



Techniques de conservation de l'énergie dans les réseaux de capteurs mobiles : découverte de voisinage et routage

Nouha Sghaier

► To cite this version:

Nouha Sghaier. Techniques de conservation de l'énergie dans les réseaux de capteurs mobiles : découverte de voisinage et routage. Informatique et langage [cs.CL]. Université Paris-Est, 2013. Français. NNT : 2013PEST1194 . tel-01335097

HAL Id: tel-01335097

<https://theses.hal.science/tel-01335097>

Submitted on 21 Jun 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ PARIS-EST

École doctorale Mathématiques et Sciences et Technologies de
l'Information et de la Communication (MSTIC)

T H È S E

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS-EST

Spécialité : INFORMATIQUE

Présentée par

Nouha SGHAIER

**Techniques de conservation de l'énergie dans les
réseaux de capteurs mobiles :
découverte de voisinage et routage**

Soutenue publiquement le 22 Novembre 2013

devant le jury composé de :

Rapporteurs :

Maryline CHETTO	-	Université de Nantes
Pascal LORENZ	-	Université de Haute-Alsace

Examineurs :

Noureddine ZERHOUNI	-	Université de Franche-Comté
Jean MARTY	-	Hôpital Henri Mondor Créteil
Brice AUGUSTIN	-	Université Paris-Est Créteil

Directeur :

Abdelhamid MELLOUK	-	Université Paris-Est Créteil
--------------------	---	------------------------------

Table des matières

1	Introduction générale	1
1.1	Contexte général	1
1.2	Motivations et contributions	5
1.3	Structure de la thèse	5
2	Réseaux de capteurs sans fil éco-responsables (Green WSN)	7
2.1	Introduction	7
2.2	Informatique verte (Green computing) : Problématique	8
2.2.1	Définition	8
2.2.2	Motivations et objectifs	9
2.3	Réseaux de capteurs sans fil éco-responsables (Green WSN) .	11
2.3.1	Caractéristiques des RCsF	11
2.3.2	RCsF éco-responsables : Objectifs	13
2.4	Techniques de réduction de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil	15
2.4.1	Formes de dépense d'énergie	15
2.4.2	Sources de surconsommation d'énergie	17
2.4.3	Méthodes de conservation d'énergie	18
2.4.3.1	Duty cycling	18
2.4.3.2	Approches orientées données	23
2.4.3.3	Mobilité	24
2.4.3.4	Discussion	25
2.5	Réseaux de capteurs avec récupération d'énergie ambiante . .	27
2.5.1	La récupération de l'énergie	27
2.5.2	Sources de récupération de l'énergie	29
2.5.3	Architectures des systèmes à récupération d'énergie . .	30
2.5.3.1	Architecture Récolter-Utiliser	31
2.5.3.2	Architecture Récolter-Stocker-utiliser	31
2.5.4	Applications des réseaux de capteurs à récupération d'énergie	33
2.5.4.1	Réseaux de capteurs avec récupération d'énergie solaire	33
2.5.4.2	Réseaux de capteurs avec récupération d'énergie piézoélectrique	34
2.5.4.3	Capteurs RFID	34
2.6	Conclusion	34

3	Routage dans les réseaux opportunistes	37
3.1	Introduction	37
3.2	Routage dans les réseaux de capteurs	38
3.2.1	Défis de routage	38
3.2.2	Critères de performances des protocoles de routage	39
3.3	Notion de durée de vie d'un réseau	40
3.3.1	Durée de vie basée sur le nombre de nœuds vivants	40
3.3.2	Durée de vie basée sur la couverture	41
3.3.3	Durée de vie basée sur la connectivité	42
3.3.4	Durée de vie basée sur des les exigences de qualité de service	43
3.4	Réseaux tolérants aux retards	43
3.4.1	Présentation	43
3.4.2	Fonctionnement	46
3.4.2.1	Mode de communication Store-and-Forward	46
3.4.2.2	Couche Bundle	47
3.4.3	Architecture de référence DTNRG	48
3.4.4	Types de contact	51
3.4.5	Techniques de gestion des files d'attente	52
3.5	Routage dans les DTN	53
3.5.1	Objectif	53
3.5.2	Taxonomie	56
3.5.2.1	Approches basées sur la réplication	57
3.5.2.2	Approches basées sur les connaissances	58
3.5.2.3	Approches hybrides	61
3.5.3	Synthèse	61
3.6	Conclusion	65
4	Techniques de dimensionnement de la phase de découverte de voisinage	67
4.1	Introduction	67
4.2	Protocoles de découverte de voisinage économes en énergie	68
4.2.1	Motivation	68
4.2.2	Etat de l'art	69
4.3	Probing Period Modulation by Battery Monitoring (PPM-BM)	71
4.3.1	Présentation	71
4.3.2	Evaluation des performances	74
4.3.2.1	Paramètres de simulation	74
4.3.2.2	Métriques de performance	76
4.3.2.3	Résultats de simulation	76

4.4	Expected Connectivity-based Neighbor Discovery protocol (ECoND)	80
4.4.1	Présentation	80
4.4.2	Evaluation des performances	83
4.4.2.1	Paramètres de simulation	83
4.4.2.2	Métriques de performances	84
4.4.2.3	Résultats de simulation	84
4.5	Conclusion	86
5	Routage économe en énergie dans les réseaux de capteurs mobiles	89
5.1	Introduction	89
5.2	Maximisation de la durée de vie du réseau	90
5.3	Motivation	92
5.4	EXLIOSE : Un protocole de routage opportuniste pour maximiser la durée de vie du réseau	93
5.4.1	Modèle du réseau utilisé	94
5.4.2	Modèle d'énergie utilisé	94
5.4.3	Métrique de routage	95
5.4.3.1	Probabilité de rencontre	95
5.4.3.2	Estimation de l'énergie résiduelle	96
5.4.3.3	Energy Shortage Cost (ESC) : Coût de pénurie d'énergie	98
5.4.3.4	Stratégie de transfert	99
5.5	Evaluation des performances	99
5.5.1	Métriques de performances	99
5.5.2	Scénarios de simulation	100
5.5.3	Résultats et discussion	100
5.5.3.1	Variation de la densité des nœuds	100
5.5.3.2	Variation du débit des nœuds sources	103
5.6	Implémentation	106
5.6.1	Matériel	106
5.6.2	Scénarios de test	107
5.6.3	Evaluation des performances	107
5.7	Conclusion	111
6	Conclusion générale et perspectives	113
6.1	Contributions	113
6.2	Perspectives	115
	Bibliographie	121

Table des figures

1.1	Architecture d'un nœud capteur et exemple d'un nœud type Micaz [1]	2
1.2	Un réseau de capteurs multi-sauts	3
2.1	Un exemple de réseau de capteurs	12
2.2	Rayons de communication et de sensation d'un capteur [2] . .	13
2.3	Les techniques de conservation d'énergie	26
2.4	Les composantes d'un nœud capteur à récupération d'énergie ambiante	29
2.5	Les architectures des systèmes de récupération d'énergie . . .	32
3.1	Architecture DTN	49
3.2	Exemple de réseaux DTN [3]	50
3.3	Flux normal de données de S à D suivant le chemin P	55
3.4	Le nœud Y disparaît et ainsi le chemin P	55
3.5	Exemple de connexion d'un village isolé [4]	59
4.1	L'énergie moyenne consommée par les protocoles Prophet et Prophet avec PPM-BM	77
4.2	L'énergie moyenne consommée par les protocoles Epidemic et Epidemic avec PPM-BM	78
4.3	L'énergie moyenne consommée par les protocoles MaxProp et Maxprop avec PPM-BM	80
4.4	L'énergie moyenne consommée par les protocoles Prophet, Prophet avec PPM-BM et Prophet avec ECoND	85
4.5	L'énergie moyenne consommée par les protocoles Epidemic, Epidemic avec PPM-BM et Epidemic avec ECoND	86
4.6	L'énergie moyenne consommée par les protocoles MaxProp, MaxProp avec PPM-BM et Maxprop avec ECoND	87
5.1	La relation entre les quantités d'énergie consommée et résiduelle au niveau des nœuds capteurs	93
5.2	Le pseudo-code du module de calcul de l'énergie résiduelle au niveau des nœuds capteurs	97
5.3	Durée de vie en fonction de la densité des nœuds	101
5.4	L'énergie résiduelle moyenne en fonction de la densité des nœuds	102
5.5	L'écartype de l'énergie résiduelle en fonction de la densité des nœuds	103

5.6	Le taux de livraison de messages en fonction de la densité des nœuds	104
5.7	Durée de vie en fonction de la taille des messages	105
5.8	L'énergie résiduelle moyenne en fonction de la taille des messages	106
5.9	L'écartype de l'énergie résiduelle en fonction de la taille des messages	107
5.10	Le taux de livraison de messages en fonction de la taille des messages	108
5.11	Maquette de Micaz embarqués sur des circuits de trains	108
5.12	Schéma de déploiement des capteurs Micaz	109
5.13	Taux de messages délivrés dans un réseau de capteurs fixes . .	110
5.14	Taux de messages délivrés dans un réseau de capteurs fixes . .	110
6.1	Plateforme dédiée à l'application médicale de surveillance des patients	116
6.2	Aperçu de l'interface graphique CHU	116

Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques des sources d'énergie	30
3.1	Comparaison des performances des protocoles de l'état de l'art	64
4.1	Les paramètres de simulation	75
4.2	Les paramètres d'énergie et des périodes de découverte des voisins	76
4.3	Les taux de livraison et d'overhead pour les six protocoles étudiés pour des durées de simulations de 24h	79
4.4	Les taux de livraison et d'overhead pour les six protocoles étudiés pour des durées de simulations de 10 jours	79
4.5	Les paramètres de simulation de la technique ECoND	83
4.6	Les paramètres d'énergie et des périodes de découverte des voisins pour la simulation de la technique ECoND	84
4.7	Les taux de livraison et d'overhead pour les six protocoles étudiés	88
5.1	Principales caractéristiques des Micaz	109

Introduction générale

Sommaire

1.1	Contexte général	1
1.2	Motivations et contributions	5
1.3	Structure de la thèse	5

1.1 Contexte général

A l'heure où les communications sans fil se sont imposées de façon indéniable, et où les réseaux sans fil connaissent un essor fulgurant, de nouvelles applications de ces technologies apparaissent sans cesse. Les progrès constants dans le monde des communications sans fil apportent aux utilisateurs finaux de nouveaux services avec des caractéristiques jamais attendues dans le passé. Néanmoins, ils apportent également de nouveaux défis à relever.

Un problème majeur à résoudre est la croissance rapide de la consommation d'énergie dans les Technologies d'Information et des Communications (TIC) en général et dans les réseaux sans fil en particulier. La maîtrise de la consommation d'énergie est devenue un enjeu majeur pour les industries, et ceci pour des raisons économiques, environnementales et de marketing. Si cette préoccupation a une forte influence sur les concepteurs électroniciens et les technologies de l'information et de la communication, le domaine des réseaux est particulièrement concerné. En effet, la consommation d'énergie des réseaux est estimée par le plan d'action mondial au tiers de la consommation mondiale des TICs. Ces derniers consomment 2 à 10% de la puissance mondiale et on s'attend à ce que cette consommation croisse rapidement pour atteindre peut-être le double au cours de la prochaine décennie [5] [6].

Par ailleurs, les réseaux sans fil représentent une importante source de consommation d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre, plus de 50% des émissions des TIC [7]. D'où l'idée de concevoir des dispositifs et des protocoles réseaux conscients de la quantité d'énergie qu'ils consomment, afin qu'ils deviennent autonomes et éco-responsables. Au cours des dernières années, de grands efforts ont été consacrés à la réduction des dépenses inutiles d'énergie,

ce qui est généralement connu sous le nom de la « communication verte » ou l'écologisation des technologies et de protocoles de réseaux. La communication verte, en anglais « Green communication » ou encore « Green radio » consiste dans les approches et travaux qui visent à réduire les pollutions et les émissions de CO₂ en limitant la consommation d'énergie des systèmes de communication. Il s'agit d'un concept vaste qui couvre toutes les couches de la pile protocolaire des réseaux, ainsi que les techniques et architectures de réseaux. Nous nous intéressons dans le cadre de cette thèse à la problématique de la communication verte dans les Réseaux de Capteurs sans Fil (RCsF), un type particulier de réseaux sans fil en pleine émergence. Egalement connus sous le nom de WSN (Wireless Sensor Networks) [8], les RCsF sont des réseaux sans infrastructure fixe comprenant des nœuds capables de capter des grandeurs physiques de l'environnement extérieur (par exemple chaleur, humidité, vibrations, température, etc.), transformer ces grandeurs physiques en des grandeurs numériques, les traiter le cas échéant, et transmettre ces données à un nœud central de collecte appelé « station de base » ou aussi « Puits ». Chaque nœud capteur est composé d'une unité d'acquisition (chargée de transformer une grandeur physique récoltée dans l'environnement en une grandeur numérique), une unité de traitement (pour traiter les informations captées) et une unité de communication (pour effectuer toutes les émissions et réceptions des données sur le medium sans fil). Ces trois modules sont alimentés par une batterie. L'architecture d'un nœud capteur est illustrée dans la figure 1.1.

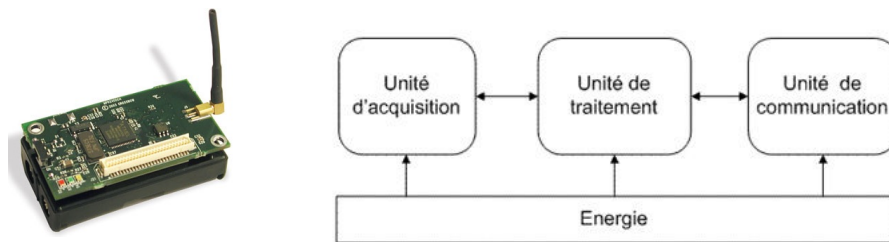


FIGURE 1.1 – Architecture d'un nœud capteur et exemple d'un nœud type Micaz [1]

Les nœuds capteurs sont de petites tailles, à faible coût, contraints en énergie, communiquant à courtes distances et s'auto-organisant en un réseau

sans fil multi-sauts (figure 1.2).

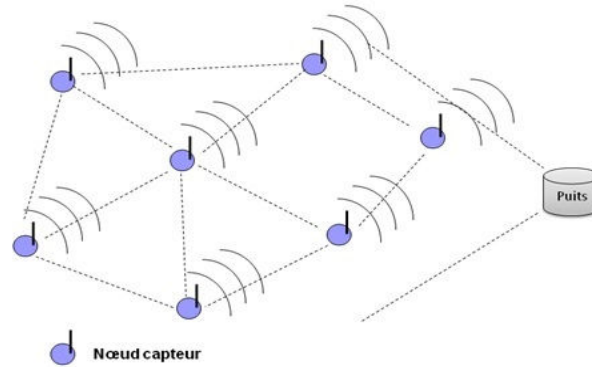


FIGURE 1.2 – Un réseau de capteurs multi-sauts

Les RCsF partagent avec leurs prédécesseurs, appelés MANET (pour Mobile Ad hoc NETworks), plusieurs propriétés, à savoir l'absence d'infrastructure et les communications sans fil. Néanmoins, ils ont pu se démarquer des MANET et attirer un nombre croissant d'industriels vu leur apport concret. Les premières applications des RCsF étaient dans le domaine militaire. Aujourd'hui, les RCsF sont présents dans des domaines d'applications variés. Citons à titre d'exemples les applications environnementales (détection de feu de forêt, repérage des mouvements d'animaux, etc.), les applications médicales (repérage et surveillance des patients dans les hôpitaux, etc.) et autres.

Dans la plupart des applications envisagées pour les réseaux de capteurs, la diffusion des données se fait sur des surfaces relativement grandes. Cependant, les nœuds capteurs ont généralement une portée radio insuffisante pour former un réseau totalement connecté en permanence [8]. Le réseau sera donc divisé en plusieurs partitions (des topologies indépendantes et non connectées) qui sont incapables de transférer directement des informations d'une partition à l'autre. Pour certains réseaux, ceci pourrait ne pas causer de problèmes, car il peut y avoir différentes stations de base (Puits) qui reçoivent les informations provenant de leurs partitions respectives. Pour d'autres, un tel déploiement de stations de base peut être impossible ou peu réaliste. Dans de tels cas, la mobilité des nœuds apparaît comme une solution possible. Lorsque quelques nœuds sont mobiles (ou la totalité des nœuds sont mobiles), de nouvelles possibilités de communication sont créées entre les partitions du réseau autrement isolées. Dans certaines applications, comme la surveillance de la faune ou les applications médicales de monitoring, la mobilité peut faire partie de la spécification

de l'application elle-même puisque les sujets à surveiller sont mobiles. Ainsi, prendre avantage de cette caractéristique semble être un choix logique. Dans cette thèse, nous nous intéressons aux applications des réseaux de capteurs impliquant une mobilité, dans lesquelles quelques ou tous les capteurs sont attachés à des sujets mobiles. Les applications médicales de suivi des patients sont particulièrement considérées. Nous nous concentrons ainsi sur les réseaux de capteurs mobiles et nous nous intéressons aux défis d'énergie et de routage dans ces réseaux.

En revanche, l'exploitation de la mobilité des nœuds induit un défi supplémentaire : les liens de communication entre les nœuds sont désormais intermittents ; ils sont dits opportunistes. Le routage dans un réseau à connectivité intermittente implique de remettre, sans cesse, en question les chemins de routage qui sont affectés par la topologie volatile du réseau. En effet, la topologie d'un réseau constitué d'équipements mobiles peut varier en continu. Un chemin de bout en bout exploitable à un moment précis entre deux nœuds quelconques ne sera plus nécessairement disponible quelques instants plus tard [9]. Cette situation relève du domaine des réseaux tolérants aux retards (Delay Tolerant Networks, DTN). Bien que plusieurs travaux se sont intéressés au routage dans les réseaux DTN [10] [11], [12], [13], leur application aux réseaux de capteurs mobiles présente des spécificités supplémentaires qui doivent être soigneusement prises en considération.

En raison des caractéristiques intrinsèques des RCsF, telles que leur petite taille, les ressources limitées de calcul et de traitement et la capacité limitée des batteries, la gestion d'énergie devient donc une préoccupation de premier ordre. La majorité des travaux sur les réseaux de capteurs s'intéressent à la réduction de la consommation énergétique ou du moins sa rationalisation [14]. En effet, comme la plupart des nœuds capteurs fonctionnent avec des piles ayant une durée de vie limitée et relativement courte, l'approvisionnement en énergie est la contrainte clé dans les réseaux de capteurs. Quand un capteur est appauvri en énergie, il ne peut plus assurer son rôle sauf si la source d'énergie est réapprovisionnée.

La consommation énergétique est donc la contrainte clé dans les réseaux de capteurs, elle transcende tous les travaux depuis le niveau le plus bas (physique), jusqu'au niveau application (exploitation des données) [14]. Compte tenu du compromis à faire entre maintenir une performance élevée du réseau et économiser sa consommation en énergie, la détermination des techniques efficaces pour limiter la consommation d'énergie du réseau est un véritable défi.

C'est dans cette optique que s'inscrivent les travaux présentés dans ce manuscrit.

1.2 Motivations et contributions

Cette thèse vise à contribuer à l'état de l'art dans les protocoles de routage opportuniste spécifiquement conçus pour une utilisation dans les RCsF. Le routage dans les réseaux de capteurs, comme indiqué précédemment, présente toujours des exigences et contraintes spécifiques à l'application, et il est presque impossible de concevoir un bon algorithme d'usage général. La plupart des protocoles existants ne sont pas entièrement compatibles avec les caractéristiques de la plupart des réseaux de capteurs et les exigences des applications pour lesquelles ils sont conçus.

Cette thèse définit un scénario cible réaliste à savoir les applications des réseaux de capteurs mobiles, et propose une solution qui peut être utilisée de manière efficace sans compromettre sa simplicité et, par conséquent, sa faisabilité. Elle comporte deux volets qui représentent les deux objectifs majeurs dans les RCsF. Le premier, qui fait l'objet du chapitre 4, porte sur les techniques de conservation de l'énergie au niveau des nœuds capteurs en agissant sur la quantité d'énergie consommée dans la communication entre capteurs. Le second volet de la thèse traite de la problématique de routage dans les RCsF mobiles à connectivité intermittente. Dans le chapitre 5, nous nous intéressons à la conception d'un protocole de routage qui vise à maximiser la durée de vie du réseau. Ayant une quantité d'énergie initialement déployée au niveau des nœuds, nous proposons de la conserver le plus longtemps possible en partageant la charge entre les différents nœuds.

Les contributions de cette thèse sont donc les suivantes :

1. Deux approches de dimensionnement de la période de découverte de voisinage dans les RCsF opportunistes,
2. Un protocole de routage qui étend la durée de vie du réseau basé sur le partage de charge entre les nœuds mobiles,

1.3 Structure de la thèse

Ce manuscrit s'articule autour de six chapitres :

Le **second chapitre** est consacré à la présentation des réseaux de capteurs sans fil éco-responsables et les techniques de communication verte dans ces réseaux. D'abord, nous définissons le concept de « communication verte » et nous présentons ses objectifs. Ensuite, nous exposons les caractéristiques des RCsF et les objectifs de la communication verte dans ces réseaux. Enfin, nous dressons un état de l'art des techniques de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs.

Dans le **troisième chapitre**, nous abordons la problématique de routage dans les RCsF opportunistes. Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons le fonctionnement et les caractéristiques des réseaux opportunistes ou réseaux tolérants aux retards (DTN). Dans la deuxième partie, nous nous intéressons à la problématique de routage dans les réseaux de capteurs mobiles à connectivité intermittente. Ces derniers représentent un type particulier des réseaux opportunistes. Ainsi, nous détaillons les protocoles de routage les plus connus dans les réseaux opportunistes puis dans les réseaux de capteurs et discutons leur application dans le contexte de la thèse.

Dans le **quatrième chapitre**, nous proposons deux nouvelles approches de conservation de l'énergie de communication dans les réseaux de capteurs opportunistes par le dimensionnement de la période de découverte de voisins. Nous présentons tout d'abord la première contribution PPM-BM qui consiste à dimensionner la fréquence de découverte de voisins en fonction de l'énergie résiduelle des nœuds. Ensuite, nous détaillons notre deuxième contribution ECoND qui propose de contrôler la fréquence de découverte de voisinage en fonction de la connectivité prévue entre les nœuds. Enfin, nous évaluons ces deux techniques et nous étudions leur impact sur les performances des protocoles de niveau supérieur, notamment le routage. Les performances de nos algorithmes en termes d'énergie et de routage sont détaillées à travers l'outil de simulation ONE (Opportunistic Network Environment Simulator). Nous évaluons, en particulier, la consommation moyenne d'énergie, le taux de messages livrés et le taux d'overhead induit. Enfin, nous discutons les résultats de simulation obtenus.

Dans le **cinquième chapitre**, nous proposons un protocole de routage économe en énergie et qui vise à maximiser la durée de vie du réseau. Pour ce faire, nous présentons une nouvelle métrique de routage qui consiste à intégrer l'énergie résiduelle des nœuds voisins dans le choix du prochain saut du paquet à router. Nous introduisons dans la première partie du chapitre la métrique et le fonctionnement du protocole de routage. Dans la deuxième partie, nous détaillons l'évaluation de notre protocole et discutons des résultats de simulation obtenus. Nous comparons les performances du protocole EXLIOSE proposé et nous le comparons à ceux de deux protocoles de routage de référence : le protocole PROPHET et un protocole basé sur l'énergie résiduelle. Enfin, nous discutons les résultats de simulation obtenus.

Nous concluons, dans le **sixième chapitre**, en résumant les principaux apports et en présentant les perspectives de recherche futures.

Réseaux de capteurs sans fil éco-responsables (Green WSN)

Sommaire

2.1	Introduction	7
2.2	Informatique verte (Green computing) : Problématique	8
2.2.1	Définition	8
2.2.2	Motivations et objectifs	9
2.3	Réseaux de capteurs sans fil éco-responsables (Green WSN)	11
2.3.1	Caractéristiques des RCsF	11
2.3.2	RCsF eco-responsables : Objectifs	13
2.4	Techniques de réduction de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil	15
2.4.1	Formes de dépense d'énergie	15
2.4.2	Sources de surconsommation d'énergie	17
2.4.3	Méthodes de conservation d'énergie	18
2.5	Réseaux de capteurs avec récupération d'énergie ambiante	27
2.5.1	La récupération de l'énergie	27
2.5.2	Sources de récupération de l'énergie	29
2.5.3	Architectures des systèmes à récupération d'énergie	30
2.5.4	Applications des réseaux de capteurs à récupération d'énergie	33
2.6	Conclusion	34

2.1 Introduction

La maîtrise de la consommation d'énergie est devenue un enjeu majeur pour les industries et le domaine des réseaux est particulièrement concerné. En effet, les infrastructures de réseaux impliquent des machines de haute performance et s'appuient, donc, sur des appareils puissants, qui ont besoin de

climatisation pour maintenir leur fonctionnement qui, elle, est consommatrice d'énergie. En outre, les réseaux sans-fil sont responsables de plus de 50% des émissions de gaz à effet de serre dans les TIC [7]. Au cours des dernières années, de grands efforts ont été consacrés à la réduction des dépenses inutiles d'énergie, ce qui est généralement connu sous le nom de la « communication verte » ou l'écologisation des technologies et de protocoles de réseaux. Nous nous intéressons dans le cadre de cette thèse à la réduction des dépenses énergétiques des réseaux de capteurs sans fil. Ce chapitre est organisé comme suit : nous introduirons dans la première section la problématique liée à la « communication verte » et les enjeux engendrés. Dans la deuxième section, nous définissons le concept de « communication verte » pour les réseaux de capteurs sans fil. La troisième section sera consacrée à détailler les différentes techniques de conservation d'énergie dans ces réseaux. Enfin, nous présenterons les réseaux de capteurs à récupération d'énergie ambiante qui constituent la nouvelle génération de réseaux de capteurs s'inscrivant dans le cadre de la « communication verte ».

2.2 Informatique verte (Green computing) : Problématique

2.2.1 Définition

San Murugesan [15] définit le domaine de l'informatique verte ou « éco-responsable » comme « l'étude et la pratique de la conception, la fabrication, l'utilisation et la disposition des ordinateurs, des serveurs et sous-systèmes associés tels que les moniteurs, les imprimantes, les périphériques de stockage, les réseaux et systèmes de communication - avec efficience et efficacité en diminuant les agressions qu'elles pourraient faire subir à l'environnement au cours de leurs cycles de vie ».

La communication verte, en anglais « Green communication » ou encore « Green radio » consiste dans toutes les approches et travaux qui visent à réduire les pollutions et les émissions de CO₂ en limitant la consommation d'énergie des systèmes de communication. Il s'agit d'un concept vaste qui couvre toutes les couches de la pile protocolaire des réseaux, ainsi que les techniques et architectures de réseaux.

D'un **point de vue environnemental**, l'objectif de la communication verte est de réduire les émissions de CO₂. Une première étape évidente dans cette direction est d'utiliser autant que possible les énergies renouvelables dans les TIC. De plus, une autre piste triviale est de concevoir des composants de faible puissance, capable d'offrir le même niveau de performances [16].

D'un **point de vue économique**, le marché mondial de l'énergie se caractérise par des prix volatiles et variables dans le temps. L'informatique éco-responsable est une préoccupation des centres d'exploitation, pour qui la facture énergétique augmente fortement (le double entre 2000 et 2005 [17]) avec la grande croissance de la puissance de calcul installée. L'enjeu est à la fois économique et sociétal lié à l'image de marque de ces entreprises. Les enjeux financiers de l'informatique éco-responsable sont donc très importants. La variabilité des prix de l'énergie peut être exploitée en déplaçant le calcul où l'énergie a un coût inférieur. Des entreprises, comme Amazon ont opté pour une délocalisation géographique de services [18] afin de réduire les dépenses de fonctionnement liés à l'approvisionnement en énergie. Par conséquent, si les machines physiques peuvent être délocalisées afin de minimiser la consommation mondiale d'énergie, on peut aussi imaginer une délocalisation des services qui pourrait être situés aux endroits optimaux et peuvent se déplacer lorsque les conditions varient en fonction du temps. Un défi technologique énorme se trouve dans l'exécution d'une telle migration de services sans aucune perturbation, et en assurant la sécurité des informations. Ceci permet d'optimiser considérablement le coût de production de l'énergie. Google est aussi parmi les entreprises qui se sont intéressées par l'amélioration de l'efficacité énergétique de ses centres de données. Elle exploite aujourd'hui les centres de données les plus efficaces au monde qui utilisent 50% d'énergie en moins que les centres de données classiques. Elle alimente ses centres de données avec de l'énergie propre et investit également dans des projets d'énergie renouvelable pour alimenter ses installations [19].

Enfin, d'un **point de vue technique**, la gestion éco-responsable de réseaux peut être vue comme une façon de réduire l'énergie exigée pour effectuer une tâche donnée tout en maintenant le même niveau de performance, qui représente le point de vue que nous adopterons dans le reste de ce manuscrit.

2.2.2 Motivations et objectifs

Partout dans le monde, nous assistons à une prise de conscience collective de l'éventuelle dangerosité des gaz à effet de serre (GES) pour notre environnement. Diverses études ont mis en exergue les effets néfastes des émissions de GES et de leurs conséquences sur le changement climatique. Selon un rapport publié par l'Union Européenne [20], une diminution de 15% à 30% du volume des émissions est primordiale avant 2020 pour maintenir une température globale inférieure à 2°C [16].

Par ailleurs, les effets de GES ne sont pas seulement limités à l'environnement, mais ils influent aussi sur l'économie. La réduction des GES permettra, entre autres, de potentiels avantages économiques. En effet, on prévoit que la

réduction d'un tiers des émissions de GES permet de générer un avantage économique plus élevé que l'investissement nécessaire pour atteindre cet objectif [21]. L'objectif de réduire les GES implique de nombreuses branches de l'industrie, y compris les technologies de l'information et de la communication. En effet, le volume des émissions de CO₂ produites par le secteur des TIC, seul, a été estimé à 2% des émissions totales [5]. Pour exemple, les techniques de l'information et de communication consomment 13,5% de l'électricité en France. Elles sont responsables de 5% des émissions de CO₂ du pays [22].

Les TIC représentent ainsi une importante source de consommation d'énergie et d'émissions de GES. D'où l'idée de concevoir des dispositifs et des protocoles réseaux conscients de la quantité d'énergie qu'ils consomment, afin qu'ils puissent être autonomes et éco-responsables (ou verts). L'interaction entre les TICs et le domaine d'énergie devient de plus en plus forte. D'une part, les TIC sont appelées à jouer un rôle clé dans la réduction de la consommation d'énergie dans plusieurs domaines, et en particulier dans ceux où plus d'énergie est dépensée, tels que les transports, les bâtiments et l'industrie manufacturière. D'autre part, les TIC sont en train de devenir un consommateur avide d'énergie, avec un taux de croissance très élevé. En ce qui concerne le premier aspect, une étude récente du projet ICTENSURE [23] estime que les TIC peuvent assurer une réduction de 26% de l'énergie consommée dans le secteur du transport, une réduction allant de 5 à 15% de l'énergie consommée par les bâtiments, et une réduction de 25 à 30% de l'énergie consommée dans l'industrie. Ces économies permettent une réduction de 17 à 22% de l'énergie globale consommée, tous secteurs confondus [24]. Par ailleurs, les TIC devraient optimiser la production, la distribution et la consommation d'énergie grâce au nouveau concept de Smart Grid. Il s'agit d'une appellation du "réseau électrique intelligent" équipé de technologies informatiques et d'automates qui permettent de piloter et communiquer avec ses infrastructures afin d'améliorer l'efficacité énergétique de l'ensemble des mailles du réseau d'électricité [25]. Ce rôle essentiel des TIC dans l'optimisation de la consommation d'énergie a aussi un coût énergétique important puisque l'utilisation généralisée des TIC implique l'activation d'un grand nombre d'équipements, dont la consommation actuelle est estimée par le Plan d'action mondial à 2 à 10% de la puissance mondiale [5]. Environ un tiers de cette consommation est dûe aux réseaux. De similaires estimations ont également été obtenues par d'autres organismes, tels que le Fraunhofer Institut, et l'Union Internationale des Télécommunications. Tandis que la fraction de l'énergie consommée par les TIC d'aujourd'hui n'est pas très élevée, on s'attend à ce qu'elle croisse rapidement pour peut-être doubler au cours de la prochaine décennie [6]. Ces faits ont suscité un vif intérêt des chercheurs dans les deux domaines « des TIC pour l'efficacité énergétique » et « l'efficacité énergétique dans les TIC ».

2.3. Réseaux de capteurs sans fil éco-responsables (Green WSN)

». Bien que la pertinence et l'impact possible des TIC pour l'optimisation de la consommation d'énergie est incontestable, l'importance des efforts de recherche dans le domaine des TIC éco-responsables en général, et des réseaux économes en énergie, en particulier, n'est pas évidente.

Parmi ces projets, nous citons l'initiative lancée par le GreenTouch Alcatel-Lucent Bell Labs [26], un nouveau projet de recherche qui s'est fixé pour objectif de diviser par 1000 la consommation énergétique des réseaux dans les 5 ans à venir, et plusieurs projets de recherche financés par la Commission européenne dans son 7e programme, notamment le Réseau TREND, réseau d'excellence sur l'efficacité énergétique des réseaux [27]. Ce concept vise la réduction de l'énergie ainsi que les coûts de consommation, en mettant l'accent sur l'énergie nécessaire au fonctionnement d'un réseau. Bien que ces projets concernent en majorité l'ensemble du réseau, allant du réseau d'accès jusqu'au terminal de l'utilisateur, une grande partie des études portent sur les réseaux sans-fil qui représentent plus de 50% des émissions de gaz à effet de serre dans les TIC [7].

2.3 Réseaux de capteurs sans fil éco-responsables (Green WSN)

2.3.1 Caractéristiques des RCsF

Un réseau de capteurs sans fil est un ensemble d'unités de traitement embarquées appelées « motes » ou « capteurs » (appelés aussi nœuds du réseau), communiquant via des liens radio. Il s'agit d'un réseau sans infrastructure comprenant des nœuds capables de capter des grandeurs physiques de l'environnement extérieur (chaleur, humidité, vibrations, etc.), transformer les grandeurs physiques captées en des grandeurs numériques, les traiter le cas échéant, et transmettre ces données à un nœud central de collecte appelé « station de base » ou aussi « puits » par l'intermédiaire d'une architecture multi-sauts. Un réseau de capteurs peut être composé d'un grand nombre de nœuds, qui peut atteindre les centaines de milliers, déployés sur un ou plusieurs domaines en vue d'observer un phénomène particulier. Ces nœuds peuvent avoir des positions fixes ou bien être déployés aléatoirement dans la zone de supervision. Ces motes collaborent entre eux pour envoyer les informations collectées sur le phénomène supervisé à la ou les stations de base et envoyer des alertes le cas échéant. Les nœuds « puits » disposent de plus de ressources matérielles et permettent de collecter et stocker les informations issues des différents capteurs. Les motes sont capables de collecter des informations depuis l'environnement extérieur et de les router jusqu'à la station de

base. Cette dernière centralise toutes les données collectées et constitue une passerelle vers une infrastructure externe ou vers le réseau Internet où des utilisateurs peuvent consulter, gérer et analyser les données stockées au niveau du « puits ». Ce processus est illustré dans la figure 2.1. Le nœud capteur (ou

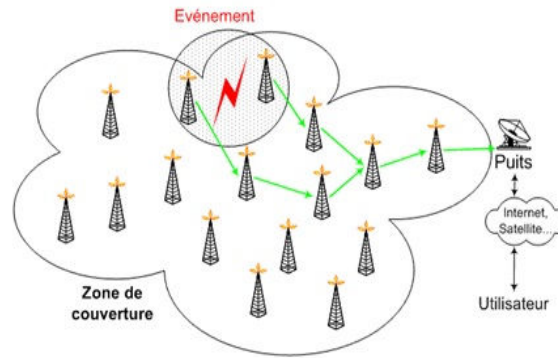


FIGURE 2.1 – Un exemple de réseau de capteurs

aussi le mote) constitue l'élément de base d'un réseau de capteurs sans fil. Il s'agit d'un composant physique composé des quatre unités suivantes :

- - une unité d'acquisition,
- - une unité de traitement,
- - une unité de transmission radio,
- - une unité de génération et de contrôle d'énergie.

L'unité d'acquisition est constituée d'un récepteur, un capteur qui reconnaît la grandeur à mesurer, et d'un CAN (Convertisseur Analogique Numérique) chargé de convertir la grandeur physique captée en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement. Cette dernière comprend un processeur associé généralement à une petite unité de stockage. Cette unité est chargée d'exécuter les protocoles de communication qui assurent la collaboration des nœuds entre eux. Elle peut aussi, dans le but d'alléger la tâche à la station de base, traiter les informations captées. Une fois celles-ci traitées, elles sont envoyées, via l'unité radio, à la station de base. L'unité de transmission radio comprend des circuits de modulation, de démodulation, de filtrage et de multiplexage. Cette unité est attachée à une antenne et permet d'effectuer toutes les émissions et réceptions des données sur le medium sans fil.

L'unité d'acquisition et l'unité de communication sont deux entités fondamentales dans le fonctionnement d'un capteur. Elles définissent deux para-

2.3. Réseaux de capteurs sans fil éco-responsables (Green WSN)13

mètres caractéristiques d'un capteur à savoir le rayon de communication (R_c) et le rayon de sensation (R_s) (appelé aussi rayon de couverture et définit la portée de capture du nœud) [2]. La figure 2.2 montre les zones définies par ces deux rayons pour un capteur A. La zone de communication est la zone où le capteur A peut communiquer avec les autres capteurs. Dans cet exemple, le capteur A peut communiquer avec le capteur B. D'autre part, la zone de détection est la zone dans laquelle le capteur A peut capter l'événement *Evt1*. Dans cet exemple, il s'agit de la zone dans laquelle se trouve le capteur C.

Pour alimenter les composants du capteur, ce dernier comprend une unité de génération et de contrôle d'énergie. Cette unité est constituée généralement d'une batterie et est responsable de la répartition de la quantité d'énergie disponible sur les différents modules du mote afin de réduire ses dépenses en énergie, comme par exemple la mise en veille des composants inactifs. Cette unité est la plus importante dans un mote puisque c'est elle qui affecte la durée de vie d'un réseau de capteurs. Une bonne gestion de l'énergie au niveau d'un nœud capteur permet d'éviter au maximum l'épuisement de son énergie et ainsi étendre sa durée de vie.

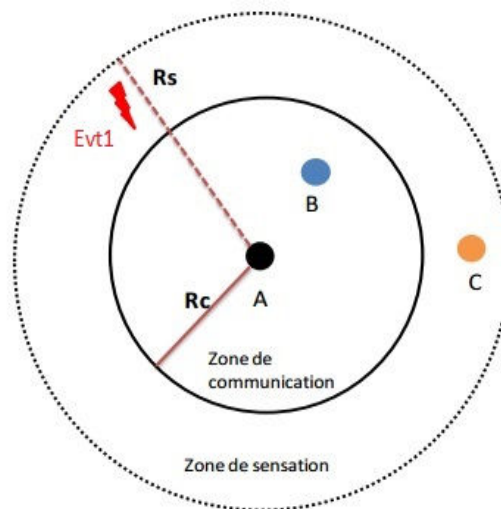


FIGURE 2.2 – Rayons de communication et de sensation d'un capteur [2]

2.3.2 RCsF eco-responsables : Objectifs

Un réseau de capteurs est un réseau de dispositifs embarqués (nœuds capteurs) qui coopèrent pour détecter et recueillir des données pour l'analyse

spécifique d'une application particulière. Les applications de réseaux de capteurs présentent différentes caractéristiques de conception, du type du phénomène supervisé (type de capteur à utiliser), de calcul, de communication de capacité de stockage, de coût, de taille des nœuds, de type de source d'alimentation, de l'architecture de déploiement, etc. Une catégorie d'application typique largement déployée est celle reposant sur des nœuds capteurs alimentés par des batteries. Dans certaines applications, les nœuds capteurs sont déployés dans des endroits difficiles à atteindre ou des endroits où les lignes électriques n'existent pas. La durée de vie d'un nœud capteur dépend donc de la durée de vie des ses batteries. Une durée de vie finie du nœud implique une durée de vie limitée des applications et des coûts supplémentaires pour changer régulièrement les piles. Plusieurs techniques ont été proposées afin de maximiser la durée de vie des nœuds alimentés par les piles. Nous les évoquerons dans la section 2.4. Une autre technique pour résoudre le problème de la durée de vie finie des nœuds capteurs est l'utilisation de la récupération d'énergie. Pour concevoir des réseaux de capteurs sans fil économes en énergie, on doit suivre les trois axes suivants :

1. Réduire au minimum la quantité d'énergie nécessaire au fonctionnement de ces réseaux,
2. Remplacer les batteries par des dispositifs de récupération d'énergie qui collectent l'énergie directement à partir de l'environnement,
3. Réduire au minimum le nombre de capteurs à déployer pour couvrir la zone de supervision

Le premier axe consiste à réduire la quantité d'énergie consommée par les différents modules des nœuds capteurs, ou à utiliser des protocoles MAC économes en énergie. Nous détaillerons cet axe dans la section suivante. Le deuxième axe vise à concevoir des réseaux de capteurs autonomes en énergie. De nouvelles générations de réseaux sont apparues à savoir les réseaux de capteurs sans fil avec récupération d'énergie ambiante, connu sous le nom de « Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP) ». Le troisième axe concerne le déploiement du réseau de capteur. L'optimisation de l'énergie suivant cet axe revient à une problématique d'optimisation du nombre des nœuds déployés. Il s'agit donc d'une problématique de déploiement. Plusieurs techniques dans la littérature permettent de trouver le nombre optimal de nœuds à déployer qui permettent une couverture maximale de la zone de supervision. Cette problématique dépasse le cadre de notre sujet de thèse. Ainsi, elle ne sera pas considérée dans la suite de ce manuscrit. Nous nous intéresserons dans la suite de cette section à détailler les deux premiers axes d'optimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs.

2.4 Techniques de réduction de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Les nœuds capteurs sont généralement alimentés par des batteries. Ils doivent donc gérer judicieusement leur consommation d'énergie pour prolonger la durée de vie des nœuds et la durée d'une application particulière. Les sources de consommation des nœuds capteurs pourraient être « utiles » ou « inutiles ». Nous faisons, dans ce qui suit, un inventaire des sources de consommation des capteurs et nous les classifions en deux catégories « utiles » ou « inutiles ».

2.4.1 Formes de dépense d'énergie

Pour caractériser et quantifier la consommation d'un système de communication, il est nécessaire de prendre en compte tous les éléments ou fonctions nécessitant de l'énergie : le traitement du signal, tant à l'émission qu'à la réception, les transducteurs, les capteurs et tout autre élément intermédiaire. Nous commençons par détailler les formes de dépense d'énergie d'un nœud, « utiles » pour son fonctionnement. Les éléments qui nécessitent de l'énergie pour que les nœuds capteurs fonctionnent normalement sont les suivants :

- Le microcontrôleur MCU (Micro Controller Unit) : Généralement les MCU possèdent différents modes de fonctionnement pour des fins d'optimisation d'énergie. Les trois principaux modes de fonctionnement d'un MCU sont : « actif », « veille » ou « sommeil ». Dans chaque mode, le MCU consomme une certaine quantité d'énergie et même le passage d'un mode de fonctionnement à un autre est consommateur d'énergie. Tenons à titre d'exemple, le microcontrôleur ATmega 128L, que nous trouverons dans les capteurs Micaz, qui consomme $16.5mW$ en mode actif et seulement $3\mu W$ en mode idle [28]. Ainsi, les différents modes de fonctionnement, le temps de transition entre les modes et aussi le temps passé par le MCU dans chaque mode, ont un impact sur la consommation d'un nœud capteur [29].
- La radio : La radio est le composant le plus gourmand en énergie de tous les composants d'un nœud capteur. La radio fonctionne selon quatre modes, à savoir, « transmission », « réception », « veille » ou « sommeil ». Les modes « transmission » et « réception » sont, évidemment, les modes qui consomment le plus d'énergie. Cependant, une observation importante dans la plupart des radios est que la consommation d'énergie en mode « veille » est aussi significative que celle dépensée en mode « réception ». En effet, lorsque la radio est en mode « veille », le nœud est à l'écoute du canal même s'il n'est pas en mode « transmission » ou «

- réception ». Ainsi, il est préférable d'éteindre complètement l'émetteur plutôt que de le laisser en mode veille quand il n'est pas en mode de transmission ou de réception. En plus, une quantité importante d'énergie est consommée lors du passage d'un mode de fonctionnement à un autre.
- Le capteur : Le terme capteur est utilisé ici pour désigner le dispositif capteur ou détecteur, proprement dit, des paramètres physiques. Il s'agit des dispositifs matériels qui transforment l'état d'une grandeur physique observée (comme la température ou la pression) en une grandeur mesurable et utilisable [30]. Le signal analogique continu produit par les capteurs est numérisé par un convertisseur analogique-numérique et transmis au microcontrôleur pour un traitement ultérieur. Ces tâches d'échantillonnage, de conversion des signaux physiques en signaux électriques, de conditionnement des signaux et de conversion analogique/numérique consomment de l'énergie. Nous distinguons trois classes de capteurs : les passifs omnidirectionnels, les passifs directionnels, et les capteurs actifs. Les capteurs passifs détectent les données sans manipuler l'environnement par sondage (comme par exemple un thermomètre, détecteur chimique, détecteur de fumée, pression de l'air, etc.). Ils n'ont pas besoin d'apport d'énergie extérieur pour fonctionner. Ils sont autoalimentés ; la source d'énergie n'est nécessaire que pour amplifier leur signal analogique. Les capteurs actifs, quant à eux, sondent en continu l'environnement, comme par exemple, un sonar ou un radar, et ils nécessitent une source d'énergie pour fonctionner. Les capteurs actifs consomment, ainsi, plus d'énergie que les capteurs passifs. Ce qui explique que ces derniers sont généralement les plus utilisés.

En outre, il existe d'autres formes de dissipation d'énergie dues à l'accès à la mémoire (en lecture ou en écriture). Un autre aspect non négligeable est le phénomène d'autodécharge de la batterie. En effet, cette dernière se décharge d'elle-même et perd de sa capacité au fil du temps [29]. Il est aussi à noter qu'il est difficile de faire une étude quantitative précise des quantités d'énergie consommées par chaque unité du nœud capteur en raison du grand nombre des plateformes commerciales existantes. Cependant, d'après les expériences menées dans [31], la transmission des données est la phase la plus consommatrice d'énergie dans le fonctionnement d'un nœud capteur. En effet, le coût de transmission d'un bit d'information est équivalent au coût nécessaire au calcul d'un millier d'opérations [32]. L'énergie consommée en phase de réception des données, et celle dépensée en période de veille de l'unité de transmission sont approximativement équivalentes. La consommation de l'unité de détection (ou de capture) dépend des types de capteurs utilisés et donc de l'application. Dans de nombreux cas, cette quantité d'énergie est négligeable devant celle consommée par les unités de traitement et, surtout, des

systèmes de transmission.

2.4.2 Sources de surconsommation d'énergie

Nous désignons par surconsommation d'énergie, toute consommation inutile que l'on peut éviter afin d'économiser au maximum l'énergie et augmenter la durée de vie des nœuds capteurs. Les sources de cette surconsommation sont nombreuses ; elles peuvent être engendrées par exemple par le dispositif de détection lorsque celui-ci est mal géré (ceci peut être engendré par exemple par une fréquence d'échantillonnage mal contrôlée) [29], [33]. La surconsommation concerne également la partie communication. En effet, cette dernière est sujette à des phénomènes gourmands en énergie, notamment au niveau de la couche liaison de données où se déroule le contrôle d'accès au support sans fil. Certains de ces phénomènes ont été recensés dans [29], [34], [35], [36], [37] :

- L'écoute à vide (idle listening) : Quand le nœud capteur est en « veille », il est à l'écoute du canal et prêt à recevoir des données. Sa radio est donc en marche, même si le nœud n'est pas vraiment en phase de « réception » des données. Cette phase est coûteuse en termes d'énergie. Ainsi, il est préconisé d'éteindre la radio lorsqu'elle n'est pas sollicitée pour transmettre des données. Néanmoins, la transition de mode de fonctionnement de « veille » en « réception » ou l'inverse, est lui aussi coûteux sur le plan énergétique, il est ainsi préférable de l'envisager de manière « raisonnable ».
- La collision : La collision est la principale raison de surconsommation d'énergie. Ceci arrive lorsqu'un nœud reçoit plus d'un paquet à la fois, ces paquets sont appelés, dans ce cas, collision. Même quand ils ne se heurtent que partiellement, tous les paquets qui provoquent la collision doivent être jetés et retransmis. Cette retransmission induit une surconsommation d'énergie. Eviter les collisions est à la charge des protocoles MAC.
- L'écoute abusive (overhearing) : Ce phénomène se présente quand un nœud reçoit un paquet qui ne lui est pas destiné. Cette situation est pénalisante sur le plan énergétique surtout dans des réseaux denses et à grande charge de trafic.
- L'overhead des paquets de contrôle : Il s'agit des messages de contrôle nécessaires à la transmission de données. La réception, transmission et l'écoute de ses messages consomment de l'énergie donc un nombre minimal de paquets de contrôle doit être utilisé pour effectuer les transmissions de données. Etant donné que les messages de contrôle ne transportent pas vraiment des données, leur envoi fréquent engendre une baisse considérable du débit utile effectif [29].

- L’overmitting : Cette situation se présente quand un nœud envoie un paquet et que sa destination n’est pas prête pour le recevoir.

2.4.3 Méthodes de conservation d’énergie

En se basant sur l’étude, ci-dessus, des sources de dissipation d’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, nous constatons que l’énergie consommée par un capteur est principalement due aux opérations suivantes : la détection, le traitement et la communication [31]. Plusieurs approches sont proposées pour réduire la consommation énergétique dans ces réseaux en économisant la consommation énergétique soit au niveau de la capture, au niveau de traitement ou encore au niveau de la communication. D’une manière générale, nous distinguons trois classes de techniques de conservation d’énergie : Data cycling, approches orientées données, et mobilité [38]. Nous détaillerons dans ce qui suit chaque classe de techniques.

2.4.3.1 Duty cycling

Le Duty cycling agit principalement sur l’activité réseau. L’objectif de cette opération consiste à mettre l’unité de transmission radio en mode « veille » chaque fois que la communication n’est pas requise. Idéalement, la radio devrait être éteinte dès qu’il n’y a plus de données à envoyer/ recevoir, et devrait être reprise dès qu’un nouveau paquet de données arrive. De cette manière, les nœuds alternent des périodes d’activité et de sommeil selon l’activité du réseau. Ce comportement est généralement dénommé duty cycling, et le duty cycle est défini comme étant la fraction de temps pendant laquelle les nœuds sont actifs pendant leur durée de vie.

Comme les nœuds capteurs effectuent des tâches coopératives, ils doivent coordonner leurs instants de Sommeil/Réveil. Un algorithme d’ordonnancement Sommeil/Réveil est ainsi primordial dans toute technique de duty cycling. Il s’agit d’un algorithme distribué basé sur les instants auxquels les nœuds décident d’effectuer la transition de l’état actif à l’état sommeil, et vice-versa. Il permet aux nœuds voisins d’être actifs en même temps, ce qui rend possible l’échange des données, même lorsque les nœuds fonctionnent avec un duty cycle faible (i.e., ils dorment dans la plupart du temps) [38].

Le duty cycling peut être réalisé à travers deux approches différentes et complémentaires : le contrôle de topologie et la gestion d’énergie. D’une part, il est possible d’exploiter la redondance des nœuds, ce qui est typique dans les réseaux de capteurs, et sélectionner de manière adaptative un sous-ensemble minimal de nœuds qui vont rester actifs pour maintenir la connectivité. Les nœuds qui ne sont pas nécessaires pour assurer la connectivité peuvent pas-

ser à l'état sommeil et économiser ainsi l'énergie. La technique qui consiste à trouver le sous-ensemble optimal de nœuds qui assurent la connectivité du réseau est appelée « contrôle de topologie ». Par conséquent, l'idée de base derrière le contrôle de topologie est d'exploiter la redondance du réseau pour prolonger au maximum sa durée de vie. Ceci permet d'augmenter, généralement, la durée de vie par un facteur de deux ou trois par rapport à un réseau dans lequel tous les nœuds sont simultanément actifs [39] [40]. D'autre part, les nœuds actifs (i.e., les nœuds sélectionnés pendant la phase de contrôle de topologie déjà décrite) n'ont pas besoin de maintenir leur radio active en continu. Ils peuvent l'éteindre en absence d'activité réseau, et alternent donc des périodes de Sommeil/Réveil. Le duty cycling effectué sur les nœuds actifs est appelé « gestion d'énergie ». Par conséquent, le contrôle de topologie et de gestion d'énergie sont des techniques complémentaires qui mettent en oeuvre le duty cycling avec une granularité différente. Les techniques responsables de la gestion d'énergie peuvent être subdivisées en deux grandes catégories en fonction de la couche de l'architecture réseau au niveau de laquelle elles sont mises en oeuvre [38]. En effet, elles peuvent être implémentées en tant que protocoles sleep/wakeup indépendants du protocole MAC (Medium Access Control), typiquement au niveau de la couche réseau ou de la couche application, ou strictement intégrées avec le protocole MAC lui-même. Cette dernière approche permet d'optimiser les fonctions d'accès au support en se basant sur le modèle sleep/wakeup utilisé pour la gestion d'énergie. D'autre part, les protocoles sleep/wakeup indépendants permettent une plus grande souplesse car ils peuvent être adaptés selon les besoins de l'application, et peuvent être utilisés avec tout protocole MAC.

2.4.3.1.1 Protocoles de contrôle de topologie Le concept de contrôle de topologie est strictement lié à la présence de la redondance dans le réseau. Les réseaux de capteurs denses ont généralement un certain degré de redondance (qui est défini par le nombre de capteurs couvrant un point donné de la zone de supervision). Dans de nombreux cas, le déploiement des nœuds capteurs se fait aléatoirement à partir d'un avion ou d'une roquette par exemple, ou bien ils peuvent être placés un par un d'une manière déterministe par un humain ou un robot. Par conséquent, il peut être pratique de déployer un certain nombre de nœuds plus que nécessaire pour faire face aux éventuelles défaillances de nœuds survenant pendant ou après le déploiement. Dans de nombreux contextes, il est beaucoup plus facile de déployer initialement un plus grand nombre de nœuds que de redéployer des nœuds supplémentaires en cas de besoin. Un déploiement redondant est ainsi fréquent et plus pratique [38]. Les protocoles de contrôle de topologie visent donc à adapter dynamiquement la topologie du réseau en fonction des besoins de l'application, de

manière à permettre l'exploitation du réseau tout en minimisant le nombre de nœuds actifs et, par conséquent, de prolonger sa durée de vie. Plusieurs critères peuvent être utilisés pour décider quels nœuds activer/désactiver, et à quel moment. À cet égard, les protocoles de contrôle de topologie peuvent être classés selon les deux catégories suivantes : protocoles orientés position (location driven) et protocoles orientés connectivité (connectivity driven) [38].

Les protocoles orientés position se basent sur la localisation des nœuds capteurs pour choisir le moment d'éteindre certains d'entre eux. Parmi ces protocoles, nous listons GAF [41] (Geographical Adaptive Fidelity) et GeRaF (Geographic Random Forwarding) [42], [43]. Ces protocoles requièrent la connaissance des positions des nœuds qui peuvent être obtenues en munissant chaque nœud capteur d'une unité GPS.

Les protocoles orientés connectivité, quant à eux, choisissent d'activer/désactiver certains nœuds tout en assurant la connectivité complète du réseau et la couverture de la zone de détection. Span [44] est un exemple de ces protocoles qui élit d'une façon adaptative des «coordinateurs». Ces derniers restent actifs en permanence et effectuent un routage multi-sauts, tandis que les autres nœuds restent en mode sommeil et se réveillent périodiquement en cas de besoin. Le choix des coordinateurs et leur nombre se font selon des « règles d'admissibilité de coordinateur ». ASCENT [45] (Adaptive Self-Configuring sEnsor Networks Topologies) est un protocole orienté connectivité qui, à la différence de Span, ne dépend pas du protocole de routage. En effet, ASCENT choisit d'activer un nœud sur la base des informations de connectivité et la perte de paquets qui sont mesurées localement par le nœud lui-même.

Les protocoles de contrôle de topologie orientés position exigent l'information de localisation des nœuds. Cette information est généralement obtenue à l'aide des unités GPS embarquées sur les nœuds capteurs. Comme la technologie GPS reste assez chère et consommatrice d'énergie, il est souvent impossible de l'installer sur tous les nœuds. Dans ce cas, il suffirait d'équiper seulement un sous-ensemble limité de nœuds avec un GPS, et déduire l'emplacement des autres nœuds par le biais d'autres techniques de localisation [46], [47]. Il ressort donc que les protocoles orientés connectivité sont généralement préférables, car ils ne nécessitent que des informations tirées à partir de mesures locales. Dans le cas général, comme l'efficacité énergétique des protocoles de contrôle de topologie est étroitement liée à la densité des réseaux, le gain réalisable en termes de durée de vie dépend de la densité réelle du réseau. Il a été montré que les protocoles de contrôle de topologie peuvent généralement augmenter la durée de vie du réseau par un facteur de deux à trois par rapport à un réseau avec des nœuds actifs en permanence [38], [40]. Par ailleurs, les protocoles de contrôle de topologie peuvent être couplés avec d'autres types

de techniques de conservation de l'énergie, tels que celles présentées dans les sections suivantes.

2.4.3.1.2 Protocoles de gestion d'énergie Comme nous l'avons mentionné précédemment, les protocoles de gestion d'énergie se divisent en protocoles sleep/wakeup et d'autres intégrés au niveau MAC.

Les protocoles sleep/wakeup sont classés selon trois grandes catégories [38] :

- Protocoles à la demande : L'idée de base sur laquelle est fondée ce type de protocoles consiste à ce qu'un nœud devrait se réveiller seulement quand son voisin veut communiquer avec lui. Le principal problème associé à ces protocoles est de savoir comment informer le nœud en sommeil qu'un autre nœud est prêt à communiquer avec lui. À cet égard, ces systèmes utilisent généralement plusieurs radios avec différents compromis énergie/performance (i.e. une radio à faible débit et à faible consommation pour la signalisation, et une radio à haut débit mais à plus forte consommation pour la communication des données) [29]. A titre d'exemple, le protocole STEM (Sparse Topology and Energy Management) [48] utilise deux fréquences radio différentes.
- Rendez-vous programmés : cette approche exige que tous les nœuds capteurs se réveillent au même moment. En effet, les nœuds se réveillent périodiquement pour vérifier la présence de communications potentielles. Ensuite, ils retournent au mode sommeil jusqu'à la prochaine date de rendez-vous. L'avantage majeur de cette approche consiste à garantir que tous les voisins d'un nœud qui est réveillé, le soient aussi. D'un autre côté, les approches de rendez-vous planifiées nécessitent la synchronisation des nœuds pour qu'ils se réveillent à la même date. Le problème de synchronisation dans les réseaux de capteurs sans fil suscite l'intérêt de plusieurs travaux de recherche [49] [50]. En effet, les protocoles de synchronisation fonctionnent principalement autour de mesures de date de transmission et de réception de paquets de données afin de déterminer les délais causés par le temps de transmission de la donnée entre l'application émettrice et l'application destinataire de la donnée. Les caractéristiques intrinsèques des RCsF, telles que la capacité limitée de calcul et les temps de propagation non déterministes rendent cette tâche un véritable défi.
- Systèmes asynchrones : les systèmes asynchrones permettent à chaque nœud de se réveiller indépendamment des autres, en garantissant que les nœuds ont toujours des périodes actives qui se chevauchent au sein d'un nombre spécifié de cycles. Random Asynchronous Wakeup (RAW) [51] est un exemple de systèmes sleep/wakeup asynchrones.

Les protocoles du niveau MAC dans les réseaux de capteurs sans fil font l'objet de plusieurs travaux dans la littérature ([52], [53], [34] et [54]). Dans ce qui suit, nous nous intéressons aux protocoles MAC qui implémentent des méthodes de duty cycling pour la gestion de l'énergie. Ces protocoles peuvent être classés en trois catégories : protocoles basés sur TDMA, protocoles avec contention et protocoles hybrides.

- Protocoles MAC basés sur TDMA : Dans les protocoles MAC basés sur TDMA, le temps est divisé en trames et chaque trame est constituée d'un nombre de slots. A chaque nœud est attribué un ou plusieurs slots par trame, selon un algorithme d'ordonnancement. Pendant ces slots, le nœud capteur peut transmettre/recevoir des paquets à partir d'autres nœuds. Dans de nombreux cas, les nœuds sont regroupés en clusters avec un Cluster-Head chargé d'attribuer les slots de temps pour les nœuds du cluster (comme Bluetooth [55] et LEACH [56]). Les protocoles TDMA sont par nature économes en énergie, puisque les nœuds n'activent leur radio que pour certains slots de temps et ils s'endorment le reste du temps. Néanmoins, ces protocoles ne sont pas fréquemment utilisés dans les réseaux de capteurs à cause de leurs inconvénients dans la pratique à savoir leurs problèmes de passage à l'échelle, leur besoin de synchronisation fine et leur sensibilité aux interférences [29].
- Protocoles avec contention : Ces protocoles sont les plus utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil grâce à leur robustesse et leur évolutivité. Ils assurent le duty cycling par une intégration étroite des fonctionnalités d'accès au canal avec une approche sleep/wakeup. La seule différence est que, dans ce cas, l'algorithme sleep/wakeup est dépendant du protocole MAC utilisé. Parmi les protocoles MAC avec contention les plus populaires, nous citons B-MAC [57], S-MAC [34], T-MAC [58] et D-MAC [59]. Ces protocoles garantissent le passage à l'échelle et ont généralement un délai plus faible que celui des protocoles basés sur TDMA. Par contre, leurs dissipations d'énergie sont plus importantes à cause de la contention et des collisions [38].
- Protocoles MAC hybrides : L'idée de base des protocoles MAC hybrides est l'alternance de fonctionnement entre les protocoles TDMA et CSMA, selon le niveau de contention. Ils combinent les points forts des protocoles MAC basés sur TDMA et ceux avec contention tout en compensant leurs faiblesses. Z-MAC [60] est l'un des protocoles MAC hybrides les plus intéressants parce qu'il est robuste en s'adaptant facilement aux changements de topologie et aux problèmes de synchronisation. Z-MAC est implémenté dans TinyOS [61], le système d'exploitation le plus répandu pour les réseaux de capteurs sans-fil.

2.4.3.2 Approches orientées données

Les approches de duty cycling ne prennent pas en compte la nature des données véhiculées dans les réseaux de capteurs. Par conséquent, des approches orientées données pourraient être utiles et plus efficaces en énergie. Ces approches sont classées en deux grandes catégories : des techniques de réduction des données qui visent à réduire les échantillons inutiles, et des méthodes d'acquisition de données efficaces en énergie qui concernent la réduction de l'énergie dépensée par le module de détection (ou le capteur proprement dit) [38].

La catégorie des **techniques de réduction des données** comprend les méthodes de prédiction et d'agrégation des données. La première sous classe de méthodes vise à construire un modèle d'abstraction décrivant le phénomène supervisé [62], [63], [56]. Le modèle peut prédire les valeurs détectées par les nœuds avec une certaine limite d'erreurs. Il existe deux instances de modèles dans le réseau, un modèle pour le Sink et un autre au niveau des nœuds capteurs. Si la précision nécessaire est satisfaite, les requêtes émises par les utilisateurs peuvent donc être évaluées au niveau du Sink sans avoir la nécessité d'obtenir les données exactes à partir des nœuds capteurs. La deuxième sous-classe consiste à l'agrégation des données (par exemple, en calculant une moyenne de certaines valeurs détectées) des nœuds intermédiaires entre le nœud source et le Sink [64].

La deuxième catégorie de **techniques d'acquisition de données efficaces en énergie** vise à réduire la consommation d'énergie du module de détection. Ceci va à l'encontre de l'hypothèse selon laquelle la détection n'a pas une consommation d'énergie significative. En effet, ce module peut, dans certaines applications, consommer plus d'énergie que la radio ou le reste des composants du nœud capteur [33]. Cela est dû principalement à la consommation excessive d'énergie de certains composants du module de détection tels que les transducteurs, les convertisseurs A/N et les dispositifs de capture actifs ou simplement liés à un temps d'acquisition long [29]. Ces techniques ont pour objectif de réduire le nombre d'acquisitions (échantillons de données). Réduire les données prélevées permet de réduire le nombre de communications et donc d'agir sur la consommation du module de détection lui-même et par conséquent la consommation globale du réseau. Ces approches sont classifiées en des techniques d'échantillonnage adaptatif (qui exploitent la corrélation entre les échantillons mesurés et les similitudes pour réduire la quantité des données devant être acquises à partir du transducteur), des techniques d'échantillonnage hiérarchiques (qui supposent l'utilisation de capteurs de types différents et choisissent dynamiquement la classe de capteurs à activer afin d'avoir un compromis entre la précision de la détection et l'économie d'énergie) et des

techniques d'échantillonnage actifs (qui se basent sur des approches de prédiction de données [38]).

2.4.3.3 Mobilité

Au delà du duty cycling et des approches orientées données, la mobilité des nœuds, lorsque cela est possible, peut être une solution efficace pour réduire la consommation d'énergie. En effet, dans un réseau de capteurs statiques, les paquets en provenance des nœuds traversent le réseau vers le Sink en suivant des chemins multi-sauts. Lorsque le Sink est lui même statique, quelques chemins peuvent être plus chargés que d'autres, en fonction de la topologie du réseau et les taux de génération de paquets au niveau des nœuds sources. Généralement, les nœuds proches du Sink sont chargés de transférer un plus grand nombre de paquets et donc verront leur niveau de batteries s'épuiser rapidement. Cela se produira même si des techniques de conservation d'énergie, comme listées ci-dessus, sont mises en place.

Des nœuds collecteurs mobiles, connus sous le nom de Data Mules [65], permettent de réduire la consommation d'énergie. En effet, il s'agit d'appareils mobiles dont nous pouvons contrôler le mouvement pour fournir une alternative à la collecte classique des données à partir des nœuds capteurs dispersés dans l'espace. Les data mules circulent dans la zone de supervision et entrent en communication avec chaque nœud quand il se trouve à sa proximité. Ainsi les nœuds statiques attendront le passage du data mule pour lui transférer leurs données. Ce dernier se chargera du routage des données vers le Sink. En conséquence, les nœuds capteurs statiques peuvent économiser l'énergie grâce à la réduction de la longueur des chemins de routage, de la contention et des overheads de diffusion.

Deux catégories d'approches de mobilité sont distinguées. Une catégorie se base sur la mobilité du Sink [66], [67], [68] et l'autre est fondée sur la mobilité des nœuds relais ou data Mules [65], [69], [70], [71]. Il est important de souligner ici que le type de contrôle de la mobilité des nœuds qu'intègre la conception du réseau est à considérer avec une grande importance [29]. Ce problème est détaillé dans [69]. Les nœuds mobiles peuvent être spécifiquement conçus comme faisant partie de l'infrastructure réseau, ou faire partie de l'environnement. Dans le premier cas, leur mobilité peut être contrôlée dans la mesure où ils sont généralement embarqués sur des robots. Lorsque les nœuds mobiles font partie de l'environnement, leur mobilité peut être incontrôlable. Cette dernière peut être prévisible si elle suit un horaire strict (par exemple une navette pour les transports publics) ou aléatoire. Enfin, leur mobilité peut être ni prévisible, ni complètement aléatoire (comme c'est le cas d'un mouvement d'un bus, circulant dans une ville, dont sa vitesse est soumise à des

variations en raison des conditions de circulation). Dans ce cas, les modèles de mobilité vont être fondés sur des observations et des estimations d'une certaine précision.

D'autres méthodes existent dans la littérature ayant pour objectif d'économiser l'énergie de traitement dans un capteur. Citons par exemple l'approche DVS (Dynamique Voltage Scaling) [72] qui consiste à ajuster de manière adaptative la tension d'alimentation et la fréquence du microprocesseur pour économiser la puissance de calcul sans dégradation des performances. Il y'a aussi, l'approche de partitionnement de systèmes qui consiste à transférer un calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul [73].

2.4.3.4 Discussion

Après la description des principales sources de consommation d'énergie dans les RCsF, nous présentons dans ce qui suit les différentes techniques utilisées pour minimiser cette consommation. Ces techniques sont appliquées soit au niveau de la couche liaison soit au niveau de la couche réseau. Le schéma suivant donne un aperçu global de ces mécanismes : Les techniques de conservation d'énergie dans un capteur visent à économiser l'énergie sur plusieurs niveaux : capture, traitement ou communication.

La première classe concerne les techniques de conservation de l'énergie de capture qui peut se faire en limitant la consommation du module de détection, ou en réduisant la quantité de données circulant dans le réseau. Comme le module de détection peut être gourmand en énergie, dans certaines configurations d'applications, les méthodes d'acquisition de données efficaces en énergie agissent sur le nombre de valeurs échantillonnées par les dispositifs de détection et les réduisent selon des méthodes d'échantillonnage adaptatif, hiérarchique ou en se basant sur des modèles de prédiction. Des techniques de réduction des données, comme l'agrégation, peuvent aussi être utilisées pour réduire la quantité de données dans les nœuds intermédiaires entre le nœud source et le Sink.

La deuxième classe comprend les techniques de réduction de l'énergie de traitement. Cette énergie peut être optimisée en utilisant deux techniques principales à savoir le DVS [72] et le partitionnement du système [73].

La troisième classe s'intéresse à la réduction de l'énergie de communication qui s'articule autour de deux axes : Un premier axe est dédié aux techniques de réduction du duty cycle des nœuds capteurs. Cela se traduit par la réduction de la durée d'activité de la radio pour éviter toute surconsommation d'énergie due à la communication. Ces techniques peuvent être implémentées au niveau MAC ou encore être indépendants du protocole MAC et sont par

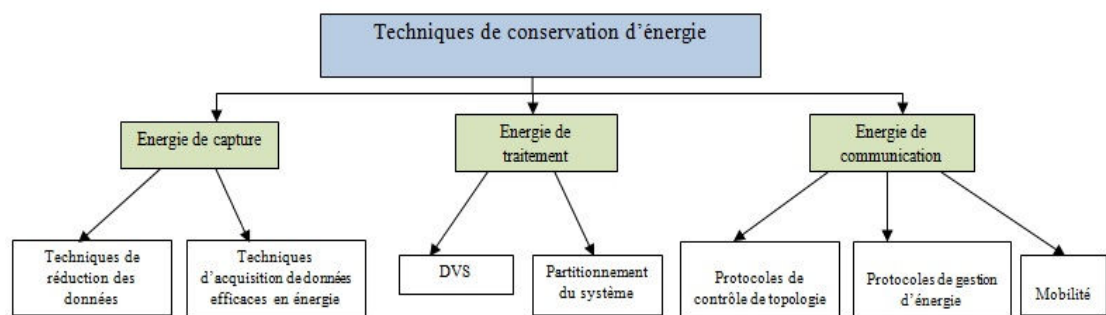


FIGURE 2.3 – Les techniques de conservation d'énergie

conséquent plus flexibles et s'adaptent aux besoins spécifiques de l'application à mettre en œuvre. Cette dernière catégorie se base sur des algorithmes d'ordonnancement sleep/wakeup. Le deuxième axe concerne la mobilité des nœuds qui est exploitée pour réduire la consommation d'énergie des nœuds. Bien que la mobilité implique l'ajout de dispositifs assurant la mobilité des nœuds (tels que des robots), qui peuvent être chers, le gain en énergie dépasse l'investissement nécessaire à les mettre en œuvre. Une autre façon de rendre les nœuds capteurs mobiles, est de les embarquer sur des éléments mobiles de l'environnement (tels que des animaux, personnes, etc.). Cette possibilité pourrait être moins coûteuse mais posera des problèmes quant au modèle de mobilité de ces éléments qui peut être imprévisible et aléatoire.

D'autres techniques de conservation d'énergie existent dans la littérature telles que les paradigmes émanant de l'auto-organisation des systèmes, les mécanismes cross-layer, et d'autres techniques indépendantes du niveau réseau ou du niveau applicatif.

2.5 Réseaux de capteurs avec récupération d'énergie ambiante

2.5.1 La récupération de l'énergie

Les réseaux de capteurs avec récupération d'énergie ambiante constituent la nouvelle génération de réseaux de capteurs qui proposent des réseaux économes en énergie et autonomes. Ils se basent sur la récupération de l'énergie depuis l'environnement extérieur, domaine en plein essor actuellement. En effet, les systèmes de récupération d'énergie (Energy Harvesting Systems) existent depuis très longtemps, comme les dynamos pour s'éclairer à vélo ou les allumes gaz mécaniques, etc. De nouveaux systèmes ingénieux sont aujourd'hui mis au point pour récupérer l'énergie depuis de multiples sources [74].

La récupération d'énergie consiste à exploiter les sources d'énergie faibles et diffuses présentes dans notre environnement. Les énergies renouvelables comme le solaire, le photovoltaïque et l'éolien sont des sources très importantes de récupération d'énergie à plus grande échelle. La récupération d'énergie n'est pas réservée aux écologistes, c'est un vrai marché qui devrait peser près de 4 milliards de dollars en 2020 [74]. En effet, les équipements sans fil se multiplient et la récupération d'énergie est le moyen le plus écologique pour se passer de piles. Les avancées dans le domaine des nanotechnologies permettent notamment de créer des systèmes miniatures et très sensibles pour récupérer de faibles sources d'énergie mais suffisantes pour faire fonctionner de petits

capteurs sans fil.

Nous définissons un nœud de récupération d'énergie comme tout système qui tire une partie ou la totalité de son énergie à partir de l'environnement, tels que l'énergie solaire, les variations de température, de l'énergie cinétique ou de vibrations. L'énergie récoltée de l'environnement est convertie en énergie électrique qui permet d'alimenter les nœuds capteurs. Les sources d'énergie affectent la façon d'alimenter les capteurs. En effet, si la source d'énergie récoltée est grande et périodiquement/continuellement disponible, le nœud capteur peut être alimenté perpétuellement. En outre, sur la base de la périodicité et l'amplitude de l'énergie exploitable, les paramètres du système d'un nœud peuvent être réglés pour augmenter les performances du nœud et celles du réseau.

Comme un nœud est limité en énergie jusqu'à la prochaine possibilité de récolte, i.e prochaine recharge, il peut optimiser sa consommation d'énergie pour maximiser la performance au cours de cet intervalle. Par exemple, un nœud peut augmenter sa fréquence ou son rapport cyclique d'échantillonnage pour augmenter la fiabilité de détection, ou augmenter la puissance de transmission pour diminuer la longueur de chemins de routage.

En conséquence, les techniques de récolte d'énergie ont le potentiel d'assurer le compromis entre les paramètres de performance et la durée de vie des nœuds. Le défi réside dans l'estimation de la périodicité et de l'ampleur de la source récupérable et de décider des paramètres à régler pour éviter l'épuisement prématuré de l'énergie avant le prochain cycle de recharge.

Compte tenu du profil d'utilisation énergétique des nœuds capteurs, les techniques de récolte d'énergie pourraient répondre partiellement ou totalement à leurs besoins énergétiques. Une technique très répandue et populaire de la récupération d'énergie est la conversion d'énergie solaire en énergie électrique. L'énergie solaire est une source incontrôlable ; l'intensité de la lumière émise par le soleil ne peut pas être contrôlée, mais elle est prévisible avec des profils quotidiens et saisonniers. D'autres techniques de récolte d'énergie convertissent l'énergie mécanique ou l'énergie éolienne en énergie électrique. Certaines technologies peuvent s'implanter dans nos chaussures pour récupérer une partie de l'énergie dépensée lors de la marche. Il est aussi possible de créer de l'électricité en exploitant la chaleur dégagée par les ordinateurs. De plus, des pressions mécaniques appliquées aux systèmes piézoélectriques, ou à un bras tournant relié à un générateur, peuvent produire de l'énergie électrique. Puisque la quantité d'énergie ainsi récoltée peut varier, de telles techniques sont considérées comme des sources d'énergie contrôlables [75].

Un système typique de récupération d'énergie comprend trois composantes à savoir la source d'énergie, le système de récolte et la charge. La source d'énergie se réfère à la source d'énergie ambiante à récolter. Le système de récolte se

2.5. Réseaux de capteurs avec récupération d'énergie ambiante 29

compose de mécanismes pour exploiter et convertir l'énergie ambiante d'entrée en énergie électrique. Et la charge représente l'activité qui consomme de l'énergie et agit comme un puits pour l'énergie récupérée [75]. Dans le cas de nœuds capteurs à récupération d'énergie, la charge correspond aux activités liées aux unités d'acquisition, de traitement et de transmission. L'architecture d'un tel nœud est représentée dans la figure 2.4.

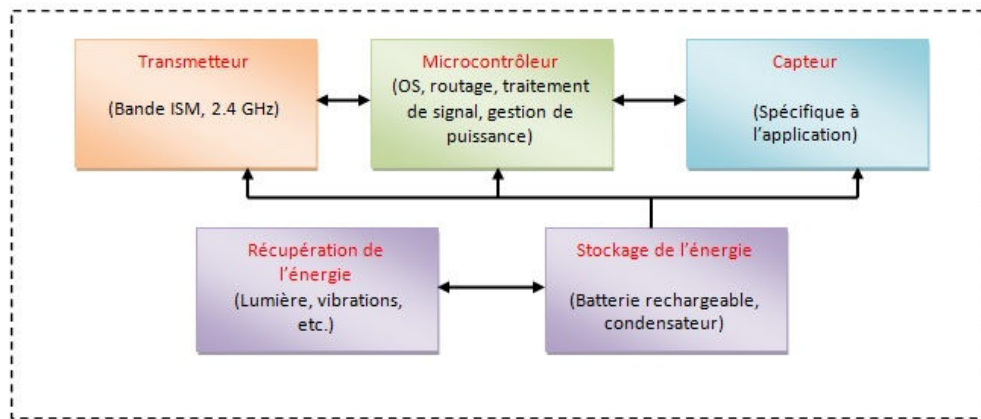


FIGURE 2.4 – Les composantes d'un nœud capteur à récupération d'énergie ambiante

2.5.2 Sources de récupération de l'énergie

Un élément essentiel de tout système de récupération d'énergie est la source d'énergie. En effet, les performances de tels systèmes dépendent de la qualité de cette source puisque cette dernière est responsable de la quantité et du taux d'énergie disponible pour utilisation. Les sources d'énergie ont des caractéristiques différentes selon leur contrôlabilité, prévisibilité et ampleur [76]. Une source d'énergie contrôlable peut fournir de l'énergie exploitable chaque fois que nécessaire ; la disponibilité de l'énergie n'est pas prédite avant la récolte.

Source d'énergie	Caractéristiques
Solaire	Ambiante, incontrôlable et prévisible
Eolienne	Ambiante, incontrôlable et prévisible
Energie RF	Ambiante, partiellement contrôlable
Vibrations	Ambiante, incontrôlable et imprévisible
Chaleur du corps	Humaine passive, incontrôlable et imprévisible
Respiration	Humaine passive, incontrôlable et imprévisible
Pression artérielle	Humaine passive, incontrôlable et imprévisible
Mouvement de doigt et marche	Humaine active et entièrement contrôlable

TABLE 2.1 – Caractéristiques des sources d'énergie

Avec des sources d'énergie incontrôlables, soit l'énergie peut être simplement récoltée chaque fois que possible ou, sa récolte est programmée pour coïncider avec les périodes de disponibilité de l'énergie (horaire, quotidienne, hebdomadaire, etc.). Des modèles de prédiction de l'énergie sont ainsi évoqués pour indiquer les périodes de disponibilité de la source d'énergie, i.e. le moment du prochain cycle de recharge.

En outre, les sources d'énergie peuvent être classées dans les deux catégories suivantes : (i) sources d'énergie ambiante qui représentent des sources d'énergie récupérables à partir de l'environnement, comme par exemple, l'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'énergie RF, et (ii) énergie humaine qui se réfère à l'énergie récupérée à partir des mouvements du corps de l'être humain [77], [78], [79], [80]. Des sources d'énergie passives sont celles qui ne sont pas contrôlables. Nous pouvons citer quelques exemples : l'hypertension artérielle, la chaleur du corps ou la respiration [77]. Les sources d'énergie humaines actives sont celles qui sont sous le contrôle de l'utilisateur. En effet, ce dernier exerce une force pour générer de l'énergie, par exemple, à travers le mouvement du doigt, la marche [77]. Nous dressons dans le tableau 2.1 une synthèse des différentes sources d'énergie et les classifions selon leurs caractères de contrôlabilité, prévisibilité et ampleur.

Pour résumer, l'énergie solaire constitue la source d'énergie la plus exploitable compte tenu de sa disponibilité et prévisibilité journalière et saisonnière assez précise.

2.5.3 Architectures des systèmes à récupération d'énergie

Généralement, les systèmes de récupération d'énergie peuvent être classés selon deux architectures : (i) Récolter-Utiliser (Harvest-Use) : l'énergie est ré-

2.5. Réseaux de capteurs avec récupération d'énergie ambiante 31

colté pour une utilisation immédiate et (ii) Récolter-Stocker-Utiliser (Harvest-Store-Use) : l'énergie est récoltée chaque fois que possible et stockée pour une utilisation ultérieure.

2.5.3.1 Architecture Récolter-Utiliser

La figure 2.5 (a) illustre la première architecture « Récolter-Utiliser ». Dans ce cas, le système de récolte alimente directement le nœud capteur. Par conséquent, pour que le nœud soit opérationnel, il faudrait que la sortie du système de récupération soit en permanence au-dessus d'un seuil représentant le point d'opération minimum. Faute d'énergie disponible, le nœud sera désactivé. De brusques variations de la capacité de la récolte d'énergie causeront des oscillations de l'état de fonctionnement du nœud [75].

Un système « Récolter-Utiliser » peut être construit à partir de sources d'énergie mécaniques générées par la poussée de touches/boutons, marche, pédale, etc. Par exemple, l'appui sur un bouton poussoir peut être utilisé pour déformer un élément piézo-électrique, générant ainsi de l'énergie électrique pour envoyer un message sans fil à courte portée. Dans le même cadre, des matériaux piézo-électriques implantés dans une chaussure peuvent se déformer à des degrés divers et génèrent ainsi de l'énergie électrique lors de la marche ou la course. L'énergie récupérée peut être utilisée pour transmettre des signaux RFID, qui permettent de suivre la personne porteuse de chaussures.

2.5.3.2 Architecture Récolter-Stocker-utiliser

La figure 2.5 (b) représente l'architecture « Récolter Stocker - Utiliser ». L'architecture se compose d'une unité de stockage qui emmagasine l'énergie récoltée et alimente également le nœud capteur. Le stockage d'énergie est utile lorsque la quantité d'énergie récoltée disponible est supérieure à celle consommée et courante. L'énergie excédentaire est stockée pour une utilisation ultérieure lorsque la source d'énergie n'existe plus ou quand le nœud capteur décide d'augmenter sa consommation d'énergie pour améliorer ses performances. L'unité de stockage peut être représentée par un seul ou un double système de stockage. Le système secondaire est un élément de secours quand le dispositif de stockage primaire est épuisé [75]. Un système « Récolter Stocker - Utiliser » peut utiliser des sources d'énergie incontrôlables, mais prévisibles comme l'énergie solaire. Pendant la journée, l'énergie solaire récoltée est utilisée pour le fonctionnement des capteurs et également stockée pour une utilisation pendant la nuit.

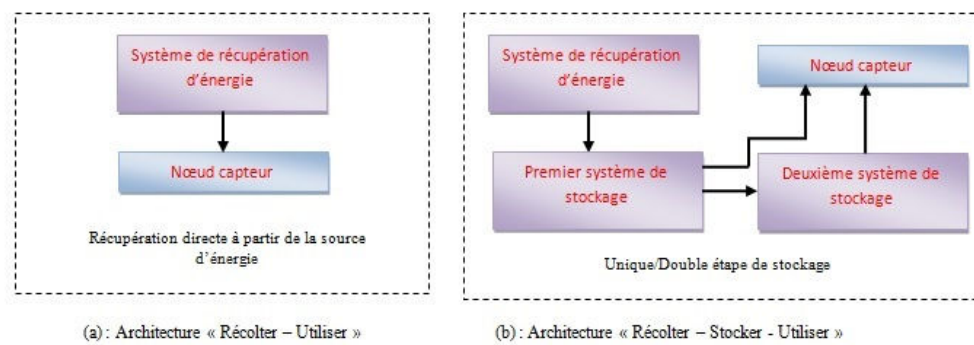


FIGURE 2.5 – Les architectures des systèmes de récupération d'énergie

2.5.4 Applications des réseaux de capteurs à récupération d'énergie

Les applications des réseaux de capteurs sans fil sont nombreuses et variées. Grâce à leur facilité de déploiement et leur faible coût d'installation, ces réseaux se retrouvent dans tous les aspects de notre vie quotidienne. Dans certaines applications telles que le monitoring en temps réel pour lequel un réseau de longue durée de vie et de grande qualité de service est exigé, les batteries qui alimentent les capteurs doivent être remplacées ou rechargées en continu. Or, ceci n'est pas possible dans la plupart des cas. En effet, le remplacement des batteries est souvent coûteux et n'est pas toujours facile à cause de contraintes environnementales, voire impossible si les capteurs sont déployés dans une zone difficile d'accès ou dangereuse. Bien que les réseaux de capteurs alimentés par des batteries constituent une solution idéale pour de nombreuses applications, il existe d'autres applications où les batteries ne parviennent pas à s'adapter à leurs exigences énergétiques. Les applications avec de tels besoins trouvent dans les réseaux de capteurs sans fil à récupération d'énergie ambiante leur meilleur allié.

2.5.4.1 Réseaux de capteurs avec récupération d'énergie solaire

De nombreux prototypes de réseaux de capteurs à récupération d'énergie ambiante sont conçus pour répondre aux exigences de ces applications. A titre d'exemple, les capteurs Heliomote [76] constituent un système de récupération d'énergie solaire, avec un seul système de stockage, et se basant sur la plateforme Mica2 [81]. Prométhée [82] est un autre exemple de capteur de récupération d'énergie à double système de stockage se basant sur la plateforme TelosB [83]. D'autres prototypes de capteurs à récupération d'énergie solaire, de différentes architectures, existent tels que Everlast [84], et Ambimax [85]. Ces capteurs sont de caractéristiques différentes en termes de panneaux solaires utilisés, de type et de capacité de la batterie, et de complexité du circuit de recharge. L'énergie solaire est la source de récupération d'énergie la moins chère, et facilement disponible. Par conséquent, il y a une multitude d'applications [86], [87], [88] qui se basent sur les réseaux de capteurs à récupération d'énergie solaire. Zebranet [88] est un réseau de capteurs mobile conçu pour suivre le mouvement et étudier le comportement des zèbres. Il se base sur des capteurs dotés de GPS et de modules de récupération d'énergie solaire.

2.5.4.2 Réseaux de capteurs avec récupération d'énergie piézoélectrique

Les capteurs de récupération d'énergie piézo-électriques utilisent une force mécanique pour déformer un matériau piézo-électrique, ce qui entraîne une différence de potentiel électrique. Les deux principaux types de matériaux piézo-électriques utilisés sont, (i) les films piézo-électriques, par exemple, le PVDF (polyfluorure de vinylidène) et (ii) le céramique piézo-électrique, par exemple, PZT (titanate zirconate de plomb). Ces matériaux sont utilisés dans des applications de récupération d'énergie à partir de la marche, ou du mouvement des doigts. A titre d'exemple, un PVDF inséré dans la semelle d'une chaussure permet d'exploiter l'énergie produite par le mouvement du talon [79].

2.5.4.3 Capteurs RFID

Les systèmes d'identification par radiofréquence (RFID) utilisent des fréquences radio pour identifier, localiser et suivre les gens, les actifs et les animaux. Le lecteur RFID interroge le tag, qui répond avec sa propre identité. Le tag RF passif utilise l'énergie RF qui lui est transmis, afin de pouvoir fonctionner, ce qui peut être vu comme une forme de récupération d'énergie. Ceci ne s'applique pas aux tags RF actifs, qui ont leur propre batterie et ne dépendent pas de l'énergie RF externe.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à un état de l'art des techniques basées sur une communication verte dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons posé les briques de base et fédéré quelques concepts nécessaires pour la compréhension de la problématique dans la suite du manuscrit.

L'objectif consiste à réduire la consommation d'énergie dans ces réseaux et prolonger leur durée de vie. pour y arriver, nous avons présenté les deux grands axes autour desquels s'articulent les travaux de la littérature dans ce domaine.

Un premier axe concerne les techniques de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil en général. Il s'agit de techniques visant à réduire le duty cycle des nœuds qui se traduit par la réduction de la surconsommation d'énergie due à l'activité de communication radio. Les techniques sont classées en approches implémentées au niveau MAC et d'autres plus flexibles, indépendantes des protocoles d'accès au medium sans fil. D'autres techniques sont orientées données et ont pour objectif de réduire la quantité de don-

nées traversant le réseau. Cela est possible grâce à l'agrégation des données et la réduction des échantillons de données au niveau des nœuds capteurs. La mobilité des nœuds est aussi exploitée pour conserver au maximum l'énergie au niveau des nœuds du réseau. Ce premier axe concerne notamment les réseaux de capteurs alimentés par les piles. Une autre solution de conservation d'énergie serait la récupération d'énergie à partir de l'environnement extérieur. Ainsi, le deuxième axe concerne les réseaux de capteurs à récupération d'énergie ambiante qui confèrent une certaine autonomie aux nœuds capteurs en exploitant des sources renouvelables « infinies » d'énergie. L'objectif de ces réseaux est d'assurer le compromis entre les paramètres de performance du réseau et la durée de vie nodale.

Rappelons qu'un challenge aussi important que la gestion d'énergie est le routage dans les réseaux de capteurs opportunistes. Dans le prochain chapitre nous nous intéresserons à la problématique de routage et nous dresserons un panorama des protocoles de routage présentés dans la littérature pour les réseaux opportunistes.

Routage dans les réseaux opportunistes

Sommaire

3.1	Introduction	37
3.2	Routage dans les réseaux de capteurs	38
3.2.1	Défis de routage	38
3.2.2	Critères de performances des protocoles de routage	39
3.3	Notion de durée de vie d'un réseau	40
3.3.1	Durée de vie basée sur le nombre de nœuds vivants	40
3.3.2	Durée de vie basée sur la couverture	41
3.3.3	Durée de vie basée sur la connectivité	42
3.3.4	Durée de vie basée sur des les exigences de qualité de service	43
3.4	Réseaux tolérants aux retards	43
3.4.1	Présentation	43
3.4.2	Fonctionnement	46
3.4.3	Architecture de référence DTNRG	48
3.4.4	Types de contact	51
3.4.5	Techniques de gestion des files d'attente	52
3.5	Routage dans les DTN	53
3.5.1	Objectif	53
3.5.2	Taxonomie	56
3.5.3	Synthèse	61
3.6	Conclusion	65

3.1 Introduction

De nos jours, les technologies de réseaux sont au cœur des systèmes informatiques. Ils communiquent entre eux et profitent de la grande quantité de fonctionnalités réseaux étendues introduites ces trente dernières années. En

conséquence, de plus en plus de systèmes, ayant chacun ses particularités et éventuellement ses propres moyens de communication, sont interconnectés par Internet ou par d'autres types de réseaux. Les besoins des utilisateurs de ces systèmes sont aussi en évolution continue et les services ubiquitaires se multiplient pour permettre la mobilité et l'accès à distance à différents contenus et services. Le nombre croissant d'appareils que les utilisateurs portent, la variété des capacités du réseau, le nombre de possibilités de communication, et l'hétérogénéité des réseaux ont amené les chercheurs à envisager de nouvelles façons de communiquer. Une classe de solutions sont les réseaux tolérants aux retards (Delay Tolerant Network -DTN). Le domaine des réseaux DTN a réellement émergé ces dernières années afin de fournir des mécanismes permettant d'étendre l'architecture de l'Internet actuel.

Ce chapitre est organisé comme suit : Nous introduisons dans la première section les contraintes du routage dans les réseaux de capteurs sans fil et les critères d'évaluation des protocoles de routage. Dans la deuxième section, nous présentons la notion de durée de vie d'un réseau de capteurs. Ensuite, nous introduisons les réseaux tolérants aux retards. Nous présenterons leurs principales caractéristiques, leur architecture et leur fonctionnement. Enfin, nous consacrerons la quatrième section pour étudier les protocoles de routage opportunistes de la littérature.

3.2 Routage dans les réseaux de capteurs

3.2.1 Défis de routage

Le routage des données constitue le mécanisme le plus important dans les réseaux de capteurs sans fil. En effet, les capteurs sans fil communiquent par radio à courte portée ce qui rend le routage multi-sauts une nécessité pour l'acheminement des données des nœuds géographiquement éloignés de la station de base. Ce mécanisme est responsable de la sélection des chemins pour acheminer les données d'un nœud expéditeur jusqu'à une ou plusieurs stations de base. L'objectif principal des protocoles de routage consiste donc à garantir un taux d'acheminement des messages élevé tout en minimisant la consommation d'énergie. Cependant, pour que cette tâche soit efficace, les protocoles de routage doivent gérer certaines contraintes liées aux propriétés intrinsèques des RCsF et dont les principales sont les suivantes [89] :

- La tolérance aux pannes : au cours du temps, des nœuds peuvent devenir défaillants suite à l'épuisement de leurs batteries ou suite à une panne physique. Ainsi, ils ne sont plus capables de communiquer ou de coopérer pour l'acheminement des données. Il est généralement difficile

de remplacer ces nœuds défaillants. Un protocole de routage doit donc pouvoir pallier aux trous (i.e. vides de routage) qui peuvent apparaître dans le réseau suite à l'échec de certains nœuds, et continuer le processus de routage [90].

- La dynamique du réseau : dans certains cas, les nœuds du réseau sont mobiles rendant la tâche de routage plus complexe. En effet, la mobilité des capteurs entraîne une modification continue des liens de communication. Les algorithmes de routage doivent par conséquent s'adapter à ce changement de topologie et assurer le routage des paquets.
- La qualité de service : chaque message émis doit arriver à destination dans son intégralité. De plus, dans certaines applications, le délai de transmission est un paramètre de qualité de service important : un message arrivant après un certain délai pourrait être considéré futile.
- Le modèle d'émission des données : il existe plusieurs types de communication entre un capteur et une station de base. Selon l'application, le modèle d'émission des données peut être périodique, en réponse à des requêtes explicites de la station de base ou orienté événement (les capteurs envoient leurs données seulement si un événement spécifique se produit). Ces modes de communication entre les nœuds et la station de base impliqueront des protocoles de routage totalement distincts.

3.2.2 Critères de performances des protocoles de routage

Pour faire un état de l'art sur les protocoles de routage, nous nous fixons, en plus des contraintes à gérer citées dans la section précédente, certains facteurs essentiels pour évaluer les performances des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs. Ces critères peuvent être résumés comme suit :

- Efficacité énergétique : dans un réseau de capteurs, chaque nœud collecte des données et envoie/transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de quelques nœuds nécessite un changement de la topologie du réseau et une retransmission des paquets. Ces opérations sont gourmandes en énergie, c'est pour cette raison que les travaux actuels se concentrent principalement sur les moyens de réduire cette consommation et concevoir des protocoles de routage efficaces en énergie.
- Equilibrage de charge (ou énergie) : un protocole de routage doit assurer un bon équilibrage de charge (ou énergie) pour éviter l'épuisement rapide de l'énergie de certains nœuds capteurs, ayant comme conséquence une courte durée de vie du réseau [91].
- Maximisation de la durée de vie : dans certaines applications comme le contrôle de l'environnement, les nœuds du réseau sont déployés pour assurer un fonctionnement le plus longtemps possible. Un capteur pos-

sède des ressources limitées en énergie. S'il épuise sa batterie, il serait généralement impossible de la remplacer. De ce fait, la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de la batterie du nœud. Un protocole de routage efficace en énergie est recommandé dans un tel cas pour prolonger la durée de vie du réseau.

- Passage à l'échelle : les algorithmes de routage doivent assurer leur bon fonctionnement quel que soit le nombre de capteurs dans le réseau. Un algorithme localisé est la seule manière de supporter ce passage à l'échelle [92]. Ainsi, un bon protocole de routage - qui permet le passage à l'échelle - devrait s'appuyer surtout sur des informations locales dans ses décisions de routage.
- Support de la mobilité : Dans le contexte de la thèse, nous visons l'usage de réseaux de capteurs mobiles, il s'agit donc d'une contrainte importante à prendre en compte lors de la conception d'un protocole de routage adapté.

3.3 Notion de durée de vie d'un réseau

La durée de vie d'un réseau est considérée comme la mesure la plus importante pour l'évaluation des réseaux de capteurs. Dans un environnement aux ressources limitées, la consommation énergétique de chaque nœud capteur doit être envisagée. Un réseau ne peut accomplir son objectif que tant qu'il est « en vie », mais pas au delà. La durée de vie prévue est critique dans tout déploiement de capteurs.

Dans la littérature, on peut trouver un grand nombre de publications qui traitent le problème de la durée de vie dans un réseau de capteurs. Ces travaux considèrent la durée de vie du réseau comme un critère qui doit être maximisé, et plusieurs définitions de cette notion existent dans la littérature. Dans cette section, nous en résumons les définitions les plus courantes. Nous en distinguons quatre catégories principales qui sont détaillées ci dessous.

3.3.1 Durée de vie basée sur le nombre de nœuds vivants

Dans cette définition, la durée de vie du réseau est définie par la durée jusqu'au moment où un certain nombre de nœuds épuise leur batterie. Il existe plusieurs définitions possibles dans cette catégorie selon le nombre de nœuds défaillants à considérer.

Dans [93], [94], [95], [96] la durée de vie d'un réseau est définie par la durée jusqu'à ce que le premier nœud épuise toute son énergie. Certains auteurs excluent les stations de base dans le calcul de la durée de vie du réseau puisque

celles-ci sont généralement alimentées par le courant continu [96]. Ces définitions sont dites, *durée de vie N-de-N* (n-of-n lifetime). La durée de vie T_n^n est définie par l'équation suivante :

$$T_n^n = \min_{v \in V} T_v \quad (3.1)$$

T_v étant la durée de vie du noeud v et n étant le nombre de noeuds. Dans un modèle de réseau hiérarchique, la durée de vie est définie par la durée jusqu'à ce que le premier clusterhead épuise sa batterie [97]. Une autre variante de la définition de la durée de vie d'un réseau peut aussi s'exprimer en fonction du nombre de noeuds vivants. Dans [98], [99], la durée de vie est calculée par la période de temps écoulée jusqu'à ce qu'il reste au plus une fraction β de noeuds vivants dans le réseau. Cette définition est dite *durée de vie K-de-N* (k-of-n lifetime). Une autre définition consiste à considérer la durée jusqu'au moment où 50% des noeuds épuisent leur énergie [36]. Dans [100], la durée de vie d'un réseau est exprimée par la durée jusqu'à ce que tous les capteurs épuisent leur énergie.

Bien que cette catégorie de définition soit la plus simple, certaines définitions de la durée de vie peuvent s'avérer imprécises. Prenons l'exemple de la définition durée de vie K-de-N et nous considérons le cas de $k' < k$ noeuds qui sont à des positions stratégiques (autour de la station de base par exemple) et qui épuisent leurs énergies. Le reste des noeuds ne peuvent désormais transférer leurs messages au Sink. Ainsi, le réseau est considéré comme non fonctionnel. Pourtant la définition de la durée de vie ne reconnaît pas cette situation et attend jusqu'il y ait exactement k noeuds défaillants pour considérer le réseau comme non fonctionnel.

3.3.2 Durée de vie basée sur la couverture

Compte tenu des caractéristiques spécifiques des réseaux de capteurs, mesurer la durée de vie du réseau par la période durant laquelle le réseau peut couvrir la zone d'intérêt semble être un moyen naturel. La couverture peut être définie de différentes façons, en fonction de la composition de la région d'intérêt et de la redondance atteinte de la couverture.

Il existe deux approches pour décrire le degré de couverture d'un réseau de capteurs donné. La première approche exige que seulement une portion α de la région d'intérêt soit couverte par au moins un capteur. Ceci est communément appelé *α -couverture*. La seconde approche vise à atteindre plus de redondance, et nécessite donc que chaque point à l'intérieur de la région d'intérêt soit recouvert par au moins k capteurs. C'est ce qu'on appelle *k -couverture*.

Ainsi, nous distinguons plusieurs définitions de la durée de vie d'un réseau en fonction de la définition adoptée de la couverture. Parmi celles-ci,

nous citons la définition la plus courante *1-couverture* qui définit la durée de vie comme la période pendant laquelle la région d'intérêt est totalement couverte par au moins un nœud capteur [101], [102]. Une autre variante de cette définition est que seule une fraction α de la région d'intérêt doit être couverte. Cette définition est adoptée dans [103], [104]. Une variante plus stricte exige que chaque point de la zone d'intérêt doive être couvert par au moins k nœuds. Cette définition est adoptée par exemple dans [105]. Par ailleurs, notons que la couverture du nœud est souvent considérée comme la mesure la plus importante pour définir la qualité de service d'un réseau. Ce paramètre est primordial notamment pour les travaux s'intéressant à la problématique de déploiement des réseaux et des algorithmes d'ordonnancement. Néanmoins, ce paramètre n'est pas suffisant pour la définition de la durée de vie puisqu'il n'est jamais garanti que les données mesurées soient transmises au nœud collecteur [106].

3.3.3 Durée de vie basée sur la connectivité

La connectivité est une mesure qui est couramment rencontrée dans le contexte des réseaux ad hoc parce qu'il n'y a pas de notion de couverture du nœud dans ce type de réseaux et par conséquent la capacité de transmettre des données vers une destination donnée est plus importante. [107] définit la connectivité dans un réseau ad hoc par la durée minimale durant laquelle le pourcentage des nœuds vivants ou la taille de la plus grande composante connexe du réseau devient inférieure à un seuil donné. Cette définition est insuffisante pour les réseaux de capteurs puisque la connectivité vers la station de base est ce qui importe le plus. Dans [108], la connectivité dans un réseau de capteurs est définie par le pourcentage de nœuds qui ont des chemins vers la station de base. Ainsi, la durée de vie du réseau est la durée pendant laquelle un pourcentage donné de nœuds possèdent un chemin vers la station de base. Plusieurs travaux ont associé la métrique de couverture à celle de connectivité. Par exemple, [109] définit la durée de vie du réseau par la période jusqu'à ce que la couverture ou la connectivité du réseau devienne inférieure à un seuil prédéfini. Dans ce cas, la couverture est mesurée en termes de α -couverture. La connectivité est mesurée en termes de taux de messages délivrés au Sink. Une autre définition est proposée dans [105] et qui consiste à définir la durée de vie du réseau par l'espérance de l'intervalle complet pendant lequel la probabilité de garantir simultanément une connectivité et une *k-couverture* est au moins égale à β .

3.3.4 Durée de vie basée sur des les exigences de qualité de service

Certains travaux définissent la durée de vie du réseau en termes de paramètre de qualité de service requise pour l'application. Dans [110], la durée de vie est définie par la période pendant laquelle le réseau satisfait la qualité de service requise. [100] définit la durée de vie du réseau comme étant la période jusqu'à ce que le réseau n'est plus capable de fournir un taux acceptable de détection d'événements. Cette définition est vague, puisqu'on ne spécifie pas le paramètre de qualité de service à considérer, et non précise.

3.4 Réseaux tolérants aux retards

3.4.1 Présentation

Les réseaux traditionnels, comme l'Internet actuel, sont basés sur une idée architecturale majeure à savoir le principe de bout-en-bout. Ceci implique que les partenaires d'une communication dialoguent depuis chaque extrémité du réseau pour établir et gérer leur communication. Ce principe consiste à avoir un chemin stable entre une source et une destination quelconques pendant la durée de la communication. Cependant, ces conditions ne sont pas toujours vérifiées dans certains scénarios, comme les communications spatiales, dans lesquelles les délais de transmission sont importants ou, dans les réseaux sans fils lorsque les nœuds ne peuvent pas toujours communiquer entre eux à cause de la mobilité des ces derniers ou de leur dispersion. Les réseaux tolérants aux retards (Delay tolerant Networks, DTN) sont une architecture réseau visant à palier les contraintes rencontrées dans ces environnements. Cette architecture permet de mettre en place des réseaux pouvant s'accommoder à de forts retards dans les communications, retards que ne supportent pas les protocoles classiques TCP/IP [111].

Plusieurs désignations existent pour les réseaux DTN. Ils sont appelés aussi "réseaux opportunistes", ou "réseaux à connectivité intermittente" [112]. Ces réseaux sont caractérisés par :

- Une connectivité intermittente,
- Des délais importants et/ou variables,
- Un débit asymétrique,
- Un taux d'erreur binaire important.

La connectivité peut être sujette à des perturbations menant à l'échec des communications et au partitionnement du réseau. Une telle connectivité est dite "intermittente" et peut être due à plusieurs raisons :

- Problème de mobilité : La mobilité des nœuds affecte la connectivité du réseau. Une paire de nœuds ne peut ainsi communiquer que lorsque les partenaires de la communication sont à portée radio l'un de l'autre.
- Problème radio : La communication radio entre les nœuds peut ne pas être suffisamment bonne ou être perturbée à cause des interférences externes.
- Problème de batterie : Dans certains réseaux, les nœuds pourraient manquer d'énergie (suite à l'épuisement de leurs batteries) et peuvent donc rentrer en veille et deviennent ainsi incapables de communiquer pendant un certain laps de temps.

Des exemples de réseaux DTN sont les suivants :

MANETs (Mobile Ad hoc Networks) : Un réseau mobile ad hoc [113] est un réseau sans infrastructure dans lequel toutes les stations peuvent être mobiles. Chaque station communique directement avec sa voisine lorsqu'elles sont à portée radio l'une de l'autre. Pour communiquer avec d'autres entités, il lui est nécessaire de faire passer ses données par d'autres stations qui se chargeront de les acheminer. Une application classique des réseaux mobiles ad hoc consiste à assurer la communication d'unités de secours sur des zones larges, par exemple lors de catastrophes naturelles. Ces réseaux souffrent de perturbations de connectivité en raison de la mobilité des nœuds et des interférences radio. Les approches des réseaux tolérants aux retards sont envisagées pour aider à offrir une continuité des services de communications dans ce contexte défavorable.

PSN (Pocket Switched Networks) : Les réseaux PSN sont des réseaux pair-à-pair qui s'auto-organisent en se basant sur les contacts aléatoires des citoyens durant leurs migrations pendulaires. Les appareils de ces derniers (citons simplement : leurs smartphones, leurs lecteurs multimédias, leurs tablettes, etc.) communiquent en réseau et transfèrent les données grâce au principe "store and forward". Nous présenterons ce principe, avec plus de détails, dans la section suivante.

VANETs (Vehicular Ad hoc Networks) : Les réseaux VANETs sont une forme des réseaux MANETs et fournissent des communications au sein d'un groupe de véhicules à portée radio les uns des autres et entre les véhicules et les équipements fixes à portée, usuellement appelés équipements de la route. Ils représentent par ailleurs une projection des systèmes de transports intelligents (Intelligent Transportation Systems - ITS). Les véhicules communiquent les uns avec les autres par l'intermédiaire de la communication inter-véhicule (Inter-Vehicle Communication - IVC) aussi bien qu'avec les équipements de la route par l'intermédiaire de la communication d'équipement-à-Véhicule (Roadside-to-Vehicle Communication - RVC). Le but optimal de ces réseaux consiste à contribuer à avoir des routes plus sûres en fournissant des

informations opportunes aux conducteurs et aux autorités intéressées. Comme les réseaux PSN, les réseaux VANETs sont aussi basés sur le principe de "store and forward".

RCsF (Réseaux de Capteurs sans Fil) : Les réseaux de capteurs sans fil sont caractérisés par des nœuds de faibles capacités mémoire, CPU et de batterie. La communication dans ces réseaux se fait tout en économisant l'énergie au niveau des nœuds. Par conséquent, les protocoles de communication spécifiques doivent pallier aux perturbations de connectivité et aux ressources limitées en énergie et en mémoire.

Réseaux satellitaires et interplanétaires : Les réseaux satellitaires se basent sur des liaisons radio longues distances. Ils permettent de transporter des informations d'un point à l'autre de la Terre, notamment des programmes télévisés en diffusion mais aussi des communications téléphoniques ou de données. Ces systèmes peuvent être soumis à des latences élevées avec une interruption prévisible (en raison de la dynamique planétaire), peuvent subir des interruptions dues à des conditions environnementales, et fournissent un service de réseau store-and-forward prévisible occasionnellement disponible. En outre, le concept de base de ces réseaux est de construire un réseau Internet interplanétaire. Il s'agit de déployer des réseaux Internet standards dans des endroits éloignés (par exemple dans d'autres planètes). Ces réseaux Internet distribués sont connectés via un backbone interplanétaire capable de supporter de très fortes latences. Des passerelles et des relais sont créés pour interfacer les environnements de forte et faible latence. Les communications interplanétaires sont caractérisées par des délais de propagation longs et variables, par d'énormes atténuations et des interruptions régulières ou irrégulières des communications [114].

Les communications dans les différents réseaux cités ci-dessus sont réalisées sur des liaisons indépendantes, chacune nécessitant des caractéristiques qui lui sont propres. Ces réseaux sont adaptés pour des zones particulières, appelées "régions", dans lesquelles les caractéristiques des communications sont homogènes. Les frontières entre régions sont définies par des propriétés spécifiques de délais, de taux d'erreur, de mécanismes de fiabilisation et de qualité de service. Chaque réseau régional répond donc à des contraintes physiques bien particulières. Les réseaux régionaux ne sont pas conçus pour être interconnectés entre eux. Cependant, par l'utilisation de passerelles spécifiques on peut créer un pont de communication entre deux réseaux. Un DTN constitue ainsi un réseau de réseaux régionaux. Il peut être vu comme une couche au dessus des réseaux régionaux incluant le réseau Internet.

3.4.2 Fonctionnement

3.4.2.1 Mode de communication Store-and-Forward

En général, les systèmes de communication se basent sur l'un des deux modes de communication suivants : le mode de communication Store-and-Forward et le mode relayé. Le mode relayé est celui utilisé dans la plupart des réseaux existants dont les réseaux IP. Ce mode de communication consiste à transférer les messages qui circulent dans le réseau le plus rapidement possible. Pour ce faire, plusieurs techniques peuvent être mises en oeuvre : découpage des messages, utilisation de plusieurs routes, etc. Ce mode de communication est utilisé dans une logique de communication de bout en bout, i.e. l'existence d'au moins une route entre l'origine et la destination est nécessaire pour pouvoir transporter les messages. Dans le cas où une route complète n'est pas disponible, la communication de type relayé devient impossible à réaliser. Avec le mode Store-and-Forward, il n'est pas nécessaire d'avoir une route directe. Quand les routes sont interrompues en raison de la perte de liens, les nœuds intermédiaires sont capables de garder l'information jusqu'à disposer d'une route [114].

Dans un réseau à connectivité intermittente, où la connectivité de bout en bout entre deux terminaux est absente, il est nécessaire d'aborder le problème de communication d'un autre point de vue. Cela consiste à utiliser des communications de type Store-and-Forward. Les réseaux DTN se basent sur le concept de Store-and-Forward pour le transfert des messages. Le point fondamental de ce type de communication est la notion de stockage longue durée. Elle permet d'établir une communication entre terminaux sans avoir de connexion de bout en bout [114]. Ce mode de communication permet de surmonter la rupture des communications : le message est stocké dans un nœud intermédiaire quand il n'est pas possible de le transférer au nœud suivant ; le message est renvoyé ultérieurement une fois que la communication entre les nœuds est rétablie.

Les caractéristiques fondamentales de ce mode de communication sont décrites ci-dessous [114] :

Stockage longue durée : Les nœuds qui composent les réseaux DTN doivent avoir suffisamment de mémoire pour pouvoir stocker les messages lorsqu'il n'est pas possible de les faire passer par un autre nœud après la rupture des communications. La période de stockage dans le nœud est déterminée par la taille de la mémoire ou par la priorité du message s'il y a des critères de qualité de service à assurer. Cette notion de stockage est complètement différente de celle liée aux communications du type relayé où le stockage est très court ; le stockage dans ces réseaux est vu comme un effet indésirable car il provoque l'utilisation excessive des ressources dans les nœuds et la perte

d'informations quand la limite de ces ressources est dépassée (overload).

Stockage des messages complets et vérification de l'intégrité : Les communications sont orientées message, c'est à dire que toutes les données à envoyer sont regroupées dans une seule et même entité : le message. Cela permet de diminuer les conversations entre les nœuds qui peuvent s'avérer coûteuses (en termes de délais ou de débits). Après avoir vérifié l'intégrité du message, celui-ci est stocké pour être transmis immédiatement si possible, ou bien, pour attendre d'être transmis ultérieurement. La différence avec le mode relayé est que les messages qui circulent dans le réseau ne constituent pas des unités d'information complètes ; ce sont des morceaux d'information qui ne sont pas vérifiés par les nœuds intermédiaires mais par le(s) nœud(s) de destination. Les tâches assignées aux nœuds intermédiaires sont essentiellement limitées à la lecture de l'adresse destination et au routage immédiat.

Envoi complet des messages : Dans les communications se basant sur le concept de Store-and-Forward, les messages qui circulent dans le réseau constituent eux-mêmes des unités complètes d'information. Les messages sont transférés d'un nœud à l'autre et sont vérifiés après chaque saut par le nœud d'origine et par le nœud destination. C'est ainsi qu'une fois le message transmis et arrivé à destination, aucune communication supplémentaire n'est nécessaire. Cela constitue un des avantages des communications Store-and-Forward par rapport aux communications relayées dans les environnements présentant des conditions extrêmes et où l'interruption des communications et l'occurrence d'erreurs peuvent être fréquentes.

Toutes les propriétés citées ci-dessus du mode de communication Store-and-Forward lui permettent d'être un mode de communication idéal pour les réseaux DTN. Ce concept de communication s'adapte aux conditions dans lesquelles les communications du type relayées ne sont pas performantes : délais longs et variables, intermittence des communications et fortes variations des taux d'erreur. Cependant, ces mêmes propriétés rendent les communications de type Store-and-Forward inappropriées pour les applications temps-réel. En effet, ces communications rajoutent des délais supplémentaires pour la vérification et le stockage des messages dans chaque nœud et impliquent des mécanismes pour vérifier l'intégrité et l'envoi complet des messages. Pour mettre en place le concept de Store-and-Forward, une nouvelle couche réseau a été mise en place : la couche Bundle. Nous la présenterons dans la section suivante.

3.4.2.2 Couche Bundle

Un réseau DTN est composé de plusieurs réseaux sujets à des connexions intermittentes. Ces réseaux peuvent être hétérogènes et impliquent des technologies et des protocoles de communication différents. Pour faire abstraction

aux technologies rencontrées dans les différents réseaux DTN et ainsi assurer leur interconnexion, une couche appelée "Bundle" vient se placer, dans le modèle architecturale réseau, entre la couche application et les couches spécifiques aux réseaux (couches Transport, Réseau, etc.). La couche Bundle assure l'intégration des réseaux dans une approche de communication Store-and-Forward. Le protocole Bundle est le protocole utilisé dans cette couche. Ce protocole agrège les données sous forme de message appelés Bundle et se charge de les transmettre. Une couche intermédiaire appelée "Convergence Layer", est utilisée pour faire le lien entre la couche Bundle et les couches inférieures.

La Figure 3.1 illustre un exemple d'architecture DTN composée de deux réseaux avec deux nœuds DTN. Les nœuds DTN servent à interconnecter les réseaux qui, en principe, peuvent être hétérogènes et avoir, ainsi, différentes piles protocolaires. Ils servent également à pallier les communications intermittentes entre les réseaux. Les fonctionnalités de type Store-and-Forward ne sont utilisées que pour transférer des messages d'un réseau vers un autre. Les communications entre les composants qui appartiennent à un même réseau utilisent leur propre pile de protocoles. La couche Bundle est décrite en détails dans la spécification du protocole Bundle [115]. La propriété principale de ce protocole est la « Custody-based retransmission » ou retransmission avec "garde". En effet, la fiabilité des DTNs repose sur la notion de garde. Celle-ci caractérise la responsabilité du nœud DTN à retransmettre de façon intégrée le message bundle à qui on confie la garde. La garde est transférée d'un nœud DTN à l'autre en même temps que le bundle. Chaque nœud DTN transfère un bundle vers un autre nœud et attend une notification d'acceptation pour se libérer de la garde. Lors de la réception d'un bundle, le nœud récepteur vérifie son intégrité et envoie ensuite une notification d'acceptation de la garde vers le nœud d'origine. Une fois que ce dernier reçoit l'acceptation de la garde, il efface toute copie du bundle, sinon, il essaiera de l'envoyer de nouveau dès la première opportunité. La garde permet, ainsi, d'avoir une garantie de délivrance d'un nœud DTN à l'autre et assure, par conséquent, une fiabilité par saut.

3.4.3 Architecture de référence DTNRG

L'architecture de référence DTNRG [3] est une généralisation de l'architecture des IPN (InterPlanetary Networks) soutenue par l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA) et décrite par Akyildiz et al [116]. Cette architecture proposée par le groupe de recherche DTNRG (Delay-Tolerant Networking Research Group) répond aux préoccupations soulevées par les principes de conception architecturale, le protocole de communication

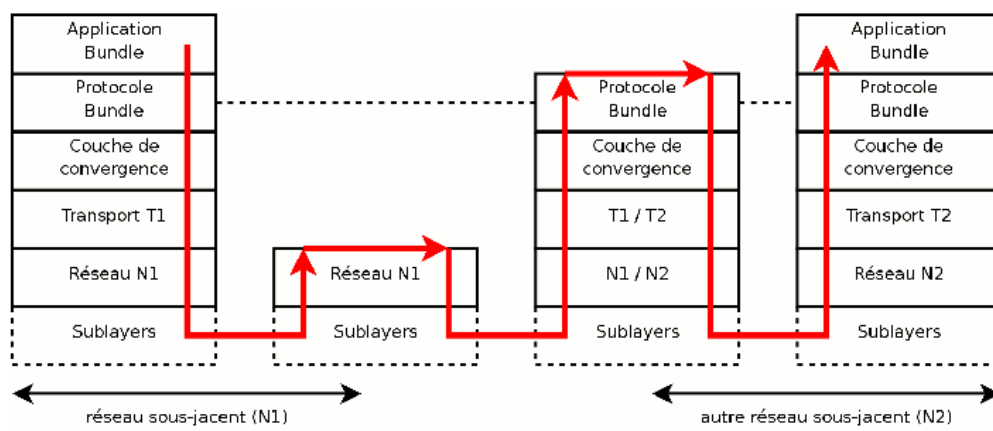


FIGURE 3.1 – Architecture DTN

assurant l'interopérabilité entre les environnements extrêmes et la connectivité intermittente.

L'architecture DTNRG se compose principalement d'un overlay, appelé aussi couche Bundle, situé au-dessus de la couche de transport dans la pile TCP/IP classique. Les messages ou ADU, dans l'architecture DTNRG sont appelés bundles. Ils sont transférés entièrement entre les nœuds DTN en utilisant un protocole de transport qui assure la fiabilité de nœud à nœud. Les bundles peuvent être de taille différente et les nœuds sont supposés avoir des buffers de taille suffisante pour les stocker [117].

Le réseau DTN est divisé en régions délimitées par des passerelles DTN qui assurent le passage des bundles à travers les régions. Un exemple d'une telle organisation est présenté par la figure 3.2. Dans chaque région, une pile de protocoles différents peut être utilisée. Un bundle peut, par exemple, être transporté par le protocole TCP sur un lien Wi-Fi, ensuite par un protocole de transport fiable comme SCTP [118] sur une liaison satellite, avant d'atteindre sa destination.

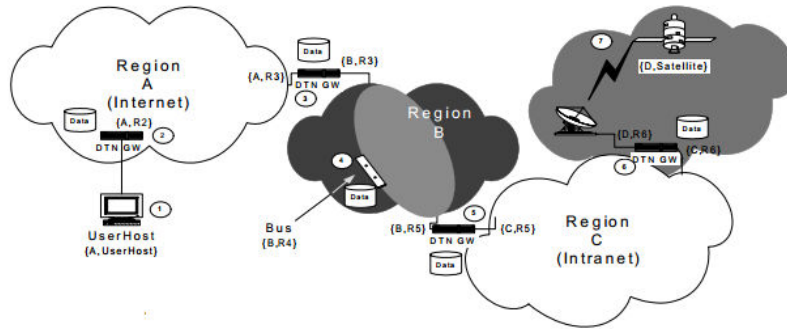


FIGURE 3.2 – Exemple de réseaux DTN [3]

Pour acheminer les messages bundles, il est nécessaire d'adopter une méthode d'adressage pour identifier les nœuds DTN. Comme les DTNs font abstraction des réseaux sous-jacents, on ne peut utiliser les mécanismes d'adressage de ces derniers (adresses IP par exemple). Le protocole Bundle utilise donc des tuples appelés EndPoint Identifier (EID) composés de deux sous-

parties : un identifiant de région et un identifiant du nœud dans la région (spécifique aux protocoles internes de la région). L'adresse suivante est un exemple d'une adresse EID : `earth.sol.int, src. client.com :1093`

L'identifiant de la région est `earth.sol.int` et celui du nœud `src. client.com :1093`, similaire à une adresse URL et un numéro de port. Ainsi, l'identifiant de la région est utilisé au niveau du routage inter-région alors que pour le routage intra-région on se sert de celui du nud. Ce mécanisme d'adressage étant similaire au service de résolution des noms DNS (Domain Name System), i.e. l'identifiant du nœud DTN n'est pas résolu au niveau de la source mais ceci est fait par le nœud passerelle situé dans la région cible destinataire du bundle.

Lors de la transmission des bundles, des priorités peuvent être attribuées à ces derniers. Les niveaux de priorité classés par ordre croissant d'urgence sont *Bulk*, *Normal* ou *Expedited*. Des options de transmission sont également disponibles telles que *Report When Bundle Received*, pour demander un acquittement une fois le nœud DTN reçoit le bundle complet, *Report When Bundle Forwarded*, pour demander un acquittement lorsque le bundle est transféré par un nœud intermédiaire, et *Report When Bundle Delivered* pour signaler au nœud source que la destination a bien reçu le bundle qui lui est destinée [117].

3.4.4 Types de contact

La connectivité est un problème majeur dans les réseaux DTN. Du fait que les liens entre les différents nœuds ne sont pas toujours permanents, plusieurs types de contacts ont été définis par le groupe DTN-GR afin de formaliser et faciliter les communications, et notamment le routage DTN.

Selon la terminologie adoptée par le DTN-GR, nous distinguons trois types de contacts :

- Contacts déterministes ou planifiés : ces contacts sont des liens non permanents dont la connectivité, au moins son commencement, est connue à l'avance. Ils sont donc facilement exploitables mais peuvent engendrer des délais importants suivants la périodicité de la connectivité [119]. Une connexion entre la Terre et un satellite est un exemple de contact planifié puisque les mouvements des deux objets sont connus à l'avance et peuvent donc être anticipés. Dans les réseaux de capteurs, ces contacts ont lieu par exemple dans le cas de veilles et réveils périodiques de capteurs [117].
- Contacts prévisibles : les contacts prévisibles sont des liens dont les caractéristiques de la connectivité entre les nœuds (début, durée, etc.) ne sont pas connus avec précision. Ils sont prédits à l'aide de l'historique

des contacts entre les noeuds. Par exemple, si, pendant une certaine période de temps, un nœud A a été en contact avec un autre nœud B, il est fort probable que ce contact se reproduise dans un futur proche.

- Contacts opportunistes : Les contacts opportunistes sont des contacts qui ne peuvent être ni anticipés ni prédits. Il s’agit de contacts qui apparaissent occasionnellement pour une certaine durée de temps.

3.4.5 Techniques de gestion des files d’attente

D’après de nombreuses études sur le routage dans les DTNs, il a été explicitement mentionné que le choix de la meilleure politique de gestion de la mémoire tampon et de la meilleure stratégie de transfert, combinés à la méthode de routage la plus adéquate, représente la meilleure formule pour améliorer les performances en termes de livraison de message et des délais de transmissions de bout-en-bout [120] [121] [122].

Comme évoqué précédemment, les réseaux DTN se basent sur le principe du Store-and-Forward. Ceci implique qu’un nœud de prochain saut peut ne pas être immédiatement disponible ; le nœud porteur de données doit ainsi stocker ses informations et les transférer dès que cest possible. Par conséquent, les protocoles DTN supposent que chaque nœud maintient une file d’attente en mémoire tampon. Ces mémoires tampons doivent avoir une taille suffisante pour pouvoir y stocker un nombre maximum de messages. Néanmoins, la mise en mémoire tampon (ou Buffering) ne représente pas une solution permanente puisque les messages doivent être rapidement transmis pour atteindre l’objectif principal de réduction du délai de transmission et ainsi éviter le débordement de ces espaces mémoire. L’espace tampon est, par conséquent, une ressource cruciale dans les DTNs qui doit être gérée efficacement. Il est donc primordial d’utiliser des techniques adéquates et efficaces de gestion de la mémoire tampon des noeuds. Les techniques de gestion des files d’attente nodales définissent des règles d’utilisation de la mémoire sur deux niveaux [4] :

- Au niveau de la transmission : quand le nœud est congestionné, il ne peut plus accepter de messages à transférer.
- Au niveau de la mémoire nodale : à ce niveau, les bundles à supprimer sont identifiés, y compris ceux qui sont reçus, afin de réduire l’espace tampon utilisé.

Lorsque la mémoire au niveau du nœud est pleine et qu’un nouveau message vient d’arriver, il peut utiliser l’une des techniques de gestion de sa file d’attente suivantes, pour prendre en charge le nouveau message reçu [121] :

- FIFO (First In First Out) : le message qui a été entré en premier dans la file d’attente est le premier qui sera supprimé.
- MOFO (Evict most forwarded first) : cette technique nécessite de garder

une trace du nombre de fois qu'un message est transféré. Le message qui a été le plus de fois transféré sera le premier à être supprimé, ce qui donne la chance aux messages qui n'ont pas encore été transférés suffisamment, de l'être.

- MOPR (Evict most favourably forwarded first) : il s'agit d'une version pondérée de MOFO, où au lieu d'incrémenter un compteur d'une unité chaque fois qu'un message est transféré, il est incrémenté en fonction d'une probabilité de livraison P du message par le nœud en question. En effet, chaque nœud maintient une valeur FP (initialisée à zéro) pour chaque message dans sa file d'attente. Chaque fois que le message est transmis, FP est mis à jour en fonction de l'équation :

$$FP = FP_{old} + P$$
Le message avec la plus grande valeur FP est le premier à être abandonné.
- SHLI (Evict shortest life time first) : dans l'architecture DTN, chaque message a une valeur TTL (i.e. durée de vie du message) qui indique le temps pendant lequel ce message est utile et doit être conservé. Quand cette technique est adoptée, le message avec la plus courte durée de vie restante est le premier à être abandonné.
- LEPR (Evict least probable first) : si un nœud présente moins de chance de transférer un message pour lequel il a une prévisibilité de livraison P faible, il sera supprimé en premier en cas de débordement de sa mémoire.

Une combinaison de ces techniques de gestion de file d'attente peut être adoptée pour une meilleure gestion de l'espace mémoire nodal. Un exemple de technique pourrait être MOFO ; SHLI ; FIFO.

3.5 Routage dans les DTN

3.5.1 Objectif

Le problème du routage dans les DTNs pourrait apparaître comme un problème standard de routage dynamique dans les réseaux MANETs, mais avec des contraintes supplémentaires d'échec de liens. Or, ce n'est pas le cas [123].

En effet, pour tenir compte de la topologie dynamique des MANETs, une abondance de protocoles de routage ont été proposés tels que OLSR [124], AODV [125], LAR [126], STAR [127], et bien d'autres. Certains de ces protocoles de routage adoptent une approche réactive en ne prenant pas l'initiative de trouver un itinéraire vers une destination donnée jusqu'à ce que la demande en soit effectuée. AODV et DSR font partie de cette catégorie de protocoles. Les protocoles proactifs, en revanche, impliquent des échanges périodiques de

messages de contrôle pour la création et la maintenance des chemins. Cette maintenance reste toujours active même s'il n'y a pas de trafic circulant dans le réseau ; de la sorte, lorsque des données ont besoin d'être acheminées, le parcours qu'elles vont suivre est déjà connu à l'avance et la transmission est immédiate. Cette procédure est effectuée aux dépens de la bande passante consommée pour les mises-à-jour périodiques de la topologie. Des exemples de protocoles proactifs sont OLSR, DSDV et STAR.

Cependant, pour tous ces protocoles de routage, il est implicitement supposé que le réseau est connecté et qu'il y a toujours un chemin de bout en bout entre toute paire de nœuds. Dans ce contexte, l'objectif du protocole de routage consiste à trouver le meilleur chemin de bout-en-bout actuellement disponible pour déplacer le trafic d'une extrémité à l'autre. Malheureusement, ces hypothèses ne sont pas valables dans une configuration DTN. Les nœuds DTN manquent d'informations sur l'état du réseau (i.e. informations sur les autres nœuds du réseau, la topologie du réseau, etc.). Les protocoles de routage tels que AODV et OLSR ne fonctionnent pas correctement dans les DTNs, puisque dans ces protocoles, lorsque les paquets arrivent et qu'il n'y a pas des chemins de bout-en-bout immédiats pour leurs destinations, ces paquets sont simplement détruits.

Les figures 3.3 et 3.4 illustrent un exemple où le protocole AODV ne supporte pas une topologie de réseau à connectivité intermittente. Dans ces deux figures, un chemin P est établi sur la demande d'une source S pour envoyer ses données à la destination D. Si un nœud du chemin P disparaît pour une raison particulière, le protocole de routage échouera totalement. Donc, pour généraliser, dans ce contexte, un ensemble de chemins traversant des nœuds qui risquent de disparaître du réseau pour une raison quelconque, devient invalide et le restera jusqu'à ce que ces nœuds rentrent de nouveau en contact. Dans la figure 3.4, nous remarquons que le nœud X possède une autre route vers la destination D à travers le nœud W. Cependant, X ne peut pas envoyer ses paquets à W puisque le protocole AODV a déjà déterminé le chemin bout-à-bout à suivre et qu'à partir du nœud X, le prochain saut est Y. Par conséquent, tous les paquets de X sont perdus et le protocole de routage échoue.

De point de vue DTN, Y peut être un nœud qui est passé en mode veille pour économiser son énergie. Pendant ce temps, Y n'est pas actif et le chemin P établi par AODV de S à D passant par Y est enregistré dans la table de routage de S. Cela entraînera la perte des messages envoyés par S parce qu'ils n'atteindront jamais D. Une perte importante de ressources est ainsi notée. Dans un DTN, un chemin de bout en bout n'est pas toujours disponible ; le routage des données est donc échelonné dans le temps jusqu'à atteindre la destination finale. Ceci est accompli selon le principe du Store-and-Forward. Par conséquent, le routage point à point est une partie intégrante et essentielle

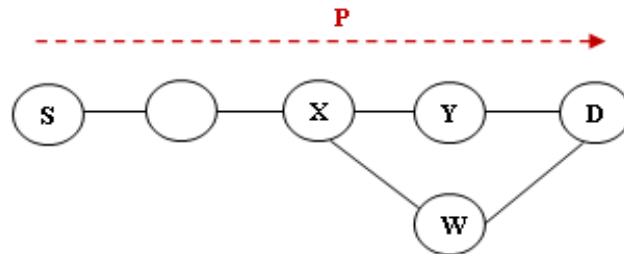


FIGURE 3.3 – Flux normal de données de S à D suivant le chemin P

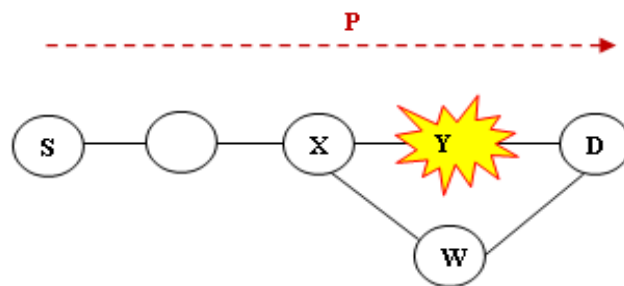


FIGURE 3.4 – Le nœud Y disparaît et ainsi le chemin P

de tout système de routage DTN.

Comme mentionné par Jain et al. [4], le routage est l'un des défis dans les réseaux DTNs. Comme expliqué ci-dessus, les approches de routage des réseaux MANETs ne peuvent pas fonctionner dans ce type de réseaux. Différentes approches doivent être considérées et doivent s'adapter aux conditions suivantes :

Topologie dynamique : dans le cas où les nœuds sont mobiles, la topologie du réseau est instable et sujette à des perturbations imprévisibles, des délais de transmission importants et une connectivité arbitraire.

Informations topologiques limitées : ceci aggrave la difficulté de trouver la métrique de routage qui reflète fidèlement l'état du réseau. Un chemin d'une source vers une destination quelconque peut être statique ou dynamique. Cependant, en cas d'absence d'informations sur la topologie du réseau, les routes statiques ne sont pas adéquates. La topologie dynamique d'un réseau DTN et le manque de mise-à-jour des informations topologiques globales expliquent le fait que les protocoles de routage destinés aux DTN utilisent souvent des indicateurs de routage locaux, tels que la fréquence de rencontre des nœuds.

Durée de connexion variable et incertaine : puisque la durée de connexion entre les nœuds est variable et imprévisible, les protocoles de routage doivent décider rapidement de transmettre ou non la totalité ou une partie des bundles lorsque les nœuds se rencontrent. Cette décision est cruciale pour maximiser la probabilité de livraison.

Ressources limitées : les protocoles de routage DTNs doivent prendre en compte les ressources matérielles limitées (de mémoire, de puissance de traitement et d'énergie) de certains réseaux tolérants aux délais. Prenons l'exemple des réseaux de capteurs où des protocoles de routage efficaces doivent être utilisés pour optimiser la consommation d'énergie des nœuds et maximiser la durée de vie du réseau.

3.5.2 Taxonomie

D'après la taxonomie introduite par Jones et al. [10], les protocoles de routage DTN sont classés principalement selon trois catégories : les protocoles utilisant la réplication (replication-based), les protocoles utilisant les connaissances (Knowledge-based) et les protocoles hybrides. Les approches de routage basées sur la réplication explorent la diversité des nœuds pour améliorer les performances du routage. Ils se basent sur la diffusion des messages sur plusieurs transporteurs pour augmenter leur chance d'atteindre la destination. Les protocoles de la deuxième catégorie sont basés sur l'utilisation des connaissances que les nœuds obtiennent sur les conditions de connectivité

réseau pour prendre des décisions efficaces qui améliorent les performances de routage. Les approches hybrides, quant à elles, utilisent à la fois la réplication et les connaissances.

Les approches de routage DTN doivent par ailleurs faire face à un compromis général entre différents facteurs : la robustesse contre les interruptions de connectivité (qui agit sur le taux des messages délivrés), l'impact sur les ressources réseau (qui agit sur l'overhead généré par le routage), et la rapidité d'exécution (qui agit sur le délai de transmission). Un protocole de routage dans les DTN doit donc être très robuste, avec le moindre impact sur les ressources réseaux et rapide. Ceci se traduit par un objectif de maximisation du taux de délivrance des messages, une minimisation de l'overhead et du délai de transmission des données [117].

3.5.2.1 Approches basées sur la réplication

Les protocoles de routage qui utilisent la réplication supposent que les nœuds ne disposent d'aucune information sur la topologie du réseau ou les contacts qu'ils pourraient former avec les nœuds voisins. Ainsi, les décisions de routage ne tiennent pas compte des connaissances que les nœuds pourraient obtenir depuis leur environnement. Ces protocoles sont basés sur l'inondation de plusieurs copies d'un même message. En effet, la source envoie plusieurs copies du même message à un ensemble de nœuds appelés « relais ». Ces derniers vont stocker le message jusqu'à ce que la connexion avec le destinataire soit établie. Nous présenterons ici les principaux protocoles de routage basés sur la réplication.

Le routage épidémique (Epidemic Routing) [128] est l'un des premiers protocoles de routage basés sur la réplication. Ce protocole s'appuie sur un algorithme d'inondation pure qui se base sur la distribution transitive des messages à travers les réseaux ad-hoc. Cela signifie qu'il nécessite des connaissances minimales concernant la topologie et la connectivité du réseau sous-jacent. Le protocole de routage épidémique fonctionne comme suit : quand deux nœuds se rencontrent, ils échangent les messages qu'ils n'ont pas encore en se servant des vecteurs de résumé (summary vectors). En effet, quand un message est envoyé, il est étiqueté avec un identifiant unique et enregistré dans le tampon local du nœud. Lorsque les nœuds entrent en contact, ils s'échangent la liste des identifiants de messages de leurs tampons respectifs contenus dans les vecteurs de résumé. Ces identifiants de messages sont utilisés pour déterminer quels sont les messages à transférer. Après cet échange, chaque nœud peut déterminer les messages qu'il ne possède pas et demande à l'autre nœud de les lui envoyer. Ce mécanisme empêche qu'un nœud transporte deux fois le même message. Le routage épidémique utilise massivement l'espace de stockage et la

bande passante, mais il réalise les meilleures performances en termes de taux de livraison des messages et de délais de transmission. Dans les grands réseaux, ce protocole peut être trop coûteux en termes de consommation d'énergie et d'espace mémoire utilisé. Certains travaux ont été proposés pour limiter les inondations du routage épidémique et permettre un meilleur usage de la réplication.

Grossglauser et al. [129, 130] ont été parmi les premiers à introduire un système à base de réplication pour les MANETs qui n'est pas épidémique. Ils montrent que le débit total de transmission peut être augmenté en exploitant la mobilité des nœuds dans les applications tolérantes aux délais. Les paquets peuvent être mis en tampon dans les nœuds et peuvent être acheminés à l'aide d'un seul relais intermédiaire ou transférés directement à la destination.

Le protocole Spray and Wait [131] est une autre approche basée sur la réplication, mais, contrairement au routage épidémique, il s'agit d'un protocole d'inondation contrôlée dans le sens où le nombre de copies d'un même message est limité. Ce protocole fonctionne en deux phases : la phase Spray et la phase Wait. Pendant la première phase, le fonctionnement est similaire au routage épidémique où les messages sont diffusés mais un nombre limité de copies circule dans le réseau. Pendant la seconde phase, les nœuds stockent les messages dans leurs tampons locaux et attendent de rencontrer la destination pour les lui transmettre.

Harras et al. [132] ont évalué les approches d'inondation contrôlées et ont introduit un mécanisme d'effacement de paquets. Quand un message arrive à destination, après l'inondation de base, les copies restantes dans les tampons des autres nœuds intermédiaires sont effacées.

Wang et al. [133] proposent de coder les messages avec des codes d'effacement et de distribuer leurs différentes parties sur un grand nombre de relais, de sorte que les messages originaux peuvent être reconstitués même s'ils ne sont pas tous reçus. Widmer et al. [134] ont exploré des techniques de codage réseau.

Toutes ces approches de routage diffusent de multiples copies (multi-copy) des paquets et assurent une grande fiabilité de transmission, et une faible latence, mais ils impliquent un espace mémoire élevé et une forte consommation de bande passante.

3.5.2.2 Approches basées sur les connaissances

Puisque les approches de routage basées sur la réplication peuvent engendrer des dépassements de tampon et une utilisation inefficace de la bande passante, une alternative serait de profiter des informations sur les interactions des nœuds pour prendre des décisions de routage efficaces.

Une série de travaux ont été menées par Jain et al. [4], avec des contacts déterministes, par exemple dans le cadre d'un rattachement au réseau Internet d'un village en Afrique via trois moyens de communication : un satellite basse orbite, une moto et un modem RTC. Jain et al. [4] cherchent à améliorer la connectivité à Internet d'un village isolé en se basant sur la connaissance du moment où un satellite et une moto peuvent être disponibles pour effectuer les connexions nécessaires. La moto est munie d'une clef de stockage USB et parcourt le chemin entre le village et la ville (où il y a un accès internet permanent) en quelques heures. Ce scénario est illustré dans la figure 3.5. D'autres algorithmes utilisent plus de connaissances sur les conditions et la

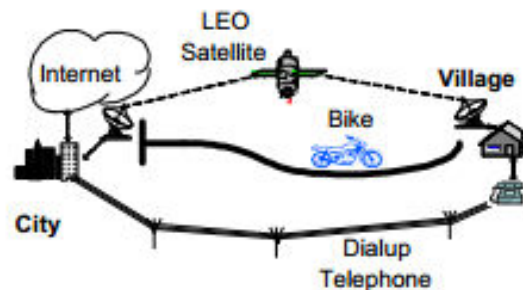


FIGURE 3.5 – Exemple de connexion d'un village isolé [4]

connectivité du réseau. Le protocole de routage MED (Minimum Expected Delay) attribue un coût à chaque paire de nœuds. Ce coût représente la somme du délai d'attente, du délai de propagation moyen et du délai de transmission sur le lien qui les relie. Les Bundles sont ensuite routés par la source suivant l'algorithme de Dijkstra [135] dans le but de minimiser les délais d'attente. Un même chemin est emprunté par tous les bundles correspondant à une paire de nœuds source-destination donnée. Ce protocole présente l'inconvénient de ne pas exploiter les nouveaux chemins qui se créent, une fois le chemin calculé par MED. Par exemple, si, après avoir calculé le chemin de la source à la destination et qu'un contact direct à la destination apparaît, ce chemin direct est ignoré et les bundles suivront la route déjà calculée par MED.

Le travail effectué dans [136] se base sur les contacts prévisibles ou prévus entre les nœuds. Le protocole de routage proposé s'appuie sur des profils de mobilité communautaire des nœuds (*community-based mobility patterns*). Les nœuds se trouvent principalement à l'intérieur de leur propre communauté et

se déplacent parfois vers les communautés voisines. Pour acheminer un paquet à une destination donnée, un nœud transfère le paquet à un nœud qui appartient à la même communauté que la destination. Ce travail a été étendu pour proposer le protocole PROPHET [137] qui est normalisé dans le groupe IRTF DTN [138]. Le protocole de routage PROPHET (Probabilistic ROuting Protocol using History of Encounters and Transitivity) [136] utilise une métrique probabiliste appelée *delivery predictability*, qui représente la capacité d'un nœud à livrer un message à une destination donnée. Cette métrique est estimée à partir de l'historique des rencontres entre les nœuds. Si un nœud voisin rencontre souvent une destination donnée, il aura la meilleure métrique de routage vers cette destination et constituera ainsi le meilleur nœud de relais. Cette métrique fait l'objet d'un facteur de vieillissement qui a pour effet de diminuer la valeur de cet indicateur au fil du temps afin de représenter le cas où une paire de nœuds ne se rencontrent pas pendant une période de temps. La *delivery predictability* a également une propriété transitive qui permet de calculer les *delivery predictabilities* vers des destinations connues par les nœuds voisins. Lorsque deux nœuds se rencontrent, ils s'échangent les vecteurs de résumé (summary vectors) et le vecteur de probabilité de livraison contenant les *delivery predictabilities* pour chaque nœud rencontré. Après cet échange, les messages sont transférés vers les nœuds ayant des *delivery predictabilities* supérieurs vers la destination. Le nœud source ne supprime pas les messages après le transfert mais les garde dans son espace tampon local, lui donnant la possibilité de transférer ces messages directement à la destination s'il la rencontre. Si les tampons sont pleins, les messages sont supprimés selon le système de gestion de file d'attente FIFO.

MaxProp [139] est une autre approche probabiliste qui utilise une métrique appelée *delivery likelihood*. Cette métrique est calculée à partir de l'historique des rencontres des nœuds. En utilisant une méthode de calcul de la moyenne progressive, les nœuds qui se rencontrent souvent auront des métriques plus élevées au fil du temps. Lorsque deux nœuds se rencontrent, ils s'échangent d'abord leurs vecteurs de *delivery likelihood*. Sur la base de ces métriques, ils mettent à jour leurs valeurs de *delivery likelihood* et calculent un coût pour chaque chemin possible vers la destination. Le coût d'un chemin correspond à la somme des probabilités de livraison des nœuds faisant partie de ce chemin. Le chemin avec le coût le moins élevé représentera le coût de cette destination particulière. Les messages sont ensuite triés selon les coûts des destinations, et transmis et supprimés selon cet ordre. En outre, la méthode MaxProp affecte une priorité plus élevée pour les nouveaux messages pour augmenter leur chance d'atteindre la destination plus rapidement, et tente d'empêcher la réception du même message deux fois en incluant une liste de sauts dans chaque message. MaxProp est capable d'atteindre une bonne performance de

taux de délivrance et de délais de transmission. Cependant, il ne prend pas en compte les ressources limitées de certains noeuds, ce qui a un impact sur la performance globale du réseau.

Enfin, Jones et al. [140] proposent un protocole de routage à état de liens pour les réseaux DTN qui utilise la métrique MEED (Minimum Estimated Expected Delay). Certains projets de recherche, tels que Data Mules [141], SeNTD [142] ou Message Ferrying [71] impliquent des éléments de réseau mobiles pour transporter les données provenant de capteurs fixes vers des points d'accès de façon opportuniste.

3.5.2.3 Approches hybrides

Tous les protocoles basés sur la connaissance présentés ci-dessus sont des approches à copie unique, contrairement aux approches basées sur la réplication qui sont multi-copies. Cela signifie que les messages peuvent être acheminés dans un mode multi-hop, mais, à chaque fois, une seule copie du message est présente dans le réseau. Pour que les approches de routage soient plus robustes aux pannes des nœuds et ainsi augmenter les performances de routage, on peut adopter des approches hybrides, basées à la fois sur la connaissance et les copies multiples.

Parmi ces approches, notons les travaux de Jain et al. [143] qui ont déterminé une allocation optimale des blocs des codes d'effacement sur plusieurs chemins pour maximiser la probabilité de livraison en fonction des probabilités d'échec et le niveau de redondance. Étant donné les probabilités de succès, des blocs de code sont répartis sur les multiples chemins possibles. Pour ce faire, deux algorithmes différents ont été appliqués : l'un pour trouver les k meilleurs chemins disjoints et l'autre pour maximiser une fonction objectif spécifique en utilisant un procédé de programmation linéaire.

3.5.3 Synthèse

Les approches de routage opportunistes sont essentiellement classées en utilisant deux propriétés. La première concerne la stratégie de réplication. La seconde concerne l'utilisation des connaissances disponibles sur l'état du réseau afin de prendre des décisions de routage efficaces. Sur la base de la première propriété, nous distinguons des approches de routage à copie unique (une seule copie d'un message est transmise sur le réseau), ou multi-copies (plusieurs copies d'un même message circulent dans le réseau). Les protocoles de routage basés sur la réplication (selon la classification de Jones et al. [10]), sont multi-copies. Les protocoles basés sur la connaissance, quant à eux, sont à copie unique. Les approches multi-copies présentent de meilleures perfor-

mances de taux de délivrance et de délais de transmission. En effet, avoir plus de copies d'un même message dans le réseau permet d'augmenter la chance que ce message arrive à destination et diminue le délai moyen de transmission. Cependant, ces approches ont un inconvénient majeur, à savoir la consommation excessive de la bande passante et le débordement des mémoires de stockage.

Certaines stratégies de routage nécessitent plus d'informations sur le réseau pour décider du choix du nœud pour le prochain saut. D'une part, un nœud peut prendre des décisions avec aucune connaissance sur le réseau, à l'exception des contacts qui sont disponibles. Ces stratégies utilisent des règles de routage statiques et tous les nœuds obéissent aux mêmes règles. Cela conduit à des implémentations simples qui nécessitent une configuration et des messages de contrôle au minimum. Les approches de routage basées sur la réplication font partie de cette catégorie d'approches avec aucune connaissance. De l'autre, un nœud peut avoir besoin des informations sur la topologie du réseau ou/et de la connectivité et des contacts créés dans le réseau. Ces informations sont incluses dans le processus de routage et permettent d'avoir des décisions de routage plus efficaces, sans pour autant nuire aux ressources matérielles de bande passante et de mémoire. Ceci est le cas des approches de routage basées sur la connaissance [10].

Nous notons que dans un environnement où l'espace tampon et la bande passante sont infinis, le routage épidémique représente la meilleure approche de routage dans les réseaux tolérants aux retards et présente les meilleures performances en termes de taux de délivrance de messages et de délais de transmission [144]. Le protocole PROPHET a été proposé comme une alternative au routage épidémique avec une demande plus faible d'espace mémoire et de bande passante. Maxprop est, comme PROPHET, une approche de routage probabiliste, mais utilise une métrique différente. Il est important de mentionner que la métrique de routage utilisée dans MaxProp est différente de celle utilisée dans PROPHET. En effet, cette première dépend de la probabilité de rencontre entre les paires de nœuds alors que celle de PROPHET dépend de la probabilité de rencontre de la destination elle-même, ce qui signifie que PROPHET nécessite plus d'états. Cependant, les nœuds MaxProp calculent les chemins possibles vers la destination par concaténation de la probabilité de livraison des nœuds impliqués. Ce calcul n'est pas nécessaire dans PROPHET, puisque les messages ne sont transférés qu'aux nœuds ayant des *delivery predictability* vers la destination, supérieurs à celle du nœud porteur.

Il est également important de mentionner que ces protocoles ne sont pas conçus pour les réseaux de capteurs sans fil en particulier, mais ils sont destinés aux réseaux ad hoc, dont le paradigme de communication est très différent. Nous proposerons dans ce qui suit, une approche de routage pour les réseaux de capteurs sans fil qui prend en compte leurs caractéristiques, en particulier

leurs contraintes énergétiques.

Nous dressons dans le tableau 3.1, une comparaison des protocoles de routage selon les critères de performances cités dans la section 3.2.2 :

	Effi.énerg	Equili.charge	Dur.vie	Scalabilité	Mobilité	T.livr
Epidemic routing [128]	-	-	-	-	-	+++
Grossglauser et al. [130]	-	-	-	+	+	++
Spray and Wait [131]	-	-	-	-	-	++
PROPHET [136]	+	-	-	+	-	++
MaxProp [139]	+	-	-	+	+	++
Data Mules [141]	+	-	-	+	++	++
SeNTD [142]	+	-	-	+	++	++
Message Ferrying [71]	+	-	-	+	++	++
Jain et al. [143]	+	+	+	+	-	+

TABLE 3.1 – Comparaison des performances des protocoles de l'état de l'art

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la problématique de routage dans les réseaux tolérants aux retards. Nous avons présenté ces réseaux et leurs caractéristiques principales. Ces réseaux sont conçus pour supporter des délais de transmission très grands. Les réseaux tolérants aux retards sont caractérisés notamment par une connectivité intermittente où la connectivité de bout en bout entre une paire de nœuds donnés est absente. Ainsi, le routage des données dans ces réseaux est une problématique essentielle. Nous avons par ailleurs étudié les principaux protocoles de routage de la littérature. Ils sont classés en deux catégories principales. La première comprend les protocoles de routage basés sur la réplication qui ne nécessitent aucune information sur la topologie et la connectivité du réseau. Ces protocoles sont basés sur de simples techniques de diffusion de messages qui visent à augmenter les taux de livraison et réduire les délais moyens de transmission. Cependant, ils consomment de façon excessive les ressources matérielles liées à l'énergie et à la mémoire des nœuds. Le protocole de référence de cette catégorie est le routage épidémique. La deuxième catégorie regroupe les protocoles de routage basés sur la connaissance du réseau pour établir des décisions de routage efficaces. Ces protocoles se basent généralement sur des métriques qui représentent implicitement des informations sur les contacts entre les nœuds (telles que la fréquence de rencontre des nœuds). PROPHET et MaxProp sont les protocoles de référence dans cette catégorie. Notons que les protocoles de la deuxième catégorie sont les plus utilisés.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons à un type particulier de réseaux tolérants aux retards. Il s'agit des réseaux de capteurs sans fil. La mobilité des nœuds capteurs et le manque de densité perturbe la connectivité de ces réseaux ce qui en fait une application importante des réseaux DTN. Les réseaux de capteurs sans fil héritent ainsi des caractéristiques des DTN et y rajoutent des contraintes énergétiques importantes. En étudiant les protocoles de routage dans les DTNs, nous avons remarqué qu'ils sont conçus pour les réseaux ad hoc en général et ne prennent pas en compte les spécificités des réseaux de capteurs. Ceci constitue notre motivation pour proposer un protocole de routage opportuniste spécifique aux réseaux de capteurs, simple à implémenter, économe en énergie et performant.

Techniques de dimensionnement de la phase de découverte de voisinage

Sommaire

4.1	Introduction	67
4.2	Protocoles de découverte de voisinage économes en énergie	68
4.2.1	Motivation	68
4.2.2	Etat de l'art	69
4.3	Probing Period Modulation by Battery Monitoring (PPM-BM)	71
4.3.1	Présentation	71
4.3.2	Evaluation des performances	74
4.4	Expected Connectivity-based Neighbor Discovery protocol (ECoND)	80
4.4.1	Présentation	80
4.4.2	Evaluation des performances	83
4.5	Conclusion	86

4.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil mobiles ont récemment suscité une attention considérable en raison de leur utilité pour une grande variété d'applications telles que la surveillance de l'habitat, les réseaux sociaux, et les applications de suivi, etc. Pour assurer les communications, les nœuds mobiles coopèrent ensemble pour fournir plusieurs services comme le routage ou la collecte des données. Tous ces mécanismes de haut niveau reposent sur un protocole de découverte de voisins. Pendant le processus de découverte de voisins, un nœud cherche à explorer sa zone de couverture. Pour accomplir cette

découverte, un nœud diffuse périodiquement des messages de découverte de voisinage (i.e. des messages Hello) pour informer de sa présence. Cet échange périodique de messages Hello est utilisé pour créer et maintenir des tables de voisins, qui seront utilisées par les protocoles de niveau supérieur. Toutefois, cette phase peut s'avérer gourmande en énergie si le protocole de découverte de voisins est mal configuré. Nous nous intéresserons dans ce chapitre au dimensionnement des protocoles de découverte des voisins dans les réseaux de capteurs sans fil mobiles et nous proposons deux techniques de dimensionnement de la fréquence d'envoi des messages de découverte de voisinage.

Ce chapitre est organisé comme suit : Nous introduisons le contexte et la motivation pour l'étude des protocoles de découverte de voisinage dans les réseaux de capteurs sans fil mobiles. Ensuite, nous présentons les principaux travaux qui se sont intéressés à la conception de protocoles de découverte économes en énergie. Nous détaillons, dans la troisième section, notre contribution PPM-BM qui consiste à dimensionner la fréquence de découverte de voisins en fonction de l'énergie résiduelle des nœuds. Nous évaluons cette méthode et nous étudions son impact sur les performances des protocoles de niveau supérieur, notamment le routage. Enfin, nous consacrons la quatrième section à présenter notre deuxième contribution ECoND qui propose de contrôler la fréquence de découverte de voisinage en fonction de la connectivité prévue entre les nœuds. Nous évaluons cette approche et nous discutons les résultats de simulation.

4.2 Protocoles de découverte de voisinage économes en énergie

4.2.1 Motivation

Dans les réseaux de capteurs mobiles, les nœuds se déplacent continuellement dans l'espace. Ses mouvements induisent des changements de la topologie du réseau au fil du temps ; les nœuds à portée radio à un instant donné, peuvent s'éloigner et les nœuds situés en dehors de la portée radio, peuvent se rapprocher l'un de l'autre. Initialement, les nœuds ne possèdent aucune information sur leur voisinage et commencent par découvrir progressivement leurs voisins en envoyant périodiquement des messages contenant nécessairement l'identifiant du nœud émetteur et éventuellement sa position [145]. Cet échange périodique de messages de découverte de voisins est utilisé pour créer et maintenir à jour les tables de voisins, qui seront utilisées par les protocoles de niveau supérieur tels que les protocoles de routage. Cette tâche représente un défi dans les réseaux mobiles puisque les nœuds ne peuvent pas conser-

4.2. Protocoles de découverte de voisinage économes en énergie 69

ver les traces de tous les nœuds voisins. En effet, cette information change au fil du temps et un protocole de découverte de voisins est nécessaire pour mettre à jour en continu ces informations. Ce protocole dépend de certains paramètres tels que la fréquence d'envoi des messages de découverte des voisins, i.e. messages « Hello », leur portée, etc. Certains protocoles dans les réseaux de capteurs ajoutent de la complexité et peuvent avoir un impact considérable sur l'efficacité des protocoles de découverte de voisinage. Prenons l'exemple des protocoles MAC qui impliquent des mécanismes complexes d'ordonnancement des activités et d'introduction de périodes de sommeil. Ces mécanismes de mise en veille des nœuds permettent de minimiser leur consommation d'énergie mais peuvent avoir un impact sur les performances des protocoles de découverte de voisinage et sur la durée de ce processus, i.e. le temps nécessaire avant que chaque nœud ne découvre tous les autres nœuds présents dans son voisinage. La consommation d'énergie peut également constituer une contrainte forte lors de la conception d'un protocole de découverte de voisins, notamment pour les réseaux de capteurs sans fil où la contrainte énergétique est caractéristique de ces réseaux. De plus, la couche physique peut également avoir un impact important sur le processus de découverte, particulièrement sur la probabilité de découverte des nœuds [145]. La fiabilité des liens radios et les phénomènes liés à la propagation peuvent aussi avoir un impact considérable sur les performances des protocoles de découverte des voisins. Toutes ces problématiques doivent donc être considérées lors de la conception d'un protocole de découverte de voisinage. En effet, un dimensionnement mal adapté de ce protocole pourrait se répercuter sur les performances des protocoles de haut niveau, notamment les protocoles de routage [145].

4.2.2 Etat de l'art

La phase de découverte des voisins (« Neighbour discovery », ou aussi « probing phase ») est une phase clé de la pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil à sauts multiples et des réseaux DTN. Nous nous intéressons dans ce qui suit aux réseaux de capteurs mobiles qui sont utilisés pour une grande variété d'applications telles que les réseaux sociaux [146] et de suivi de mouvement [147]. Pour l'ensemble de ces applications, un nœud mobile a besoin de découvrir en continu ses voisins avec un minimum d'énergie et de latence. Les nœuds des réseaux mobiles ne sont pas nécessairement synchronisés les uns les autres, ce qui rend la découverte de voisinage plus difficile. Concevoir un protocole de découverte de voisins constitue ainsi un défi central puisqu'il s'agit, non seulement, de garantir la découverte opportune des nœuds capteurs les uns des autres d'une manière économe en énergie, mais aussi de maintenir la connectivité du réseau.

Plusieurs travaux sont proposés dans la littérature pour répondre à ce problème. Nous les classons en deux types d’approches : celles résolvant le problème au niveau microscopique et d’autres au niveau macroscopique.

Les approches de niveau microscopique comprennent les protocoles de niveau MAC économes en énergie. Ces approches proposent des techniques de duty-cycle permettant de contrôler les périodes d’activité de l’interface radio, source importante de consommation d’énergie. Il s’agit de réduire les durées d’activité des nœuds et de les alterner avec des périodes de sommeil. Déterminer le duty-cycle optimal, qui permet de planifier les périodes d’activité et de sommeil de façon à favoriser la découverte des voisins, est simple si les capteurs sont fixes et dotés d’une horloge synchronisée. Un certain nombre d’approches existent pour les réseaux de capteurs sans fil fixes, par exemple S-MAC [34], qui planifie le réveil, l’écoute du canal, et le sommeil simultanés de tous les nœuds du réseau. Les protocoles D-MAC [59] et FPS [148] planifient les duty-cycles selon un arbre de diffusion. Toutefois, dans les réseaux asynchrones d’autres solutions doivent être envisagées. Des exemples de ces approches peuvent se retrouver dans WiseMAC [149], BMAC [57] et X-MAC [150]. Dans ces approches, les nœuds capteurs planifient des périodes de réveil asynchrones et utilisent des techniques de détection de porteuse pour repérer une transmission entrante. Ces approches asynchrones sont plus robustes. En effet, elles ne nécessitent pas de topologie fixe ou des horloges très précises et utilisent de longs préambules pour garantir le réveil de n’importe quel nœud voisin. Le principal inconvénient des approches asynchrones est le coût élevé de la découverte de voisins, car elles nécessitent une longue transmission continue, connue sous le nom de préambule ou train de paquets. Les approches citées ci-dessus ne sont pas directement applicables aux réseaux de capteurs mobiles, car les connexions entre les nœuds sont souvent intermittentes et l’heure d’arrivée exacte du nœud voisin est incertaine. Une solution triviale consiste à ce que les capteurs mobiles restent éveillés pendant de longues périodes de temps pour ne pas manquer la découverte de voisins potentiels. Ceci entraînera inévitablement une grande consommation d’énergie. En outre, les réseaux de capteurs sans fil mobiles présentent des défis différents de ceux des réseaux de capteurs statiques. D’abord, les réseaux mobiles de faible densité dépensent des quantités considérables d’énergie en cas d’isolement des nœuds. Pour économiser l’énergie, les nœuds mobiles doivent être en mesure de se découvrir les uns les autres, tout en hibernant pendant de longues périodes de temps. Ensuite, les réseaux mobiles sont caractérisés par des modèles de trafic très différents de ceux des réseaux fixes. Des approches s’adaptant aux modèles de mobilité des nœuds capteurs sont ainsi envisagées.

Les approches de niveau macroscopique comprennent les solutions qui tirent avantage des hypothèses de modèles de mobilité pour assurer la dé-

couverte de voisins économe en énergie. Ces approches utilisent souvent des méthodes d'apprentissage des modèles d'activités des nœuds et adaptent la procédure de découverte des voisins selon ces modèles. L'apprentissage des modèles d'activités temporelles était souvent utile pour la prédiction de la qualité des liens [151], l'optimisation du routage [152], le broadcast [153], les protocoles MAC [154] et dans la localisation et les applications de suivi de mouvement [155]. Ces méthodes d'apprentissage peuvent être utiles pour concevoir des protocoles dynamiques de découverte de voisins. Parmi les approches de dimensionnement des protocoles de découverte de voisins se basant sur l'apprentissage des corrélations spatiales entre les nœuds, nous citons PPM-EL [156] qui se base sur l'estimation des probabilités de rencontre des nœuds en fonction de leur position dans la zone d'intérêt.

Nous proposons dans ce qui suit deux méthodes de dimensionnement du protocole de découverte de voisins s'inscrivant dans le cadre des approches macroscopiques et seront détaillées dans les sections suivantes.

4.3 Probing Period Modulation by Battery Monitoring (PPM-BM)

4.3.1 Présentation

Dans les études menées dans [157], une modélisation et une analyse de la consommation de l'énergie dans les réseaux DTN montre que l'énergie consommée par les nœuds, en mode « idle » ou « veille », est aussi significative que celle dépensée en mode « réception », et elle dépasse généralement par un ordre de grandeur la consommation de la procédure de transmission de données réelles. Pendant la phase de veille, le nœud ne transmet pas de messages de données mais il est à l'écoute du canal pour découvrir son voisinage et s'échange périodiquement des messages de découverte de voisins ou des messages « Hello ». Cet échange de messages consomme de l'énergie et use la batterie des nœuds. Dans cette phase, le nœud dépense de l'énergie afin de détecter la présence de voisins. Une fois que le contact est établi avec ses voisins, le nœud peut transmettre et recevoir des données. Chaque nœud commute périodiquement à cet état, en fonction du paramètre « période de découverte » ou aussi « période de scan » i.e. l'intervalle de temps séparant deux phases de découverte de voisinage. Des travaux de simulation sont élaborés dans [157] pour trouver la valeur de période de scan optimale qui permet d'améliorer les performances du routage. Ils ont conclu qu'une période de scan fixe (égale à 32 secondes dans leur contexte de simulation) permet d'atteindre les meilleurs performances de routage en termes de taux de messages délivrés. Néanmoins,

les auteurs de [157] n'ont pas évoqué l'impact de ce paramètre sur la durée de vie du réseau. Nous nous intéressons dans mes travaux à étudier l'impact énergétique de la fréquence de découverte de voisins sur les performances du réseau et nous optimiserons ce paramètre afin d'augmenter la durée de vie des nœuds. La constatation faite dans [157] concerne les réseaux DTN en général et s'applique donc sur les réseaux de capteurs en particulier. S'appuyant sur ces études, et partant de l'affirmation que délivrer plus de messages consomme plus d'énergie, nous nous sommes fixés comme objectif de limiter les duplications des messages de découverte des voisins. Ainsi, nous proposons des méthodes de dimensionnement efficaces qui agissent sur le paramètre « période de découverte de voisins ». Ce paramètre ne sera pas fixe mais au contraire dynamique et changera en fonction des paramètres énergétiques des nœuds. Nous adoptons le modèle d'énergie proposé dans [157]. En effet, on suppose que chaque nœud dispose de cinq états :

- Off : dans cet état, l'interface radio du nœud est hors tension. Un nœud peut être en mode Off par manque d'énergie (batterie déchargée). Dans cet état, le nœud ne peut pas établir des connexions avec les autres nœuds.
- Inactif : l'interface radio du nœud en mode « Inactif » est en veille. Toutefois, il peut être détecté par d'autres nœuds pour les contacts et l'échange de messages ultérieurs. La quantité d'énergie dépensée par unité de temps dans ce mode est très réduite et sera considérée comme négligeable.
- Découverte de voisins (Mode Scan) : dans ce mode, le nœud dépense de l'énergie afin de détecter la présence de ses voisins. Une fois le contact établi, le nœud peut transmettre et recevoir des messages. Chaque nœud commute périodiquement dans cet état, en fonction du paramètre « période de découverte ».
- Transmission : le nœud est en mode transmission de messages.
- Réception : lorsque le nœud reçoit des messages.

Dans ce modèle, chaque mode consomme une quantité d'énergie donnée et ces paramètres seront détaillés dans la section suivante.

En se basant sur le modèle d'énergie cité ci-dessus, nous proposons un algorithme appelé *Probing Period Modulation by Battery Monitoring (PPM-BM)*, une technique de dimensionnement de la période de découverte des voisins en fonction de l'énergie résiduelle du nœud qui sera détaillée dans la suite.

Initialement, les nœuds n'ont aucune visibilité sur leur voisinage. Ils disposent d'une quantité d'énergie $E_{initiale}$ et s'échangent les messages « Hello » avec leurs voisins chaque période de temps T_{init} fixe. Comme ce processus consomme beaucoup d'énergie, nous visons à dimensionner le paramètre T en

fonction de la quantité d'énergie résiduelle d'un nœud i , à un moment donné. Ce paramètre sera dimensionné au cours du temps selon l'équation suivante :

$$T^i = \alpha_i \times (T_{max} - T_{min}) + T_{min} \quad (4.1)$$

$$\alpha_i = (1 - \frac{E_{resid}^i}{E_{initiale}}) \quad (4.2)$$

E_{resid}^i étant l'énergie résiduelle du nœud i et T_{max} et T_{min} représentent respectivement les valeurs maximum et minimum attribuées à T . T_{min} étant la période de scan utilisée initialement avant de commencer la procédure de dimensionnement, et T_{max} représente la période maximale de découverte qui garantit un certain niveau d'exploration de voisinage même quand la quantité d'énergie résiduelle est faible.

Initialement, les nœuds possèdent un niveau maximum de leur énergie et vont, par conséquent, découvrir leur voisinage plus fréquemment, i.e. chaque T_{min} . Au fil du temps, ils vont transmettre des messages et leur niveau d'énergie diminuera. C'est ainsi qu'ils augmenteront au fur et au mesure leurs périodes de découverte selon les équations (4.1) et (4.2). Le pseudo-code de la technique PPM-BM est donné dans l'algorithme 1.

Algorithme 1 Pseudo-code de la technique PPM-BM

Initialement : $\forall i \in N \setminus \{Sink\}, T^i = T_{min}$

Périodiquement : chaque nœud i effectue une mise à jour locale

$$T^i = (1 - \frac{E_{resid}^i}{E_{initiale}}) \times (T_{max} - T_{min}) + T_{min}$$

Pour un niveau d'énergie minimal, les nœuds adopteront une période de découverte maximale T_{max} leur permettant de découvrir moins souvent leur voisinage. Ceci leur permettra de conserver leur énergie pour le processus de routage. Quand un nœud voit son niveau d'énergie arriver au-dessous d'un certain seuil minimum, il mettra à jour sa période de découverte des voisins et diminuera sa fréquence d'envoi de messages « Hello ». Par conséquent, il va être moins sollicité par son voisinage pour router les messages puisqu'il va apparaître moins souvent dans leurs tables de voisins. Ainsi, le nœud en question ne va plus participer dans le routage des messages des autres nœuds mais il conservera son énergie pour continuer à émettre ses propres messages. Bien que ceci puisse conduire au phénomène « d'égoïsme » des nœuds possédant les niveaux d'énergie résiduelle les moins élevés, nous privilégierons de conserver le plus longtemps possible ces nœuds et éviter de les perdre suite à la consommation totale de leurs batteries. Ceci est réaliste et envisageable dans certaines applications réelles où un nœud capteur couvre une zone géographique donnée et sa disparition du réseau entraînera la perte des informations

de supervision de cette zone. Dans des applications médicales de suivi des patients, un nœud capteur représente un patient et il sera primordial de ne perdre aucun des nœuds du réseau. Si un nœud épuise totalement son énergie, les informations de suivi de la personne portant le nœud défaillant sont perdues. D'où l'objectif de conserver l'énergie de tous les nœuds du réseau et ne perdre aucun d'eux.

4.3.2 Evaluation des performances

Nous proposons dans cette section une évaluation des performances de la technique PPM-BM. L'objectif de cette étude est de quantifier l'impact du dimensionnement de la période de découverte des voisins sur la consommation d'énergie globale du réseau et la durée de vie des nœuds. Nous étudions aussi l'impact de ce paramètre sur les performances des protocoles de routage. Tout d'abord, nous présentons l'environnement et les paramètres de simulation. Ensuite, nous exposons les métriques utilisées dans la mesure des performances. Enfin, nous analysons les performances de la technique PPM-BM.

4.3.2.1 Paramètres de simulation

4.3.2.1.1 Environnement de simulation : A des fins de validation de notre technique PPM-BM, nous avons opté pour le simulateur ONE [158]. Il s'agit d'une plate-forme de simulation à événements discrets, basée sur les agents et implémentée en Java. Le simulateur comprend plusieurs modèles synthétiques de mouvement et des traces de mobilité réelles et est dédié aux réseaux DTN. Il comprend des implémentations de plusieurs algorithmes de routage classiques pour les DTN et des modèles de mouvement qui sont utiles pour la comparaison des performances des techniques proposées. ONE permet une simulation rapide et flexible de différents scénarios et fournit également un moyen facile de génération des statistiques sur les scénarios simulés.

4.3.2.1.2 Modèle de mobilité utilisé : Nous adoptons un modèle de mobilité inspiré du modèle *Working Day Movement* [159] de ONE. Il s'agit d'un modèle basé sur une combinaison de plusieurs sous-modèles élémentaires de mouvements (sous-modèle de mouvement des individus dans la maison, sous-modèle de mouvement au bureau, etc) pour simuler les déplacements quotidiens des citoyens. Contrairement aux modèles de mobilité aléatoires comme "Random Waypoint", qui ne sont pas réalistes et ne reflètent pas les propriétés de mouvement des scénarios réels, le modèle *Working Day Movement* est capable de produire les caractéristiques des temps d'inter-contact et la distribution de durée de contact qui suivent étroitement celles des traces de mobilité

Zone de mouvement	$80km^2$
Nombre de nœuds	100
Durée de simulation	24h (1 jour) puis 10 jours
Portée de la radio	80m
Débit	250kbit/s
Espace tampon	200kB
Vitesse de mouvement	2m/s to 5m/s
Taille des messages	200Bytes
Période de génération des messages	60s

TABLE 4.1 – Les paramètres de simulation

réelles. Ce modèle permet de simuler des mouvements répétitifs périodiques. Il est ainsi utile pour reproduire des mouvements stationnaires notamment ceux des équipements mobiles portés par l'Homme (*human-carried devices movement*) où des liens sociaux se forment - quand des équipements font la même activité dans un même endroit - et influencent ainsi leur modèle de connectivité.

Dans notre étude, nous considérons un réseau formé de 100 nœuds mobiles. Leurs vitesses de déplacement sont uniformément comprises entre 2 m/s et 5 m/s, qui représentent les vitesses de déplacement des piétons [160]. Les nœuds sont déployés de manière aléatoire sur une zone de $10km \times 8km$, qui constitue une configuration fréquente dans la littérature DTN. Un puits (*sink*) unique est placé au centre de la zone de mouvement. Chaque nœud mobile génère périodiquement des messages de taille fixe de 200 octets chaque période de 60 secondes. Ce processus de génération de messages est typique d'un réseau de capteurs mobiles qui se consacre à la mesure synchrone d'un phénomène physique donné. Tous les nœuds possèdent 200 Ko d'espace tampon, une taille raisonnable pour les capacités de mémoire actuelles. La portée radio est de 80 mètres, et le débit binaire est de 250 kbit/s, valeurs typiques des communications radios 802.15.4 utilisées dans les réseaux de capteurs. Les paramètres globaux de simulation sont énumérés dans le tableau 4.1.

4.3.2.1.3 Modèle d'énergie utilisé : Nous utilisons également le module d'énergie détaillé dans la section 4.3.1 et implémenté dans ONE et qui prend en paramètres la quantité d'énergie consommée par mode de fonctionnement des nœuds. Les quantités d'énergie sont typiquement exprimées en unités par seconde. Cela signifie que pour chaque opération, l'énergie totale dépensée est fonction de sa durée. Pendant la simulation, le niveau de batterie des nœuds diminuera à chaque opération réalisée. Avant de commencer la

BatteryCapacity	1000 mW
ScanEnergy	1.21 mW/s
TransmitEnergy	0.28 mW/s
ReceiveEnergy	0.121mW/s
T_{min}	120s
T_{max}	3600s

TABLE 4.2 – Les paramètres d’énergie et des périodes de découverte des voisins

simulation, nous définissons la capacité initiale des batteries et les quantités d’énergie consommée pendant les différentes opérations en nous basant sur les valeurs typiques de consommation d’énergie de la littérature. Ces paramètres sont résumés dans le tableau 4.2.

4.3.2.2 Métriques de performance

La technique PPM-BM, comme décrite ci-dessus, est indépendante des protocoles de routage. Pour étudier son impact sur les performances de ces protocoles, nous l’avons implémentée dans trois des protocoles DTN les plus cités dans la littérature, à savoir le routage Epidémique [128], le protocole PROPHET [144] et MaxProp [139]. Les résultats de simulation sont calculés à partir de la moyenne de 10 exécutions. Dans cette étude, nous évaluons trois métriques :

- La consommation d’énergie : définie comme étant la consommation d’énergie moyenne des nœuds.
- Le taux de livraison des messages : défini comme étant le rapport entre le nombre des messages reçus par le Sink et le nombre total des messages émis par les nœuds.
- Le taux d’overhead induit : cette métrique mesure l’efficacité de la bande passante et est définie dans ONE comme suit :

$$overhead = \frac{N_{relays} - N_{deliv}}{N_{deliv}} \quad (4.3)$$

N_{relays} étant le nombre total de messages transférés par les nœuds et N_{deliv} le nombre de messages reçus au niveau du Sink.

4.3.2.3 Résultats de simulation

Nous considérons pour cette simulation le scénario suivant :

Scénario : les nœuds mobiles se déplacent aléatoirement dans la zone de déploiement suivant le modèle *Working Day Movement*. Le puits est immobile

au centre de la zone. Chaque période de 60s, les nœuds émettent des messages en direction du puits. La durée de simulation est de 24h. Les figures 4.1, 4.2 et 4.3.2.3 illustrent la variation de la consommation d'énergie moyenne des nœuds en fonction du temps pour les trois protocoles considérés.

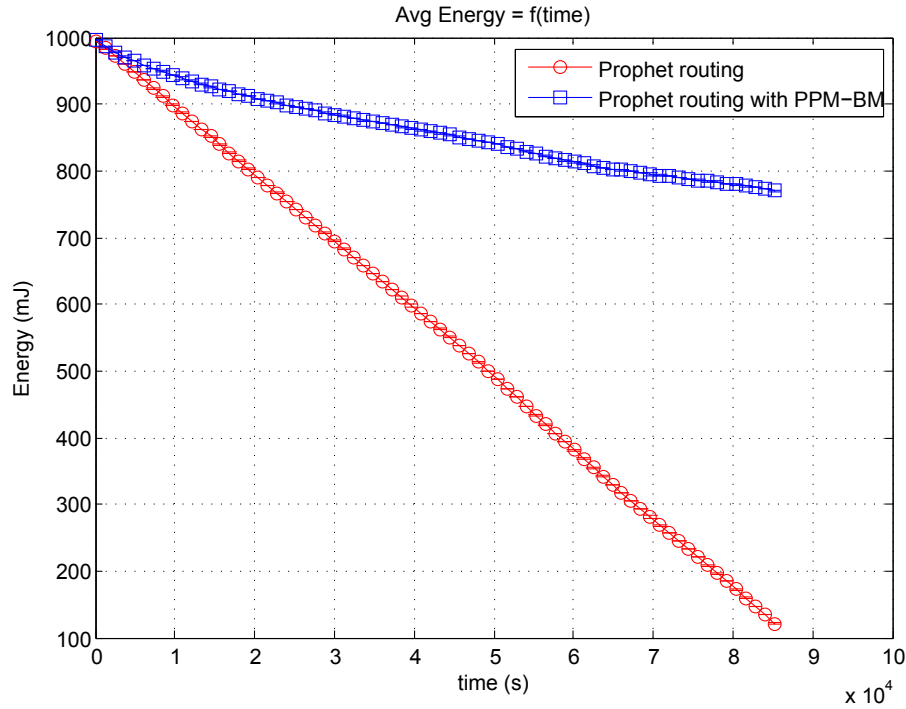


FIGURE 4.1 – L'énergie moyenne consommée par les protocoles Prophet et Prophet avec PPM-BM

Nous remarquons, pour les trois protocoles étudiés, que la technique PPM-BM permet de conserver plus de 70% de l'énergie moyenne consommée par ces trois protocoles (Prophet, Epidemic et Maxprop). Ce résultat est prévisible puisque la technique PPM-BM permet de réduire le nombre de messages « Hello » envoyés et dimensionne leur envoi en fonction du niveau d'énergie résiduelle du nœud.

Néanmoins, le fait de réduire la fréquence de découverte de voisins pourrait faire manquer des rencontres entre les nœuds et avoir un impact sur le taux de livraison de messages. Les tableaux 4.3 et 4.4 résume les performances obtenus des protocoles Epidemic, Prophet et MaxProp ainsi que leurs versions avec

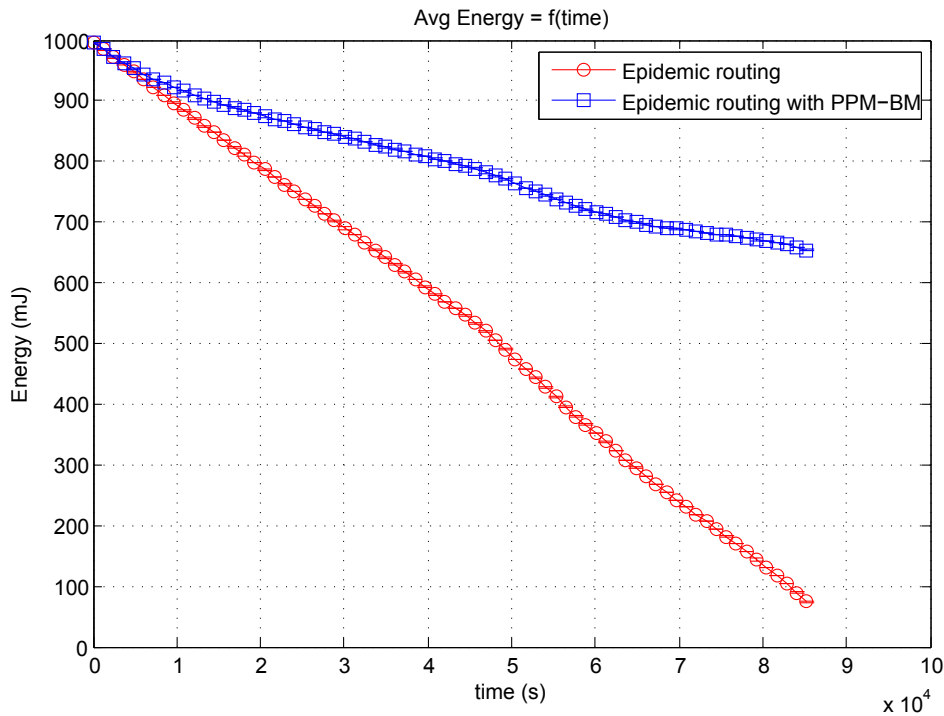


FIGURE 4.2 – L'énergie moyenne consommée par les protocoles Epidemic et Epidemic avec PPM-BM

PPM-BM, en termes de taux de livraison de messages et d'overhead.

Nous remarquons que le routage Epidemic présente le taux de livraison le plus élevé par rapport aux protocoles Prophet et MaxProp. La technique PPM-BM n'affecte pas le taux de livraison de ce protocole puisque Epidemic se base sur la diffusion de messages rendant ainsi la phase de découverte de voisins inutile dans ce cas de figure. Pour une durée de simulation de 24h, la technique PPM-BM a permis de garder un taux de livraison comparable à celui des deux protocoles Prophet et MaxProp originaires. L'apport de la technique PPM-BM est plus visible pour une durée de simulation de 10 jours au bout de laquelle les trois protocoles originaires ont eu un taux de livraison réduit et un overhead élevé. Ceci est expliqué par l'épuisement d'énergie de la plupart des nœuds et la perte de messages. Les versions des protocoles avec PPM-BM ont pu garder un taux de livraison de messages acceptable puisqu'ils ont conservé l'énergie d'un grand nombre de nœuds.

Protocole	Taux de livraison de messages	Overhead
Epidemic	0.5670	79.2371
Epidemic-PPM-BM	0.5670	79.2371
Prophet	0.3575	36.4141
Prophet-PPM-BM	0.3603	36.2403
MaxProp	0.5272	58.7069
MaxProp-PPM-BM	0.5691	58.4172

TABLE 4.3 – Les taux de livraison et d’overhead pour les six protocoles étudiés pour des durées de simulations de 24h

Protocole	Taux de livraison de messages	Overhead
Epidemic	0.0568	85.2518
Epidemic-PPM-BM	0.0568	562.8753
Prophet	0.0423	46.2299
Prophet-PPM-BM	0.3246	79.1805
MaxProp	0.0618	66.1213
MaxProp-PPM-BM	0.3639	85.4029

TABLE 4.4 – Les taux de livraison et d’overhead pour les six protocoles étudiés pour des durées de simulations de 10 jours

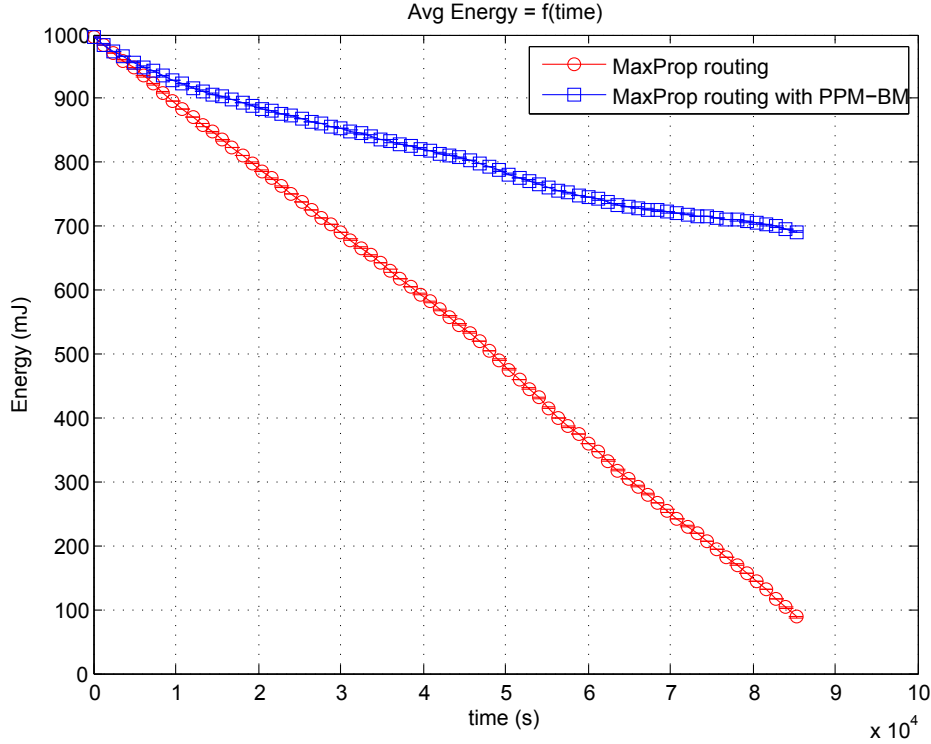


FIGURE 4.3 – L'énergie moyenne consommée par les protocoles MaxProp et Maxprop avec PPM-BM

4.4 Expected Connectivity-based Neighbor Discovery protocol (ECoND)

Nous présentons dans cette section notre approche de dimensionnement de la fréquence de découverte de voisins basée sur la connectivité estimée, ou ECoND, *Expected Connectivity-based Neighbor Discovery protocol*.

4.4.1 Présentation

Nous commençons par définir la notion du calendrier de découverte (discovery schedule), qui détermine les intervalles de temps au cours desquels chaque nœud mobile effectue la découverte de voisins [161].

Calendrier de découverte : Le calendrier de découverte d'un nœud mobile m est défini par la fonction binaire $\omega(m, t)$, qui détermine si le nœud

m tente une découverte de voisins à l'instant t . $\omega(m, t) = 0$ implique que le nœud mobile m n'est pas en mode découverte à l'instant t . Inversement, $\omega(m, t) = 1$ indique que le nœud m est en mode de découverte de voisins à l'instant t . La notion de découverte de voisins est définie comme étant l'événement se produisant à l'instant t quand deux nœuds mobiles $m1$ et $m2$ sont à portée radio l'un de l'autre et $\omega(m1, t) = \phi(m2, t) = 1$. ω et ϕ étant les fonctions définissant respectivement les calendriers de découverte des nœuds $m1$ et $m2$.

Nous considérons les réseaux de capteurs mobiles asymétriques (i.e. les nœuds possèdent des calendriers de découverte différents) asynchrones. La notion de découverte de voisins est définie comme étant l'événement qui se produit lorsque les calendriers de découverte d'une paire de nœuds coïncident. Le problème de découverte de voisins dans un réseau de n nœuds est défini ainsi : $\omega(i, t) = \phi(j, t + \varphi_{i,j}) \forall 1 \leq i, j \leq n \forall t$, où $\varphi_{i,j}$ est le décalage entre les origines des temps relatives dans les nœuds i et j .

L'approche proposée se base sur la conclusion tirée des simulations de l'approche PPM-BM. Nous avons remarqué qu'une fréquence de découverte de voisinage élevée garantit une découverte rapide des nœuds mais devient une source de gaspillage d'énergie quand les nœuds sont isolés et ne rencontrent aucun nœud. D'autre part, une fréquence de découverte faible peut manquer de nombreux contacts importants. Son impact sur le taux de livraison des messages était remarquable.

Le but de cette démarche est de concevoir un algorithme adaptatif pour le contrôle de la fréquence de découverte de voisinage, économe en énergie et permettant de maintenir le nombre de rencontres réussies. Pour maximiser ce facteur, un nœud doit être en mode découverte de voisins à l'instant où il est entouré de plusieurs nœuds et passera en mode sommeil au moment où il se trouve isolé. Nous proposons une approche qui permet à un nœud de planifier ses instants de découverte de voisinage en fonction de la connectivité estimée (cf. Equation (4.4)). Ainsi, un nœud passera plus souvent en mode de découverte lorsque plus de rencontres sont attendues. De même, il évite la découverte en l'absence de rencontres prévues.

Pour ce faire, nous exploitons les cycles temporels que suit le mouvement des nœuds dans un réseau de capteurs. Nous estimons cette hypothèse réaliste, au vu des nombreuses études sur les communautés de réseautage et biologiques affirmant que l'activité des êtres vivants suit certaines tendances et cycles temporels [162] [163]. Ces cycles temporels dépendent de divers facteurs, notamment la disponibilité de l'alimentation, les migrations et les structures sociales. Ces cycles sont liés aux activités solaires et lunaires connexes et sont également appelés les rythmes biologiques. Ceci aura un impact sur le mouvement des équipements mobiles portés par l'Homme. Les réseaux de capteurs sont également concernés par cette étude puisqu'ils sont utilisés pour déployer

des applications de suivi de la faune, ou des personnes. Prenons l'exemple d'une application médicale de suivi du déplacement des patients dans l'hôpital. Leur déplacement suit des cycles temporels prévisibles : le matin, les patients quittent leurs chambres. En journée, ils sont généralement dans les services de soin ou les salles opératoires. Et le soir, ils sont dans les salles de surveillance post-interventionnelles ou rejoindront leurs chambres. Il en sera de même chaque jour.

Nous considérons un réseau de capteurs mobiles dont le modèle de mobilité présente des cycles temporels et des activités répétitives chaque période de 24h. Nous prenons comme unité de temps 1 jour et nous le divisons en N timeslots. La durée de chaque timeslot peut être définie selon le type d'applications. Ce paramètre sera fixé dans la section suivante. Pendant chaque timeslot, la connectivité du réseau est différente. Pour cela, chaque nœud calculera le taux de rencontre de voisins à chaque timeslot à l'aide d'une moyenne pondérée exponentielle EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) et en se basant sur l'historique des mesures pendant les derniers jours au même timeslot. L'estimation du taux de rencontre pour chaque nœud est calculée selon l'équation suivante :

$$E_c(m, t_{slot}, J) = Encount_{curr} \times \alpha + (1 - \alpha) \times [E_c(m, t_{slot}, J - 1)] \quad (4.4)$$

$E_c(m, t_{slot}, J)$ représente la connectivité prévue du nœud m pendant le timeslot t_{slot} le jour J , $Encount_{curr}$ représente le nombre actuel de voisins rencontrés, et $[E_c(m, t_{slot}, J - 1)]$ étant l'ancienne valeur de connectivité prévue calculée le jour d'avant pendant le même timeslot t_{slot} . Nous pondérons les deux derniers paramètres respectivement avec α et $(1 - \alpha)$. Quand α est grand, la valeur représentant le nombre de rencontres actuelles a plus de poids dans le calcul de la connectivité prévue, ce qui permet d'avoir un algorithme plus sensible aux changements de nombre de voisins rencontrés. Quand α est petit, ceci rend l'algorithme plus robuste contre les valeurs de connectivité bruitées mais ne prendra pas en compte les changements actuels du niveau de connectivité. La fréquence de découverte de voisins $F_{discovery}$ sera mise à jour à chaque timeslot sur la base de la connectivité estimée. Elle sera déduite à partir de l'équation suivante :

$$F_{discovery} = \frac{E_c(m, t_{slot}, J)}{\sum_{i=1}^N E_c(m, t_{slot_i})} \times \frac{1}{T_{init}} \quad (4.5)$$

$$T_{discovery} = \frac{1}{F_{discovery}} \quad (4.6)$$

La fréquence de découverte de voisins est calculée localement par chaque nœud à chaque timeslot et le nœud enverra par la suite ses messages hello chaque $T_{discovery}$. Pour résumer, la technique ECoND fonctionne comme suit :

Zone de mouvement	$80km^2$
Nombre de nœuds	100
Portée de la radio	80m
Débit	250kbit/s
Espace tampon	200kB
Vitesse de mouvement	2m/s to 5m/s
Taille des messages	200Bytes
Période de génération des messages	60s
Durée de simulation	24h (1 jour)
Durée d'un timeslot	1h

TABLE 4.5 – Les paramètres de simulation de la technique ECoND

1. Initialement, les nœuds découvrent leurs voisinages chaque T_{init} . Au fur et à mesure, ils ajustent cette valeur en fonction de la connectivité estimée suivant les étapes suivantes.
2. A chaque rencontre d'un voisin, chaque nœud incrémente un compteur de voisins $C_v = C_v + 1$. Ce compteur est remis à zéro à chaque fin de timeslot.
3. A la fin de chaque journée, une mise à jour de la connectivité à chaque timeslot est estimée à :

$$E_c(m, t_{slot}, J) = C_v(t_{slot}) \times \alpha + (1 - \alpha) \times [E_c(m, t_{slot}, J - 1)] \quad (4.7)$$

4. Au début du timeslot courant (t_{slot}), le nœud fixe sa fréquence de découverte égale à :

$$F_{discovery} = \frac{E_c(m, t_{slot}, J)}{\sum_{i=1}^N E_c(m, t_{sloti})} \times \frac{1}{T_{init}} \quad (4.8)$$

Désormais, l'envoi de messages de découverte de voisins est fait à chaque $\frac{1}{F_{discovery}}$.

4.4.2 Evaluation des performances

4.4.2.1 Paramètres de simulation

Pour évaluer les performances de la technique ECoND, nous avons opté pour les mêmes paramètres de simulations de la technique PPM-BM qui sont résumés dans les Table 4.5 et Table 4.6.

BatteryCapacity	1000 mW
ScanEnergy	1.21 mW/s
TransmitEnergy	0.28 mW/s
ReceiveEnergy	0.121mW/s
T_{min}	120s
T_{max}	3600s
α	0.5

TABLE 4.6 – Les paramètres d’énergie et des périodes de découverte des voisins pour la simulation de la technique ECoND

4.4.2.2 Métriques de performances

Les résultats de simulation sont calculés à partir de la moyenne de 10 exécutions. Dans cette étude, nous évaluons trois métriques :

- La consommation d’énergie : définie comme étant la consommation d’énergie moyenne des nœuds.
- Le taux de livraison des messages : défini comme étant le rapport entre le nombre de messages reçus par le Sink et le nombre total de messages émis par les nœuds.
- Le taux d’overhead induit : cette métrique mesure l’efficacité de la bande passante et est définie dans ONE comme suit :

$$overhead = \frac{N_{relays} - N_{deliv}}{N_{deliv}} \quad (4.9)$$

N_{relays} étant le nombre total de messages transférés par les nœuds et N_{deliv} le nombre de messages reçus au niveau du Sink.

4.4.2.3 Résultats de simulation

Nous considérons pour cette simulation le scénario suivant :

Scénario : les nœuds mobiles se déplacent aléatoirement dans la zone de déploiement suivant le modèle *Working Day Movement*. Le puits est immobile au centre de la zone. Chaque 60s, les nœuds émettent des messages en direction du puits. La durée de simulation est de 24h. Les figures 4.4, 4.5 et 4.4.2.3 illustrent la variation de la consommation d’énergie moyenne des nœuds en fonction du temps pour les trois protocoles considérés.

Nous remarquons que la technique ECoND permet de réduire la consommation moyenne d’énergie et permet de conserver plus longtemps l’énergie comparativement à la technique PPM-BM présentée dans la section précédente. Ce résultat est valable pour les trois protocoles. Nous nous sommes

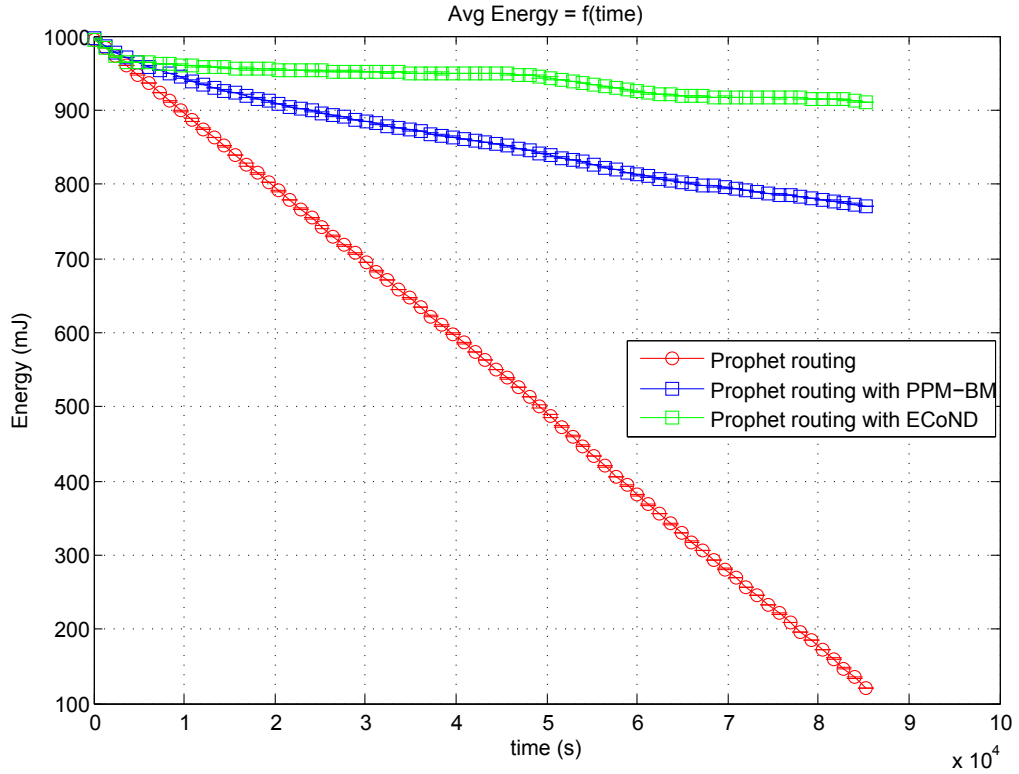


FIGURE 4.4 – L'énergie moyenne consommée par les protocoles Prophet, Prophet avec PPM-BM et Prophet avec ECoND

intéressés aussi à comparer les performances de ECoND implémentée dans les trois protocoles de référence, en termes de taux de livraison de messages et d'overhead. Dans le tableau 4.7, nous remarquons que les performances du protocole Epidemic ne sont pas affectées par la technique ECoND puisque la phase de découverte de voisins n'a pas d'effet dans un scénario de diffusion épidémique de messages. Les performances obtenus par Prophet et MaxProp sont conservées. Ce résultat met en évidence l'intérêt de la technique ECoND puisque nous avons les mêmes performances de taux de livraison de messages que celles des protocoles originaires, avec en plus une conservation de l'énergie moyenne des nœuds.

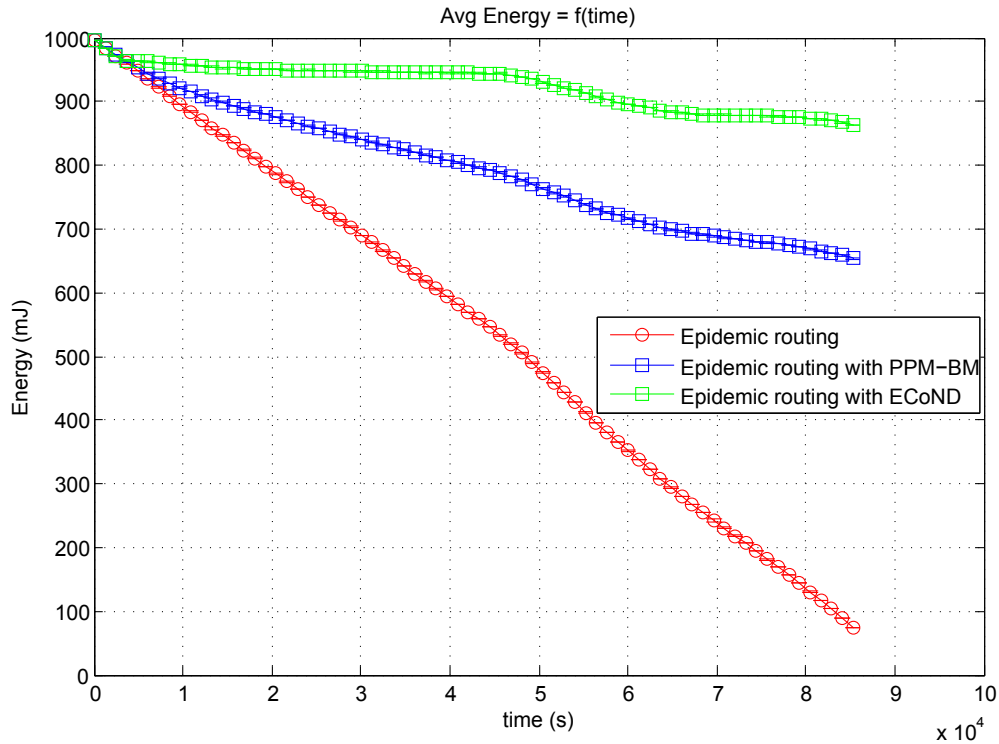


FIGURE 4.5 – L'énergie moyenne consommée par les protocoles Epidemic, Epidemic avec PPM-BM et Epidemic avec ECoND

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évoqué l'impact de la phase de découverte de voisinage sur les performances des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs mobiles.

Nous avons présenté deux techniques de découverte de voisinage économes en énergie. La première approche, PPM-BM, consiste à dimensionner la fréquence d'envoi des messages de découverte de voisins en fonction du niveau de batterie du nœud. Les nœuds avec les niveaux de batterie les moins élevés découvriront leur voisinage moins souvent pour conserver leur énergie résiduelle pour les mécanismes de haut niveau notamment le routage. Les nœuds ayant les niveaux d'énergie les plus élevés, quant à eux, enverront plus souvent des messages de découverte de voisins et seront plus impliqués dans le routage des données vers le Sink. Cette technique ne prend pas en compte l'information de connectivité prévue, c'est pour cette raison que nous avons proposé

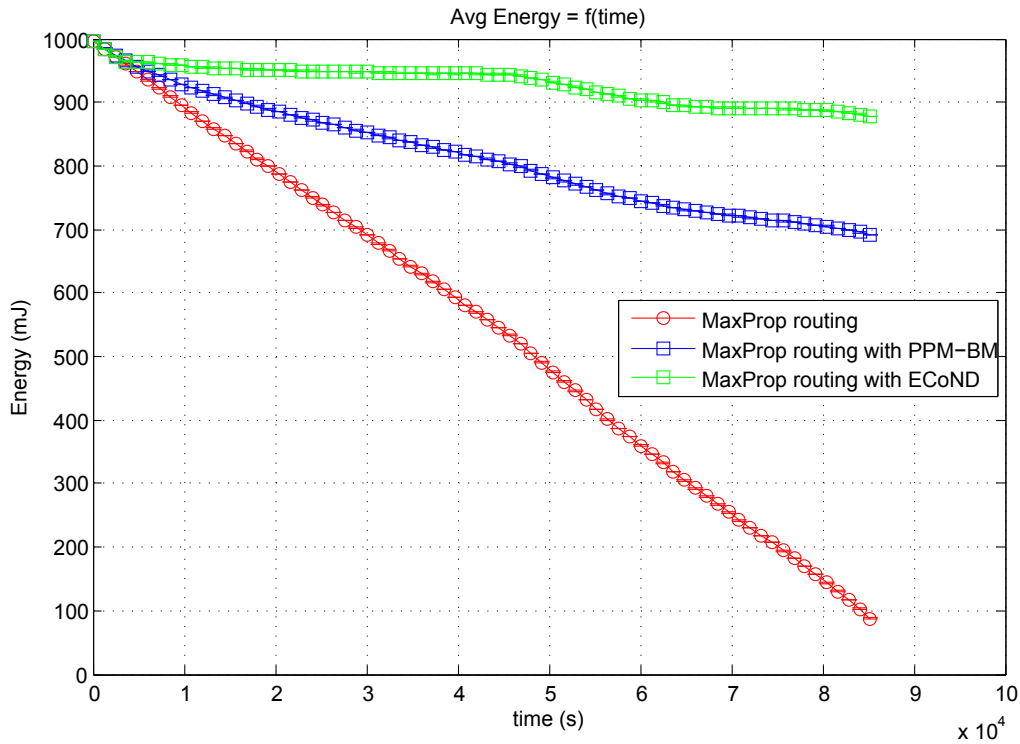


FIGURE 4.6 – L'énergie moyenne consommée par les protocoles MaxProp, MaxProp avec PPM-BM et Maxprop avec ECoND

la deuxième approche ECoND. Cette méthode vise à ajuster la fréquence de découverte de voisins en fonction de la connectivité estimée à chaque instant. Cette technique tire profit des cycles temporels des modèles de mouvement des nœuds. La connectivité est estimée en se basant sur l'historique des rencontres. La fréquence de découverte est alors ajustée en fonction du taux de connectivité estimé.

Ces deux approches ont été évaluées par simulation et implémentées sur trois protocoles de routage opportunistes. Les résultats de simulation mettent en évidence l'efficacité de ces deux techniques qui permettent de réduire la consommation d'énergie des nœuds sans affecter les performances de taux de livraison de messages et d'overhead des protocoles de référence. Les deux approches proposées sont conçues pour un contexte d'application de suivi des personnes dans un milieu indoor. Par ailleurs, elles se basent sur des spécifications génériques et s'appliquent à d'autres types d'applications de

Protocole	Taux de livraison de messages	Overhead
Epidemic	0.5272	79.2371
Epidemic-ECoND	0.5272	79.2371
Prophet	0.3575	36.4141
Prophet-ECoND	0.3582	36.4269
MaxProp	0.5670	58.7069
MaxProp-ECoND	0.5677	58.4982

TABLE 4.7 – Les taux de livraison et d’overhead pour les six protocoles étudiés

réseaux de capteurs mobiles. Elles sont indépendantes du protocole de routage utilisé et peuvent ainsi être utilisées avec tout protocole de haut niveau.

Nous consacrons le chapitre 5 à l’étude du routage dans les réseaux de capteurs sans fil mobiles et nous proposons d’agir sur ce mécanisme pour optimiser la consommation d’énergie des noeuds et améliorer les performances de routage.

Routage économe en énergie dans les réseaux de capteurs mobiles

Sommaire

5.1	Introduction	89
5.2	Maximisation de la durée de vie du réseau	90
5.3	Motivation	92
5.4	EXLIOSE : Un protocole de routage opportuniste pour maximiser la durée de vie du réseau	93
5.4.1	Modèle du réseau utilisé	94
5.4.2	Modèle d'énergie utilisé	94
5.4.3	Métrique de routage	95
5.5	Evaluation des performances	99
5.5.1	Métriques de performances	99
5.5.2	Scénarios de simulation	100
5.5.3	Résultats et discussion	100
5.6	Implémentation	106
5.6.1	Matériel	106
5.6.2	Scénarios de test	107
5.6.3	Evaluation des performances	107
5.7	Conclusion	111

5.1 Introduction

Le routage des données est fondamental dans les réseaux sans infrastructure comme les réseaux de capteurs sans fil. Dans l'absence d'une infrastructure gérant les informations échangées entre les différents nœuds du réseau (comme par exemple les routeurs dans les réseaux filaires), chaque nœud du réseau joue un rôle primordial dans le transfert des informations et la gestion du routage et tous les nœuds collaborent afin de router une information vers la station puits. Le rôle principal d'un protocole de routage est celui d'acheminer

le maximum de données vers le nœud collecteur du réseau, tout en consommant le minimum de ressources. Nous avons proposé dans le chapitre 4 deux techniques de dimensionnement de la découverte de voisins qui permettent d'ajuster la fréquence de découverte en fonction des ressources disponibles en énergie et de la connectivité prévue. Ces deux approches sont indépendantes du protocole de routage utilisé. Nous agissons maintenant sur le mécanisme de routage et nous proposons, dans ce chapitre, un protocole de routage qui vise à maximiser la durée de vie du réseau et améliorer les performances de délivrance de messages.

La durée de vie est devenue la caractéristique clé pour l'évaluation des réseaux de capteurs. En effet, l'objectif de tout scénario d'application est d'avoir des nœuds déployés pour des mois ou des années. Dans ce chapitre, nous abordons le problème de l'extension de la durée de vie d'un réseau de capteurs. Dans ce type de réseau, tous les nœuds génèrent des messages et les envoient à une station de base ou un puits (*sink*) à travers des chemins multi-sauts. Nous proposons dans ce chapitre un protocole de routage destiné à équilibrer les consommations d'énergie des nœuds afin de prolonger la durée de vie du réseau. L'équilibrage des consommations d'énergie passe par un partage de la charge du trafic au niveau du réseau.

Ce chapitre est organisé comme suit : nous définissons d'abord la notion de durée de vie d'un réseau de capteurs. Comme plusieurs définitions existent dans la littérature, nous avons opté pour la définition la plus utilisée et nous la présentons dans la première section. Ensuite, nous présentons les principaux travaux qui se sont intéressés à la maximisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs. Nous détaillons, dans la troisième section, le protocole de routage que nous proposons, EXLIOSE (novel approach to EXtending network Lifetime in Opportunistic SEnsor Networks) qui se base sur une nouvelle métrique de routage ESC (Energy-Shortage Cost). Nous évaluons les performances du protocole proposé et les comparons à deux protocoles de référence. Les évaluations se feront en termes d'extension de la durée de vie du réseau sans négliger les performances de qualité de service, notamment le taux de livraison de messages.

5.2 Maximisation de la durée de vie du réseau

La durée de vie du réseau est la métrique la plus importante pour l'évaluation d'un réseau de capteurs. Dans un tel environnement aux ressources limitées, l'optimisation de la consommation d'énergie de chaque nœud doit, évidemment, être envisagée. Toutefois, la durée de vie du réseau affecte l'utilité du réseau de capteurs. Le réseau ne peut accomplir son objectif que lorsqu'il

est "vivant", i.e. fonctionnel. La durée de vie est ainsi une métrique qui informe sur l'utilité maximale d'un réseau de capteurs. Cette métrique est considérée dans une analyse qui précède un déploiement réel d'un réseau de capteurs et peut également contribuer à justifier le coût du déploiement. La durée de vie est également considérée comme un paramètre fondamental dans le contexte de la disponibilité et de la sécurité des réseaux [164].

La durée de vie du réseau est l'intervalle du temps qui s'écoule depuis le déploiement initial du réseau et l'instant où l'on considère le réseau comme non fonctionnel. En revanche, considérer un réseau comme non fonctionnel est spécifique à l'application et c'est en raison de cette spécificité qu'une multitude de définitions existent. Parmi les définitions présentées dans le chapitre 2, nous optons pour la définition suivante : un réseau de capteurs est considéré comme non-fonctionnel dès qu'un nœud épuise toute son énergie. La durée de vie du réseau est ainsi définie comme étant la période séparant le déploiement initial du réseau et le premier instant de l'épuisement total de l'énergie d'un nœud. La durée de vie du réseau dépend ainsi de la durée de vie nodale. Par conséquent, si nous considérons que DV_i est la durée de vie du nœud $n_i \in N$ (N étant l'ensemble des nœuds), alors la durée de vie du réseau, DV_{Reseau} , est définie comme étant la durée de vie minimale des nœuds du réseau :

$$DV_{Reseau} = \min_{i \in N} DV_i \quad (5.1)$$

L'objectif principal consiste à maximiser la durée de vie du réseau. Selon la définition retenue de la durée de vie, maximiser cette métrique est équivalent à maximiser la durée de vie minimale d'un nœud. Il s'agit d'étendre au maximum l'instant où le premier nœud meurt i.e. épuise totalement son énergie. Déterminer la durée de vie maximale du premier nœud qui tombe en panne (suite à l'épuisement de la charge de sa batterie) revient à minimiser la consommation d'énergie maximale des nœuds du réseau. En d'autres termes, minimiser le maximum des consommations d'énergie de chaque nœud revient à équilibrer la charge du trafic dans le réseau pour garantir qu'aucun nœud ne s'expose à une forte consommation d'énergie [29]. Notre idée consiste alors à mettre en oeuvre des mécanismes simples pour le routage qui assurent la maximisation de la durée de vie du réseau. Nous présentons cela dans la partie suivante. Cette définition est idéale dans un contexte d'applications médicales de suivi des patients ou des réseaux BAN (Body Area Networks) utilisés dans des applications E-Health [165].

5.3 Motivation

La plupart des travaux qui se sont intéressés à la maximisation de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil, se sont fixés comme objectif la minimisation de la métrique énergie de bout-en-bout en sélectionnant les nœuds de prochain saut, ceux qui sont géographiquement plus proches de la destination. Le protocole GCF [166] est le premier qui a intégré l'idée du routage opportuniste dans les réseaux de capteurs. En effet, le routage opportuniste [167] - [168] exploite la nature de diffusion du canal sans fil en élargissant la plage de transmission des messages. Au lieu de choisir un nœud de prochain saut selon une métrique donnée, GCF propose de choisir plusieurs voisins comme candidats pour transmettre les messages. L'objectif final étant de minimiser le nombre de retransmissions des messages en impliquant plusieurs nœuds relais et la minimisation de l'énergie de bout-en-bout en permettant aux messages d'emprunter différents chemins. Cependant, minimiser l'énergie consommée de bout-en-bout plutôt que de considérer l'énergie résiduelle de chaque capteur, entraînera des épuisements de certains capteurs et rend ainsi le réseau de capteurs non fonctionnel suivant la définition pour laquelle nous avons opté dans la section 5.2. [169] propose un mécanisme de veille et de sommeil opportuniste qui permet à chaque capteur de déterminer le groupe de nœuds relais qui permet de prolonger la durée de vie du réseau en respectant un certain délai de transmission de bout-en-bout acceptable. Ce mécanisme de planification des moments de veille/sommeil fonctionne au dessus des protocoles de routage. En effet, ce mécanisme détermine un sous-ensemble de capteurs réveillés qui permettent d'étendre la durée de vie du réseau et c'est à la charge du protocole de routage de choisir l'ensemble de nœuds relais parmi ce sous-ensemble. Notons que les travaux sur la planification veille/sommeil sont orthogonaux à nos travaux et peuvent être combinés avec notre proposition. Certains travaux [170], [171] ont présenté des protocoles de routage qui visent à maintenir la disponibilité des capteurs possédant des niveaux de batterie moins élevés en répartissant la charge sur ceux qui en possèdent plus. Cependant, ne considérer que le niveau d'énergie résiduelle pour décider du nœud du prochain saut, n'est à notre avis pas très opportun parce que l'énergie consommée lors de la transmission d'un message pourrait avoir un impact différent sur deux nœuds ayant des niveaux d'énergie résiduels différents. Prenons l'exemple du scénario de la figure 5.1 où un nœud A veut transmettre ses messages à l'un de ses voisins B et C qui possèdent la même capacité de batterie, en l'occurrence ici 10 unités. Supposons que les niveaux d'énergie résiduelle des nœuds B et C sont différents, par exemple 2 et 5 unités respectivement. Notons qu'une unité d'énergie consommée représente 50% et 20% respectivement de leur énergie résiduelle. Afin de saisir l'impact de chaque unité d'énergie consommée sur le

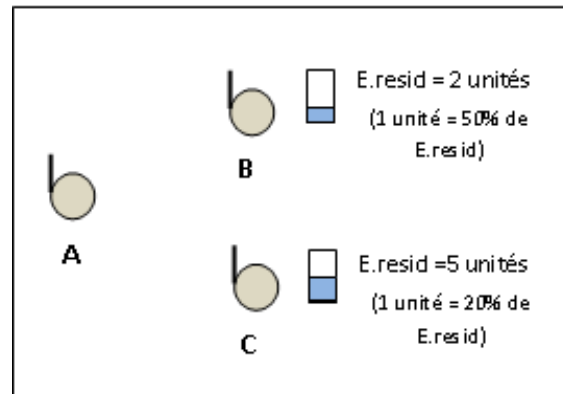


FIGURE 5.1 – La relation entre les quantités d’énergie consommée et résiduelle au niveau des nœuds capteurs

choix du nœud du prochain saut, nous définissons la métrique coût de pénurie d’énergie noté ESC, qui mesure cet impact et inclut les deux paramètres liés à l’énergie consommée au cours de la transmission et au niveau d’énergie résiduelle. Nous détaillons cette métrique dans la section suivante.

5.4 EXLIOSE : Un protocole de routage opportuniste pour maximiser la durée de vie du réseau

EXLIOSE (novel approach to EXtending network Lifetime in Opportunistic SEnsor Networks) est un protocole de routage qui vise à maximiser la durée de vie du réseau de capteurs mobiles en maximisant celle des batteries des nœuds. Il est basé sur l’historique de rencontre entre les paires de nœuds. Il partage le même principe de fonctionnement de base que d’autres algorithmes dans cette classe [144] [139] : les nœuds échangent et/ou enregistrent des informations sur la fréquence de rencontre de la destination et font l’acheminement des messages en se basant sur cette information. Se baser sur l’information « fréquence de rencontre de la destination » permet aux nœuds de choisir le/ou les nœuds de prochain saut qui rencontrent le plus souvent la destination. Ceci permet d’augmenter le taux de livraison des messages. Cet objectif est assuré par EXLIOSE. Il vise par ailleurs à partager la charge entre les nœuds et maximiser la durée de vie du réseau. Pour ce faire, nous proposons une nou-

velle métrique qui prend en compte le niveau d'énergie résiduelle au niveau des nœuds et leur consommation d'énergie prévue.

5.4.1 Modèle du réseau utilisé

Nous modélisons un réseau de capteurs mobiles comme un réseau de capteurs DTN. Un réseau DTN est représenté, en théorie des graphes, par un multi graphe orienté $G = (V, E)$ où V et E représentent respectivement l'ensemble des nœuds et des arêtes. Chaque lien direct (arête) E entre deux nœuds $(V1, V2)$ représente une opportunité de rencontre entre eux, et il est annoté avec un quadruplet $E = (t_s, t_e, s, T)$, où t_s est l'heure de début de la rencontre, t_e est l'heure de fin de la rencontre, si elle est connue, s est la taille de la possibilité de transfert (capacité du contact), et T est le type de contact. Un modèle DTN inclut la notion de type de contact ou de connectivité T . Un contact représente une période de temps au cours de laquelle deux nœuds voisins sont à portée radio l'un de l'autre et la capacité du lien est ainsi strictement positive [172]. Dans les réseaux classiques, la connectivité d'un lien est généralement représentée par un état binaire (i.e. connecté ou déconnecté). Dans les réseaux DTN, un ensemble riche d'options de connectivité est nécessaire pour prendre des décisions de routage efficaces. Plusieurs types de contacts sont définis dans [172]. Les contacts dans un réseau DTN peuvent, à titre d'exemple, être déterministes ou prévisibles. Dans notre modèle, les contacts entre les entités mobiles ne peuvent être ni connus ni prévisibles. Ainsi, ces contacts sont opportunistes. En outre, les nœuds d'un réseau DTN ont une capacité de stockage finie (tampon) utilisée pour conserver les messages en transit. Le routage se produit dans un mode store-and-forward. L'algorithme de routage est chargé de déterminer le nœud qui constitue le prochain saut par lequel le message doit transiter. Les messages stockés qui ne seront pas immédiatement transférés devront attendre jusqu'à ce qu'un contact ait lieu.

5.4.2 Modèle d'énergie utilisé

Le modèle d'énergie que nous utilisons est proposé dans [157]. En effet, comme les nœuds capteurs sont généralement alimentés par des batteries de capacité limitée, l'alimentation en énergie d'un nœud est représentée par une fonction décroissante en fonction du temps. Chaque nœud capteur possède cinq états :

- Off : quand il épuise son énergie, le nœud ne peut plus établir des connexions avec les autres nœuds.
- Inactif : lorsque le nœud est en mode Inactif, son interface réseau est en-veille, mais il peut être détecté par ses voisins pour échanger des

messages.

- Scan : dans ce mode, le nœud est en découverte de son voisinage.
- Transmission : le nœud envoie des messages.
- Réception : le nœud reçoit des messages.

Dans un autre modèle proposé dans [173], les coûts énergétiques de transmission et de réception sont une fonction linéaire de la longueur du message à transmettre. Cependant, dans le modèle que nous avons choisi, la quantité d'énergie consommée lors de chaque émission et réception est supposée être fixe pour tous les nœuds. En outre, une quantité d'énergie prédéfinie fixe est affectée pour chaque opération. Dans le cadre de réseaux de capteurs, ces hypothèses sont justifiées par le fait qu'un capteur transmet des données de taille fixe sur l'environnement surveillé. Puis, quand un nœud est inactif, l'énergie dépensée est nulle. Enfin, lorsque le nœud est en mode transmission ou réception, le temps total passé dans ce mode est multiplié par la quantité d'énergie prédéfinie dépensée par unité de temps dans l'opération correspondante. La dernière hypothèse du modèle indique, comme mentionné dans la littérature, que la quantité d'énergie consommée au cours de la phase de scan est supérieure d'un ordre de grandeur à celle consommée en mode transmission.

5.4.3 Métrique de routage

5.4.3.1 Probabilité de rencontre

Avant de calculer la nouvelle métrique de routage proposée ESC, nous avons besoin de calculer un paramètre important qui est la *probabilité de livraison* $P(i, s) \in [0, 1]$. Celle-ci mesure la probabilité qu'un nœud i soit capable de livrer un message à la destination s , le Sink. Pour définir ce paramètre, nous nous basons sur les probabilités de rencontre entre chaque paire de nœuds. Nous justifions l'utilité de ces deux paramètres par le fait que les nœuds dans les réseaux de capteurs mobiles portés par des humains (*human-carried mobile sensors*), suivent les mouvements des utilisateurs qui ne se déplacent pas aléatoirement mais plutôt suivant un mouvement prévisible fondé sur des motifs répétitifs de mouvement. Ainsi, nous supposons que si un nœud a visité un emplacement à plusieurs reprises, il est probable qu'il se rendra à cet endroit de nouveau [144].

Lorsque deux nœuds se rencontrent, ils s'échangent leurs probabilités de rencontre de la station de base (*Sink*) respectives. Cette information est utilisée pour mettre à jour leurs probabilités de livraison. D'abord, la probabilité de rencontre entre les deux capteurs i et j est définie dans [144] comme suit :

$$P(i, j) = [P(i, j)] + (1 - [P(i, j)]) \times P_{init} \quad (5.2)$$

Où $[P(i, j)] = P(i, j)_{ancien}$, se réfère à l'ancienne valeur de la probabilité de rencontre et $P_{init} \in [0, 1]$ est une constante d'initialisation de la probabilité de rencontre.

Ensuite, si une paire de nœuds ne se rencontre pas pendant un certain temps, ces nœuds sont moins susceptibles d'être de bons expéditeurs de messages l'un pour l'autre. Pour prendre en considération ce facteur une constante de vieillissement $\gamma \in [0, 1]$ permet de réduire la probabilité de rencontre entre une paire de nœuds ne se rencontrant pas pendant k unités de temps. La probabilité de rencontre devient ainsi :

$$P(i, j) = [P(i, j)] \times \gamma^k \quad (5.3)$$

Enfin, pour définir la probabilité de livraison d'un nœud, nous utilisons la propriété transitive de la probabilité de rencontre, qui se base sur le constat suivant : si un nœud A rencontre fréquemment le nœud B, et que le nœud B rencontre le plus souvent le Sink, ainsi, le nœud B est probablement un bon expéditeur des messages du nœud A vers le Sink. L'équation suivante définit la probabilité de livraison du nœud A :

$$P_{sink}(A) = [P_{sink}(A)] + (1 - [P_{sink}(A)]) \times P(A, B) \times P_{sink}(B) \quad (5.4)$$

La probabilité de livraison $P_{sink}(i)$ donne une mesure de la capacité d'un nœud i à livrer un message au Sink. Ce paramètre augmente lorsque le nœud i est co-localisé avec le sink ou co-localisé avec des nœuds voisins qui rencontrent fréquemment le Sink. Ce paramètre sera utilisé pour calculer la métrique ESC. La métrique inclut aussi l'estimation de l'énergie résiduelle des nœuds. Nous expliquons dans la section suivante la méthode d'estimation de ce paramètre.

5.4.3.2 Estimation de l'énergie résiduelle

Le protocole EXLIOSE se base sur une métrique de routage qui inclut la valeur d'énergie résiduelle du nœud. En se basant sur le modèle d'énergie donné dans la section 5.4.2, chaque nœud estime et met à jour, périodiquement son niveau d'énergie résiduelle en déduisant de son niveau d'énergie initial les quantités consommées pendant les opérations de Scan, de transmission et de réception de messages, multipliés par la durée passée dans chaque opération. Chaque nœud informe périodiquement ses voisins par son niveau d'énergie dans les paquets « Hello » de découverte de voisinage. Le pseudo-code du module responsable du calcul de l'énergie résiduelle au niveau des nœuds est donné dans la figure 5.2.

```
SI ((CurrentTime > timeoflastUpdate) ET (node is in sending mode)) ALORS
    E.résiduelle = E.init - (CurrentTime - timeoflastUpdate) * E(transmitEnergy);
/* E(transmitEnergy) est une constante qui correspond à l'énergie consommée pendant la transmission */
FINSI

SI ((CurrentTime > timeoflastUpdate) ET (node is in receiving mode)) ALORS
    E.résiduelle = E.init - (CurrentTime - timeoflastUpdate) * E(receiveEnergy);
/* E(receiveEnergy) est une constante qui correspond à l'énergie consommée pendant la réception */
FINSI

SI (CurrentTime > timeoflastScanUpdate + scanInterval) ALORS
    /* scanning at this update round */
    E.résiduelle = E.init - E(scanEnergy);
/* E(receiveEnergy) est une constante qui correspond à l'énergie consommée pendant la réception */
    timeoflastScanUpdate = CurrentTime
FINSI
```

FIGURE 5.2 – Le pseudo-code du module de calcul de l'énergie résiduelle au niveau des nœuds capteurs

5.4.3.3 Energy Shortage Cost (ESC) : Coût de pénurie d'énergie

Afin de sélectionner le nœud de prochain saut, nous proposons une métrique de routage qui se base sur l'estimation de la consommation d'énergie de chaque nœud capteur à partir de son historique de rencontre avec le Sink, et sur son énergie résiduelle. Cette métrique est appelée ESC (Energy Shortage Cost, ou coût de pénurie d'énergie), et mesure la réduction de la durée de vie du réseau suite au choix d'un nœud en tant que prochain-saut. L'idée de base est de minimiser cette métrique et de transmettre les messages à partir des nœuds avec des ESC élevés vers les nœuds ayant des coûts ESC bas. Nous attribuons un coût ESC égale à zéro pour le Sink.

Lors de la conception de la nouvelle métrique ESC, nous notons que les métriques se basant uniquement sur le niveau d'énergie résiduelle ne permettent pas le partage de charge entre les nœuds. Ainsi, nous incluons en plus l'énergie consommée par le nœud lors du transfert de ses messages jusqu'au Sink. L'objectif de conception de la métrique ESC est d'éviter l'épuisement de l'énergie de tout capteur. Prenons l'exemple d'un capteur i qui a deux nœuds voisins, $v1$ et $v2$ disposant d'une énergie résiduelle valant respectivement 1 unité et 5 unités. Supposons que la transmission d'un message au Sink coûte 1 unité pour le nœud $v1$ et 3 unités pour $v2$. Selon la définition de la métrique ESC, les nœuds $v1$ et $v2$ auront des coûts respectifs de 1 et 0.6. De toute évidence, $v2$ devrait être choisi comme prochain saut malgré le fait que cela coûte plus d'énergie pour transmettre ses messages au Sink. Dans le cas contraire (en choisissant le nœud $v1$ comme prochain saut), $v1$ épuisera son énergie et mettra fin à la durée de vie du réseau. Afin de souligner cet impact, nous définissons la métrique ESC pour chaque nœud i comme suit :

$$ESC = \frac{EConsum(i)}{RE_i} \quad (5.5)$$

RE_i se réfère à l'énergie résiduelle du nœud i . $EConsum(i)$ mesure l'énergie consommée par le nœud i pour transférer ses messages au Sink. Cette quantité est estimée à partir de sa probabilité de livraison multipliée par la quantité prédéfinie de l'énergie dépensée pendant l'opération de transmission. $EConsum(i)$ est inversement proportionnel à la probabilité de livraison d'un nœud. Lorsque le nœud a une probabilité de livraison élevée, il est supposé qu'il rencontre fréquemment le Sink. Ainsi, il ne consommera pas une grande quantité d'énergie pour atteindre la destination. Inversement, si un nœud a une probabilité de livraison plus petite, il est supposé rencontrer moins souvent le Sink et ses messages vont transiter par plusieurs nœuds avant d'atteindre leur destination. Sa consommation d'énergie sera ainsi conséquente.

$$E_{Consumed}(i) \propto \frac{1}{P_{sink}(i)} \quad (5.6)$$

5.4.3.4 Stratégie de transfert

Dans le contexte des réseaux de capteurs mobiles, les stratégies de routage sont complètement différentes des réseaux statiques. Dans un tel contexte, aucune garantie n'existe pour qu'un chemin entièrement connecté entre les sources et les destinations soit fonctionnel à tout moment. Quand un message arrive à un nœud, il pourrait ne pas y avoir de chemin disponible vers le Sink. Le nœud doit ainsi enregistrer le message dans sa mémoire tampon (si sa capacité le permet) et le transférer dès qu'un contact a lieu. Dès l'apparition d'un contact, la décision de routage doit être prise selon la valeur de la métrique ESC. Avant de décider du nœud pour le prochain saut, le nœud source doit calculer son coût et le comparer à ceux de ses voisins. Si le coût du voisin est inférieur à sa propre métrique, le nœud source transmet le message. Dans le cas contraire, il le garde jusqu'à ce qu'il rencontre un meilleur nœud ou rencontre le Sink lui-même. Lors de la rencontre entre deux nœuds, ils s'échangent les index des messages transférés. Ce paramètre est utilisé pour décider quels messages demander à l'autre nœud. Après cet échange, chaque nœud peut déterminer les messages qu'il n'a pas encore vus (i.e. transférés) et les demande ainsi à son voisin.

5.5 Evaluation des performances

A des fins de validation du protocole EXLIOSE en termes de durée de vie et d'équilibrage d'énergie, nous effectuons un ensemble de simulations sur ONE avec les mêmes paramètres que ceux utilisés dans l'évaluation des techniques PPM-BM et ECoND (Cf. Tableaux 4.5 et 4.6).

5.5.1 Métriques de performances

Dans nos simulations nous considérons les protocoles suivants représentatifs de chaque catégorie, afin de comparer les résultats obtenus par notre proposition :

- PROPHET considéré comme une référence dans les protocoles de routage pour les réseaux opportunistes. Il est basé sur une métrique probabiliste qui mesure la probabilité de livraison d'un nœud à une destination donnée.

- Un protocole basé sur l'énergie résiduelle (Residual Energy Based protocol, REB) et représentatif des protocoles de routage opportunistes basés sur la métrique « énergie résiduelle nodale ».

Les métriques utilisées consistent à analyser les performances de ces approches en termes de :

- Taux de livraison des messages : défini comme étant le rapport entre le nombre de messages reçus par le Sink et le nombre total de messages émis par les nœuds.
- Durée de vie du réseau : définie comme la période écoulée depuis le début de la simulation avant qu'un capteur n'épuise totalement son énergie.
- Énergie résiduelle moyenne : calcule l'énergie résiduelle moyenne à la fin de la simulation pour tous les nœuds capteurs. Elle représente la quantité d'énergie restante dans le réseau.
- Écart-type de l'énergie résiduelle : indique la répartition du trafic/consommation d'énergie entre les nœuds.

Le principal objectif de cette analyse est d'évaluer l'impact de la métrique ESC sur ces quatre critères de performance.

5.5.2 Scénarios de simulation

Les simulations effectuées dans ce chapitre utilisent une distribution aléatoire des nœuds dans le réseau. Les nœuds capteurs sont mobiles et se déplacent dans une zone de $10km \times 8km$ avec des vitesses de déplacement, représentant celles des piétons, uniformément comprises entre $2m/s$ et $5m/s$. Les nœuds se déplacent selon le modèle de mobilité *Working Day Movement*. Le Sink est par contre fixe et placé au centre de la zone de simulation. Afin de répondre à des cas réels, nous définissons deux scénarios de simulation qui ont pour objectif de mesurer les performances des protocoles avec une densité de nœuds et des débits variables. Pour mesurer les métriques de performance retenues, nous faisons varier, la densité et le débit des nœuds sources.

5.5.3 Résultats et discussion

5.5.3.1 Variation de la densité des nœuds

Nous mesurons ici l'impact de la densité des nœuds formant le réseau. Nous varions le nombre de nœuds de 100 à 350 nœuds. Les résultats présentés sont des moyennes de 5 simulations pour chaque graphe. La durée de simulation est de 24h. La Figure 5.3 illustre la durée de vie du réseau mesurée pour les trois protocoles de routage évalués. Dans cette simulation, nous avons fixé l'énergie initiale de chaque capteur à 500 mW, de sorte que quelques

nœuds capteurs consomment leur énergie au cours de la période de simulation. Les résultats montrent qu'EXLIOSE et REB permettent une durée de vie de réseau beaucoup plus grande que PROPHET, puisque ces protocoles considèrent tous les deux le niveau d'énergie résiduelle pour sélectionner le nœud pour le prochain saut. Par ailleurs, EXLIOSE est meilleur que REB parce que, en plus de l'énergie résiduelle, il choisit le nœud de prochain saut qui rencontre fréquemment le Sink. Ainsi, il réduit le coût de retransmissions et de la consommation d'énergie. La figure 5.3 montre également que lorsque le réseau devient plus dense, la durée de vie du réseau diminue parce que le nombre moyen de voisins par nœud augmente. Les nœuds sont reliés, ainsi, à un plus grand nombre de voisins et beaucoup plus de messages de découverte de voisin sont envoyés. Ce processus devient de plus en plus coûteux en termes

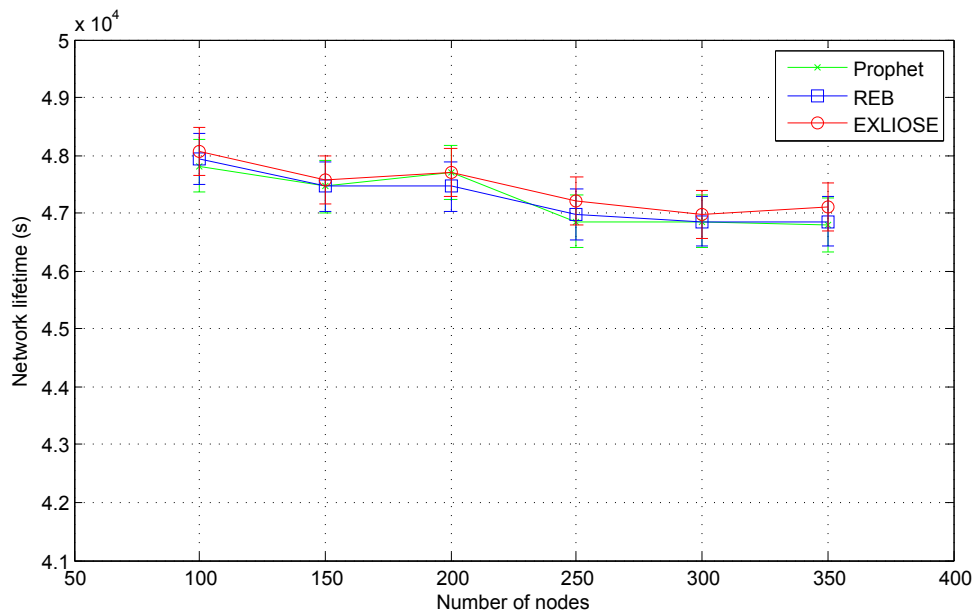


FIGURE 5.3 – Durée de vie en fonction de la densité des nœuds

d'énergie. Par conséquent, les nœuds épuisent rapidement leurs batteries. La figure 5.4 illustre l'énergie résiduelle moyenne à la fin de la simulation pour les trois protocoles de routage. Plus cette valeur est élevée, plus la performance est élevée. La figure 5.5 représente l'écart type de l'énergie résiduelle. En effet, plus la valeur de l'écart type est basse, meilleure est la capacité du protocole de

routage à équilibrer la consommation d'énergie. EXLIOSE est plus économe en énergie que PROPHET puisqu'il présente une grande quantité d'énergie résiduelle moyenne et un petit écart-type. Ces résultats s'expliquent par le fait

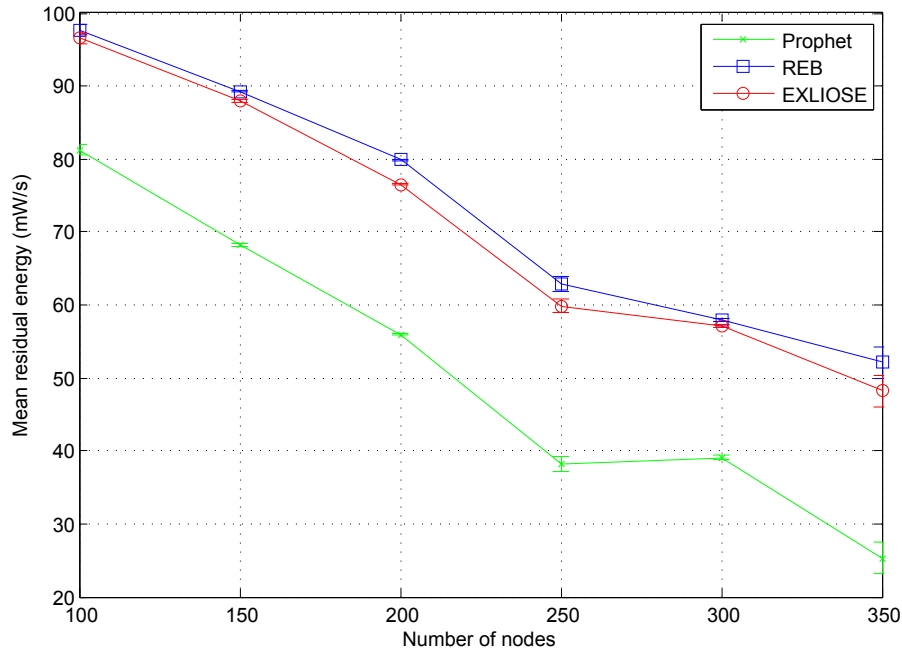


FIGURE 5.4 – L'énergie résiduelle moyenne en fonction de la densité des nœuds

qu'EXLIOSE prend en compte l'énergie résiduelle de chaque nœud. Il est donc en mesure de mieux répartir la charge sur la base du niveau d'énergie. Puisque PROPHET ne considère pas l'énergie lors de la décision du routage, il offre des performances médiocres en termes d'efficacité énergétique et d'équilibrage de charge.

La figure 5.6 montre qu'EXLIOSE réalise un meilleur taux de livraison par rapport à REB et PROPHET. Les résultats obtenus sont meilleurs que ceux de REB parce que ce dernier ne considère pas la probabilité de livraison dans sa métrique de routage. Entre deux nœuds candidats, REB choisit le nœud qui possède la plus grande quantité d'énergie résiduelle. Dans la même situation, EXLIOSE choisit le nœud avec le niveau d'énergie résiduelle le plus élevé et qui rencontre le plus souvent le Sink dans l'objectif de maximiser le nombre de messages envoyés au Sink. EXLIOSE présente également des résultats meilleurs que PROPHET. Ce résultat peut être expliqué par le fait

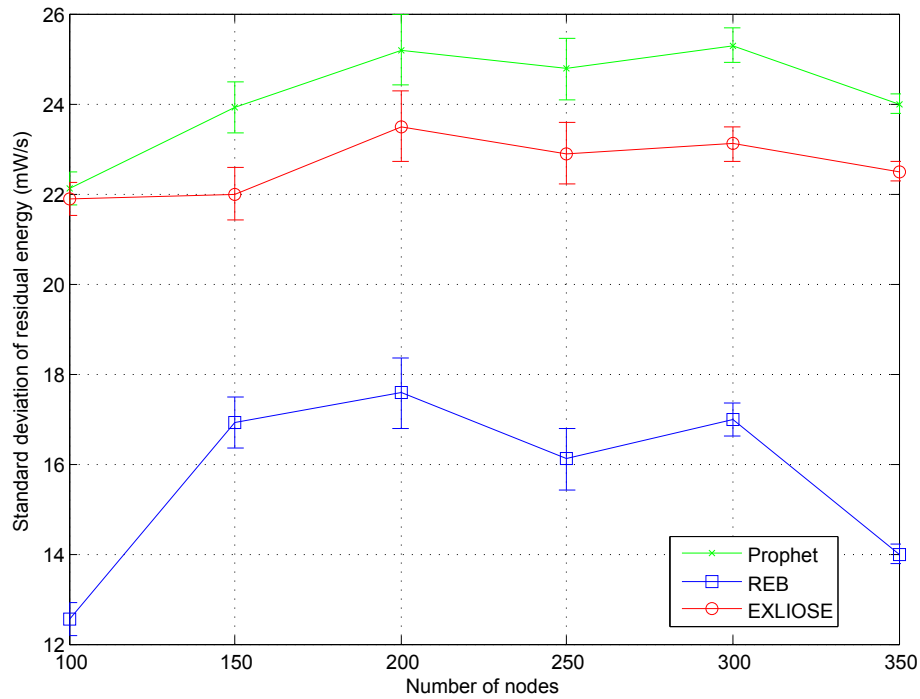


FIGURE 5.5 – L'écartype de l'énergie résiduelle en fonction de la densité des nœuds

qu'EXLIOSE permet un meilleur équilibrage d'énergie. Ce résultat est représenté dans la figure 5.5. Ainsi, plusieurs nœuds sont vivants et il y a plus de chances qu'un message donné atteigne le Sink. De plus, nous remarquons que plus le réseau est dense, plus le nombre de messages envoyés au *sink* est élevé. Ce résultat est évident puisque les messages sont transmis par un grand nombre de nœuds et ont donc plus de chances d'atteindre le Sink.

5.5.3.2 Variation du débit des nœuds sources

Pour mesurer l'impact de la charge sur les performances des protocoles, nous varions la taille des messages envoyés par les nœuds sources. Nous maintenons fixes la fréquence de génération de messages à savoir 1 message chaque période de 60s et nous fixons la taille des buffers à 200kB. Nous considérons un réseau de 250 nœuds mobiles et un seul Sink fixe. Les résultats obtenus sont des moyennes de 5 simulations pour chaque graphe. La durée de simulation est de 24h. La Figure 5.7 illustre la durée de vie du réseau mesurée pour les

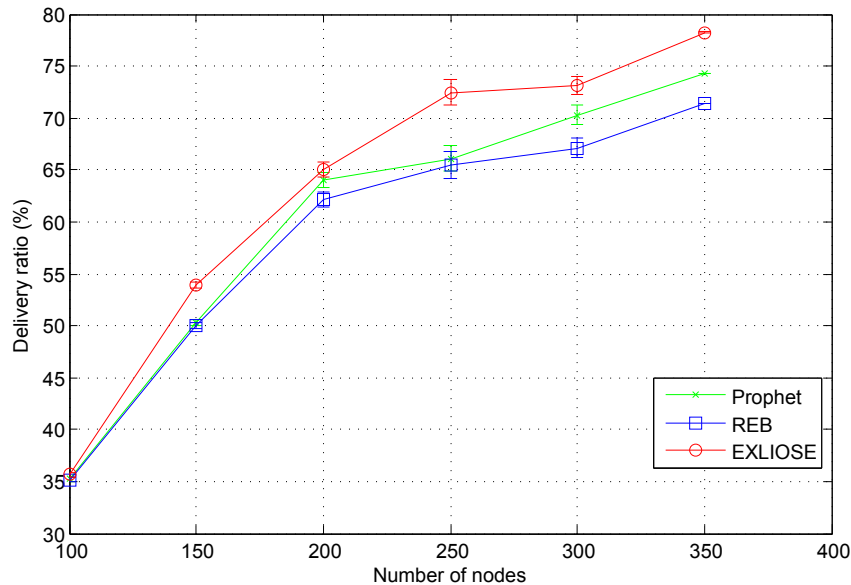


FIGURE 5.6 – Le taux de livraison de messages en fonction de la densité des nœuds

trois protocoles de routage évalués. La figure 5.8 illustre l'énergie résiduelle moyenne à la fin de la simulation pour les trois protocoles de routage. Nous remarquons que les valeurs de l'énergie résiduelle diminuent quand le débit des nœuds sources augmente. En effet, lorsque les nœuds envoient des messages de grande taille en gardant la même fréquence d'envoi, le débit d'envoi augmente et le nombre de communications entre les nœuds augmente aussi. Cela consommera plus d'énergie au niveau des nœuds et entraînera la diminution du niveau de l'énergie résiduelle dans le réseau au terme de la simulation. La figure 5.9 illustre l'écartype de l'énergie résiduelle en fonction de la taille des messages. Les résultats obtenus mettent en évidence la capacité d'EXLIOSE à résister mieux que les protocoles évalués à l'augmentation de charge induite par l'augmentation de la taille des messages envoyés. Il est plus efficace en énergie, en gardant un niveau élevé d'énergie résiduelle dans le réseau, et permet un équilibrage d'énergie/de charge en ayant la plus petite déviation de l'énergie résiduelle.

La figure 5.10 illustre la variation du taux de livraison des messages en

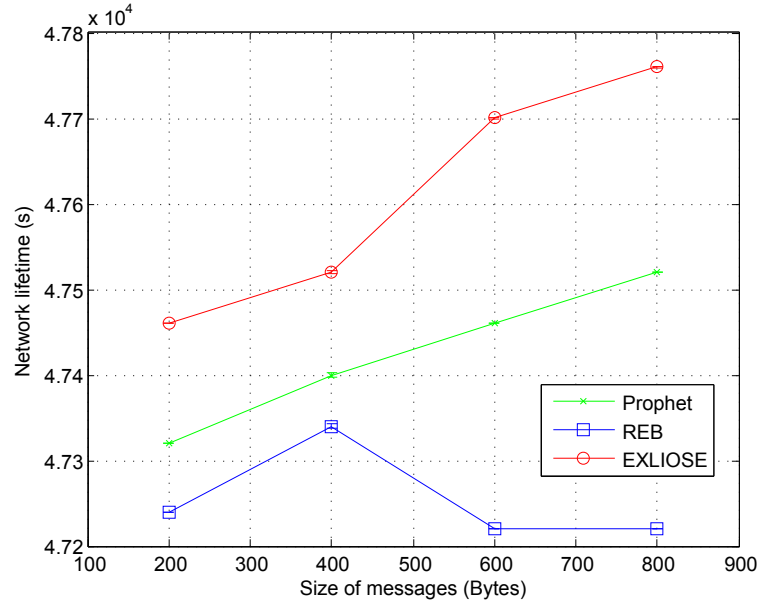


FIGURE 5.7 – Durée de vie en fonction de la taille des messages

fonction de la taille des messages. Les résultats obtenus montrent que le taux de messages délivrés diminue quand le débit d'envoi des messages augmente. Ceci est expliqué par le fait qu'en augmentant la taille des messages et par conséquent en augmentant le débit d'envoi des messages, le nombre de messages supprimés augmente suite à l'explosion des buffers des nœuds. Ceci entraîne une diminution des messages délivrées jusqu'au Sink. Les résultats montrent aussi que REB présente les plus mauvaises performances. Ceci est expliqué par le fait que la métrique de routage de REB n'agit pas sur le taux de livraison des messages. En comparant les performances de Prophet et EXLIOSE, nous remarquons qu'ils sont comparables vu qu'ils intègrent tous les deux des métriques de routage visant à augmenter les chances de rencontrer le sink et donc augmenter les chances de livraison des messages jusqu'au sink.

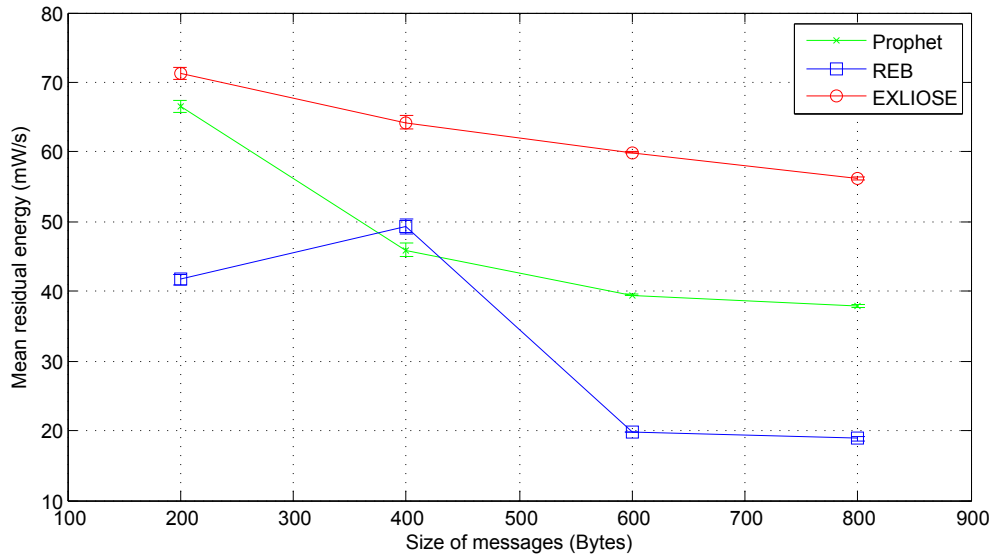


FIGURE 5.8 – L'énergie résiduelle moyenne en fonction de la taille des messages

5.6 Implémentation

A des fins de préparation de la validation du protocole de routage proposé dans un contexte réel, nous avons commencé le déploiement d'une plateforme de capteurs réels et étudié les performances de leur protocole de routage XMesh [174].

5.6.1 Matériel

La plateforme de capteurs mise en place comporte 17 noeuds de type Micaz [1]. Les caractéristiques de ces capteurs sont présentés dans le tableau 5.1. Ils sont dotés d'une carte d'acquisition type MDA100 qui leur permet de capter la luminosité et la température de l'environnement extérieur.

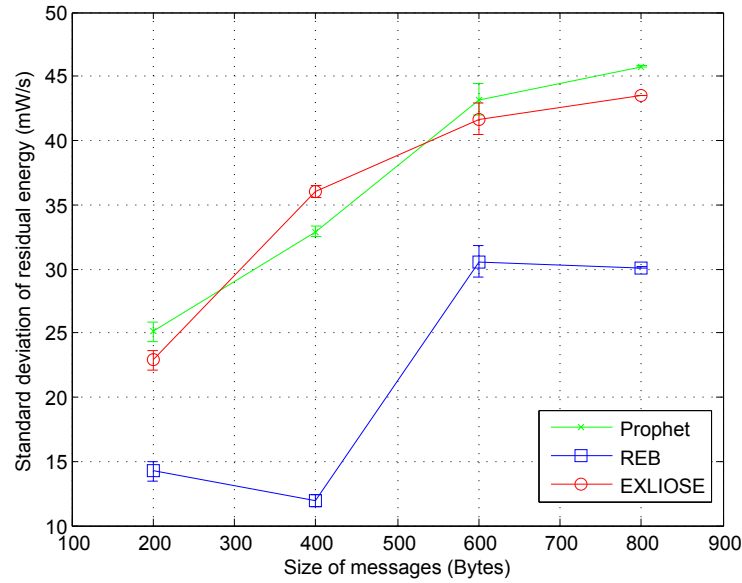


FIGURE 5.9 – L'écartype de l'énergie résiduelle en fonction de la taille des messages

5.6.2 Scénarios de test

L'application de test consiste à collecter les informations de luminosité et de température des noeuds capteurs et les acheminer jusqu'au noeud collecteur, le Sink. Nous considérons deux scénarios de test : le premier consiste à considérer un réseau de 17 capteurs fixes déployés dans les locaux du Labo. Le schéma de déploiement est illustré dans la figure 5.12 . Le deuxième scénario concerne un réseau de 16 capteurs mobiles avec un Sink fixe. Les capteurs mobiles sont embarqués sur des circuits de train comme illustrés dans la figure 5.11. Dans les deux scénarios de test, nous évaluons les performances de XMesh en termes de taux de messages acheminés au Sink.

5.6.3 Evaluation des performances

Nous considérons le premier scénario de test et nous évaluons les performances du protocole XMesh en termes de taux de messages délivrés. La figure

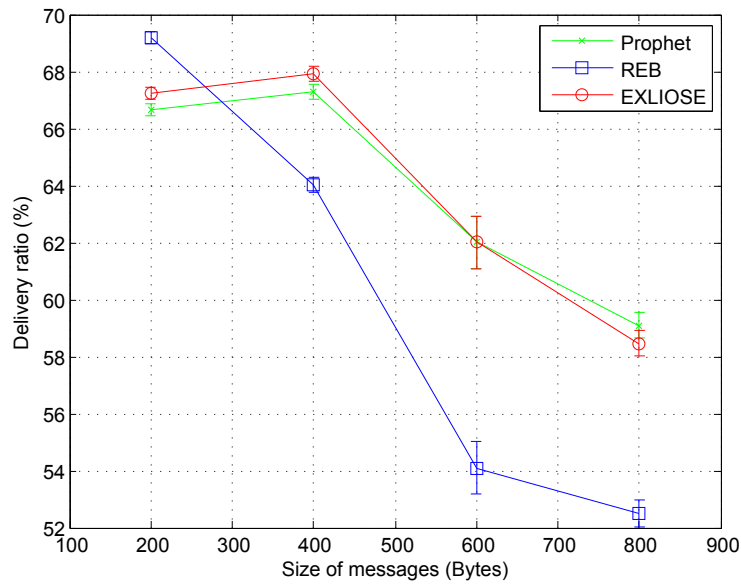


FIGURE 5.10 – Le taux de livraison de messages en fonction de la taille des messages

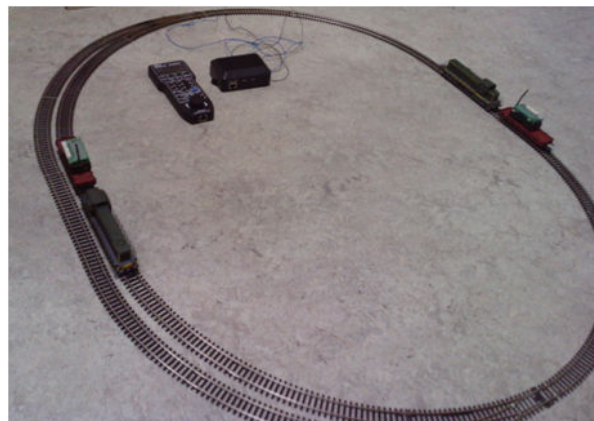


FIGURE 5.11 – Maquette de Micaz embarqués sur des circuits de trains

5.13 illustre le taux de messages délivrés pour les 16 noeuds déployés. Le noeud

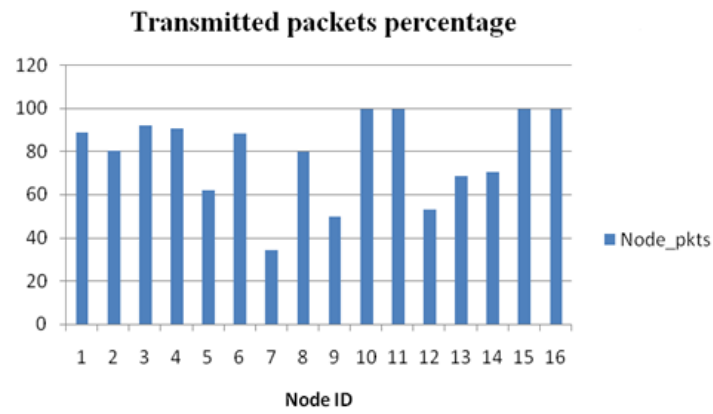


FIGURE 5.13 – Taux de messages délivrés dans un réseau de capteurs fixes

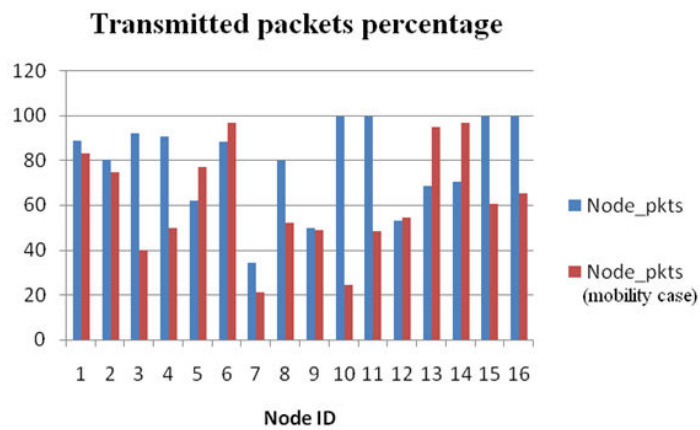


FIGURE 5.14 – Taux de messages délivrés dans un réseau de capteurs fixes

serait d'implémenter le protocole EXLIOSE sur cette plateforme de capteurs et d'évaluer ses performances dans un contexte réel.

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la définition de la durée de vie qui s'adapte le mieux au contexte de la thèse. Nous avons formulé le problème de maximisation de la durée de vie d'un réseau de capteurs et proposé une nouvelle métrique de routage appelée ESC qui maximise ce paramètre. Nous avons proposé un protocole de routage, basé sur cette métrique, économe en énergie conçu pour les réseaux de capteurs mobiles, appelé EXLIOSE. Il est basé sur l'historique des informations de rencontre des nœuds pour estimer le meilleur nœud de prochain saut pour assurer le bon acheminement des messages et minimiser leur perte. De plus, il se base sur la capacité d'énergie résiduelle au niveau des nœuds pour assurer un équilibre énergétique, partager la charge et étendre à la fois la durée de vie des nœuds ainsi que celle du réseau. Les résultats obtenus montrent clairement l'efficacité du protocole proposé. En effet, il est moins impacté que les deux protocoles de référence en termes de variation de la densité du réseau et de croissance de charge. Des premiers travaux de mis en place de maquette réelle ont été mis en place.

Conclusion générale et perspectives

Sommaire

6.1 Contributions	113
6.2 Perspectives	115

Les réseaux de capteurs sans fil (RCsF) ont connu au cours des dernières années un essor considérable. Les premières applications des RCsF étaient dans le domaine militaire. Aujourd'hui, les RCsF sont présents dans des domaines d'applications variés. Citons à titre d'exemples les applications environnementales (détection de feu de forêt, repérage des mouvements d'animaux, etc.), les applications médicales (repérage et surveillance des patients dans les hôpitaux, etc.) et autres. Néanmoins, et comme toute technologie, les RCsF présentent des défis de conception essentiellement liés à l'absence d'une infrastructure fixe, une topologie changeante due à la mobilité des noeuds capteurs et surtout une autonomie énergétique limitée de ses capteurs puisqu'ils sont alimentés par des batteries de durée déterminée et qu'il est souvent difficile de les changer /ou les recharger. L'énergie apparaît donc comme une source critique pour les réseaux de capteurs sans fil et la capacité énergétique des capteurs doit être utilisée efficacement afin de maximiser la durée de vie du réseau. Les travaux de cette thèse ont pour objectif de proposer des algorithmes et des techniques efficaces en termes d'énergie afin que la durée de vie du réseau soit maximisée. Les techniques proposées ont porté à la fois sur l'efficacité énergétique au niveau de la phase de découverte de voisins et au niveau du routage. Ces approches sont proposées pour les réseaux de capteurs sans fil mobiles, caractérisés par une connectivité intermittente, qui représentent un cas particulier des réseaux tolérants aux retards.

6.1 Contributions

Dans les travaux de thèse présentés dans ce mémoire, nous faisons de la conservation d'énergie, la ligne directrice de notre travail.

Dans la première partie de la thèse, nous avons proposé des techniques permettant de réduire les consommations d'énergie des noeuds capteurs pendant la phase de découverte de voisins. D'abord, et avant de tenter de réduire la consommation d'énergie, ou comprendre par quels moyens une telle réduction peut être réalisée, nous avons procédé à l'analyse des différentes sources de surconsommation d'énergie dans un noeud capteur. Ensuite, nous avons analysé les travaux de la littérature qui proposent des techniques économisant la consommation énergétique soit au niveau de la capture, au niveau de traitement ou au niveau de la communication. Nous avons remarqué que peu de travaux se sont intéressés à l'économie de l'énergie dépensée au cours de la phase de découverte de voisins. Pourtant, celle-ci est tout aussi gourmande en énergie que la phase de réception des données. Dans ce contexte, nous avons proposé deux techniques permettant de dimensionner les protocoles de découverte de voisinage afin de satisfaire les contraintes énergétiques. La première technique proposée, PPM-BM, consiste à dimensionner la fréquence d'envoi des messages de découverte de voisins en fonction du niveau de batterie du noeud. Les noeuds, avec les niveaux de batterie les moins élevés, découvriront leur voisinage moins souvent pour conserver leur énergie résiduelle pour les mécanismes de haut niveau notamment le routage. Les noeuds ayant les niveaux d'énergie les plus élevés, quant à eux, enverront plus souvent des messages de découverte de voisins et seront plus impliqués dans le routage des données vers le Sink. Cette technique est indépendante du protocole de routage utilisé et peut donc être généralisée à tout mécanisme de routage. Ainsi, elle a été implémentée sur trois protocoles de routage opportunistes de référence et a été évaluée par simulation. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de la technique PPM-BM en termes d'économie d'énergie et a permis de réduire les consommations moyennes des noeuds capteurs. Toutefois, nous avons noté, que le fait de réduire la fréquence de découverte de voisins pourrait faire manquer des rencontres possibles entre les noeuds et minimiser ainsi le taux de livraison de messages. Ainsi, nous avons pris en considération le paramètre de connectivité entre les noeuds et avons proposé la deuxième technique de dimensionnement de la découverte de voisinage, ECoND. Cette technique vise à ajuster la fréquence de découverte de voisins en fonction de la connectivité estimée à chaque instant. ECoND tire profit des cycles temporels des modèles de mouvement des noeuds. La connectivité est estimée en se basant sur l'historique des rencontres. La fréquence de découverte est ajustée quant à elle sur le taux de connectivité estimé. ECoND a été également évalué par simulation. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité énergétique de cette méthode tout en maintenant acceptables les performances de taux de livraison de messages et d'overhead des protocoles évalués.

Dans la deuxième partie de la thèse, nos travaux ont porté sur l'optimisa-

tion des performances des réseaux de capteurs en termes de durée de vie. Dans cette partie, nous avons reconsidéré certains protocoles de routage relevant du domaine des réseaux à connectivité intermittente et nous avons proposé un protocole de routage destiné à équilibrer les consommations d'énergie des nœuds afin de prolonger la durée de vie du réseau. Pour ce faire, nous avons proposé une nouvelle métrique de routage qui consiste à intégrer l'énergie résiduelle des nœuds voisins et la fréquence de rencontre du Sink dans le choix du nœud du prochain saut. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité du protocole EXLIOSE proposé. En effet, il garantit un équilibre énergétique, un meilleur partage de charge et une extension de la durée de vie à la fois des nœuds ainsi que celle du réseau. De plus, il est moins impacté que les protocoles évalués en termes de variation de la densité du réseau et de croissance de charge, assurant ainsi un passage à l'échelle plus aisé.

6.2 Perspectives

Les travaux que nous avons effectués dans cette thèse nous ouvrent de nombreuses perspectives de recherche que nous structurons comme suit :

D'abord, afin de valider notre protocole de routage, EXLIOSE, sur un déploiement réel, nous considérons un contexte particulier, à savoir une application médicale de suivi des patients. Le but de cette application consiste à suivre les mouvements des patients dans l'hôpital et la collecte périodique de leurs paramètres physiologiques (tels que la saturation pulsée de l'hémoglobine en oxygène, ou SpO₂). Pour mettre en œuvre cette application, nous avons entamé le montage d'une plateforme de capteurs de type Micaz qui reproduit une application de suivi des personnes dans un milieu indoor. Nous simulons le mouvement des patients dans l'hôpital à l'aide de capteurs embarqués sur des circuits de train. D'autres capteurs sont déployés au plafond et interagissent avec les capteurs mobiles pour simuler un environnement hospitalier indoor. La figure 6.1 présente la plateforme mise en place. Pour suivre le déplacement des capteurs mobiles et les localiser dans la zone de déploiement, nous avons implémenté un algorithme de localisation indoor basé sur RSSI. A partir d'un déploiement à priori d'un ensemble de capteurs fixes (beacons), nous avons enregistré des empreintes de différentes positions dans la région de déploiement. Ainsi, nous localisons les nœuds mobiles en faisant une interpolation des signaux RSSI et en estimant leur position la plus probable. Les premiers résultats obtenus sont encourageants. Afin de faciliter l'interaction avec la plateforme de capteurs, nous avons également implémenté une interface graphique illustrée dans la figure 6.2. A partir d'un planning journalier d'un service de soin (la salle d'opération par exemple), un utilisateur peut



FIGURE 6.1 – Plateforme dédiée à l'application médicale de surveillance des patients

consulter à tout moment la liste des patients en mouvement, i.e. la liste des capteurs déployés, et des informations concernant leurs états de santé et leurs positions géographiques instantanées. Ces dernières pourraient servir, à titre d'exemple, à estimer l'instant d'arrivée d'un patient donné à la salle de soins et ainsi mieux gérer l'occupation de ces salles.

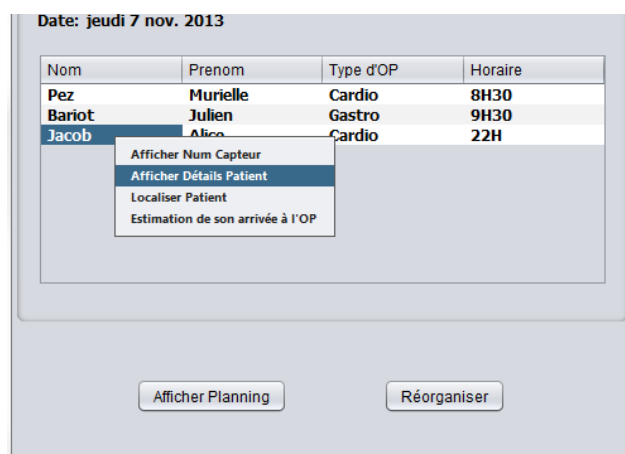


FIGURE 6.2 – Aperçu de l'interface graphique CHU

Ensuite, le modèle d'énergie utilisé dans les travaux de cette thèse est un modèle qui nous a permis d'estimer le niveau d'énergie résiduel. Dans ce modèle, les coûts énergétiques de transmission et de réception sont une fonction linéaire de la durée passée par le nœud dans chaque activité (telle que réception des données, découverte de voisins, etc.). Cette durée est multipliée par une quantité d'énergie prédéfinie fixe pour chaque activité. Il serait intéressant d'évaluer l'efficacité des algorithmes proposés en utilisant un modèle

d'énergie plus réaliste dans lequel les coûts énergétiques de transmission et de réception sont une fonction linéaire de la longueur du message à transmettre, notamment le modèle proposé dans [173].

En outre, nous proposons de considérer les réseaux de capteurs à récupération d'énergie ambiante et d'adapter les algorithmes proposés pour améliorer l'efficacité de ces réseaux. Nous proposons de considérer l'estimation des quantités d'énergies récupérées par les noeuds en fonction de leurs positions dans la zone de déploiement et de l'intégrer dans la prise de décision de routage.

Enfin, nous intégrerons les approches proposées dans des projets en cours de mise en œuvre au Labo qui constituent une continuité des travaux dans le domaine hospitalier. Nous mentionnons en particulier le projet en collaboration avec le CHU Mondor sur le développement de services numériques pour la santé et l'autonomie.

Liste de publications

Revues internationales avec comité de lecture

N.Sghaier, J.Perez, B.Augustin, A.Mellouk, « Energy-aware probing period dimensioning algorithms for mobile WSN-HEAP », International Journal of Sensor Networks (IJSNET). Accepted, To appear 2014.

Conférences internationales avec comité de lecture et actes

N.Sghaier, A.Mellouk, B.Augustin, Y.Amirat, Jean MARTY, M.A.Khoussa, A.Abid, Rafik Zitouni, « Wireless Sensor Networks for Medical Care Services », 7th IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Istanbul, 2011.

N.Sghaier, B.Augustin, A.Mellouk, « On enhancing network-lifetime in opportunistic wireless sensor networks », IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Istanbul, 2014.

Bibliographie

- [1] MICAz Datasheet. Crossbow technology inc. *San Jose, California*, 2006. (Cité en pages [v](#), [2](#) et [106](#).)
- [2] Kamal Beydoun. *Conception d'un Protocole de Routage Hierarchique pour les Reseaux de Capteurs*. PhD thesis, PhD. Thesis, LâUFR des Sciences et Techniques de lâUniversite de Franche-Comte, Franche-Comte, 2009. (Cité en pages [v](#) et [13](#).)
- [3] Kevin Fall. A delay-tolerant network architecture for challenged inter-nets. In *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pages 27–34. ACM, 2003. (Cité en pages [v](#), [48](#) et [50](#).)
- [4] Sushant Jain, Kevin Fall, and Rabin Patra. *Routing in a delay tolerant network*, volume 34. ACM, 2004. (Cité en pages [v](#), [52](#), [56](#) et [59](#).)
- [5] Global Action Plan. An inefficient truth. *Global Action Plan Report*, <http://globalactionplan.org.uk>, 2007. (Cité en pages [1](#) et [10](#).)
- [6] Mario Pickavet, Willem Vereecken, Sofie Demeyer, Pieter Audenaert, Brecht Vermeulen, Chris Develder, Didier Colle, Bart Dhoedt, and Piet Demeester. Worldwide energy needs for ict : The rise of power-aware networking. In *Advanced Networks and Telecommunication Systems, 2008. ANTS'08. 2nd International Symposium on*, pages 1–3. IEEE, 2008. (Cité en pages [1](#) et [10](#).)
- [7] Luis Suarez, Loutfi Nuaymi, and Jean-Marie Bonnin. An overview and classification of research approaches in green wireless networks. *EUR-ASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012(1) :1–18, 2012. (Cité en pages [1](#), [8](#) et [11](#).)
- [8] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer networks*, 38(4) :393–422, 2002. (Cité en pages [2](#) et [3](#).)
- [9] Frédéric Guidec, Julien Haillot, et al. Communication'basée contenus' dans les réseaux mobiles ad hoc discontinus. *Techniques et Sciences Informatiques*, 30(3/2011) :275–308, 2011. (Cité en page [4](#).)
- [10] Evan PC Jones and Paul AS Ward. Routing strategies for delay-tolerant networks. *Submitted to ACM Computer Communication Review (CCR)*, 2006. (Cité en pages [4](#), [56](#), [61](#) et [62](#).)
- [11] Jian Shen, Sangman Moh, and Ilyong Chung. Routing protocols in delay tolerant networks : A comparative survey. In *The 23rd International*

- Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, Kaikyo Messe Shimonoseki, Shimonoseki City, Yamaguchi-Pref., Japan*, volume 182, 2008. (Cité en page 4.)
- [12] RJ DâSouza and Johny Jose. Routing approaches in delay tolerant networks : A survey. *International Journal of Computer Applications*, 1(17) :8–14, 2010. (Cité en page 4.)
 - [13] Mengjuan Liu, Yan Yang, and Zhiguang Qin. A survey of routing protocols and simulations in delay-tolerant networks. In *Wireless Algorithms, Systems, and Applications*, pages 243–253. Springer, 2011. (Cité en page 4.)
 - [14] Abdallah Makhoul. *Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données*. PhD thesis, UNIVERSITÄ DE FRANCHE-COMTE, 2008. (Cité en page 4.)
 - [15] San Murugesan. Harnessing green it : Principles and practices. *IT professional*, 10(1) :24–33, 2008. (Cité en page 8.)
 - [16] Aruna Prem Bianzino, Claude Chaudet, Dario Rossi, and J-L Rougier. A survey of green networking research. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 14(1) :3–20, 2012. (Cité en pages 8 et 9.)
 - [17] Jonathan G Koomey. Estimating total power consumption by servers in the us and the world, 2007. (Cité en page 9.)
 - [18] Asfandiyar Qureshi, Rick Weber, Hari Balakrishnan, John Guttag, and Bruce Maggs. Cutting the electric bill for internet-scale systems. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 39(4) :123–134, 2009. (Cité en page 9.)
 - [19] Google centres de donnÃ©es. (Cité en page 9.)
 - [20] Dennis Pamlin and Katalin Szomolányi. Saving the climate the speed of light. first roadmap for reduced co2 emissions in the eu and beyond. *European Telecommunications Network Operatorsâ Association and WWF*, 2006. (Cité en page 9.)
 - [21] William D Nordhaus. To slow or not to slow : the economics of the greenhouse effect. *The economic journal*, 101(407) :920–937, 1991. (Cité en page 10.)
 - [22] Henri Breuil, Daniel Burette, Bernard Flûry-Hérard, Ingénieurs généraux des Ponts, Chaussées Membres du CGEDD, Jean Cueugnet, and Denis Vignolles. Tic et développement durable. *Conseil général de l'environnement et du développement durable*, 2008. (Cité en page 10.)
 - [23] Ict-ensure : Information and communications technologies environmental sustainability research. [http ://ict-ensure.tugraz.at/en/index.html](http://ict-ensure.tugraz.at/en/index.html). (Cité en page 10.)

- [24] Lorenz M Hilty, Vlad Coroama, Margarita Ossés de Eicker, Thomas Ruddy, and Esther Müller. The role of ict in energy consumption and energy efficiency. *Report to the European Commission, DG INFSO, Project ICT ENSURE : European ICT Sustainability Research, Graz University*, 2009. (Cité en page 10.)
- [25] Smart grids cre. <http://www.smartgrids-cre.fr>. (Cité en page 10.)
- [26] Greentouch website. <http://www.greentouch.org/>. (Cité en page 11.)
- [27] TREND Consortium (project FP7-ICT-257740). Trend, towards real energy-efficient network design, the network of excellence on energy efficient networking. <http://www.fp7-trend.eu/>. (Cité en page 11.)
- [28] Jason L Hill and David E Culler. Mica : A wireless platform for deeply embedded networks. *Micro, IEEE*, 22(6) :12–24, 2002. (Cité en page 15.)
- [29] Rahim Kacimi. *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université de Toulouse, 2009. (Cité en pages 15, 16, 17, 21, 22, 23, 24 et 91.)
- [30] Marc Krämer and Alexander Gerald. Energy measurements for micaz node. 5. *GI/ITG KuVS Fachgespräch à Drahtlose Sensornetze*, page 61, 2006. (Cité en page 16.)
- [31] Vijay Raghunathan, Curt Schurgers, Sung Park, and Mani B Srivastava. Energy-aware wireless microsensor networks. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 19(2) :40–50, 2002. (Cité en pages 16 et 18.)
- [32] Gregory J Pottie and William J Kaiser. Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, 43(5) :51–58, 2000. (Cité en page 16.)
- [33] Cesare Alippi, Giuseppe Anastasi, Cristian Galperti, Francesca Mancini, and Manuel Roveri. Adaptive sampling for energy conservation in wireless sensor networks for snow monitoring applications. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2007. MASS 2007. IEEE International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2007. (Cité en pages 17 et 23.)
- [34] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 12(3) :493–506, 2004. (Cité en pages 17, 22 et 70.)
- [35] Mahmood Ali, Annette Bohm, and Magnus Jonsson. Wireless sensor networks for surveillance applications—a comparative survey of mac protocols. In *Wireless and Mobile Communications, 2008. ICWMC'08. The Fourth International Conference on*, pages 399–403. IEEE, 2008. (Cité en page 17.)

- [36] Holger Karl and Andreas Willig. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. Wiley-Interscience, 2007. (Cité en pages 17 et 41.)
- [37] Zahra Rezaei and Shima Mobininejad. Energy saving in wireless sensor networks. *Int J Comput Sci Eng Surv (IJCSES)*, 3(1) :23–37, 2012. (Cité en page 17.)
- [38] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco, and Andrea Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks : A survey. *Ad Hoc Networks*, 7(3) :537–568, 2009. (Cité en pages 18, 19, 20, 21, 22, 23 et 24.)
- [39] Ajit Warrier, Sangjoon Park, Jeongki Min, and Injong Rhee. How much energy saving does topology control offer for wireless sensor networks ?—a practical study. *Computer Communications*, 30(14) :2867–2879, 2007. (Cité en page 19.)
- [40] Deepak Ganesan, Alberto Cerpa, Wei Ye, Yan Yu, Jerry Zhao, and Deborah Estrin. Networking issues in wireless sensor networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 64(7) :799–814, 2004. (Cité en pages 19 et 20.)
- [41] Ya Xu, John Heidemann, and Deborah Estrin. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 70–84. ACM, 2001. (Cité en page 20.)
- [42] Michele Zorzi and Ramesh R Rao. Geographic random forwarding (ge-raf) for ad hoc and sensor networks : energy and latency performance. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 2(4) :349–365, 2003. (Cité en page 20.)
- [43] Paolo Casari, Alessia Marcucci, Michele Nati, Chiara Petrioli, and Michele Zorzi. A detailed simulation study of geographic random forwarding (geraf) in wireless sensor networks. In *Military Communications Conference, 2005. MILCOM 2005. IEEE*, pages 59–68. IEEE, 2005. (Cité en page 20.)
- [44] Benjie Chen, Kyle Jamieson, Hari Balakrishnan, and Robert Morris. Span : an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. *Wireless networks*, 8(5) :481–494, 2002. (Cité en page 20.)
- [45] Alberto Cerpa and Deborah Estrin. Ascent : Adaptive self-configuring sensor networks topologies. *mobile computing, IEEE transactions on*, 3(3) :272–285, 2004. (Cité en page 20.)

- [46] Koen Langendoen and Niels Reijers. Distributed localization in wireless sensor networks : a quantitative comparison. *Computer Networks*, 43(4) :499–518, 2003. (Cité en page 20.)
- [47] Guoqiang Mao, Barış Fidan, and Brian Anderson. Wireless sensor network localization techniques. *Computer networks*, 51(10) :2529–2553, 2007. (Cité en page 20.)
- [48] Curt Schurgers, Vlasios Tsiatsis, and Mani B Srivastava. Stem : Topology management for energy efficient sensor networks. In *Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE*, volume 3, pages 3–1099. IEEE, 2002. (Cité en page 21.)
- [49] Ya R Faizulkhakov. Time synchronization methods for wireless sensor networks : A survey. *Programming and Computer Software*, 33(4) :214–226, 2007. (Cité en page 21.)
- [50] Fikret Sivrikaya and Bulent Yener. Time synchronization in sensor networks : a survey. *Network, IEEE*, 18(4) :45–50, 2004. (Cité en page 21.)
- [51] Vamsi Paruchuri, Shivakumar Basavaraju, Arjan Duresi, Rajgopal Kannan, and S Sitharama Iyengar. Random asynchronous wakeup protocol for sensor networks. In *Broadband Networks, 2004. BroadNets 2004. Proceedings. First International Conference on*, pages 710–717. IEEE, 2004. (Cité en page 21.)
- [52] Ilker Demirkol, Cem Ersoy, and Fatih Alagoz. Mac protocols for wireless sensor networks : a survey. *Communications Magazine, IEEE*, 44(4) :115–121, 2006. (Cité en page 22.)
- [53] Koen Langendoen. Medium access control in wireless sensor networks. *Medium access control in wireless networks*, 2 :535–560, 2008. (Cité en page 22.)
- [54] Rajesh Yadav, Shirshu Varma, N Malaviya, et al. A survey of mac protocols for wireless sensor networks. *UbiCC journal*, 4(3) :827–833, 2009. (Cité en page 22.)
- [55] Jaap C Haartsen. The bluetooth radio system. *Personal Communications, IEEE*, 7(1) :28–36, 2000. (Cité en page 22.)
- [56] Qi Han, Sharad Mehrotra, and Nalini Venkatasubramanian. Energy efficient data collection in distributed sensor environments. In *Distributed Computing Systems, 2004. Proceedings. 24th International Conference on*, pages 590–597. IEEE, 2004. (Cité en pages 22 et 23.)
- [57] Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 95–107. ACM, 2004. (Cité en pages 22 et 70.)

- [58] Tijs Van Dam and Koen Langendoen. An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 171–180. ACM, 2003. (Cité en page 22.)
- [59] Gang Lu, Bhaskar Krishnamachari, and Cauligi S Raghavendra. An adaptive energy-efficient and low-latency mac for data gathering in wireless sensor networks. In *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004. Proceedings. 18th International*, page 224. IEEE, 2004. (Cité en pages 22 et 70.)
- [60] Injong Rhee, Ajit Warrier, Mahesh Aia, Jeongki Min, and Mihail L Sichitiu. Z-mac : a hybrid mac for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 16(3) :511–524, 2008. (Cité en page 22.)
- [61] Philip Levis, Sam Madden, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, Kamin Whitehouse, Alec Woo, David Gay, Jason Hill, Matt Welsh, Eric Brewer, et al. Tinyos : An operating system for sensor networks. In *Ambient intelligence*, pages 115–148. Springer, 2005. (Cité en page 22.)
- [62] David Chu, Amol Deshpande, Joseph M Hellerstein, and Wei Hong. Approximate data collection in sensor networks using probabilistic models. In *Data Engineering, 2006. ICDE'06. Proceedings of the 22nd International Conference on*, pages 48–48. IEEE, 2006. (Cité en page 23.)
- [63] Daniela Tulone and Samuel Madden. Paq : Time series forecasting for approximate query answering in sensor networks. In *Wireless Sensor Networks*, pages 21–37. Springer, 2006. (Cité en page 23.)
- [64] Elena Fasolo, Michele Rossi, Jorg Widmer, and Michele Zorzi. In-network aggregation techniques for wireless sensor networks : a survey. *Wireless Communications, IEEE*, 14(2) :70–87, 2007. (Cité en page 23.)
- [65] Ryo Sugihara and Rajesh K Gupta. Path planning of data mules in sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 8(1) :1, 2011. (Cité en page 24.)
- [66] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas. Sink mobility protocols for data collection in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th ACM international workshop on Mobility management and wireless access*, pages 52–59. ACM, 2006. (Cité en page 24.)
- [67] Ioannis Papadimitriou and Leonidas Georgiadis. Energy-aware routing to maximize lifetime in wireless sensor networks with mobile sink. *Journal of Communications Software and Systems*, 2(2) :141–151, 2006. (Cité en page 24.)

- [68] Z Maria Wang, Stefano Basagni, Emanuel Melachrinoudis, and Chiara Petrioli. Exploiting sink mobility for maximizing sensor networks lifetime. In *System Sciences, 2005. HICSS'05. Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on*, pages 287a–287a. IEEE, 2005. (Cité en page 24.)
- [69] Marco Conti, Andrea Passarella, and Luciana Pelusi. Mobile-relay forwarding in opportunistic networks. In *Chapter in Adaptive Techniques in Wireless Networks (M. Ibnkahla, Editor. Citeseer, 2009.* (Cité en page 24.)
- [70] Hyewon Jun, Wenrui Zhao, Mostafa H Ammar, Ellen W Zegura, and Chungki Lee. Trading latency for energy in wireless ad hoc networks using message ferrying. In *Pervasive Computing and Communications Workshops, 2005. PerCom 2005 Workshops. Third IEEE International Conference on*, pages 220–225. IEEE, 2005. (Cité en page 24.)
- [71] Wenrui Zhao, Mostafa Ammar, and Ellen Zegura. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 187–198. ACM, 2004. (Cité en pages 24, 61 et 64.)
- [72] S. Ziane and A. Mellouk. A swarm intelligent scheme for routing in mobile ad hoc networks. In *Systems Communications, 2005. Proceedings*, pages 2–6, 2005. (Cité en page 25.)
- [73] Paolo Santi. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 37(2) :164–194, 2005. (Cité en page 25.)
- [74] Site $\tilde{\text{A}}\text{dit}\tilde{\text{A}}\text{©}$ par la soci $\tilde{\text{A}}\text{t}\tilde{\text{A}}\text{©}$ BLOBIFY. R $\tilde{\text{A}}\text{©cup}\tilde{\text{A}}\text{©ration}$ d' $\tilde{\text{A}}\text{©nergie}$ ecologie et $\tilde{\text{A}}\text{©conomie}$ riment avec r $\tilde{\text{A}}\text{©cup}\tilde{\text{A}}\text{©ration}$ d' $\tilde{\text{A}}\text{©nergie}$... [http ://www.recuperation-energie.com/](http://www.recuperation-energie.com/). (Cité en page 27.)
- [75] Sujesha Sudevalayam and Purushottam Kulkarni. Energy harvesting sensor nodes : Survey and implications. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 13(3) :443–461, 2011. (Cité en pages 28, 29 et 31.)
- [76] Aman Kansal, Jason Hsu, Sadaf Zahedi, and Mani B Srivastava. Power management in energy harvesting sensor networks. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, 6(4) :32, 2007. (Cité en pages 29 et 33.)
- [77] Thad Starner. Human-powered wearable computing. *IBM systems Journal*, 35(3.4) :618–629, 1996. (Cité en page 30.)

- [78] Nathan S. Shenck and Joseph A. Paradiso. Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics. *Micro, IEEE*, 21(3) :30–42, 2001. (Cité en page 30.)
- [79] John Kymissis, Clyde Kendall, Joseph Paradiso, and Neil Gershenfeld. Parasitic power harvesting in shoes. In *Wearable Computers, 1998. Digest of Papers. Second International Symposium on*, pages 132–139. IEEE, 1998. (Cité en pages 30 et 34.)
- [80] Joseph A Paradiso and Mark Feldmeier. A compact, wireless, self-powered pushbutton controller. In *UbiComp 2001 : Ubiquitous Computing*, pages 299–304. Springer, 2001. (Cité en page 30.)
- [81] Crossbow Inc. Datasheet, mica2. (Cité en page 33.)
- [82] Xiaofan Jiang, Joseph Polastre, and David Culler. Perpetual environmentally powered sensor networks. In *Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005. Fourth International Symposium on*, pages 463–468. IEEE, 2005. (Cité en page 33.)
- [83] Crossbow Inc. Datasheet, telosb. (Cité en page 33.)
- [84] Farhan Simjee and Pai H Chou. Everlast : long-life, supercapacitor-operated wireless sensor node. In *Low Power Electronics and Design, 2006. ISLPED'06. Proceedings of the 2006 International Symposium on*, pages 197–202. IEEE, 2006. (Cité en page 33.)
- [85] Chulsung Park and Pai H Chou. Ambimax : Autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes. In *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2006. SECON'06. 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on*, volume 1, pages 168–177. IEEE, 2006. (Cité en page 33.)
- [86] Prabal Dutta, Jonathan Hui, Jaein Jeong, Sukun Kim, Cory Sharp, Jay Taneja, Gilman Tolle, Kamin Whitehouse, and David Culler. Trio : enabling sustainable and scalable outdoor wireless sensor network deployments. In *Proceedings of the 5th international conference on Information processing in sensor networks*, pages 407–415. ACM, 2006. (Cité en page 33.)
- [87] Daniele Musiani, Kaisen Lin, and T Simunic Rosing. Active sensing platform for wireless structural health monitoring. In *Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks*, pages 390–399. ACM, 2007. (Cité en page 33.)
- [88] Pei Zhang, Christopher M Sadler, Stephen A Lyon, and Margaret Martonosi. Hardware design experiences in zebranet. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 227–238. ACM, 2004. (Cité en page 33.)

- [89] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. A survey on sensor networks. *Communications magazine, IEEE*, 40(8) :102–114, 2002. (Cité en page 38.)
- [90] Mohamed Aissani. *Optimisation du routage dans les réseaux de capteurs pour les applications temps-réel*. PhD thesis, Université Paris-Est, 2011. (Cité en page 39.)
- [91] Kewei Sha, Weisong Shi, and Sivakumar Sellamuthu. 5.2 load-balanced query protocols for wireless sensor networks. *Sensor Network Operations*, page 264, 2006. (Cité en page 39.)
- [92] Kamin Whitehouse, Cory Sharp, Eric Brewer, and David Culler. Hood : a neighborhood abstraction for sensor networks. In *Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services*, pages 99–110. ACM, 2004. (Cité en page 40.)
- [93] Arvind Giridhar and PR Kumar. Maximizing the functional lifetime of sensor networks. In *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, page 2. IEEE Press, 2005. (Cité en page 40.)
- [94] Vivek P Mhatre, Catherine Rosenberg, Daniel Kofman, Ravi Mazumdar, and Ness Shroff. A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 4(1) :4–15, 2005. (Cité en page 40.)
- [95] Wei Wang, Vikram Srinivasan, and Kee-Chaing 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*, pages 270–283. ACM, 2005. (Cité en page 40.)
- [96] Ritesh Madan, Shuguang Cui, S Lal, and Andrea Goldsmith. Cross-layer design for lifetime maximization in interference-limited wireless sensor networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 5(11) :3142–3152, 2006. (Cité en pages 40 et 41.)
- [97] Stanislava Soro and Wendi B Heinzelman. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering. In *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2005. Proceedings. 19th IEEE International*, pages 8–pp. IEEE, 2005. (Cité en page 41.)
- [98] Jing Deng, Yung-Hsiang S Han, Wendi B Heinzelman, and Pramod K Varshney. Scheduling sleeping nodes in high density cluster-based sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, 10(6) :825–835, 2005. (Cité en page 41.)

- [99] Keith Hellman and Michael Colagrosso. Investigating a wireless sensor network optimal lifetime solution for linear topologies. *Journal of Interconnection Networks*, 7(01) :91–99, 2006. (Cité en page 41.)
- [100] Di Tian and Nicolas D Georganas. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pages 32–41. ACM, 2002. (Cité en pages 41 et 43.)
- [101] Mihaela Cardei, My T Thai, Yingshu Li, and Weili Wu. Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks. In *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, volume 3, pages 1976–1984. IEEE, 2005. (Cité en page 42.)
- [102] Benyuan Liu, Peter Brass, Olivier Dousse, Philippe Nain, and Don Towsley. Mobility improves coverage of sensor networks. In *Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 300–308. ACM, 2005. (Cité en page 42.)
- [103] Kui Wu, Yong Gao, Fulu Li, and Yang Xiao. Lightweight deployment-aware scheduling for wireless sensor networks. *Mobile networks and applications*, 10(6) :837–852, 2005. (Cité en page 42.)
- [104] Honghai Zhang and Jennifer C Hou. On the upper bound of α -lifetime for large sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 1(2) :272–300, 2005. (Cité en page 42.)
- [105] Wei Mo, Daji Qiao, and Zhengdao Wang. Mostly-sleeping wireless sensor networks : connectivity, k-coverage, and alpha-lifetime. In *Proceedings of the 43rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, 2005. (Cité en page 42.)
- [106] Isabel Dietrich and Falko Dressler. On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 5(1) :5, 2009. (Cité en page 42.)
- [107] Douglas M Blough and Paolo Santi. Investigating upper bounds on network lifetime extension for cell-based energy conservation techniques in stationary ad hoc networks. In *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 183–192. ACM, 2002. (Cité en page 42.)
- [108] Bogdan Cărbunar, Ananth Grama, Jan Vitek, and Octavian Cărbunar. Redundancy and coverage detection in sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 2(1) :94–128, 2006. (Cité en page 42.)

- [109] Guoliang Xing, Xiaorui Wang, Yuanfang Zhang, Chenyang Lu, Robert Pless, and Christopher Gill. Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 1(1) :36–72, 2005. (Cité en page 42.)
- [110] Santosh Kumar, Anish Arora, and Ten-Hwang Lai. On the lifetime analysis of always-on wireless sensor network applications. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005. IEEE International Conference on*, pages 3–pp. IEEE, 2005. (Cité en page 43.)
- [111] Volodymyr Goncharov. Delay-tolerant networks. *Lehrstuhl für Rechnernetze und Telematik, Institut für Informatik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg*, 2010. (Cité en page 43.)
- [112] Tiphaine Phe-Neau, Marcelo Dias De Amorim, Vania Conan, et al. Caractérisation en diptyque de l’intercontact pour les réseaux à connectivité intermittente. *14èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel)*, pages 1–4, 2012. (Cité en page 43.)
- [113] Joseph Macker. Mobile ad hoc networking (manet) : Routing protocol performance issues and evaluation considerations. *IETF*, 1999. (Cité en page 44.)
- [114] Hugo Cruz Sanchez. *Routage pour une constellation de satellites Store and Forward dans des conditions difficiles*. PhD thesis, Télécom Paris-Tech, 2008. (Cité en pages 45 et 46.)
- [115] S Burleigh and K Scott. Bundle protocol specification. *IETF Request for Comments RFC*, 5050, 2007. (Cité en page 48.)
- [116] Ian F Akyildiz, Özgür B Akan, Chao Chen, Jian Fang, and Weilian Su. Interplanetary internet : state-of-the-art and research challenges. *Computer Networks*, 43(2) :75–112, 2003. (Cité en page 48.)
- [117] Jérémie Leguay. *Hétérogénéités et Routages dans les Réseaux Connectivité Intermittente*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, 2007. (Cité en pages 50, 51 et 57.)
- [118] Randall R Stewart and Qiaobing Xie. Stream control transmission protocol (sctp). *IETF*, 2001. (Cité en page 50.)
- [119] Dominique Revuz JÃ©rÃ©my Courtial, Etienne Duris. Delay tolerant networks. [http ://www.igm.univ-mlv.fr/ dr/XPOSE2008/dtn/index.html](http://www.igm.univ-mlv.fr/dr/XPOSE2008/dtn/index.html), 2000. (Cité en page 51.)
- [120] Amir Krifa, C Baraka, and Thrasyvoulos Spyropoulos. Optimal buffer management policies for delay tolerant networks. In *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2008. SECON’08. 5th Annual*

- IEEE Communications Society Conference on*, pages 260–268. IEEE, 2008. (Cité en page 52.)
- [121] Anders Lindgren and Kaustubh S Phanse. Evaluation of queueing policies and forwarding strategies for routing in intermittently connected networks. In *Communication System Software and Middleware, 2006. Comsware 2006. First International Conference on*, pages 1–10. IEEE, 2006. (Cité en page 52.)
- [122] Zhensheng Zhang. Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks : overview and challenges. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 8(1) :24–37, 2006. (Cité en page 52.)
- [123] Dan Henriksson, Tarek F Abdelzaher, and Raghu K Ganti. A caching-based approach to routing in delay-tolerant networks. In *Computer Communications and Networks, 2007. ICCCN 2007. Proceedings of 16th International Conference on*, pages 69–74. IEEE, 2007. (Cité en page 53.)
- [124] Thomas Clausen, Philippe Jacquet, Cédric Adjih, Anis Laouiti, Pascale Minet, Paul Muhlethaler, Amir Qayyum, Laurent Viennot, et al. Optimized link state routing protocol (olsr). 2003. (Cité en page 53.)
- [125] Charles Perkins, Elizabeth Belding-Royer, and Samir Das. Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing. Technical report, RFC 3561, July, 2003. (Cité en page 53.)
- [126] Young-Bae Ko and Nitin H Vaidya. Location-aided routing (lar) in mobile ad hoc networks. *Wireless Networks*, 6(4) :307–321, 2000. (Cité en page 53.)
- [127] Jose Joaquin Garcia-Luna-Aceves and Marcello Spohn. Source-tree routing in wireless networks. In *Network Protocols, 1999.(ICNP'99) Proceedings. Seventh International Conference on*, pages 273–282. IEEE, 1999. (Cité en page 53.)
- [128] Amin Vahdat, David Becker, et al. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. Technical report, Technical Report CS-200006, Duke University, 2000. (Cité en pages 57, 64 et 76.)
- [129] Matthias Grossglauser and David Tse. Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks. In *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1360–1369. IEEE, 2001. (Cité en page 58.)

- [130] Matthias Grossglauser and David NC Tse. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks. *Networking, Ieee/Acm Transactions On*, 10(4) :477–486, 2002. (Cité en pages 58 et 64.)
- [131] Thrasyvoulos Spyropoulos, Konstantinos Psounis, and Cauligi S Raghavendra. Spray and wait : an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, pages 252–259. ACM, 2005. (Cité en pages 58 et 64.)
- [132] Khaled A Harras, Kevin C Almeroth, and Elizabeth M Belding-Royer. Delay tolerant mobile networks (dtmns) : Controlled flooding in sparse mobile networks. In *NETWORKING 2005. Networking Technologies, Services, and Protocols ; Performance of Computer and Communication Networks ; Mobile and Wireless Communications Systems*, pages 1180–1192. Springer, 2005. (Cité en page 58.)
- [133] Yong Wang, Sushant Jain, Margaret Martonosi, and Kevin Fall. Erasure-coding based routing for opportunistic networks. In *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, pages 229–236. ACM, 2005. (Cité en page 58.)
- [134] Jörg Widmer and Jean-Yves Le Boudec. Network coding for efficient communication in extreme networks. In *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, pages 284–291. ACM, 2005. (Cité en page 58.)
- [135] Charles E Leiserson, Ronald L Rivest, Clifford Stein, and Thomas H Cormen. *Introduction to algorithms*. The MIT press, 2001. (Cité en page 59.)
- [136] Anders Lindgren, Avri Doria, and Olov Schelen. Probabilistic routing in intermittently connected networks. In *Service Assurance with Partial and Intermittent Resources*, pages 239–254. Springer, 2004. (Cité en pages 59, 60 et 64.)
- [137] Anders Lindgren, Elwyn Davies, Samo Grasic, and Avri Doria. Probabilistic routing protocol for intermittently connected networks. 2012. (Cité en page 60.)
- [138] Anders Lindgren, Avri Doria, Elwyn Davies, and Samo Grasic. Probabilistic routing protocol for intermittently connected networks draft-irtf-dtnrg-prophet-09, 2009. (Cité en page 60.)
- [139] John Burgess, Brian Gallagher, David Jensen, and Brian Neil Levine. Maxprop : Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. In *Proc. iee infocom*, volume 6, pages 1–11. Barcelona, Spain, 2006. (Cité en pages 60, 64, 76 et 93.)

- [140] Evan PC Jones, Lily Li, and Paul AS Ward. Practical routing in delay-tolerant networks. In *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, pages 237–243. ACM, 2005. (Cité en page 61.)
- [141] Rahul C Shah, Sumit Roy, Sushant Jain, and Waylon Brunette. Data mules : Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. In *Sensor Network Protocols and Applications, 2003. Proceedings of the First IEEE. 2003 IEEE International Workshop on*, pages 30–41. IEEE, 2003. (Cité en pages 61 et 64.)
- [142] Paul McDonald, Dermot Geraghty, Ivor Humphreys, Stephen Farrell, and Vinny Cahill. Sensor network with delay tolerance (sendt). In *Computer Communications and Networks, 2007. ICCCN 2007. Proceedings of 16th International Conference on*, pages 1333–1338. IEEE, 2007. (Cité en pages 61 et 64.)
- [143] Sushant Jain, Michael Demmer, Rabin Patra, and Kevin Fall. Using redundancy to cope with failures in a delay tolerant network. In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, volume 35, pages 109–120. ACM, 2005. (Cité en pages 61 et 64.)
- [144] Anders Lindgren, Avri Doria, and Olov Schelén. Probabilistic routing in intermittently connected networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 7(3) :19–20, 2003. (Cité en pages 62, 76, 93 et 95.)
- [145] Elyès BEN HAMIDA. Modélisation stochastique et simulation des réseaux sans fil multi-sauts. 2009. (Cité en pages 68 et 69.)
- [146] Emiliano Miluzzo, Nicholas D Lane, Kristóf Fodor, Ronald Peterson, Hong Lu, Mirco Musolesi, Shane B Eisenman, Xiao Zheng, and Andrew T Campbell. Sensing meets mobile social networks : the design, implementation and evaluation of the cenceme application. In *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*, pages 337–350. ACM, 2008. (Cité en page 69.)
- [147] Ting Liu, Christopher M Sadler, Pei Zhang, and Margaret Martonosi. Implementing software on resource-constrained mobile sensors : Experiences with impala and zebranet. In *Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services*, pages 256–269. ACM, 2004. (Cité en page 69.)
- [148] Barbara Hohlt, Lance Doherty, and Eric Brewer. Flexible power scheduling for sensor networks. In *Proceedings of the 3rd international symposium on Information processing in sensor networks*, pages 205–214. ACM, 2004. (Cité en page 70.)

- [149] Amre El-Hoiydi and J-D Decotignie. Wisemac : an ultra low power mac protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks. In *Computers and Communications, 2004. Proceedings. ISCC 2004. Ninth International Symposium on*, volume 1, pages 244–251. IEEE, 2004. (Cité en page 70.)
- [150] Michael Buettner, Gary V Yee, Eric Anderson, and Richard Han. X-mac : a short preamble mac protocol for duty-cycled wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 307–320. ACM, 2006. (Cité en page 70.)
- [151] Yong Wang, Margaret Martonosi, and Li-Shiuan Peh. A new scheme on link quality prediction and its applications to metric-based routing. In *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 288–289. ACM, 2005. (Cité en page 71.)
- [152] Yong Wang, Margaret Martonosi, and Li-Shiuan Peh. A supervised learning approach for routing optimizations in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd international workshop on Multi-hop ad hoc networks : from theory to reality*, pages 79–86. ACM, 2006. (Cité en page 71.)
- [153] Michael D Colagrosso. Intelligent broadcasting immobile ad hoc networks : three classes of adaptive protocols. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2007(1) :25–25, 2007. (Cité en page 71.)
- [154] Zhenzhen Liu and Itamar Elhanany. Rl-mac : a qos-aware reinforcement learning based mac protocol for wireless sensor networks. In *Networking, Sensing and Control, 2006. ICNSC'06. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on*, pages 768–773. IEEE, 2006. (Cité en page 71.)
- [155] Jeffrey Junfeng Pan, Qiang Yang, and Sinno Jialin Pan. Online co-localization in indoor wireless networks by dimension reduction. In *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE*, volume 22, page 1102. Menlo Park, CA ; Cambridge, MA ; London ; AAAI Press ; MIT Press ; 1999, 2007. (Cité en page 71.)
- [156] Julien Perez. Ppm-eml : an adaptative probing period modulation algorithm for efficient energy-management in dtn. (Cité en page 71.)
- [157] Denis Rodrigues Silva, António Costa, and Joaquim Macedo. Energy impact analysis on dtn routing protocols. 2012. (Cité en pages 71, 72 et 94.)

- [158] Ari Keränen, Jörg Ott, and Teemu Kärkkäinen. The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation. In *SIMUTools '09 : Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*, New York, NY, USA, 2009. ICST. (Cité en page 74.)
- [159] Frans Ekman, Ari Keränen, Jouni Karvo, and Jörg Ott. Working day movement model. In *Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE workshop on Mobility models*, pages 33–40. ACM, 2008. (Cité en page 74.)
- [160] Ari Keränen, Jörg Ott, and Teemu Kärkkäinen. The one simulator for dtn protocol evaluation. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*, page 55. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2009. (Cité en page 75.)
- [161] Arvind Kandhalu, Karthik Lakshmanan, and R Rajkumar. Neighbor discovery in mobile sensor networks. Technical report, Technical report, Carnegie Mellon University, 2010. (Cité en page 80.)
- [162] D Ebert, KP Ebmeier, and WP Kaschka. Advances in biological psychiatry. *Biological Rhythms and Behavior*, 1983. (Cité en page 81.)
- [163] Jennifer J Loros Jay C Dunlap, J DeCoursey Patricia, Jay C Loros Dunlap, and Patricia J DeCoursey. Chronobiology : biological timekeeping/. 2004. (Cité en page 81.)
- [164] Moazzam Khan and Jelena Misic. Security in ieee 802.15. 4 cluster based networks. *Security in Wireless Mesh Networks*, 6, 2008. (Cité en page 91.)
- [165] João M. L. P. Caldeira, Joel J. P. C. Rodrigues, and Pascal Lorenz. Toward ubiquitous mobility solutions for body sensor networks on healthcare. *IEEE Communications Magazine*, 50(5) :108–115, 2012. (Cité en page 91.)
- [166] Kai Zeng, Wenjing Lou, Jie Yang, and D Richard Brown. On geographic collaborative forwarding in wireless ad hoc and sensor networks. In *Wireless Algorithms, Systems and Applications, 2007. WASA 2007. International Conference on*, pages 11–18. IEEE, 2007. (Cité en page 92.)
- [167] Kai Zeng, Wenjing Lou, and Hongqiang Zhai. On end-to-end throughput of opportunistic routing in multirate and multihop wireless networks. In *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*, pages 816–824. IEEE, 2008. (Cité en page 92.)
- [168] Rafael Laufer, Henri Dubois-Ferriere, and Leonard Kleinrock. Multirate anypath routing in wireless mesh networks. In *INFOCOM 2009, IEEE*, pages 37–45. IEEE, 2009. (Cité en page 92.)

- [169] Joohwan Kim, Xiaojun Lin, Ness B Shroff, and Prasun Sinha. On maximizing the lifetime of delay-sensitive wireless sensor networks with any-cast. In *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*, pages 807–815. IEEE, 2008. (Cité en page 92.)
- [170] Joongseok Park and Sartaj Sahni. An online heuristic for maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *Computers, IEEE Transactions on*, 55(8) :1048–1056, 2006. (Cité en page 92.)
- [171] Chengjie Wu, Ruixi Yuan, and Hongchao Zhou. A novel load balanced and lifetime maximization routing protocol in wireless sensor networks. In *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, pages 113–117. IEEE, 2008. (Cité en page 92.)
- [172] Vinton Cerf, Scott Burleigh, Adrian Hooke, Leigh Torgerson, Robert Durst, Keith Scott, Kevin Fall, and Howard Weiss. Delay-tolerant networking architecture. *RFC4838, April*, 2007. (Cité en page 94.)
- [173] Hai-Ying Zhou, Dan-Yan Luo, Yan Gao, and De-Cheng Zuo. Modeling of node energy consumption for wireless sensor networks. *Wireless Sensor Network*, 3(1) :18–23, 2011. (Cité en pages 95 et 117.)
- [174] A. Teo, G. Singh, and J.C. McEachen. Evaluation of the xmesh routing protocol in wireless sensor networks. In *Circuits and Systems, 2006. MWSCAS '06. 49th IEEE International Midwest Symposium on*, volume 2, pages 113–117, 2006. (Cité en page 106.)

Résumé : Le challenge de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil constitue un verrou technologique qui reste un problème ouvert encore aujourd'hui. Ces travaux de thèse s'inscrivent dans la problématique de la conservation de l'énergie dans les réseaux de capteurs et s'articulent autour de deux axes. Dans la première partie, nous abordons le dimensionnement des protocoles de découverte de voisinage. Nous proposons deux techniques de dimensionnement de ces protocoles qui visent à optimiser la consommation d'énergie des nœuds capteurs. La première technique, PPM-BM, consiste à dimensionner le protocole de découverte de voisins en fonction du niveau de batterie du nœud. La deuxième approche, ECoND, vise à ajuster la fréquence de découverte de voisins en fonction de la connectivité estimée à chaque instant. Cette technique tire profit des cycles temporels des modèles de mouvement des nœuds. La connectivité est estimée en se basant sur l'historique des rencontres. La découverte de voisins est ajustée en fonction du taux de connectivité estimé. Les résultats enregistrés mettent en évidence l'efficacité de ces deux techniques dans l'optimisation de la consommation d'énergie des nœuds sans affecter les performances de taux de livraison de messages et d'overhead. La deuxième partie de la thèse concerne l'optimisation des performances des réseaux de capteurs en termes de durée de vie. Nous reconsidérons dans cette partie certains protocoles de routage relevant du domaine des réseaux à connectivité intermittente et nous proposons le protocole EXLIOSE qui se base sur la capacité d'énergie résiduelle au niveau des nœuds pour assurer un équilibre énergétique, partager la charge et étendre à la fois la durée de vie des nœuds ainsi que celle du réseau.

Mots clés : Réseaux de capteurs, découverte de voisinage, réseaux à connectivité intermittente, durée de vie, équilibre énergétique.

Abstract : The challenge of energy consumption in wireless sensor networks is a key issue that remains an open problem. This thesis relates to the problem of energy conservation in sensor networks and is divided into two parts. In the first part, we discuss the design of neighbor discovery protocols. We propose two techniques for modulating these protocols in order to optimize the energy consumption of sensor nodes. The first technique, PPM-BM aims to modulate the neighbor discovery protocol based on the battery level of the node. The second approach ECoND aims to set up the frequency of neighbor discovery based on estimated connectivity. This technique takes advantage of the temporal cycles of nodes' movement patterns. Connectivity is estimated based on encounters' history. A neighbor discovery is set up based on the estimated rate of connectivity. The achieved results demonstrate the effectiveness of these techniques in optimizing the energy consumption of nodes while maintaining acceptable message delivery and overhead rates. In the second part of the thesis, we contribute to the optimization of the performance of sensor networks in terms of network lifetime. We review in this section some routing protocols for networks with intermittent connectivity and we propose EXLIOSE protocol which is based on residual energy to ensure energy-balancing, load sharing and network lifetime extending.

Keywords : sensor networks, neighbor discovery, networks with intermittent connectivity, network lifetime, energy-balancing.
