niveaux de gris, de taille brute 102400 octets. Le schéma d'encodage (cf. section 2.4.1) avec un facteur de qualité $Q = 50$ génère ainsi une version compressée de 16621 octets consistant en 205 paquets image. Dans la littérature, la vitesse de déplacement V d'un puits se décline en trois catégories : *lente* (au-dessous de 1 mètre par seconde ou $1 m/s$), *modérée* (entre 1 et $10 m/s$) et *rapide* au delà de $20 m/s$ [95]. **Il faut noter que la plupart des robots mobiles d'intervention appartiennent à la première catégorie : $30 cm/s$ le *Recon Scout XT*, $70 cm/s$ pour l'*iClebo Kobuki*¹⁰.**

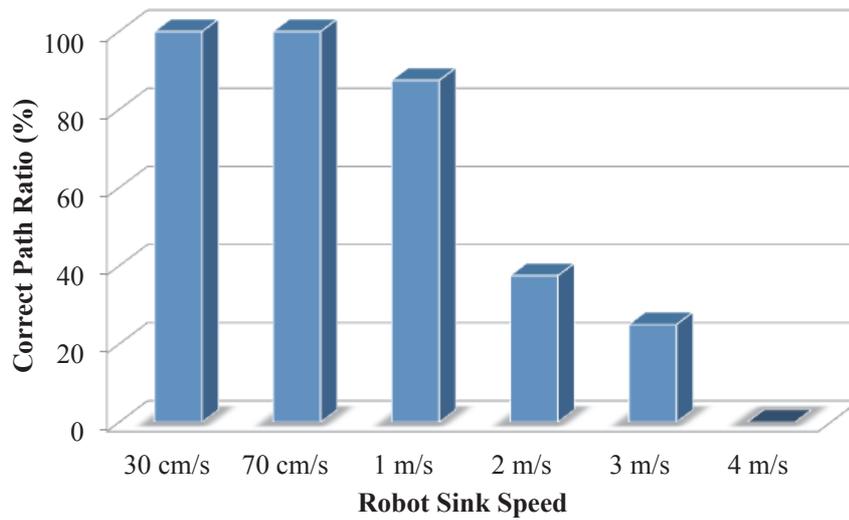
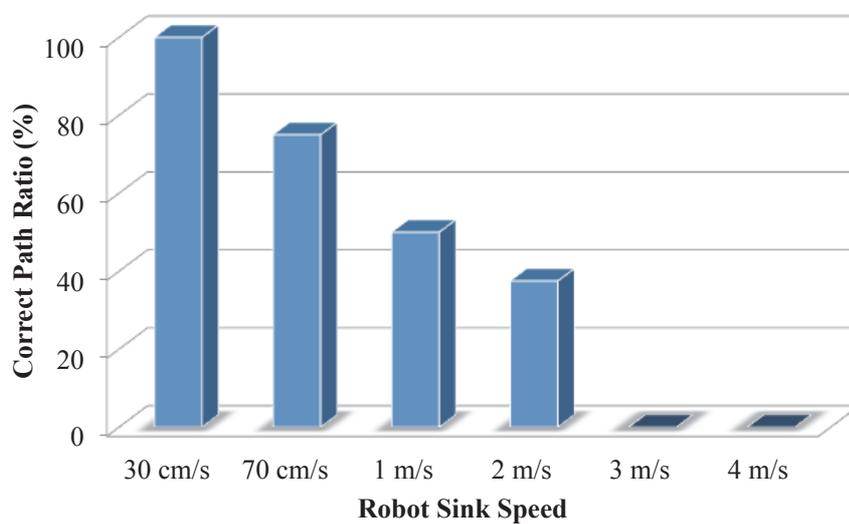
Les nœuds ne connaissent pas à priori la position courante du robot mobile. La mobilité du puits nécessite donc des mises à jour de sa position sur tout le réseau pour assurer la connectivité. Il existe des approches qui proposent des méthodes de

10. <http://kobuki.yujinrobot.com/home-en>

dissémination dans un contexte de puits mobiles. En outre, nous utilisons différentes fréquences de mise à jour de la position du puits dans le réseau : $5s$, $10s$ et $15s$. Une fréquence de mise à jour de $F = 10s$ signifie que le puits informe le réseau sur sa position courante toutes les $10s$. Avec une telle fréquence, les sources disposent d'une fenêtre de transmission de $10s$ pour une vitesse de déplacement $V = 1m/s$. En fonction de la fréquence de mise à jour du puits, nous cherchons à analyser l'impact de la mobilité sur les approches proposées basées sur les informations de chemins à 2 sauts. Pour ce faire, nous considérons dans nos simulations un déploiement de 10 robots Sink mobiles pour l'exploration de la zone. Sur une période donnée, un seul des robots se déplace pour la collecte des données. On effectue ainsi pendant une fenêtre de transmission donnée, des mesures par rapport au maintien des chemins établis par T-GPSR sur la base de la dernière position connue du robot actuellement en état de collecte. En d'autres termes, nous cherchons à savoir dans combien de cas ces chemins deviennent obsolètes ? Rappelons que T-GPSR définit plusieurs chemins pour une paire (source, destination) sur la base des informations de chemins à 2 sauts. Ces mesures sont effectuées sur tous les robots à différentes périodes avant d'en faire la moyenne.

5.3.3 Résultats de simulation

Les Figures 5.7, 5.8 et 5.9 illustrent le taux moyen de chemins maintenus (corrects) respectivement pour une fréquence de mise à jour de $5s$, $10s$, et $15s$. Ces figures montrent que pour une vitesse de déplacement $V = 30cm/s$ tous les chemins restent corrects pour des valeurs de F allant jusqu'à $10s$. De plus, cette moyenne de chemins corrects reste encore élevée pour $F = 15s$: plus de 87% (cf. 5.9). Une fréquence de $15s$ atteint fortement les chemins pour une vitesse de déplacement $V = 70cm/s$: 50% des chemins deviennent caduques. Les résultats pour une vitesse $V = 1m/s$ ne sont satisfaisants que pour $F = 5s$. Les autres vitesses par contre ne sont pas vraiment adaptées à des robots de secours. En effet dans la réalité, la vitesse déplacement des robots d'intervention dépasse très rarement les $70cm/s$.

FIGURE 5.7 – Moyenne des chemins maintenus pour $F = 5s$ FIGURE 5.8 – Moyenne des chemins maintenus pour $F = 10s$

Par conséquent, T-GPSR fonctionne également dans un contexte de Sink mobile, en l'occurrence des robots de secours. Une mise à jour très fréquente générant trop

de messages, on peut adopter une valeur F de 10 à 15s pour des robots de secours dotés d'une vitesse de moins $70m/s$ et $F = 5s$ au delà.

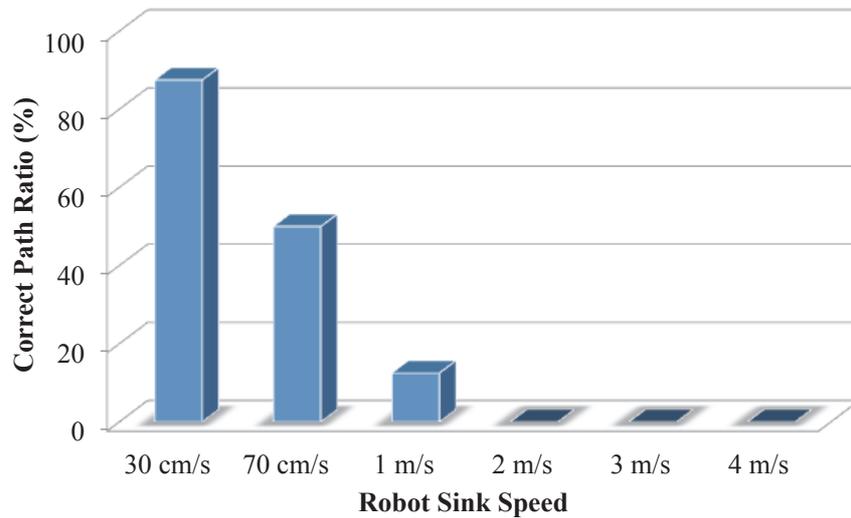


FIGURE 5.9 – Moyenne des chemins maintenus pour $F = 15s$

5.4 Conclusion

Ce chapitre a fait une brève description des récentes catastrophes naturelles ou accidentelles qui ont sévi à l'échelle planétaire. Destinés à ce type de crise, le fort potentiel des systèmes de Search & Rescue assistés par robot a été souligné. Des exercices de simulation, des exemples d'interventions réelles, une vision globale bien trop ambitieuse de ces systèmes par rapport à l'état de l'art actuel de la robotique, mais aussi les inconvénients en termes d'autonomie énergétique et de coûts de déploiement, ont été également évoqués. En outre, le concept de la mobilité des puits dans les réseaux de capteurs a été décrit à travers ses avantages et les défis à relever pour la mise en œuvre d'un tel schéma. Il s'en est suivi un tour d'horizon des architectures de collecte de données via des puits mobiles classifiées en fonction de type de mobilité : aléatoire, déterministe et contrôlé.

Après une présentation de la politique d'intégration envisagée entre des technologies de réseaux de capteurs et de robotique mobile pour des opérations de secours, une étude de l'impact de la mobilité du puits sur les approches proposées a été réalisée. A travers des simulations, cette étude a montré la robustesse de nos approches basées sur les informations à 2 sauts dans un contexte de puits mobiles, en l'occurrence des robots de secours. En outre, il serait judicieux de procéder à l'évaluation de performances par une comparaison avec les approches existantes de collecte de données via des puits mobiles. Pour ce faire, nos études actuelles se penchent sur l'intégration d'un support de gestion mobilité dans T-GPSR afin d'en accroître les performances par l'exploitation des réceptions indésirables (*overhearings*) afin d'éviter la propagation de la position actualisée du Sink sur la topologie globale.

Conclusion générale

Contributions de la thèse

Dans cette thèse, nous avons étudié la problématique de la transmission simultanée d'une large quantité d'informations visuelles, émanant de plusieurs sources pour résoudre les ambiguïtés. Nous nous sommes alors intéressés aux concepts clefs de transfert de flux multimédia de manière générale, ainsi qu'à ceux d'un flux spécifique, des images. Ainsi, différentes contributions ont été apportées dans l'optique d'une transmission efficace et efficiente des images.

Nous avons tout d'abord proposé un mécanisme de sélection des cover-sets pertinents à activer pour une transmission fiable d'une grande quantité d'images en situation critique. Cette stratégie de sélection, guidée par une approche multicritère, se fonde essentiellement sur des métriques d'état et de voisinage réparties entre autonomie et criticité. Afin d'assurer la remontée des captures émises par les source sélectionnées, nous avons proposé un mécanisme de routage, consistant à intégrer le concept de multi-chemin à GPSR favorisant ainsi la transmission de flux multimédia. Les résultats de ces simulations révèlent que cette approche contrôlée de sélection des cover-sets, combinée au mécanisme de routage accroît la fiabilité des données dans un contexte de trafic intensif, et ainsi la qualité visuelle des images reconstruites au Sink. De plus, cette amélioration devient encore plus significative lorsque les informations de sélection sont prises en compte au niveau routage.

Toujours à des fins d'optimisation, nous avons proposé une seconde approche optimisée de sélection de cover-sets bénéficiant des avantages de l'exploitation des

informations de chemins à 2 sauts. En outre, le protocole de routage géographique multi-chemin T-GPSR a été défini pour la transmission des images au puits. T-GPSR est une extension de GPSR reposant essentiellement sur les informations de chemins à 2 sauts. Les simulations ont montré l'efficacité de la coopération des deux approches dans un contexte de transmission simultanée d'une grande quantité d'informations visuelles.

Dans le dernier chapitre de cette thèse, nous avons présenté les systèmes de Search & Rescue assistés par robot à travers son potentiel, des exemples de déploiement (exercices de simulation, interventions réelles), les contraintes en termes de coûts et d'autonomie énergétique. Notre scénario d'une approche collaborative entre des robots mobiles de secours et des capteurs image statiques, visant à renforcer ce type de système et en réduire les coûts de déploiement, a été décrit. Nous n'avons pas cherché à proposer une architecture de collecte de données via des puits mobiles. L'idée principale a été d'étudier l'impact de la mobilité des puits sur les approches proposées, lesquelles se fondent sur les informations de chemins à 2 sauts. Cette étude a permis de déterminer les valeurs limites, sur le système, de paramètres pertinents dans un contexte de Search & Rescue : la vitesse de déplacement des robots sinks mobiles et la fréquence de mise à jour de leur position. A travers des simulations, cette étude de performances a montré la robustesse de nos approches basées sur les informations à 2 sauts dans un contexte de puits mobiles, en l'occurrence des robots de secours.

Perspectives

Nous présentons dans cette section les perspectives de recherche relatives aux travaux présentés dans ce document.

- *Mécanisme de contrôle* : Afin d'augmenter la fiabilité par la réduction (*i*) des congestions induites par la sollicitation simultanée des nœuds partagés (com-

muns à plusieurs cover-sets) comme sources dans le processus d'activation (ii) des interférences inter-chemins rencontrées dans l'établissement de routes multiples, une perspective de recherche consiste à considérer un mécanisme de contrôle. Ce mécanisme pourrait regrouper deux techniques essentielles : (1) une politique d'ordonnancement local permettant d'agencer l'ordre des transmissions dans un cover-set activé, (2) une exclusion mutuelle sur un voisinage fini (à 2 sauts) permettant sur une période donnée à un unique cover-set de transmettre dans ce voisinage.

- *Expérimentations* : Il s'agit d'exploiter les informations de chemins à 2 sauts en procédant à la validation de T-GPSR sur des plateformes réelles disponibles au sein du LIUPPA.

Publications

Conférences Internationales avec comité de lecture

M. Diop, C. Pham, O. Thiare, "2-Hop Neighborhood Information for Cover Set Selection in Mission-Critical Surveillance with Wireless Image Sensor Networks", Proceedings of the IFIP Wireless Days International Conference (WD'2013), Valencia, Spain, November 2013.

C. Pham, **M. Diop**, O. Thiare, "Selecting source image sensor nodes based on 2-hop information to improve image transmissions to mobile robot sinks in search rescue operations", Proceedings of the Third Workshop on Robots and Sensors integration in future rescue INformation system (ROSIN'13) , in conjunction of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2013), Tokyo Big Sight, Japan, November 2013.

M. Diop, C. Pham, O. Thiare, "Best Cover Set Selection with Multi-Criteria Approach in Mission-Critical Surveillance for Wireless Image Sensor Networks", Proceedings of the IFIP Wireless Days International Conference (WD'2012), Dublin, Ireland, November 2012.

Journées thématiques

M. Diop, C. Pham, O. Thiare, "Approche Multicritère pour la Sélection du Meilleur Ensemble Couvrant dans les Applications de Détection d'Intrusion à base de Capteurs Image", Journe thmatique PHC/ResCom "Rseaux de capteurs et applications critiques de surveillance" (RESSACS 2012), Juin 2012, IUT Bayonne, Parc Montaury.

Bibliographie

- [1] B. Karp, H. T. Kung, “Gpsr : Greedy perimeter stateless routing for wireless networks,” *International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, ACM, pp. 243–254, 2000. (Cité en pages xiii et 20.)
- [2] A. Boulis, *Castalia A simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Networks : User’s Manual*, <http://castalia.research.nicta.com.au/>, Version 3.2, NICTA, March 2011. (Cité en pages xiii et 30.)
- [3] S. Stinckwich and C. Pham, “Simulation de robots pour les applications search rescue,” in *RESSACS 2013*, 2013. (Cité en pages xiv, 80, 81, 82 et 83.)
- [4] (2014, April). [Online]. Available : <http://www.humanoides.fr/2013/03/05/une-operation-de-sauvetage-par-des-robots/#more-11489> (Cité en pages xiv et 85.)
- [5] (2014, April). [Online]. Available : <http://www.humanoides.fr/2013/04/22/trois-robots-de-sauvetage-pour-aider-les-chinois/#more-13067> (Cité en pages xiv et 86.)
- [6] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks : a survey,” *Computer Networks (2002)*, vol. 38(4), pp. 393–422, 2002. (Cité en pages 2, 12 et 23.)
- [7] J. Hicks, J. Paek, S. Coe, R. Govindan, and D. Estrin, “An easily deployable wireless imaging system,” in *Proceedings of the ImageSense’08*, 2008. (Cité en page 3.)
- [8] I. F. Akyildiz, T. Melonia, and K. R. Chowdhury, “A survey on wireless multimedia sensor networks,” *Computer Networks*, vol. 51(4), pp. 921–960, 2007. (Cité en page 3.)
- [9] A. Makhoul, R. Saadi et C. Pham, “Surveillance vidéo sur réseaux de capteurs sans fils : ordonnancement adaptatif avec prise en compte de la criticité,” *14e CFIP, Strasbourg, France*, Octobre 2009. (Cité en pages 5 et 36.)

- [10] A. Makhoul, R. Saadi, and C. Pham, "Risk management in intrusion detection applications with wireless video sensor networks," in *IEEE WCNC*, 2010. (Cité en pages 5 et 36.)
- [11] C. Pham, A. Makhoul, and R. Saadi, "Risk-based adaptive scheduling in randomly deployed video sensor networks for critical surveillance applications," *JNCA*, vol. 34, pp. 783–795, 2011. (Cité en pages 5 et 36.)
- [12] C. Pham, "Scheduling randomly-deployed heterogeneous video sensor nodes for reduced intrusion detection time," in *IEEE 12th ICDCN*, 2011. (Cité en pages 5 et 36.)
- [13] C. Pham et A. Makhoul, "Performance study of multiple cover-set strategies for mission-critical video surveillance with wireless video sensors," *IEEE WiMob 2010, Canada*, October 2010. (Cité en pages 5, 6, 36 et 37.)
- [14] C. Pham, "Communication performance of low-resource sensor motes for data-intensive applications," in *Proceedings of the IFIP Wireless Days International Conference (WD'2013)*, 2013. (Cité en page 16.)
- [15] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor networks survey," *Computer Networks (2008)*, vol. 52, pp. 2292–2330, 2008. (Cité en pages 16 et 88.)
- [16] S. Guo and T. D. C. Little, "A video delivery in wireless sensor networks," *MCL Technical Report No. 01-29-2010, Department of Electrical and Computer Engineering, Boston University*, pp. 239–260, 2010. (Cité en page 17.)
- [17] S. Soro, W. Heinzelman, "A survey of visual sensor networks," *Advances in Multimedia*, vol. 2009, no. ID 640386, p. 21, May 2009. (Cité en page 17.)
- [18] M. Radi, B. Dezfouli, K.A. Bakar et M. Lee, "Multipath routing in wireless sensor networks : Survey and research challenges," *Sensors*, pp. 650–685, 2012. (Cité en page 17.)

- [19] J. Y. Teo, Y. Ha, and C. K. Tham, "Interference-minimized multipath routing with congestion control in wireless sensor network for high-rate streaming," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 7 (9), 2008. (Cité en page 18.)
- [20] Z. Wang and J. Zhang, "Interference aware multipath routing protocol for wireless sensor networks," in *Proceedings of the IEEE GLOBECOM Workshop on Ubiquitous Computing Networks*, 2010, pp. 1696–1700. (Cité en page 18.)
- [21] S. Li, R. K. Neelisetti, C. Liu, S. Kulkarni, and A. Lim, "An interference-aware routing algorithm for multimedia streaming over wireless sensor networks," *International Journal of Multimedia & Its Applications*, vol. 2, No. 1, pp. 10–30, 2010. (Cité en page 18.)
- [22] A. A. Abassi and M. Younis, "A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks," *Computer Communications*, vol. 30, pp. 2826–2841, 2007. (Cité en page 18.)
- [23] L. Cobo, A. Quintero, and S. Pierre, "Ant-based routing for wireless multimedia sensor networks using multiple qos metrics," *Computer Networks*, vol. 54, pp. 2991–3010, 2010. (Cité en page 18.)
- [24] D. Rosario, R. Costa, H. Paraense, K. Machado, E. Cerqueira, T. Braun, and Z. Zhao, "A hierarchical multi-hop multimedia routing protocol for wireless multimedia sensor networks," *Networks Protocols and Algorithms*, vol. 2, No. 4, pp. 44–63, 2012. (Cité en page 18.)
- [25] D. Rosario, R. Costa, K. Machado, E. Cerqueira, and T. Braun, "A smart multi-hop hierarchical routing protocol for efficient video communication over wireless multimedia sensor networks," in *Proceedings of the 2nd IEEE International Workshop on Smart Communication Protocols and Algorithms, ICCWS - SCPA*, 2012. (Cité en page 18.)
- [26] I. T. Almalkawi, M. G. Zapata, and J. N. Al-Karaki, "A cross-layer-based clustered multipath routing with qos-aware scheduling for wireless multimedia sensor networks," *IJDSN*, 2012. (Cité en pages 18 et 42.)

- [27] A. Wadaa, S. Olariu, L. Wilson, M. Eltoweissy, and K. Jones, "Training a wireless sensor network," *Mobile Networks and Applications*, vol. 10, pp. 151–168, 2005. (Cité en pages 19 et 88.)
- [28] A. M. Kermarrec, A. Mostefaoui, M. Raynal, G. Tredan, and A. Viana, "Large-scale networked systems : from anarchy to geometric self-structuring," *Technical report, Department of Computer Science, Technion*, 2006. (Cité en page 19.)
- [29] R. Friedman and G. Kliot, "Location services in wireless ad hoc and hybrid networks : a survey," *Technical report 1876, IRISA, Universite de Rennes*, 2007. (Cité en page 19.)
- [30] J. Hightower and G. Borriella, "Location systems for ubiquitous computing," *IEEE Computer*, vol. 34(8), pp. 57–66, 2001. (Cité en page 19.)
- [31] J. Champ and V. Boudet, "Adnl-angle : accurate distributed node localization for wireless sensor networks with angle of arrival information," *Proc. ADHOC-NOW'10*, pp. 177–190, 2010. (Cité en pages 19 et 63.)
- [32] G. Han, H. Xu, T. Q. Duong, J. Jiang, and T. Hara, "Localization algorithms of wireless sensor networks : a survey," *Telecommunication Systems (2013)*, vol. 52, pp. 2419–2436, 2013. (Cité en page 19.)
- [33] K. Heurtefeux and F. Valois, "Localisation collaborative pour les réseaux de capteurs," in *Proceedings of CFIPâ08*, vol. 5804, 2008, pp. 102–115. (Cité en page 19.)
- [34] K. Y. Cheng, K. S. Lui, and V. Tam, "Localization in sensor networks with limited number of anchors and clustered placement," in *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC)*, 2007, pp. 4425–4429. (Cité en page 19.)
- [35] L. Shu, Y. Zhang, L. T. Yang, M. Hauswirth, and N. Xiong, "Tpgf : geographic routing in wireless multimedia sensor networks," *Telecommunication Systems*, vol. 44, Issue 1-2, pp. 79–95, 2010. (Cité en pages 19 et 21.)

- [36] L. Zhang, M. Hauswirth, L. Shu, V. Reynolds, and G. Han, "Multi-priority multi-path selection for video streaming in wireless multimedia sensor networks," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5061, Issue 1-2, pp. 439–452, 2008. (Cité en pages 19 et 22.)
- [37] L. Moraru, P. Leone, S. Nikolettseas, and J. Rolim, "Near optimal geographic routing with obstacle avoidance in wireless sensor networks by fast-converging trust-based algorithms," in *Proceedings of the 3rd ACM Workshop on QoS and security for wireless and mobile networks, Q2SWinet 07*, Oct. 2007, pp. 31–38. (Cité en pages 19 et 20.)
- [38] S. Medjah, T. Ahmed, and F. Krief, "Agem : Adaptative greedy-compass energy-aware multipath routing protocol for wmsns," *IEEE CCNC*, 2010. (Cité en pages 19, 22 et 47.)
- [39] M. Chen, V. Leung, S. Mao, and Y. Yuan, "Directional geographical routing for real-time video communications in wireless sensor networks," *COMCOM*, vol. 30, no. 17, pp. 3368–3383, 2007. (Cité en pages 19, 23, 49, 66 et 70.)
- [40] S. Medjah, T. Ahmed, and A. Asgari, "Streaming multimedia over wmsns : an online multipath routing protocol," *International Journal on Sensor Networks (IJSNet)*, vol. 11, No. 1, pp. 10–21, 2012. (Cité en pages 19 et 22.)
- [41] F. Huc, A. Jarry, P. Leone, L. Moraru, S. Nikolettseas, and J. Rolim, "Early obstacle detection and avoidance for all traffic pattern in wireless sensor networks," in *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5804, 2009, pp. 102–115. (Cité en page 20.)
- [42] M. Aissani, A. Mellouk, N. Badache, and B. Saidani, "A novel approach for void avoidance in wireless sensor networks," *International Journal of Communication Systems (IJCS)*, vol. 23(8), pp. 945–962, 2010. (Cité en page 20.)
- [43] F. Yu, S. Park, E. Lee, and S. Kim, "Hole modeling and detour scheme for geographic routing in wireless sensor networks," *Journal of Communication and Networks (JCN)*, pp. 327–336, Aug. 2009. (Cité en page 20.)

- [44] Q. Fang, J. Gao, and L. Guibas, "Locating and bypassing routing holes in sensor networks," *Journal of Mobile Networks and Applications*, vol. 11(2), pp. 187–200, Oct. 2006. (Cité en page 20.)
- [45] A. Jaiswal, S. Rao, and K. Shama, "Application aware energy efficient geographic greedy forwarding in wireless multimedia sensor networks," *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, vol. 2, pp. 222–227, 2012. (Cité en page 22.)
- [46] B. Fu, R. Li, X. Xiao, and C. Liu, "Non-interfering multipath geographic routing for wireless multimedia sensor networks," in *Proceedings of the International Conference on Multimedia Information Networking and Security MINES 09*, vol. 1, 2009, pp. 254–258. (Cité en page 23.)
- [47] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, and M. Srivastava, "Energy-aware wireless microsensor networks," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 19(2), pp. 40–50, 2002. (Cité en page 23.)
- [48] E. Shih, S. Cho, N. Ickes, R. Min, A. Sinha, A. Wang, and A. Chandrakasan, "Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks," in *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile computing and networking. ACM.*, 2001, pp. 272–287. (Cité en page 23.)
- [49] F. Valois, "Auto-organisation de réseaux radio multi-saut," Habilitation à diriger des recherches en Informatique - Réseaux et Télécommunications, ARES (CITI Insa Lyon & INRIA Grenoble Rhône-Alpes), Novembre 2007. (Cité en page 24.)
- [50] Y. Yao and J. Gehrke, "The cougar approach to in-network query processing in sensor networks," *ACM Sigmod Record*, vol. 31(3), pp. 9–18, 2002. (Cité en page 24.)
- [51] H. Wu and A. A. Abouzeid, "Power aware image transmission in energy constrained wireless networks," in *Proceedings of the 7th IEEE Symposium on Computers and Communications*, 2004, pp. 202–207. (Cité en page 24.)

- [52] M. Y. Mowafi, F. H. Awad, E. S. Taqieddin, and O. Q. Banimelhem, "A practice study of jointly exploiting multiple image compression techniques for wireless multimedia sensor networks," *Journal of Communications*, vol. 7, No. 4, pp. 309–320, Apr. 2012. (Cité en page 25.)
- [53] C. Duran-Faundez, V. Lecuire, and F. Lepage, "Tiny block-size coding for energy-efficient image compression and communication in wireless camera sensor networks," *Signal Processing : Image Communication*, vol. 26, pp. 466–481, 2011. (Cité en page 25.)
- [54] V. Lecuire, L. Makkaoui, and J.-M. Moureaux, "Fast zonal dct for energy conservation in wireless image sensor networks," *Electronics Letters*, vol. 48, 2012. (Cité en pages 25, 33 et 52.)
- [55] R. Wagner, R. Nowak, and R. Baraniuk, "Distributed image compression for sensor networks using correspondence analysis and super-resolution," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*, vol. 1, 2003, pp. 597–600. (Cité en page 27.)
- [56] M. Wu and C. Chen, "Collaborative image coding and transmission over wireless sensor networks," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 16 (2), pp. 149–170, 2007. (Cité en page 27.)
- [57] K. Y. Chow, K. S. Lui, and E. Lan, "Balancing image quality and energy consumption in visual sensor networks," in *Proceedings of the 1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing*, vol. 1, 2006, pp. 1–5. (Cité en page 28.)
- [58] A. Jayashree, G. S. Biradar, and V. D. Mytri, "Energy efficient prioritized multipath qos routing over wmsn," *International Journal of Computer Applications*, vol. 46, No. 17, pp. 33–39, 2012. (Cité en page 28.)
- [59] H. Wu and A. Abouzeid, "Energy efficient distributed image compression in resource-constrained multihop wireless networks," *Computer Communications*, vol. 28 (14), pp. 1658–1668, 2005. (Cité en page 29.)

- [60] V. Lecuire, C. D. Faundez, , and N. Krommenacker, “Energy-efficient transmission of wavelet-based images in wireless sensor networks,” *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2007. (Cité en page 29.)
- [61] C. Duran-Faundez, “Transmission d’images sur les réseaux de capteurs sans fil sous la contrainte de l’énergie,” Ph.D. dissertation, Université Henri Poincaré, Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN), France, Juin 2009. (Cité en page 29.)
- [62] W. Wang, D. Peng, H. Wang, and H. Sharif, “A novel image component transmission approach to improve image quality and energy efficiency in wireless sensor networks,” *Journal of Computer Science*, vol. 3, (5), pp. 353–360, 2007. (Cité en page 29.)
- [63] Z. Jiao, S. Chen, and B. Sun, “Image transmission scheme based on two-hop cluster for wireless sensor networks,” *Journal of Computational Information Systems (2012)*, vol. 8 : 1, pp. 191–198, 2012. (Cité en page 29.)
- [64] Z. Zuo, Q. Lu, and W. Luo, “A two-hop clustered image transmission scheme for maximizing network lifetime in wireless multimedia sensor networks,” *Journal of Computer Communications*, vol. 35, pp. 100–108, 2012. (Cité en page 29.)
- [65] (2014, Avril). [Online]. Available : <http://www.omnetpp.org/> (Cité en page 30.)
- [66] S. B. Mena, “Introduction aux méthodes multicritères d’aide à la décision,” *Biotechnol. Aron. Soc. Environ. 2000 4 (2)*, pp. 83–93, 2000. (Cité en page 41.)
- [67] L. Mendes and J. Rodrigues, “A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks,” *JNCA*, vol. 34, 2011. (Cité en page 42.)
- [68] G. A. Shah, W. Liang, and X. Shen, “Cross-layer design for qos support in wireless multimedia sensor networks,” in *Proceedings of the GLOBECOM*, 2010, pp. 1–5. (Cité en page 42.)

- [69] C. Y. Wan and S. B. Eisenman, “Coda : Congestion detection and avoidance in sensor networks,” in *ACM SenSys*, pp. 266–279, 2003. (Cité en page 42.)
- [70] S. Tanvir, E. Schiller, and A. Duda, “Propagation protocols for network-wide localization based on two-way ranging,” in *IEEE WCNC*, 2010. (Cité en pages 42 et 64.)
- [71] H. F. R. Collins, A. Lipton and T. Kanade, “Algorithms for cooperative multi-sensor surveillance,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 10, 2001. (Cité en page 63.)
- [72] T. Yan, T. He, and J. A. Stankovic, “Differentiated surveillance for sensor networks,” in *SenSys '03 : Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*. New York, NY, USA : ACM, 2003, pp. 51–62. (Cité en page 63.)
- [73] T. He, S. Krishnamurthy, J. A. Stankovic, T. Abdelzaher, L. Luo, R. Stoleru, T. Yan, L. Gu, J. Hui, and B. Krogh, “Energy-efficient surveillance system using wireless sensor networks,” in *MobiSys '04 : Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services*. New York, NY, USA : ACM, 2004, pp. 270–283. (Cité en page 63.)
- [74] S. Oh, P. Chen, M. Manzo, and S. Sastry, “Instrumenting wireless sensor networks for real-time surveillance,” in *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, May 2006. (Cité en page 63.)
- [75] R. Cucchiara, A. Prati, R. Vezzani, L. Benini, E. Farella, and P. Zappi, “Using a wireless sensor network to enhance video surveillance,” *Journal of Ubiquitous Computing and Intelligence*, vol. 1, pp. 1–11, 2006. (Cité en page 63.)
- [76] M. Lu, J. Wu, M. Cardei, and M. Li, “Energy-efficient connected coverage of discrete targets in wireless sensor networks,” *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, vol. 4, no. 3-4, pp. 137–147, 2009. (Cité en page 63.)

- [77] E. Freitas, T. Heimfarth, C. Pereira, A. Ferreira, F. Wagner, and T. Larsen, "Evaluation of coordination strategies for heterogeneous sensor networks aiming at surveillance applications," in *IEEE Sensors*, 2009. (Cité en page 63.)
- [78] M. Keally, G. Zhou, and G. Xing, "Watchdog : Confident event detection in heterogeneous sensor networks," *Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, IEEE*, 2010. (Cité en page 63.)
- [79] A. . Garcia-Sanchez, F. Garcia-Sanchez, and J. Garcia-Haro, "Wireless sensor network deployment for integrating video-surveillance and data-monitoring in precision agriculture over distributed crops," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 75, no. 2, 2011. (Cité en page 63.)
- [80] T. Clausen and P. Jaquet, "Optimized link state routing protocol," in *IETF MANET, RFC 3626*, October 2003. (Cité en page 63.)
- [81] C. S. Chen, Y. Li, and Y. Q. Song, "An exploration of geographic routing with k-hop based searching in wireless sensor networks," *ChinaCom'08*, p. 376â381, Aug. 2008. (Cité en page 63.)
- [82] Y. Li, C. S. Chen, Y. Q. Song, Z. Wang, and Y. Sun, "A two-hop based real-time routing protocol in wireless sensor networks," *Proc. IEEE WFCS*, vol. 5, no. 2, p. 65â74, May. 2008. (Cité en page 64.)
- [83] —, "Enhancing realtime delivery in wireless sensor networks with two-hop information," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 5, no.2, p. 113â122, May. 2009. (Cité en page 64.)
- [84] P. Rezayat, M. Mahdavi, M. Ghasemzadeh, and M. Sarram, "A novel real-time power aware routing protocol in wireless sensor networks," *IJCSNS*, vol. 10, no.4, pp. 300–305, April 2010. (Cité en page 64.)
- [85] Y. Dong, L. Shu, G. Han, M. Guizani, and T. Hara, "Geographic multipath routing in duty-cycled wireless sensor networks : One-hop or two-hop?" *MobiCom 2011*, 2011. (Cité en page 64.)

- [86] (2014, April). [Online]. Available : <http://www.humanoides.fr/2013/03/22/le-robot-utilise-lors-de-lintervention-du-raid-a-toulouse/> (Cité en page 84.)
- [87] J. Reich and E. Sklar, “Robot-sensor networks for search and rescue,” in *Proceedings of the IEEE Int'l Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, 2006. (Cité en page 87.)
- [88] E. B. Hamida, “Modélisation stochastique et simulation des réseaux sans fil multi-sauts,” Ph.D. dissertation, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, France, Septembre 2009. (Cité en page 89.)
- [89] W. Wang, V. Srinivasan, and K. C. Chua, “Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 05)*, 2005, pp. 270–283. (Cité en page 89.)
- [90] Z. M. Wang, S. Basagni, E. Melachrinoudis, and C. Petrioli, “Exploiting sink mobility for maximizing sensor networks lifetime,” in *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 38)*, vol. 9, 09 :287.1, 2005. (Cité en page 89.)
- [91] A. Chakrabarti, A. Sabharwal, and B. Aazhang, “Using predictable observer mobility for power efficient design of sensor networks,” in *Proceedings of the Information Processing in Sensor Networks (IPSN03)*, 2003, pp. 129–145. (Cité en page 90.)
- [92] R. C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette, “Data mules : Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks,” *Ad Hoc Network*, vol. 1, pp. 215–233, 2003. (Cité en page 90.)
- [93] F. Yu, S. Park, E. Lee, and S. H. Kim, “Elastic routing : A novel geographic routing for mobile sinks in wireless sensor networks,” *IET Communications*, vol. 4, pp. 716–727, 2010. (Cité en pages 90 et 92.)
- [94] A. Kinalis, S. Nikolettseas, D. Patroumpa, and J. Rolim, “Biased sink mobility with adaptative stop times for low latency data collection in sensor networks,”

- Information Fusion*, vol. 15, pp. 56–63, 2012. (Cité en pages 90 et 93.)
- [95] A. W. Khan, A. H. Abdullah, M. H. Anisi, and J. I. Bangash, “A comprehensive study of data collection schemes using mobile sinks in wireless sensor networks,” *Sensors 2014*, vol. 14(2), pp. 2510–2548, 2014. (Cité en pages 91, 92 et 96.)
- [96] S. R. Gandham, M. Dawande, R. Prakash, and S. Venkatesan, “Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations,” in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 03)*, vol. 1, 2003, pp. 377–381. (Cité en page 91.)
- [97] M. D. Francesco, S. K. Das, and Anastasi, “Data collection in wireless sensor networks with mobile elements : A survey,” *ACM Trans. Sens. Netw. TOSN*, vol. 8, 2011. (Cité en page 91.)
- [98] L. Shi, B. Zhang, H. T. Mouftah, and J. Ma, “Ddrp : An efficient data-driven routing protocol for wireless sensor networks with mobile sinks,” *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 26, pp. 1341–1355, 2013. (Cité en page 92.)
- [99] T. S. Chen, H. W. Tsai, Y. H. Chang, and T. C. Chen, “Geographic convergecast using mobile sink in wireless sensor networks,” *Comput. Commun.*, vol. 36, pp. 445–458, 2013. (Cité en page 93.)
- [100] B. Tang, J. Wang, X. Geng, Y. Zheng, and J. U. Kim, “A novel data retrieving mechanism in wireless sensor networks with path-limited mobile sink,” *Int. J. Grid Distrib. Comput.*, vol. 5, pp. 133–140, 2012. (Cité en page 93.)
- [101] T. Banerjee, B. Xie, J. H. Jun, and D. P. Agrawal, “Increasing lifetime of wireless sensor networks using controllable mobile cluster heads,” *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 10, pp. 313–336, 2010. (Cité en page 93.)