

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
OUSSAMA DRISSI

IMPLEMENTATION D'UNE STRATEGIE DE ROUTAGE MULTI-NIVEAU DE
DONNÉES D'UN RÉSEAU DE CAPTEURS SANS FIL DANS LE DOMAINE
FERROVIAIRE

JUIN 2014

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Résumé

L'objectif du projet est d'améliorer la transmission de données à bord d'un train. Ce travail propose des idées et des solutions techniques en utilisant les réseaux de capteurs pour assurer un service fiable, ponctuel et économique en effectuant l'acquisition et le traitement sans fil dans les trains des différents paramètres comme l'accélération, la température, l'humidité et le positionnement.

La topologie d'un réseau de capteurs installé à bord d'un train est semblable à une topologie linéaire. L'augmentation de nombre de sauts pour atteindre la station de base affecte la performance de réseau de sorte qu'il ne représente pas un bon cadre d'intégration des applications à temps réel.

Ce travail présente un cadre de simulation réaliste qui caractérise le milieu de propagation radio à bord d'un train en utilisant le simulateur NS2 et l'extension Mannasim. Il contient aussi une étude de performance de routage multi-saut classique dans un environnement réaliste ainsi qu'une proposition et une implémentation d'une architecture de routage multi-niveau pour répondre aux exigences des applications de surveillance en termes de délai bout en bout des paquets et de débit de réseau.

Avant-propos

Ce travail a été effectué au Laboratoire de microsystemes et télécommunications (LMST), au sein du Département du génie électrique et génie informatique à l'Université du Québec à Trois-Rivières.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur, Monsieur Adel Omar Dahmane, professeur titulaire à l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour son suivi, sa disponibilité et ses précieux conseils qu'il m'a prodigués le long de ce projet.

Je tiens à remercier également mon codirecteur, Monsieur Tayeb Medjeldi, directeur du Centre collégial de transfert de technologie en télécommunications (C2T3), pour son incontestable contribution à l'accomplissement de ce projet.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à tous mes enseignants pour la qualité de l'enseignement qu'ils ont bien voulu me prodiguer durant mes études afin de me fournir une excellente formation.

Enfin, je tiens à remercier, avec beaucoup d'égard et de différence, tous les membres de ma famille pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Table des matières

Résumé.....	ii
Avant-propos.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures.....	x
Liste des symboles.....	xii
Chapitre 1 - Introduction.....	1
1.1 Contexte du projet de recherche :.....	2
1.2 Problématique.....	3
1.3 Objectifs.....	5
1.4 Méthodologie.....	6
1.5 Organisation du mémoire.....	7
Chapitre 2 - Les réseaux de capteurs sans fil.....	9
2.1 Introduction.....	9
2.2 Les composants d'un capteur.....	9
2.2.1 Mémoire.....	10
2.2.2 Processeur.....	10

2.2.3	Senseur	11
2.2.4	Bloc d'alimentation.....	11
2.2.5	Unité de communication	11
2.3	Caractéristique d'un réseau de capteur.....	12
2.3.1	Architecture d'un réseau de capteurs	12
2.3.2	Les contraintes dans la conception d'un réseau de capteurs	13
2.4	Domaines d'application des réseaux de capteurs	13
2.4.1	Les applications militaires	14
2.4.2	Les applications de surveillance	14
2.4.3	La santé	14
2.4.4	Le Transport.....	14
2.5	Les stratégies de routages des données dans les réseaux de capteurs	15
2.6	Les politiques de routages d'un RCSF dans les trains	17
2.6.1	Le routage multi-saut classique	19
2.6.2	Le routage multi-niveau dans les topologies linéaires.....	21
2.7	Conclusion :.....	23
Chapitre 3 - La conception et l'implémentation des stratégies de routage des		
	données à bord d'un train.....	24
3.1	Introduction	24
3.2	Le modèle réseau.....	24

3.2.1	La topologie du réseau	25
3.2.2	La densification des nœuds	28
3.2.3	Étude de l'environnement dans les trains	29
3.3	Environnement de simulation	29
3.3.1	Le but de la simulation	29
3.3.2	Les outils de simulations	30
3.3.3	Les Paramètres de simulations	31
3.3.4	La configuration des nœuds	32
3.4	La caractérisation de l'environnement	33
3.4.1	Modèle de propagation dans les wagons	34
3.4.2	Modèle de propagation entre les wagons	34
3.4.3	Modèle réaliste	35
3.5	Les Métriques	36
3.6	Conclusion	37
Chapitre 4 - Résultats		38
4.1	Introduction	38
4.2	Effets des modèles de propagation	38
4.2.1	Le Débit	38
4.2.2	Le délai de bout en bout	39

4.2.3	Le niveau d'énergie restant.....	40
4.3	Évaluation de performance des protocoles AODV et DSDV	41
4.3.1	Le débit	42
4.3.2	Le niveau d'énergie restant.....	43
4.3.3	La durée de vie du réseau.....	43
4.4	Impact de la densification des nœuds sur la performance de réseau.....	44
4.4.1	Le débit	45
4.4.2	Le délai de bout en bout.....	46
4.5	Comparaison entre le routage classique et routage multi-niveau.....	47
4.5.1	Le délai de bout en bout.....	47
4.5.2	Le débit	48
4.5.3	Le niveau d'énergie restant.....	49
4.5.4	Discussion des résultats	49
4.6	Étude de l'augmentation du nombre de points d'accès	51
4.6.1	Le débit moyen du réseau	52
4.6.2	Le délai de bout en bout.....	53
4.6.3	La durée de vie du réseau.....	53
4.7	Analyse des résultats	54
4.8	Conclusion.....	55

Chapitre 5 - Conclusion générale.....	56
Bibliographie.....	58
Annexe A – Les caractéristiques du standard IEEE 802.15.4.....	61
Annexe B – Les protocoles de routage dans un RCSF	65
Annexe C– Installation NS2	68
Annexe D – Installation Mannasim.....	74

Liste des tableaux

Tableau 3-1	Les paramètres de l'environnement de simulation.....	32
Tableau 3-2	La configuration d'un nœud de capteur.....	33
Tableau 3-3	Les paramètres de propagation a l'intérieur d'un wagon.....	34
Tableau 3-4	Les paramètres de propagation entre deux wagons.	34
Tableau 3-5	Les paramètres de propagation dans un environnement réaliste.	35
Tableau 4-1	Le délai de bout en bout moyen pour les différents modèles de propagation.....	40
Tableau 4-2	Le débit de réseau moyen en utilisant AODV et DSDV dans un environnement réaliste.....	42
Tableau 4-3	Le débit réseau moyen pour les différentes distributions des nœuds par wagon.	45
Tableau 4-4	Le délai de bout en bout moyen pour les différentes distributions des nœuds par wagon.....	46
Tableau 4-5	Comparaison entre les performances des approches de routage proposées en termes de débit réseau et délai de bout en bout.	49
Tableau 4-6	La distance entre les points d'accès pour les deux réseaux.....	51
Tableau 4-7	Le débit moyen du réseau pour les deux modèles utilisés.....	52
Tableau 4-8	Le délai de bout en bout moyen pour les deux modèles utilisés.....	53

Liste des figures

Figure 2.1 Architecture d'un nœud de capteur [3]	10
Figure 2.2 Architecture d'un réseau de capteurs [12]	12
Figure 2.3 Modèle d'un train à 6 wagons et une locomotive	18
Figure 2.4 Une topologie linéaire d'un réseau de capteur	18
Figure 2.5 La transmission directe dans un réseau de capteurs	19
Figure 2.6 La transmission coopérative dans un réseau de capteurs.....	20
Figure 2.7 La transmission multi-niveau dans un réseau de capteurs [20]	22
Figure 3.1 Architecture multi-niveau classique d'un RCSF dans un train	25
Figure 3.2 Intégration de Wifi dans le routage multi-niveau de données	26
Figure 3.3 Architecture multi-niveau multi-saut d'un RCSF dans un train	27
Figure 3.4 Les distributions des nœuds simulées dans un wagon.....	28
Figure 4.1 Débit instantané du réseau dans différents environnements en utilisant le protocole AODV	39
Figure 4.2 Le niveau d'énergie restant dans les différents environnements en utilisant le protocole AODV.....	41
Figure 4.3 Débit instantané de réseau en utilisant les protocoles AODV et DSDV dans un environnement réaliste.	42
Figure 4.4 Le niveau d'énergie restant en utilisant les protocoles AODV et DSDV dans un environnement réaliste.	43
Figure 4.5 La durée de vie du réseau en utilisant les protocoles AODV et DSDV dans un environnement réaliste.	44
Figure 4.6 Le niveau d'énergie restant d'un capteur pour les différentes distributions des nœuds	46
Figure 4.7 Le délai de bout en bout instantané pour les deux approches de routage.	47

Figure 4.8 Le débit instantané du réseau pour les deux approches de routage.	48
Figure 4.9 Le niveau d'énergie restant d'un capteur en utilisant les deux approches de routage.	49
Figure 4.10 La durée de vie du réseau pour les deux approches de routage.	50
Figure 4.11 La duplication du nombre de points d'accès dans une architecture multi-niveau.	52
Figure 4.12 La durée de vie de réseau pour les deux modèles utilisés.	54

Liste des symboles

AODV	Ad-hoc on-demand Distance Vector
CPU	Central Processing Unit
DSDV	Destination-Sequenced Distance-Vector
DSN	Distributed Sensor Networks
DSR	Dynamic Source Routing protocol
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
FFD	Full-function device
GPS	Global Positioning System
IP	Internet Protocol
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
MANET	Mobile Ad hoc NETWORK
MU	Mobile Unit
OS	Operating system
P2P	Peer to Peer
QoS	Quality of Service
RCSF	Réseau de Capteurs Sans Fil
RCASF	Réseau de Capteurs et d'Acteurs Sans Fil

RFD	Reduced-function devices
TCP	Transmission Control Protocol
TTL	Time to Live
Wifi	Wireless fidelity
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WSN	Wireless Sensor Network
WMSN	Wireless Multimedia Sensor Network

Chapitre 1 - Introduction

Des recherches récentes en réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ont suscité un grand intérêt en raison de la diversité de ses applications qui touchent plusieurs domaines tels que le transport, la santé, les applications environnementales et militaires [1]. En effet, la capacité de détecter et de contrôler une variété de paramètres en utilisant des capteurs offre une flexibilité et une facilité de déploiement ce qui représente un changement significatif par rapport aux systèmes traditionnels de détection qui doivent être stratégiquement positionnés pour des topologies fixes et bien déterminées [2,3]. En plus, les progrès importants dans le domaine des commutateurs micro-électro-mécaniques (MEMS) et la technologie de la fabrication de matériel ont participé largement à l'apparition des capteurs intelligents qui sont capables d'exécuter trois fonctions importantes: détection, traitement sans fil et l'établissement de communication.

Un domaine intéressant, où l'utilisation des capteurs intelligents montre une efficacité importante, est le domaine des systèmes de transport intelligents. En effet, un système de transport intelligent consiste à exploiter le progrès en technologies de l'information pour améliorer l'efficacité des systèmes de transport existants et les systèmes futurs en fournissant des services de surveillance et de suivi des conditions de trafic dans les zones urbaines et rurales par exemple [11]. L'intégration de cette technologie résoudra le problème de congestion en orientant correctement le trafic loin des routes très encombrées

et congestionnées et en offrant des informations aux conducteurs afin d'éviter les collisions entre véhicules.

Le défi du déploiement d'un réseau de capteurs dans un moyen de transportation est relié, en premier lieu, à la conception du réseau qui est généralement influencée par plusieurs contraintes telles que la gestion de l'énergie, la gestion de mobilité et l'étude de l'environnement [2,4].

1.1 Contexte du projet de recherche :

L'intégration des nouvelles technologies améliore les services de transport et en particulier le transport ferroviaire afin de répondre aux attentes de passagers vu que ces technologies améliorent la vente et la vérification des billets et ils assurent aussi plus de protection pour le transport des marchandises. Mon projet de maîtrise consiste à installer un réseau de capteurs capable d'effectuer des mesures en temps réel pour surveiller plusieurs paramètres tels que la température, l'émission de gaz, le positionnement et l'humidité, ce qui va aider à réagir rapidement à tout changement inattendu. La solution doit être sans fil afin d'exploiter les avantages des réseaux sans fil comme la facilité de déploiement, le changement de la topologie, la tolérance aux pannes et la réduction de cout total du réseau. En effet, l'intégration des réseaux de capteurs sans fil dans les moyens de transport apporte des avantages en raison de leurs caractéristiques spéciales qui permettent de surmonter les problèmes liés à la connexion filaire traditionnelle entre les capteurs. En plus, les nœuds de capteurs sans fil sont de petites tailles, pas dispendieux, simples à installer, économiques en énergie, et peuvent se configurer automatiquement pour réagir contre les défaillances soudaines des nœuds [1]. Je m'intéresserais, dans ce projet, aux transports ferroviaires en proposant des solutions pour améliorer la transmission de données à bord d'un train, ce qui

va créer un bon cadre pour intégrer plusieurs applications capables d'offrir plus de protection pour le transport de marchandises et d'assurer aussi le confort et la sécurité pour les passagers. Cependant, l'environnement ferroviaire est très bruyant à cause de la présence des champs électromagnétiques forts et le train est construit en acier, ce qui perturbe le transfert de données via un canal sans fil. Beaucoup d'applications sont développées telles que la surveillance des ponts qui est un élément essentiel de l'infrastructure ferroviaire, la surveillance de la température des roulements pour empêcher les accidents [26], la détection de la présence de trains à l'intérieur des tunnels, etc. Il y a aussi quelques tentatives pour la mise en œuvre des capteurs à l'intérieur des wagons dans le train [20]. Ces tentatives sont caractérisées par l'absence d'une approche au niveau système. Il s'agit d'une méthodologie de conception reliée à un ensemble de contraintes capable de synthétiser une solution qui garantit la latence requise et la qualité de service qui correspondent à des conditions de canaux fiables [3,4].

Les réseaux de capteurs sans fil représentent une bonne solution pour effectuer l'acquisition des paramètres à bord des trains puis transmettre les données vers le centre de contrôle pour traiter tout changement irrégulier ou inattendu [2].

1.2 Problématique

Les caractéristiques de l'environnement sans fil posent plusieurs défis dans les réseaux de capteurs sans fil sachant que les capteurs sont des composants à faible portée et possèdent des capacités limitées en termes d'énergie et de calcul. Par conséquent, l'étude de l'environnement de transmission est indispensable dans la conception des réseaux de capteurs sans fil [7,8].

La plupart des recherches [2,4] dans les réseaux de capteurs sur le système de surveillance suppose un modèle de propagation radio uniforme entre tous les nœuds. Dans le cas où les nœuds ne sont pas au même endroit, comme dans des wagons de train, par exemple, cette hypothèse ne modélise pas fidèlement la réalité [26]. Si un environnement uniforme est considéré, le modèle de canal de pire scénario est généralement adopté; ceci peut sous-estimer la performance du RCSF. Inversement, si le meilleur modèle de canal est considéré, la performance du RCSF serait surestimée [8]. Dans ce projet, la chaîne de transmission de données est affectée par des obstructions telles que les barrières des wagons et les distances entre les capteurs. Ainsi, un modèle de canal de propagation réaliste doit être considéré afin de représenter fidèlement le fonctionnement d'un RCSF dans le domaine ferroviaire.

Les réseaux de capteurs peuvent être déployés à bord d'un train pour surveiller les paramètres désirés et améliorer plusieurs services [13]. Cependant, leurs applications actuelles dans ce domaine sont très limitées à cause des difficultés rencontrées durant la conception des stratégies de routage à bord du train.

La politique de routage pour des réseaux de capteurs est différente de celle des réseaux ad hoc sans fil traditionnels parce que les capteurs impliquent généralement des contraintes liées à la communication à faible puissance et utilisent les sauts multiples pour atteindre la destination. Cependant, l'augmentation de nombre de sauts entre un nœud source et la station de base affecte considérablement la performance de réseau en termes de débit de réseau et de délai bout en bout des paquets [4,6]. L'utilisation de cette approche de routage dans une topologie linéaire comme celle d'un réseau de capteurs installé dans un train contient plusieurs défis à relever afin de créer un bon cadre d'intégration des applications.

Dans [20], un seul capteur est considéré par wagon ce qui n'assure pas une détection rapide et une surveillance efficace des paramètres désirés à bord d'un train. Je réaliserais, dans ce projet, une étude de l'impact de la densification des nœuds dans un wagon sur la performance de réseau dans un environnement réaliste afin de présenter la meilleure distribution des nœuds par wagon.

Dans [20], les auteurs ont proposé aussi un nouveau schéma de protocole basé sur le routage multi-niveau. Ils ont réduit le nombre de sauts en divisant les wagons de trains en plusieurs petits segments basés sur le protocole ZigBee. Ces segments ont été reliés par la technologie Wifi (Wireless Fidelity). Cependant, dans leur étude, ils ont examiné un seul capteur par wagon. En outre, le WSN choisi est basé sur ZigBee avec une topologie en étoile où un coordinateur PAN est obligatoire. L'utilisation de coordinateur PAN n'est pas recommandée pour les applications d'énergie limitée. Cependant, les réseaux maillés sont préférés. Dans ce travail, je chercherais à réduire le nombre de sauts d'un nœud source vers la station de base dans une topologie réseau semblable à une topologie linéaire en utilisant un réseau maillé. Donc, je proposerais des schémas de routage plus efficace que le routage multi-saut classique qui améliore la transmission des données à bord d'un train et qui assure le bon fonctionnement d'un réseau de capteurs implantés à bord d'un train tout en permettant l'acquisition rapide et correcte des paramètres mesurés.

1.3 Objectifs

L'objectif principal de ce projet consiste à implémenter et comparer différents schémas de routage dans un environnement réaliste pour améliorer la transmission de données à bord des trains. Pour ce faire, les sous-objectifs suivants seront réalisés :

- Étudier la performance d'une approche de routage multi-saut classique dans un environnement réaliste en utilisant plusieurs métriques telles que le délai bout en bout, le débit réseau et le niveau d'énergie restant.
- Proposer un schéma de routage multi-niveau qui consiste à ajouter une couche supérieure constituée par des points d'accès sans fil afin de diviser le train en plusieurs segments tout en assurant la compatibilité entre des technologies différentes telles que le Wifi et IEEE 802.15.4.
- Optimiser le schéma de routage multi-niveau en étudiant l'impact de l'augmentation du nombre des points d'accès sur la performance du réseau.

1.4 Méthodologie

Ce projet sera réalisé sur plusieurs étapes afin d'améliorer la transmission de données dans un environnement réaliste et de présenter une architecture réseau optimale pour le modèle réseau de capteurs sans fil choisi.

- Choix des outils de simulation : il y a plusieurs simulateurs réseau largement utilisés pour évaluer la performance d'un réseau de capteurs. Cependant, chaque simulateur a ses limitations. Dans ce projet, le choix du simulateur est important afin de caractériser les liens radio entre les capteurs installés dans les wagons.
- Caractérisation de milieu de propagation : La chaîne de transmission des données dans un train est complexe à cause de la présence des obstructions qui affecte la qualité de signal émis. Dans ce projet, le modèle de propagation à utiliser devrait changer ses paramètres selon la visibilité entre l'émetteur et le récepteur pour modéliser fidèlement les liens radio entre les capteurs.

- Modélisation de réseau : Pour souligner l'impact de l'augmentation des sauts multiples sur la performance de réseau, il serait important de considérer le cas des trains longs.
- Comparaison entre les différents environnements de propagation : Dans cette partie, il serait utile de mettre en évidence une comparaison entre l'impact de modèle de propagation réaliste avec un modèle de propagation obstrué doux et autre obstrué sévère sur la performance du réseau en termes de délai bout en bout, du débit réseau et du niveau d'énergie restant.
- Les simulations des schémas de routage dans un environnement réaliste : cette tâche consisterait à implémenter des schémas de routage en utilisant des technologies différentes telles que le Wifi et l'IEEE 802.15.4. Ensuite, il serait important d'évaluer la performance de chaque approche de routage de données selon les métriques sélectionnées.
- Optimisation de schéma de routage multi-niveau: la dernière phase de ce projet consisterait à étudier l'impact de l'augmentation de nombre des points d'accès dans la couche supérieure Wifi sur la performance de réseau en se basant sur la distance entre deux points d'accès consécutifs.

1.5 Organisation du mémoire

Ce chapitre a présenté le contexte général de ce projet de recherche et les défis à relever pour atteindre les objectifs fixés. Le chapitre II donne un aperçu des réseaux de capteurs sans fil et présente les composants d'un nœud de capteur et certaines applications de réseau des capteurs. Le chapitre III présente les défis de routage dans les réseaux de capteurs sans fil et étudie les différents schémas de routage proposés pour la transmission des données

dans les trains. Ensuite, le chapitre IV se concentre spécifiquement sur la conception de réseau et la caractérisation de l'environnement et présente les paramètres de simulation. Le chapitre V montre des résultats d'évaluation des différents schémas de routage proposés pour la surveillance des trains. Finalement, le chapitre VI présentera une conclusion générale de ce travail de recherche.

Chapitre 2 - Les réseaux de capteurs sans fil

2.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil sont des réseaux ad hoc constitués par de petits nœuds de détection appelés capteurs. Ils ont une faible vitesse traitement et des capacités de stockage réduites. Les capteurs peuvent être déployés de façon aléatoire dans une zone à partir de laquelle les utilisateurs souhaitent recueillir des données [2]. En général, les réseaux de capteurs sans fil contiennent des centaines ou des milliers de capteurs qui sont généralement identiques. Le déploiement d'un réseau de capteurs est facile grâce à la flexibilité de sa topologie. En effet, les nœuds de capteurs ont la capacité de communiquer soit entre eux, soit directement avec une station de base.

2.2 Les composants d'un capteur

Un nœud de capteur est un dispositif de taille réduite constitué généralement de plusieurs composants matériels : processeur, mémoire, capteur, dispositif de communication et bloc d'alimentation. Il est dédié pour faire la détection et l'acquisition de données sur son environnement puis les envoyer via les canaux sans fil à une autre entité. Il représente alors un élément principal dans la chaîne d'acquisition [2].

Nous utilisons, dans notre projet, un capteur basé sur les modèles Mica2 qui sont des dispositifs sans fil à piles permettant d'envoyer et de recevoir des données [8]. Il contient un processeur intégré qui fonctionne avec le système d'exploitation TinyOS.

La connexion est basée sur une liaison radio. Le nombre de nœuds qui sont en cours d'utilisation varie en fonction de l'ampleur du réseau sans fil. La figure 2.1 montre le diagramme schématisé des composants de nœuds capteurs.

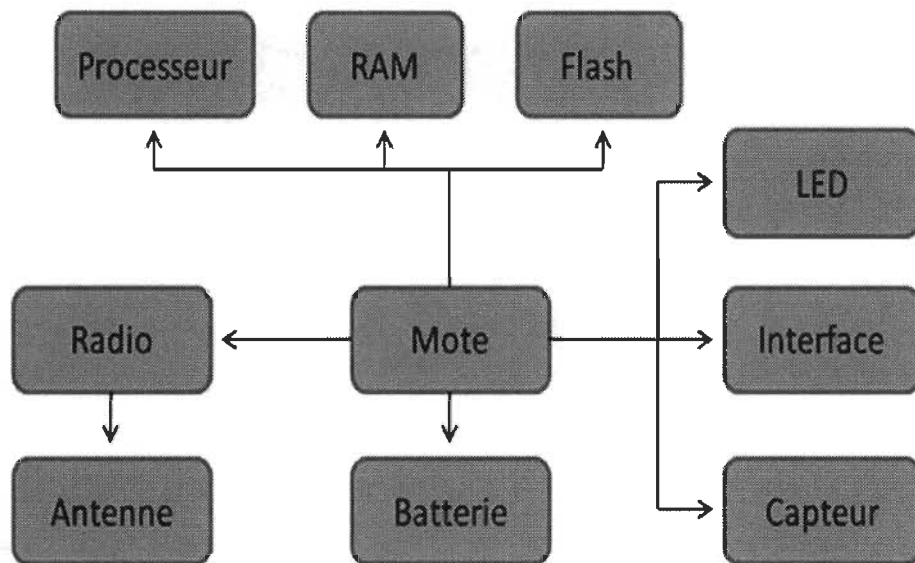


Figure 2.1 Architecture d'un nœud de capteur [3]

2.2.1 Mémoire

Le bloc mémoire est représenté par une mémoire vive qui sert à sauvegarder les données provenant de senseur ainsi que les paquets reçus à partir d'autres nœuds.

2.2.2 Processeur

Le processeur est la partie la plus importante d'un nœud de capteur. En effet, il reçoit des données auprès du capteur, traite ces données, et décide quand et où l'envoyer. Il assure aussi le relais des données reçues à partir d'autres nœuds de capteurs. Généralement, les processeurs des nœuds de capteurs fonctionnent avec le système d'exploitation TinyOS.

2.2.3 *Senseur*

C'est un composant dont le rôle est de transformer un phénomène physique en une énergie électrique. En effet, le senseur est un dispositif matériel utilisé pour mesurer la variation de l'état physique d'une zone d'intérêt et de produire une réponse instantanée à ce changement. Il y a plusieurs catégories de senseurs selon la nature de l'opération. Il est également possible de les classer en senseurs actifs ou passifs

2.2.4 *Bloc d'alimentation*

C'est un élément important dans la chaîne d'acquisition puisqu'il garde le fonctionnement d'un capteur au sein d'un réseau pour une durée limitée.

La durée de vie d'un réseau de capteurs dépend essentiellement des niveaux d'énergies des nœuds. Comme les réseaux de capteurs sont conçus pour surveiller des zones inaccessibles, la gestion d'alimentation est une tâche indispensable. La source d'énergie est les batteries traditionnelles qui ont une durée de vie limitée. Pour prolonger la vie d'un nœud, il faut gérer de façon efficace le fonctionnement des autres entités durant les communications entre les nœuds. En plus, les batteries doivent être changées de façon périodique et régulière.

2.2.5 *Unité de communication*

L'unité de communication utilise un module radio pour assurer la transmission et la réception des données entre les nœuds de capteurs. Cette catégorie des réseaux est caractérisée par des débits faibles et la réutilisation de fréquence est élevée en raison des courtes distances de communication. Généralement, les fréquences de communication varient entre 433 MHz et 2.4 GHz.

2.3 Caractéristique d'un réseau de capteur

2.3.1 Architecture d'un réseau de capteurs

Un réseau de capteurs constitue un ensemble de capteurs interconnectés par des communications sans fil via un canal radio. Par conséquent, cette catégorie des réseaux possède une architecture décentralisée et arbitraire. La figure 2.2 montre l'architecture d'un réseau de capteurs. La station de base, appelée généralement puits, collecte des données provenant d'autres nœuds distribués dans la zone de surveillance et elle est en interaction avec un utilisateur au centre de contrôle. Les données peuvent être collectées à partir d'un nœud jusqu'au puits en utilisant des techniques comme les sauts multiples ou la transmission de données à certaines fréquences [3,4]. Les puits ont des fonctionnalités plus avancées que les nœuds de détection en termes de transmissions de données et les capacités de traitement, la taille de la mémoire et les réserves d'énergie. En plus, Il peut y avoir plusieurs puits pour un réseau de sorte qu'il n'y ait pas un point unique de collecte des données.

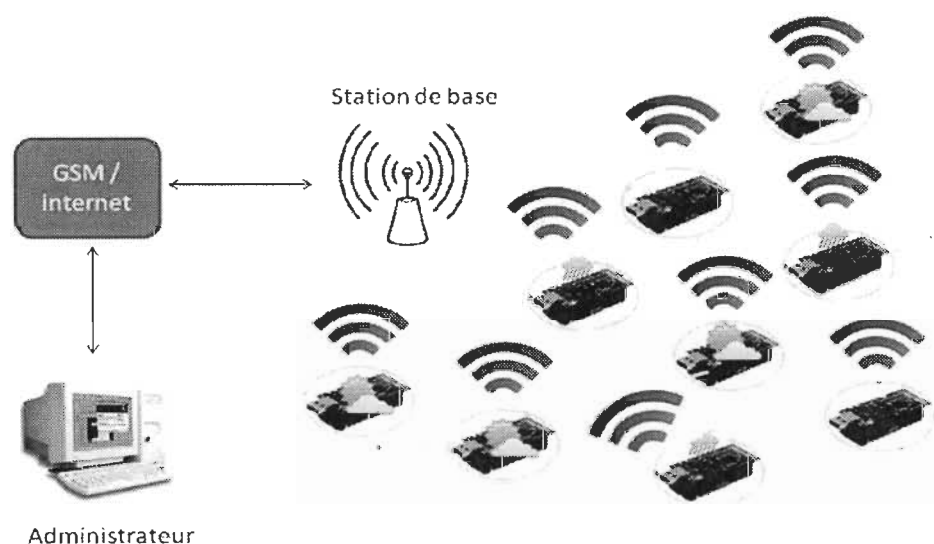


Figure 2.2 Architecture d'un réseau de capteurs [12]

2.3.2 *Les contraintes dans la conception d'un réseau de capteurs*

Le processus de conception d'un réseau de capteurs est une tâche cruciale qui dépend de plusieurs contraintes telles que :

- La dissipation d'énergie. Elle est un facteur majeur dans les réseaux de capteurs lors de la transmission et la réception des données entre les nœuds. L'énergie doit être bien utilisée, de sorte que les piles ne s'épuisent pas rapidement [4]. Les piles ne sont pas parfois facilement remplaçables dans des applications telles que la surveillance d'une zone inaccessible.

- La qualité de service. Elle assure une communication efficace et consiste à réduire le délai de réception des paquets. Les protocoles doivent vérifier la stabilité du réseau ainsi que les données redondantes qui doivent être transmises sur le réseau selon la répartition du trafic [5,6].

- Le mode de transmission. Il joue un rôle important dans les réseaux de capteurs. Les nœuds peuvent transmettre des données vers d'autres nœuds dans le réseau en utilisant une seule fréquence ou bien plusieurs fréquences.

- les nœuds de détection. Ils peuvent être mobiles ou statiques, selon l'application.

2.4 Domaines d'application des réseaux de capteurs

Les réseaux de capteurs offrent une facilité de déploiement qui représente un avantage pour utiliser cette catégorie dans différents domaines. En plus, les réseaux de capteurs peuvent être constitués de différents types de capteurs tels que thermique, infrarouge, acoustique, magnétique, optique et sismiques, pour surveiller une large variété de paramètres physiques [8,9].

2.4.1 Les applications militaires

Les réseaux de capteurs sont susceptibles d'être une partie intégrante du commandement militaire, surveillance du champ de bataille, la reconnaissance et systèmes de localisation [10].

2.4.2 Les applications de surveillance

Dans la surveillance de zone, les nœuds de capteurs sont déployés sur une zone pour détecter des phénomènes physiques. Lorsque les capteurs détectent l'événement surveillé (chaleur, pression, séisme, etc.), une information sera envoyée à travers le réseau de capteurs vers le centre de contrôle [8].

2.4.3 La santé

Parmi les applications dans le domaine de santé, les réseaux de capteurs soutiennent des interfaces pour les personnes handicapées, la surveillance intégrée des patients, les diagnostics et l'administration de médicaments dans les hôpitaux, la télésurveillance des données physiologiques de l'homme, et le suivi et la surveillance des médecins ou des patients à l'intérieur d'un hôpital.

2.4.4 Le Transport

Les réseaux de capteurs déployés dans les moyens de transport peuvent donner un mode de transport intelligent puisque les informations sur le trafic en temps réel sont collectées par les réseaux de capteurs pour améliorer plus tard des modèles de transport et signaler une alerte de la congestion et des problèmes de circulation aux conducteurs [11].

2.5 Les stratégies de routages des données dans les réseaux de capteurs

Les réseaux de capteurs sont des systèmes sans fil à commutation de paquets. Ils partagent de nombreuses propriétés avec les autres réseaux, et sont particulièrement similaires à MANET dans de nombreux aspects (par exemple, l'auto-organisation, les sauts multiples et l'absence d'une infrastructure) [21,22].

Le choix d'une stratégie de routage pour un réseau de capteurs dépend de plusieurs contraintes comme l'environnement de propagation, la capacité des nœuds et les exigences de l'application de détection [9,10]. Afin de créer un bon cadre d'intégration des applications, la conception efficace d'un réseau de capteurs est liée à plusieurs paramètres tels que :

- Livraison en temps réel : Certaines applications nécessitent que le message soit livré dans un délai bien déterminé, sinon le message devient inutile après la limite de temps. Par conséquent, l'objectif principal de ces protocoles est de contrôler complètement la latence du réseau [13]. Les performances des protocoles de routage peuvent être évaluées en comparant le temps moyen de livraison avec les contraintes temporelles.
- Durée de vie du réseau: l'application doit s'exécuter au niveau des nœuds de capteurs aussi longtemps que possible. Par conséquent, les protocoles visant cette préoccupation tentent d'équilibrer la consommation d'énergie de manière égale entre les nœuds en prenant en compte leurs niveaux d'énergie résiduelle [3]. Cependant, la métrique utilisée pour déterminer la durée de vie du réseau dépend aussi de l'application. La plupart des protocoles considèrent que la durée de vie du réseau est la période de temps jusqu'à ce que le premier nœud meure.

L'efficacité énergétique est une préoccupation majeure dans les réseaux de capteurs. En effet, les difficultés rencontrées en raison des ressources énergétiques limitées et la bande passante réduite dans un RCSF lors de la gestion du réseau nécessitent l'optimisation de la consommation de l'énergie à tous les niveaux de la pile de protocole du réseau [19]. Pour offrir une gestion efficace de l'énergie dans un RCSF, la couche réseau offre un meilleur moyen qui assure un relais des données fiable et une faible consommation d'énergie au sein d'un réseau, ce qui peut aider à maximiser la durée de vie du réseau.

La plupart des techniques de routage RCSF dépendent des informations de localisation de nœuds de capteurs pour l'estimation de la distance entre le nœud émetteur et le nœud récepteur. Par exemple, pour détecter une région connue, grâce à l'utilisation de la sonde de localisation, une requête spécifique peut être envoyée à cette région connue et cela permettra de réduire de manière significative les données transmises en comparaison à une requête de diffusion envoyée à l'ensemble du réseau [10,19]. En d'autres termes, le protocole basé sur la localisation utilise les informations de position pour transmettre les données vers les régions souhaitées, plutôt que l'ensemble du réseau. Dans [11], les auteurs ont conçu un réseau de capteurs sans fil installé dans les véhicules permettant de localiser les véhicules proches sur la route et d'éviter les collisions dans les routes rurales. Un algorithme basé sur la position des véhicules pour transmettre les données entre les véhicules est proposé. Cependant, les auteurs n'ont pas présenté une implémentation de cet algorithme dans un environnement réaliste.

D'autres algorithmes de routage consistent à diviser la zone de couverture en plusieurs régions en se basant sur l'idée de sélectionner des niveaux de puissance d'émission appropriés pour garantir la connectivité du réseau, tout en économisant l'énergie[5].

Une autre approche de routage largement utilisée dans les réseaux de capteurs consiste à construire des chaînes de grappes et définir une tête pour chaque grappe afin de réduire la consommation de l'énergie totale dans le réseau. Cette approche utilise un routage hiérarchique qui organise les nœuds en chaînes de grappes et effectue l'élection des têtes associées aux grappes. Dans [6], un algorithme hiérarchique présente un nouveau modèle de regroupement des véhicules intégrant la classification hiérarchique sur la base des algorithmes de routage classiques. Les résultats des simulations montrent que le nouveau régime permet d'étendre la durée de vie du réseau et il assure un équilibre de la charge entre les différents nœuds de capteurs par rapport à l'ancien algorithme qui est direct et le protocole de routage Leach. Cependant, il ne convient pas avec une topologie réseau linéaire installée à bord d'un train. En considérant le cas des trains longs, ce protocole de routage n'atteint pas l'objectif de ce projet pour réduire le nombre de sauts vers la station de base afin d'améliorer le fonctionnement de réseau de capteurs.

Par conséquent, La stratégie de routage utilisée dans les réseaux de capteurs est liée essentiellement aux capacités des nœuds de capteurs, la nature de l'application, la taille du réseau et l'environnement de propagation [23]. En se basant sur ces politiques de routage, nous devons choisir ou proposer un schéma de routage qui améliore la transmission des données à bord d'un train et qui présente un bon cadre d'intégration de plusieurs applications.

2.6 Les politiques de routages d'un RCSF dans les trains

Mon projet de maîtrise consiste à concevoir une stratégie de routage efficace à bord d'un train pour contrôler plusieurs paramètres tels que la température, l'humidité et

l'accélération. Notre modèle réseau de capteurs devient donc semblable à une topologie linéaire comme la montre la figure 2.3.

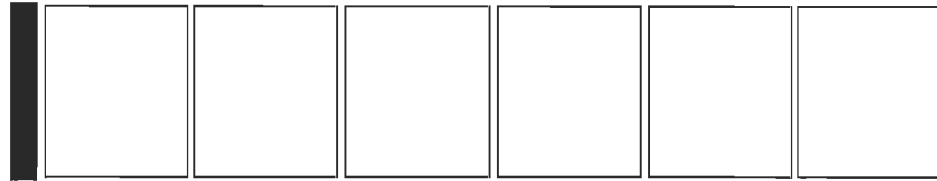


Figure 2.3 Modèle d'un train à 6 wagons et une locomotive

La topologie d'un réseau de capteurs est déterminée par les positions des dispositifs de détection répartis dans le domaine d'application. Dans des travaux de recherches [26], les auteurs ont considéré un réseau de capteurs qui est composé de n capteurs et une station de base disposée le long d'une ligne pour construire une topologie linéaire.

Chaque nœud de capteur a un identifiant unique et sert à détecter un paramètre désiré puis transmettre les données à la station de base. L'établissement d'une communication et la transmission de données entre deux nœuds consomment une puissance importante dans les réseaux de capteurs.

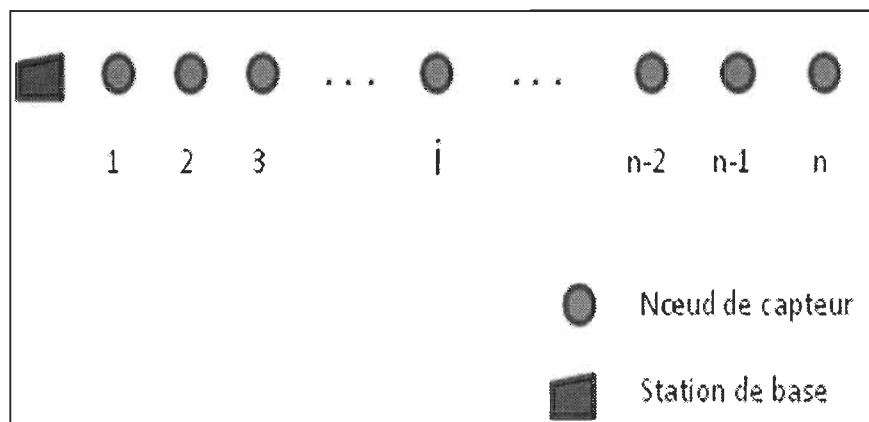


Figure 2.4 Une topologie linéaire d'un réseau de capteur

Nous nous concentrons donc sur la communication liée à la consommation d'énergie des nœuds de capteurs. En augmentant la distance entre les capteurs, le nœud émetteur doit augmenter sa puissance pour atteindre la destination.

2.6.1 Le routage multi-saut classique

La transmission des données d'un nœud source vers la station de base peut se faire directement ou à travers des nœuds. Dans le cas de la transmission directe vers la station de base, le nœud augmente la puissance d'émission pour atteindre la station de base et établir la communication, ce qui affecte de façon importante le niveau d'énergie restant [2,4]. Si la station de base est loin des nœuds de capteurs, les nœuds de capteur vont épuiser leurs batteries rapidement, ce qui va diminuer la durée de vie du réseau. Pour prolonger la durée de vie du réseau, il est nécessaire de concevoir de nouvelles approches pour un réseau de capteurs qui peuvent atteindre une forte robustesse tout en gardant une consommation d'énergie faible.

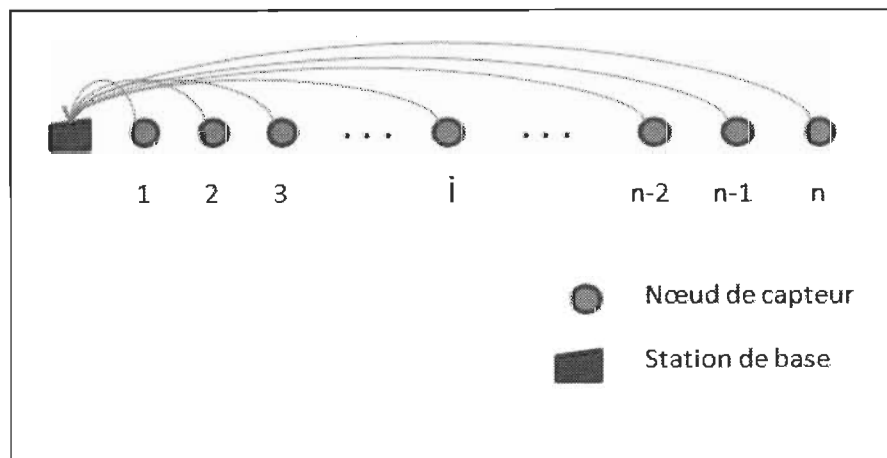


Figure 2.5 La transmission directe dans un réseau de capteurs

Des travaux de recherche récents [3,4] ont montré que plusieurs nœuds peuvent collaborer pour améliorer la fiabilité du réseau et réduire la consommation d'énergie en utilisant la nature de la diffusion du sans fil et la répartition spatiale des nœuds de capteurs. Une telle stratégie est généralement appelée communication coopérative [5].

Dans la transmission directe, la transmission de paquets s'effectue entre le nœud source et la station de base, tandis que les autres nœuds voisins peuvent être mis en état de veille pour économiser l'énergie. En choisissant un nœud pour le relais des données à partir d'un ensemble de candidats, la transmission coopérative permet de réduire considérablement l'énergie requise pour une transmission de données avec succès [2]. Chaque nœud agit comme un routeur pour acheminer un paquet reçu à partir d'un voisin à un autre. Cette technique permet de réduire l'énergie d'émission parce que la distance entre les nœuds est plus courte que la distance entre le nœud source et la station de base.

La conception de transmission des données dans un réseau de capteurs est un problème difficile à gérer. En effet, la transmission coopérative consiste à exploiter d'autres nœuds pour atteindre la station de base comme illustrée à la figure 2.6.

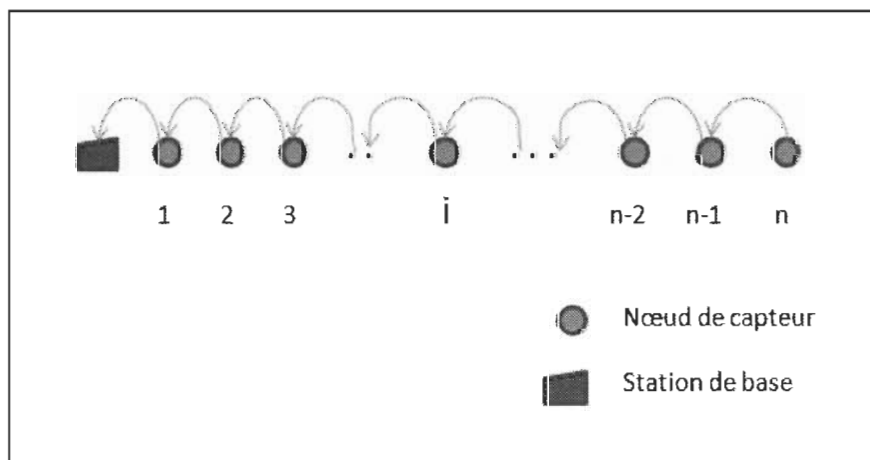


Figure 2.6 La transmission coopérative dans un réseau de capteurs

Cependant, au moins un nœud de relais doit être maintenu actif, ce qui pourrait accroître la consommation d'énergie. Par conséquent, l'efficacité énergétique du mode de transmission pour une transmission de paquets avec succès dépend de la répartition des nœuds et l'environnement de propagation.

Dans une topologie linéaire semblable à celle d'un réseau de capteurs conçu pour un train, la transmission coopérative dépend essentiellement de la distance entre deux nœuds consécutifs afin de réduire le nombre de sauts vers la station de base. Pour réduire le nombre de sauts vers la station de base, une autre approche de la transmission coopérative consiste à diminuer le nombre des nœuds de relais en levant la puissance d'émission pour atteindre un nœud de capteur à une distance D fixe du nœud source contrairement à l'approche classique qui transmet les données vers le nœud le plus proche. Cette approche de routage permet de diminuer l'impact de routage multi-saut classique sur la performance du réseau dans une topologie linéaire [26]. Cependant, chaque émission de paquet consomme plus d'énergie ce qui affecte le niveau d'énergie restant des nœuds de capteurs.

2.6.2 Le routage multi-niveau dans les topologies linéaires

Bien que, l'IEEE 802.15.4 est largement utilisé dans le domaine ferroviaire pour fournir l'interconnexion entre les capteurs placés dans les wagons, les problèmes de performance sont intensifiés dans la longue topologie en raison de la faible portée de communication de l'IEEE 802.15.4. La transmission coopérative n'est plus une solution efficace puisqu'elle introduit un nombre important de nœuds intermédiaires, ce qui affecte la performance du réseau en terme de qualité de service (délai de bout en bout, taux de délivrance des paquets) et aussi en terme d'énergie à cause des processus de retransmission [6,20].

Dans le cas d'une topologie réseau linéaire, le routage des données utilise généralement un seul chemin contrairement aux autres approches qui se basent sur plusieurs chemins pour transmettre les données vers la station de base [6,20]. Par conséquent, la défaillance d'un nœud de capteur dans une topologie linéaire peut entraîner la défaillance de la totalité de réseau de capteurs.

Dans [20], un nouveau schéma routage multi-niveau est proposé pour réduire l'impact de l'augmentation du nombre de sauts sur la performance du réseau en divisant le train en plusieurs petits segments basés sur le protocole ZigBee et reliés par une autre technologie à longue portée comme illustre la figure 2.7. Cependant, dans leur étude, les auteurs ont examiné un seul capteur par wagon et ils n'ont pas présenté une implémentation de routage multi-niveau dans un environnement réaliste. En outre, le RCSF choisi est basé sur ZigBee avec une topologie en étoile où un coordinateur PAN est obligatoire. L'utilisation de coordinateur de PAN n'est pas recommandée pour les applications d'énergie limitée comme le cas de ce projet.

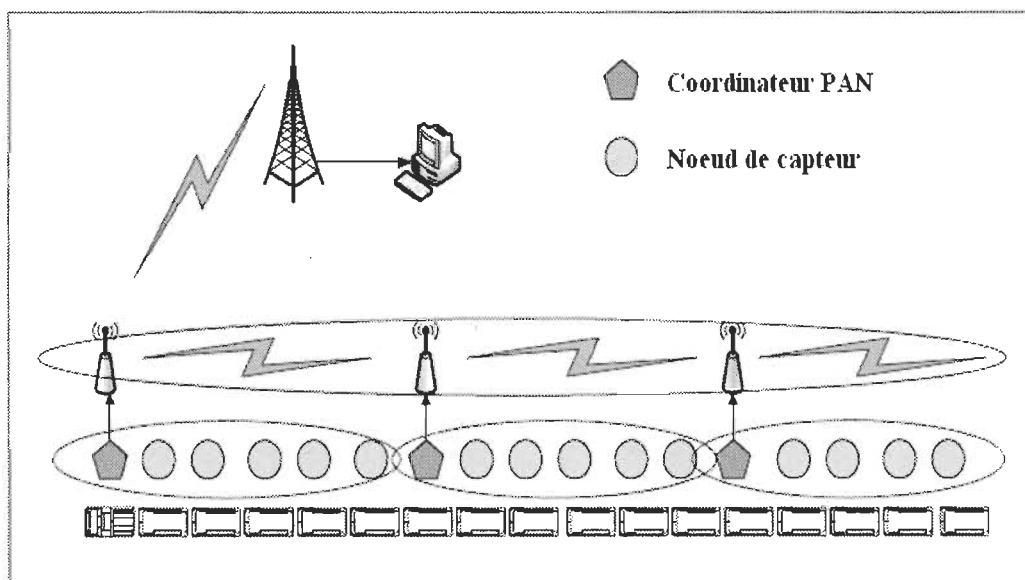


Figure 2.7 La transmission multi-niveau dans un réseau de capteurs [20]

2.7 Conclusion :

Le routage des données dans un réseau de capteurs est un problème crucial qui dépend de plusieurs paramètres. Dans ce chapitre, nous avons cité les défis à relever pour faire une conception efficace d'un réseau de capteurs installés dans les trains. En plus, nous avons présenté les stratégies de routages utilisés dans les topologies linéaires. Une étude de performance de chaque solution proposée sera détaillée dans les prochains chapitres

Chapitre 3 - La conception et l'implémentation des stratégies de routage des données à bord d'un train

3.1 Introduction

Le réseau ferroviaire a besoin d'améliorer les services à bord des trains pour satisfaire les attentes des clients. Les réseaux de capteurs sans fil sont largement utilisés dans ce domaine et ils représentent une solution pour assurer un service fiable et confortable grâce au déploiement rapide, l'auto-configuration et la tolérance aux pannes. Dans ce chapitre, nous définirons l'environnement de simulation et les stratégies de transmission de données de plusieurs topologies des réseaux de capteurs sans fil statique installés dans les wagons dans un environnement réaliste en proposant une nouvelle stratégie de routage qui réduit le nombre de sauts vers la station de base.

3.2 Le modèle réseau

Le scénario d'utilisation pour fournir le confort et la sécurité aux passagers dans les trains prévoit le déploiement de plusieurs capteurs à l'intérieur des wagons.

L'idée est le suivi de l'état du train et la protection des passagers contre les situations d'urgence et les accidents en assurant une réaction rapide en cas de tout changement irrégulier. Nous considérons un réseau de capteurs sans fil installé dans un train. Les nœuds de capteur assurent la détection d'un ensemble de paramètres dans chaque wagon, tels que la température, l'accélération et l'humidité.

Les données générées par le nœud source sont envoyées par des capteurs placés à bord du train via multi-saut et sont reçues par la station de base. Ainsi, le centre de contrôle placé dans la tête du train peut collecter régulièrement des informations sur chaque wagon pour éviter tout accident imprévu et pour assurer la sécurité aux passagers.

3.2.1 La topologie du réseau

La conception de protocoles pour le routage de données dans un RCSF est étroitement liée à la topologie du réseau considérée. Dans ce chapitre, deux topologies de réseau sont présentées afin d'étudier l'impact de la réduction du nombre de sauts sur la performance globale du réseau.

Notre modèle se compose de 37 nœuds répartis comme illustré à la figure 3.1 sur une zone carrée de 100 m x 100 m. Nous considérons un train qui contient 9 wagons et une locomotive qui contient le puits. Chaque wagon contient 4 nœuds de capteurs. Les nœuds détectent de façon continue un paramètre choisi.

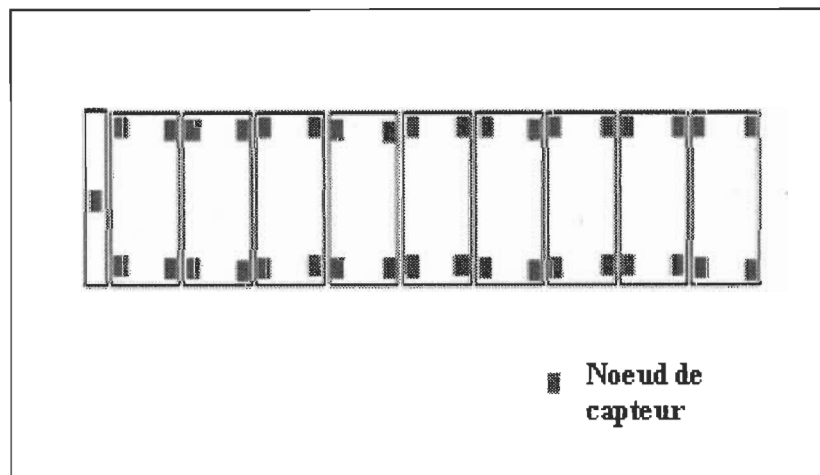


Figure 3.1 Architecture multi-niveau classique d'un RCSF dans un train

Ensuite, ils envoient des données au puits par multi-saut. Par conséquent, le réseau contient 36 nœuds similaires et nous considérons que le puits a dix fois plus de niveau d'énergie que les nœuds simples.

Afin de remédier aux problèmes que nous avons connus dans les réseaux multi-saut à grande échelle, nous proposons une approche multi-niveau d'un réseau de capteurs maillé qui consiste à réduire essentiellement la quantité des paquets de contrôle dans un réseau de capteurs suite à une demande d'établissement d'un chemin par rapport à la topologie en étoile basé sur un coordinateur PAN, ce qui ajoute beaucoup de robustesse et flexibilité au réseau ainsi qu'une meilleure gestion des ressources énergétique [20]. L'idée d'un réseau multi-saut multi-niveau est de diviser une très longue topologie linéaire en plusieurs segments plus courts et chaque segment est connecté à des segments voisins en utilisant une technologie de communication à longue portée telle que le Wifi, afin de réduire le nombre de sauts vers la station de base.

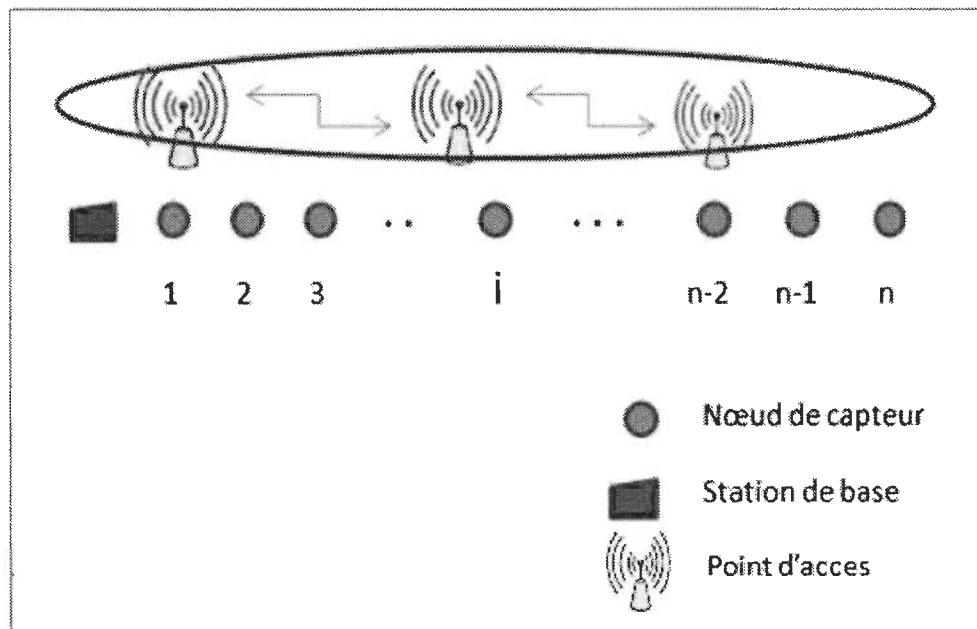


Figure 3.2 Intégration de Wifi dans le routage multi-niveau de données

Dans cette section, nous adoptons une connexion Wifi pour former une couche réseau supérieure. La technologie Wifi est notre choix pour fournir une interconnexion de niveau supérieur entre les capteurs et la station de base car elle fournit une bande passante plus élevée que le ZigBee. Ceci nous offre une vitesse de transfert de données plus importante ainsi qu'une portée de communication plus étendue. En outre, nous ajoutons trois points d'accès à la topologie précédente, comme indiqué dans la figure 3.2 et la figure 3.3. Nous considérons que ces points d'accès sont alimentés par le train sur la même zone carrée de 100 m x 100 m.

Dans le déploiement réel d'un tel projet, les points d'accès Wifi existants dans les trains modernes peuvent être utilisés. Le nombre total de nœuds est alors de 40 nœuds. En effet, chaque point d'accès possède deux interfaces Mac :

- ✓ Interface IEEE 802.15.4 : pour gérer les communications entre les nœuds dans la couche réseau inférieure.
- ✓ Interface IEEE 802.11 : pour gérer les communications dans la couche réseau supérieure.

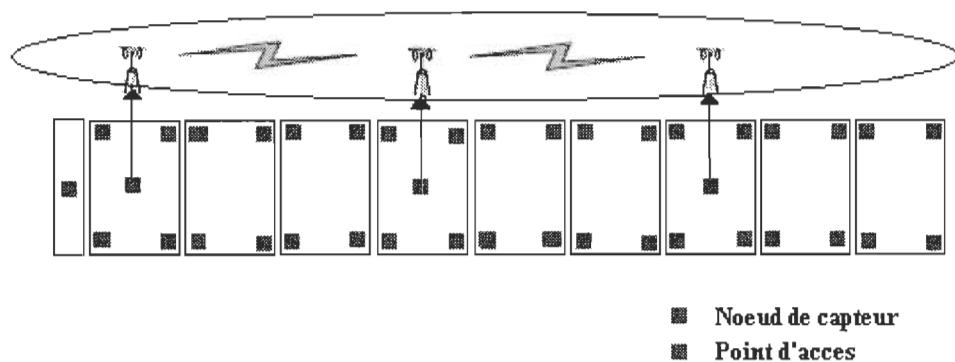


Figure 3.3 Architecture multi-niveau multi-saut d'un RCSF dans un train

3.2.2 La densification des nœuds

Après le déploiement d'un réseau, nous devons passer à l'étape d'optimisation de réseau pour assurer la meilleure distribution des nœuds selon la qualité de service et le taux de consommation de l'énergie. Des recherches ont montré que la vie du réseau augmente plus vite que la densité du réseau [20]. Sur la base de ce résultat, nous obtenons le nombre minimum de nœuds de capteurs sans fil nécessaires pour surveiller une zone donnée pendant une période donnée. Le but principal de ce travail est d'assurer une surveillance efficace de changement de température à bord d'un train en utilisant une architecture d'un réseau de capteurs optimisée en termes de qualité de service et d'économie d'énergie. Dans ce projet, nous étudions l'impact de la densité de nœud sur la durée de vie du réseau qui représente une des principales préoccupations dans les réseaux de capteurs sans fil. En effet, nous devons définir à l'aide des simulations dans un environnement réaliste la distribution des nœuds la plus efficace par wagon.

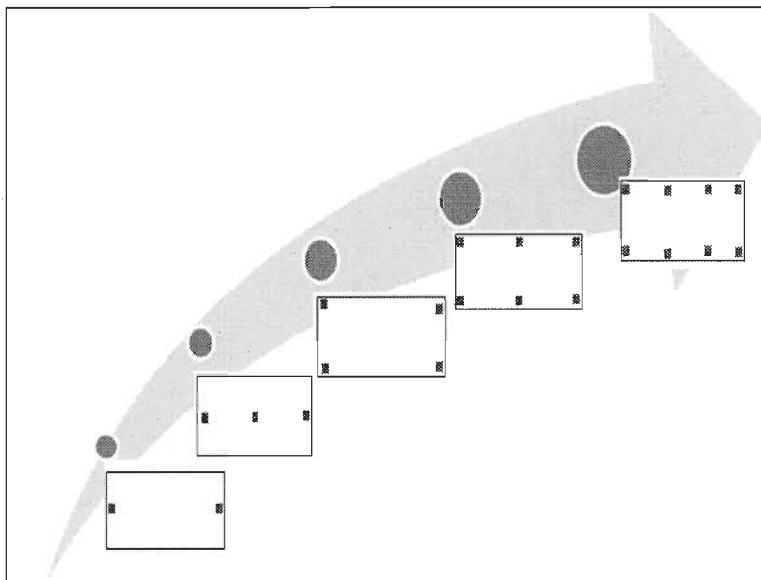


Figure 3.4 Les distributions des nœuds simulées dans un wagon

3.2.3 *Étude de l'environnement dans les trains*

La plupart des recherches sur le système de surveillance utilisant les réseaux de capteurs utilisent un modèle de propagation radio uniforme entre tous les nœuds [21, 22,23]. Dans le cas où les nœuds ne sont pas au même endroit, comme dans des wagons de train, par exemple, cette hypothèse ne modélise pas fidèlement la réalité. Si un environnement uniforme est considéré, le modèle de canal de scénario est généralement adopté, ce qui peut sous-estimer la performance de notre réseau. Inversement, si le meilleur modèle de canal de cas est considéré, la performance de réseau serait surestimée.

Dans un environnement réel, les obstacles sur le trajet de propagation d'un signal émis par un nœud de capteur induisent certainement des pertes supplémentaires dans la puissance du signal reçu, et entraînent une grande variation de l'intensité du signal reçu [15]. En effet, la voie de transmission entre les nœuds de capteurs peut varier d'une visibilité directe vers plusieurs chemins obstrués par les bâtiments, les montagnes et la végétation qui affectent les performances du réseau [19]. Par conséquent, la plage de détection d'un nœud de capteur dépend de l'environnement de propagation locale. Dans notre cas, La liaison radio entre les nœuds est obstruée par des barrières de chaque wagon qui empêchent la visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur.

3.3 Environnement de simulation

3.3.1 *Le but de la simulation*

L'environnement radio est complexe dans un train à cause de présence des obstructions qui affectent la qualité de transmission des données [26]. Nous cherchons à trouver les outils de simulations capables de modéliser notre réseau de capteurs dans un milieu réaliste

qui prend en considération les perturbations subies par les signaux. Pour évaluer la performance des deux topologies de réseau, nous avons utilisé le simulateur NS2 avec l'extension Mannassim [27].

3.3.2 *Les outils de simulations*

NS (Network simulator) est un logiciel de simulation de réseaux informatiques développé lors d'un projet de la DARPA, agence pour les projets de recherche avancée de défense aux États-Unis.

Le simulateur NS, grâce à sa popularité, est devenu un standard et une référence pour tout objet de simulation. Ce simulateur est bien adapté aux réseaux à commutation de paquets.

NS permet de modéliser tout composant du réseau en des objets réutilisables et modifiables, car le logiciel est libre. Chacun peut développer des parties, les publier et éventuellement les intégrer dans des modules de NS. Ce logiciel peut fonctionner sous les deux plateformes Windows et Linux, la différence est que sous linux, il est plus facile à l'installer. Sous Windows, on doit faire appel au chargeur « cygwin » qui permet d'émuler le serveur X de linux pour que plusieurs logiciels fonctionnant sous linux puissent fonctionner sous Windows.

Le simulateur NS dans sa deuxième version fournit une interface de programmation en langage tcl/otcl, qui est vue de deux manières :

- ✓ Un langage autonome comme tout autre langage.
- ✓ Une interface d'un programme écrit en C ou C++.

Ce langage sert à créer une topologie bien spécifique qui fait appel à un noyau C++ qui représente les différentes implémentations des protocoles existants des différentes couches.

Le simulateur NS a fait appel aux deux langages tcl/Otcl et C/C++ pour plusieurs raisons, et donc on doit assurer par ce fait un lien approprié entre le script tcl et les fonctions C++ pour que le script tcl s'exécute d'une manière correcte. De ce fait on peut se poser la question : *pourquoi deux langages différents ?*

La réponse est que l'implémentation de différents protocoles, la création des entêtes et l'implémentation des algorithmes nécessitant un temps d'exécution rapide ne peut se faire d'une manière performante qu'en utilisant le langage C++, d'autre part le temps de la mise en œuvre des scénarios, le temps d'itération rapide est assuré par l'otcl.

L'extension Mannassim permet d'étendre les fonctions de NS2 par l'ajout de nouveaux modules à la conception, le développement et l'analyse des diverses applications, modèle de la batterie et le modèle de propagation radio [27]. Cette extension dédiée pour les réseaux de capteurs ajoute plusieurs fonctionnalités au nœud de capteurs afin de déployer des applications pour détecter l'émission de gaz et le changement de la température.

3.3.3 *Les Paramètres de simulations*

Les outils NS2 et l'extension Mannasim permettent de créer un cadre de simulation détaillé pour un réseau de capteurs installé dans un train [27]. En effet, NS2 nous permet de configurer les liens radio entre les nœuds de capteurs et ajuster le modèle de propagation qui convient avec un environnement ferroviaire. Le tableau 3-1 résume les paramètres de simulation.

Tableau 3-1 Les paramètres de l'environnement de simulation

Paramètre	Valeur
Type de canal	Channel/Wireless channel
Le modèle de propagation	Shadowing visibility
Le type d'interface réseau	Phy/WirelessPhy
Le type de MAC	Mac/802.11, 802.15.4
Antenne	Omni directionnelle
Modèle d'énergie	Batterie
La file d'attente	Queue/Drop Tail
Niveau d'énergie initial (J)	10
surface (m*m)	100*100

3.3.4 La configuration des nœuds

Pour assurer la détection d'un paramètre au niveau des capteurs, il faut intégrer une application qui s'exécute sur le système TinyOS pour effectuer la tâche voulue. Un nœud de capteur assure plusieurs tâches telles que la détection de changement de température, le traitement et de génération et la transmission de données.

La création d'une couche d'application en utilisant l'extension Mannasim, qui détecte le changement de température et génère des données vers la station de base, permet de fournir des résultats précis. La configuration de chaque nœud est une tâche complexe qui comprend des paramètres pour la détection et d'autres pour l'établissement de communications. Le tableau 3-2 montre les paramètres de tous les nœuds qu'il est possible de configurer.

Tableau 3-2 La configuration d'un nœud de capteur.

Paramètre	Valeur
Type de détection	Continu/sur demande
Intervalle de diffusion (s)	2.0
Puissance de réception (J)	0.024
Puissance de transmission (J)	0.036
Puissance de détection (J)	0.015
Puissance de traitement (J)	0.024

3.4 La caractérisation de l'environnement

La transmission de données générées par un nœud source atteint le puits situé dans la locomotive en utilisant la technique multi-saut d'un wagon à l'autre. Comme le montre la figure 3.1, la chaîne de transmission de données vers la station de base contient plusieurs obstructions. En effet, la liaison radio entre deux nœuds dépend de leurs emplacements. Si l'émetteur et le récepteur se trouvent dans le même wagon, un environnement de propagation en visibilité directe doit être utilisé. Dans le cas contraire, des conditions de propagation obstruée doivent être utilisées pour les liaisons entre les nœuds qui ne sont pas dans le même wagon.

Dans chaque cas, les paramètres de propagation doivent être choisis afin de bien caractériser la liaison radio dans et inter-wagons. Dans ce travail, nous considérons deux modèles de propagation afin de bien caractériser les environnements en fonction de l'emplacement des nœuds.

3.4.1 *Modèle de propagation dans les wagons*

Dans ce cas, nous considérons que tous les nœuds ont la même configuration avec les paramètres du tableau 3-3. L'émetteur et le récepteur sont dans un même wagon ce qui offre de bonnes conditions de propagation radio selon [1,26].

Tableau 3-3 Les paramètres de propagation a l'intérieur d'un wagon.

Paramètre	Valeur
Affaiblissement de chemin	2.0
Déviation (dB)	3.0
La distance de référence	30.0

3.4.2 *Modèle de propagation entre les wagons*

La liaison radio entre les wagons est obstruée par les barrières de chaque wagon qui empêchent la visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur. En utilisant ce modèle, nous considérons que tous les nœuds ne sont pas en visibilité directe. Le tableau 3-4 présente les paramètres de propagation pris en compte dans cette étude [1,26].

Tableau 3-4 Les paramètres de propagation entre deux wagons.

Paramètre	Valeur
Affaiblissement de chemin	3.5
Déviation (dB)	5.0
La distance de référence	1.0

3.4.3 Modèle réaliste

Dans ce travail, nous proposons d'évaluer les schémas de routage d'un réseau de capteurs dans un train en utilisant un modèle de simulation réaliste. Des conditions de canal différentes sont utilisées pour modéliser avec précision les communications sans fil entre des nœuds dans le même wagon et les nœuds appartenant à des wagons différents. Un cadre réaliste est proposé en utilisant le simulateur NS2 avec l'extension Mannasim.

Pour être en mesure de basculer entre les modèles de propagation et de simuler avec précision la configuration de la figure 3.1 et la figure 3.3, nous proposons d'utiliser un modèle de canal physique qui change les paramètres de propagation en fonction de la visibilité entre les nœuds de capteurs selon leurs emplacements. Un nouveau modèle de propagation radio appelé *shadowing visibility* est assuré par Mannassin qui modifie les paramètres de propagation en fonction de la visibilité entre les nœuds de capteurs.

Tableau 3-5 Les paramètres de propagation dans un environnement réaliste.

Les paradigmes de propagation	Paramètre	Valeur
Bonnes conditions de propagation	Affaiblissement de chemin	2.0
	Déviations (dB)	3.0
	La distance de référence	30.0
Mauvaises conditions de propagation	Affaiblissement de chemin	3.5
	Déviations (dB)	5.0
	La distance de référence	1.0

Si les deux nœuds sont en visibilité directe, ce modèle utilise un bon paradigme de propagation. Sinon, il modifie les paramètres pour assurer le mauvais paradigme de propagation. Ainsi, le basculement entre les deux paradigmes en fonction de la visibilité entre les nœuds de capteur est possible et offre un modèle de simulation qui représente fidèlement un environnement de propagation réaliste.

3.5 Les Métriques

L'objectif principal des simulations avec simulateur NS2 durant cette étude est de mettre en œuvre l'impact de la modélisation d'un canal sans fil sur les performances du réseau de capteurs installé dans un train.

Nous supposons que tous les nœuds ont une position fixe pendant la période de simulation en utilisant les paramètres mentionnés dans les tableaux précédents. La comparaison des performances entre les deux topologies est basée sur les métriques suivantes:

- ✓ Délai bout en bout : représente le temps passé par un paquet pour voyager à travers le réseau de la source à la destination
- ✓ Débit: représente le taux moyen d'envoi des paquets avec succès sur un canal de communication. Ces données peuvent être délivrées sur une liaison physique ou logique, ou passent à travers un certain nœud du réseau.
- ✓ L'énergie résiduelle: représente le niveau de l'énergie résiduelle des nœuds par rapport à l'énergie initiale au cours de la simulation.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu sur le schéma de routage que nous avons choisi pour transmettre les données vers la destination. En plus, nous avons détaillé l'environnement de simulation en utilisant l'outil NS2 avec l'extension Mannassim. Ces outils nous permettent de bien modéliser les liens radio entre les capteurs et assurer une bonne configuration des nœuds ce qui prépare le terrain pour implémenter les différents schémas de routage. Les résultats de chaque phase seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 - Résultats

4.1 Introduction

Le but de ce travail est d'évaluer des stratégies de routage d'un réseau de capteurs installés dans un train afin d'améliorer la transmission des données entre les nœuds. Une étude de performance de différents schémas de routage ainsi qu'une comparaison entre deux protocoles de routage sont présentées dans ce chapitre.

4.2 Effets des modèles de propagation

Nous cherchons à souligner l'impact de l'environnement de propagation sur la performance du réseau. Trois modèles sont considérés:

- ✓ Modèle 1: l'environnement à l'intérieur du wagon est utilisé pour tous les nœuds.
- ✓ Modèle 2: l'environnement inter-wagon est utilisé pour tous les nœuds.
- ✓ Un modèle réaliste : l'environnement est soigneusement choisi en fonction de la position réelle des nœuds par rapport aux wagons.

Les résultats sont obtenus en utilisant le protocole de routage AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector) dans différents environnements de propagation.

4.2.1 Le Débit

Le débit instantané du réseau indique le taux de livraison de paquets à chaque instant pendant le temps de simulation. La figure 4.1 montre que le débit moyen en utilisant le

modèle 1 est de 3,89 kbit/s par rapport à 1,67 kbit/s en utilisant le modèle 2. Toutefois, le débit moyen dans un environnement réaliste est 2.64Kbit/s. Comme attendu, le débit est sensible à des conditions de canal sans fil. De plus, un modèle de canal réaliste permet de bien caractériser le lien radio et la qualité de transmission de données en termes de débit.

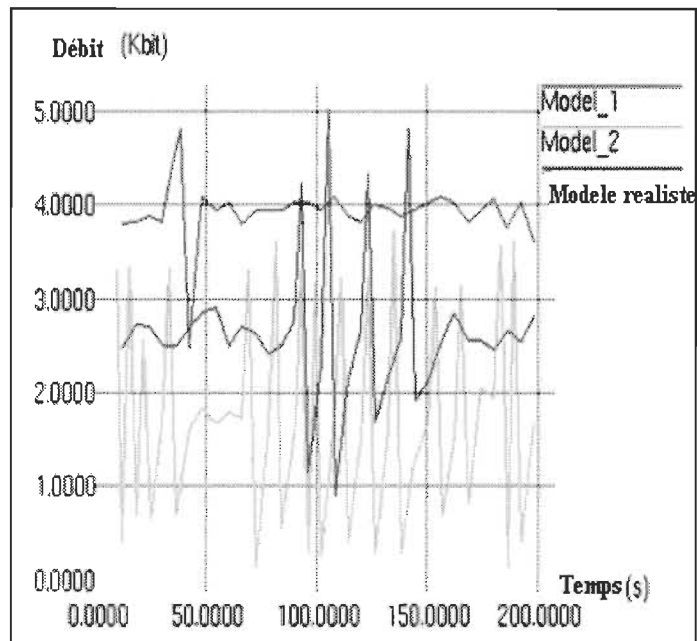


Figure 4.1 Débit instantané du réseau dans différents environnements en utilisant le protocole AODV

4.2.2 Le délai de bout en bout

La détection de la variation de température ainsi que de nombreuses applications d'un RSCF nécessitent une garantie de délai bout-en-bout puisque les données ont une haute importance. En effet, le tableau 4-1 indique le délai moyen de bout en bout du trafic généré par la détection des changements de température au niveau des nœuds en utilisant les différents modèles de canaux. Le type de changements de température utilisé lors de la simulation au niveau des nœuds de détection est continu et les données agrégées sont envoyées au puits à un intervalle régulier de 2 s.

Tableau 4-1 Le délai de bout en bout moyen pour les différents modèles de propagation

	Modèle 1	Modèle 2	Modèle réaliste
Le délai de bout en bout moyen (ms)	40.07	91.27	65.04

Le délai moyen de bout en bout augmente de manière significative en utilisant le modèle 2 pour atteindre 91,27 ms par rapport à 40.07 ms en utilisant le modèle 1 et 65.04 ms en utilisant le modèle réaliste. Une grande différence existe entre les résultats obtenus par les modèles 1 et 2. Par conséquent, on ne peut pas s'appuyer sur les résultats obtenus par le modèle 1 ou 2 où les résultats seraient trop sous-estimés ou surestimés.

4.2.3 *Le niveau d'énergie restant*

Dans cette section, nous considérons que tous les nœuds dans la simulation du réseau commencent par un niveau d'énergie initial égal à 10 (J). Chaque nœud dans le réseau consomme de l'énergie pour assurer la tâche de détection, le traitement des données et la communication avec d'autres nœuds de détection. Pour calculer le niveau d'énergie d'un nœud de capteur pendant le temps de simulation, nous avons utilisé un modèle de dissipation de puissance offert par NS-2 avec les paramètres du tableau 3-2.

La figure 4.2 représente l'énergie résiduelle d'un nœud de capteur en utilisant des modèles de propagation différents, et confirme que le nœud de capteur consomme plus d'énergie dans le modèle 2 à cause des mauvaises conditions de propagation. La perte d'énergie est principalement causée par l'échec de la livraison et la retransmission de paquets pendant le temps de simulation.

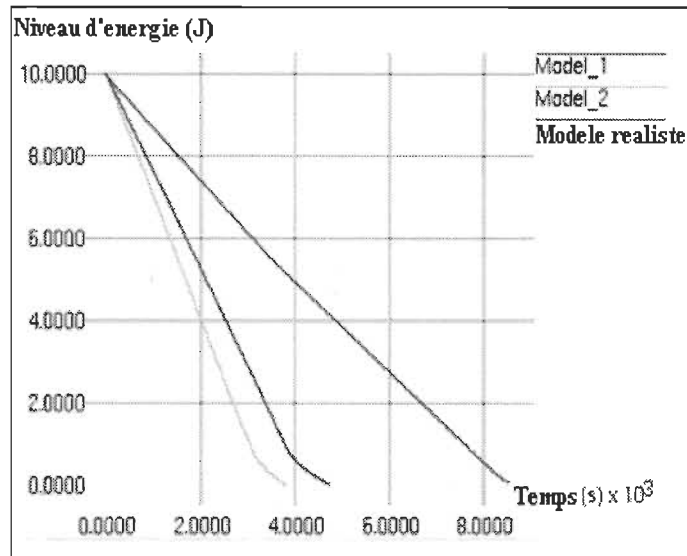


Figure 4.2 Le niveau d'énergie restant dans les différents environnements en utilisant le protocole AODV

Dans un environnement réaliste, les obstacles sur le trajet de propagation induisent certainement des pertes de puissance du signal reçu qui sont tout à fait différentes de celles observées en ne considérant que le modèle 1 ou model 2. À la lumière des résultats obtenus pour les différentes métriques de performance, il n'est pas possible de prédire le comportement dans un environnement réaliste d'un WSN dans les trains en considérant les modèles 1 et 2. Par conséquent, seul l'environnement réaliste est adopté pour les prochains résultats.

4.3 Évaluation de performance des protocoles AODV et DSDV

On considère un train qui contient 6 wagons et une tête qui contient le puits. Chaque wagon contient 5 nœuds de capteurs. L'objectif principal de cette section est d'évaluer les performances des protocoles de routage AODV et DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector) en utilisant le modèle réaliste en se basant sur les métriques sélectionnées.

4.3.1 Le débit

Le débit de données d'un réseau de capteurs sans fil est généralement influencé par la politique de routage appliqué dans la topologie du réseau. En effet, la figure 4.3 représente le débit instantané en utilisant deux protocoles de routage. Les résultats des simulations montrent que l'AODV est plus efficace que DSDV dans un environnement réaliste en termes de débit moyen comme illustré dans le tableau 4-2. En effet, le débit moyen en utilisant le protocole de routage AODV est de 2,64 (Kbits / s) par rapport à 0,69 (Kbits / s) dans le cas du DSDV.

Tableau 4-2 Le débit de réseau moyen en utilisant AODV et DSDV dans un environnement réaliste

	AODV	DSDV
Le débit de réseau moyen (Kbit/s)	2	1.65.65

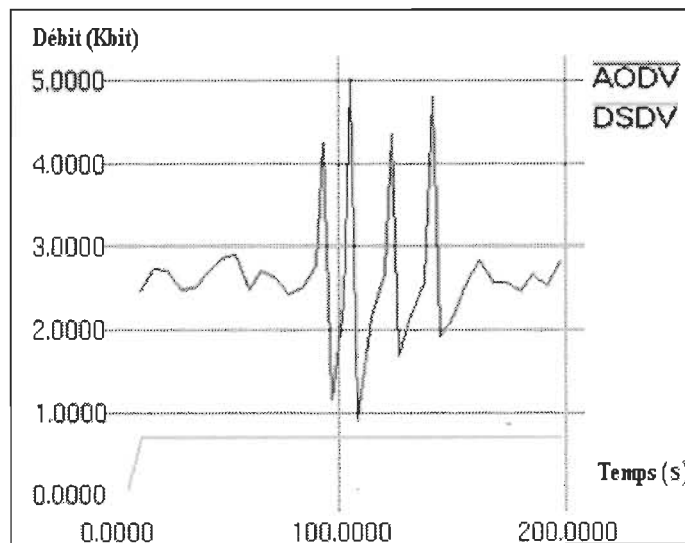


Figure 4.3 Débit instantané de réseau en utilisant les protocoles AODV et DSDV dans un environnement réaliste.

4.3.2 Le niveau d'énergie restant

Nous avons évalué le niveau d'énergie résiduelle au nœud en utilisant les protocoles de routage AODV et DSDV dans un environnement réaliste et nous avons comparé les performances des deux protocoles de routage en termes d'économie d'énergie. La figure 4.4 montre que le DSDV est plus efficace et permet l'extension de la durée de vie du nœud de capteur pour un plus long temps. Cependant, le protocole de routage AODV consomme plus d'énergie pour rechercher le chemin d'accès approprié à la destination.

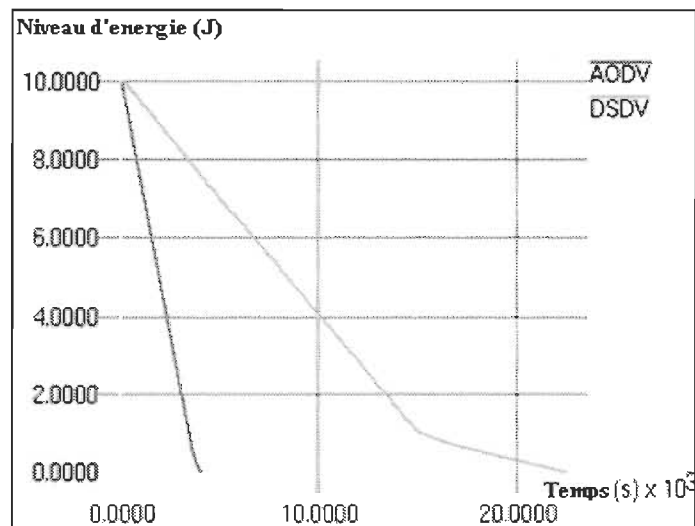


Figure 4.4 Le niveau d'énergie restant en utilisant les protocoles AODV et DSDV dans un environnement réaliste.

4.3.3 La durée de vie du réseau

L'extension de la durée de vie du réseau est un objectif majeur dans la conception d'un RCSF et il dépend presque de l'état du canal sans fil et l'énergie résiduelle de chaque nœud dans le réseau. Le protocole de routage DSDV est efficace en termes de consommation d'énergie et étend dans un environnement réaliste la durée de vie du réseau beaucoup plus longue que le protocole de routage AODV comme l'indique la figure 4.5.

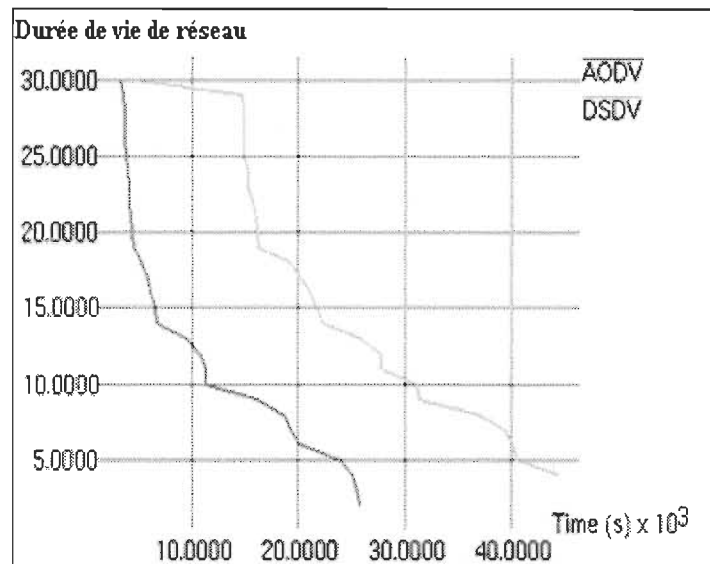


Figure 4.5 La durée de vie du réseau en utilisant les protocoles AODV et DSDV dans un environnement réaliste.

La consommation d'énergie est la contrainte la plus importante pour la conception de WSN où aucune source d'alimentation n'est disponible autre que la batterie. Les résultats des simulations montrent que chaque protocole de routage a ses avantages et aussi ses faiblesses. DSDV consomme moins d'énergie que AODV mais il a un faible taux de livraison de paquets. Alors que, AODV est un protocole de routage réactif qui assure une livraison de paquets à haut débit, il consomme beaucoup d'énergie surtout pendant la période de recherche de chemin puisqu'une requête de recherche de chemin est diffusée vers tous les nœuds de capteurs.

4.4 Impact de la densification des nœuds sur la performance de réseau

Le but principal de ce travail est d'assurer une surveillance efficace tout le long d'un train en utilisant une architecture d'un RCSF optimisé en termes de qualité de service et d'économie d'énergie.

Au fait, l'augmentation du nombre de capteurs par wagon assure une rapidité de détection et une surveillance plus efficace, mais elle augmente la quantité de données à transférer vers la station de base, ce qui affecte les ressources énergétiques des nœuds. Nous devons trouver la distribution des nœuds optimale par wagon en considérant plusieurs distributions des nœuds comme illustrée à la figure 3.4. L'étude de la performance de ces distributions des nœuds est basée sur les métriques de performance sélectionnées en utilisant le protocole de routage réactif AODV qui est largement utilisé dans les applications à temps réel grâce à son taux de délivrance des paquets très important [22].

4.4.1 Le débit

L'augmentation des nœuds de capteurs par wagon nous donne une meilleure surveillance du train parce que les nœuds sont bien distribués dans les coins du wagon. Le tableau 4-3 montre le débit moyen pour chaque distribution de nœuds. Nous constatons une augmentation importante du débit en utilisant 8 nœuds par wagon puisqu'il y a un grand volume de données générées par les capteurs qui doit être transféré à travers le réseau vers la station de base.

Tableau 4-3 Le débit réseau moyen pour les différentes distributions des nœuds par wagon.

Nombre de nœuds par wagon	Le débit de réseau moyen (Kb/s)
2	1.65
3	2.48
4	3.31
6	3.92
8	5.53

4.4.2 Le délai de bout en bout

Tableau 4-4 Le délai de bout en bout moyen pour les différentes distributions des nœuds par wagon.

Nombre de nœuds par wagon	Le délai de bout en bout moyen (ms)
2	25.804
3	29.16
4	35.60
6	47.86
8	163.41

Le tableau 4-4 montre le délai moyen de bout en bout de plusieurs distributions de nœuds par wagon. En fait, le délai moyen de bout en bout le plus faible est égal à 25,80ms pour une distribution de deux nœuds par wagon suite a la réduction de nombre de sauts vers la station de base par rapport aux autres distributions des nœuds.

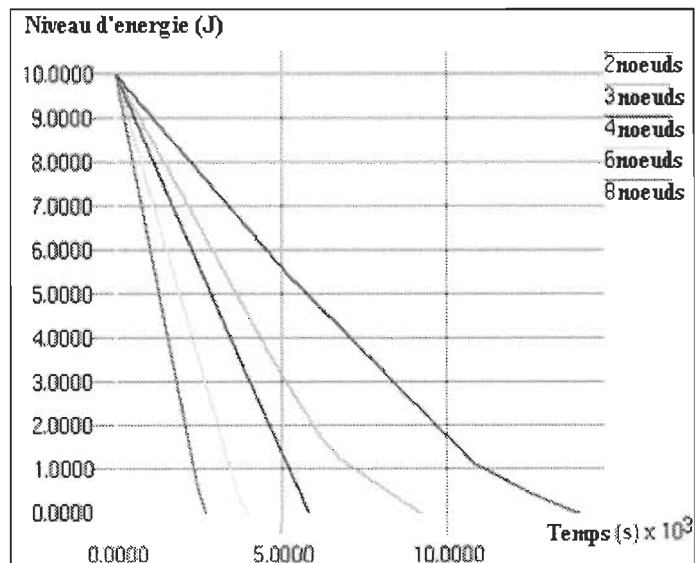


Figure 4.6 Le niveau d'énergie restant d'un capteur pour les différentes distributions des nœuds

Les résultats de simulation prouvent que l'augmentation du nombre de nœuds de capteur par wagon pour améliorer la tâche de surveillance a un impact important sur la consommation d'énergie. La figure 5.6 montre le niveau d'énergie résiduelle pour plusieurs distributions des nœuds dans un environnement réaliste. La distribution de 2 nœuds par wagon est la plus efficace en termes d'économies d'énergie.

4.5 Comparaison entre le routage classique et routage multi-niveau

Pour évaluer la performance des schémas de routage de la figure 3.1 et la figure 3.3, nous avons utilisé le protocole de routage AODV dans un environnement réaliste en exploitant le modèle de propagation *shadowing visibility*. Dans cette section, nous avons examiné les deux topologies en utilisant la distribution 4 capteurs par wagon pour couvrir toute la superficie de chaque wagon. On suppose que tous les nœuds sont fixes pendant la durée de la simulation.

4.5.1 Le délai de bout en bout

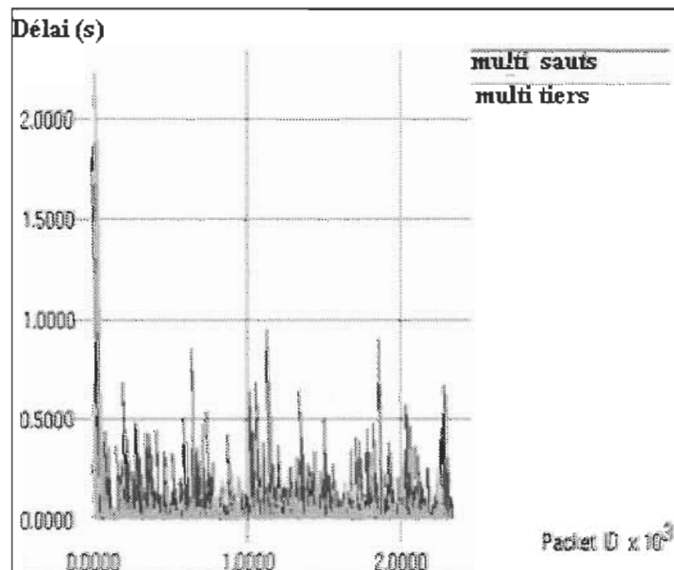


Figure 4.7 Le délai de bout en bout instantané pour les deux approches de routage.

Nous avons mesuré le délai de bout-en-bout du trafic généré par les applications de détection de changement de température au niveau des nœuds. Le type de détection est continu et les données sont envoyées vers la tête du train à un intervalle régulier de 2 s.

Le délai bout en bout de l'approche classique multi-saut atteint 1,9 s au cours de la période de recherche de chemin par rapport à environ 2,4 s pour la topologie multi-niveau. Cependant, cette approche offre un meilleur délai moyen de bout à bout, comme le montre la figure 5.7, lorsque le réseau atteint l'état de la convergence.

4.5.2 Le débit

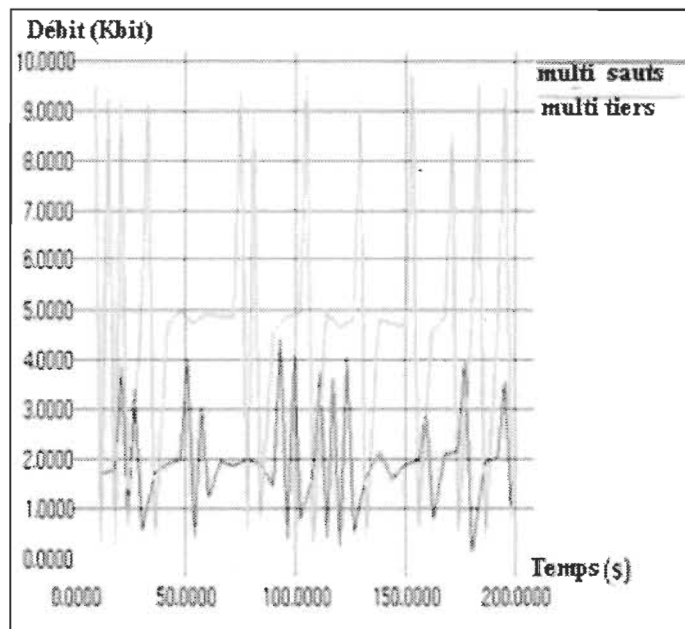


Figure 4.8 Le débit instantané du réseau pour les deux approches de routage.

On remarque à partir de la figure 4.8 que le débit instantané du réseau de l'architecture multi-niveau est d'environ 5 Kbits. Par contre, le schéma de routage multi-saut classique donne un débit instantané de réseau égal à 2Kbits.

4.5.3 Le niveau d'énergie restant

Dans un environnement réaliste, l'utilisation d'un réseau Wifi pour réduire le nombre de sauts a été efficace en termes de conservation de l'énergie. Par conséquent, un nœud de capteur reste en vie pour une durée plus longue par rapport au routage multi-saut classique.

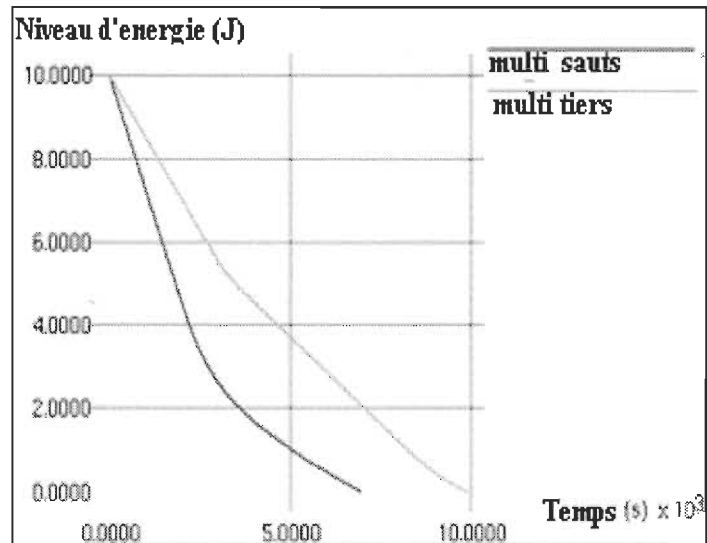


Figure 4.9 Le niveau d'énergie restant d'un capteur en utilisant les deux approches de routage.

4.5.4 Discussion des résultats

Tableau 4-5 Comparaison entre les performances des approches de routage proposées en termes de débit réseau et délai de bout en bout.

	Le débit de réseau moyen [kbps]	délai de bout en bout moyen (ms)
Approche de routage multi-niveau	5.06	29.03
Approche de routage multi-saut classique	3.11	312.80

En diminuant le nombre de sauts vers la station de base, l'approche de routage multi-niveau en utilisant le Wifi proposé fournit une meilleure performance en termes de débit moyen et de délai de bout en bout moyen comme l'indique le tableau 4-5. En outre, cette approche diminue le nombre de sauts vers la station de base et elle minimise par suite l'énergie dédiée pour le relais de données ce qui étend la durée de vie du réseau pour assurer les tâches de détection pour une durée plus longue.

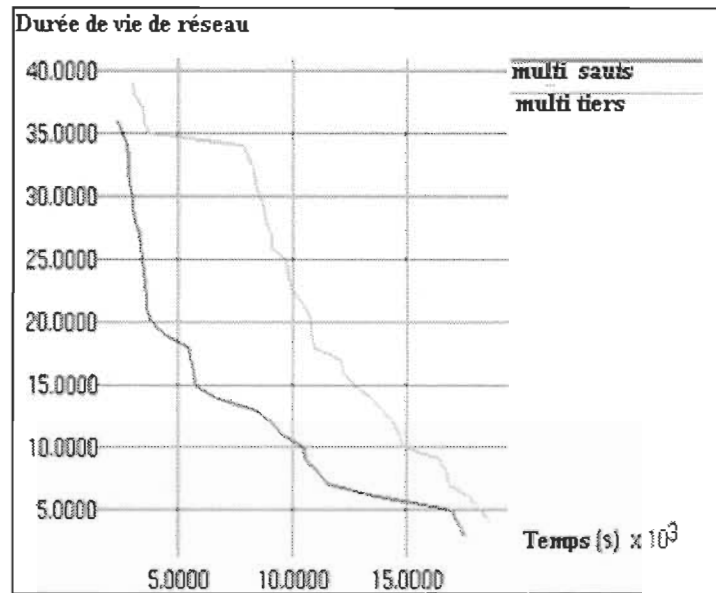


Figure 4.10 La durée de vie du réseau pour les deux approches de routage.

Le principal défi dans la conception d'un réseau de capteurs sans fil est de minimiser la consommation d'énergie pour prolonger la durée de vie des capteurs vu que la consommation d'énergie est la contrainte la plus importante. Les résultats des simulations montrent que l'approche de routage multi-niveau conserve 50% de nœuds de capteurs vivants pour une durée trois fois plus longue que l'approche de routage multi-saut classique, comme l'illustre la figure 4.10.

4.6 Étude de l'augmentation du nombre de points d'accès

Dans cette section, nous considérons le cas des trains longs et nous utilisons une politique de routage multi-niveau afin de réduire le nombre de sauts au puits. Ainsi, nous avons ajouté trois points d'accès pour diviser le train en trois parties. Nous avons constaté que le routage multi-niveau multi-saut nous a permis d'atteindre une durée de vie trois fois plus longue que la stratégie réseau de multi-saut classique ce qui nous a mené à augmenter le nombre de points d'accès pour diviser le train en des segments plus petits et diminuer par suite le nombre de sauts au niveau de la couche inférieure IEEE 802.15.4.

Nous étudions les avantages et les faiblesses de l'augmentation du nombre de point d'accès dans un train qui dispose de 12 wagons. L'augmentation du nombre de point d'accès sur la couche Wifi supérieure réduit le nombre de sauts dans la couche réseau inférieure. Le tableau 4-6 présente la distance entre deux points d'accès consécutive en fonction du nombre de point d'accès utilisés. Nous avons évalué la performance de deux topologies comme le montre la figure 4.11, en utilisant les mêmes paramètres globaux de simulation.

Tableau 4-6 La distance entre les points d'accès pour les deux réseaux.

Nombre de points d'accès	Distance (m)
3	60
6	30

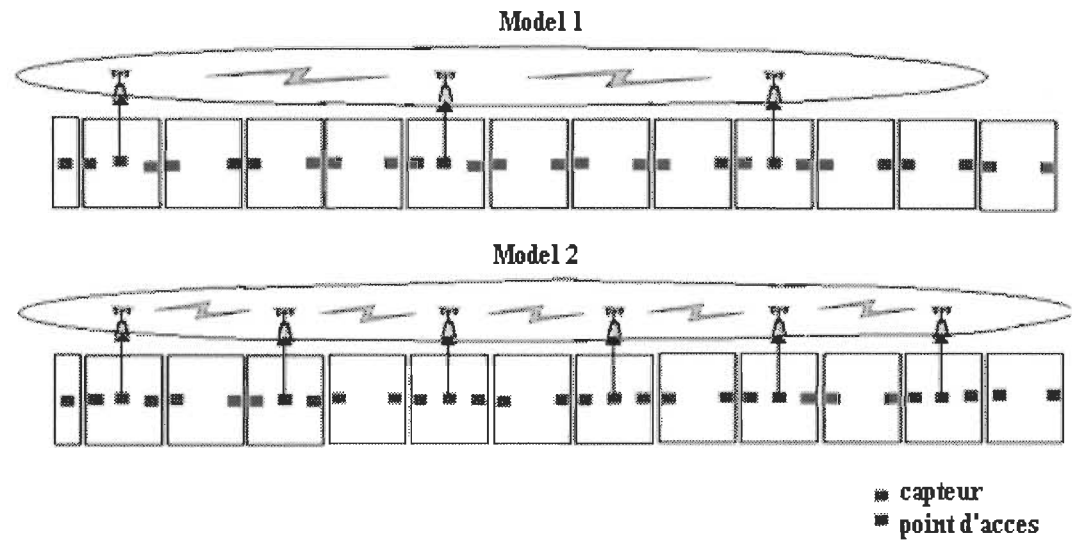


Figure 4.11 La duplication du nombre de points d'accès dans une architecture multi-niveau

4.6.1 Le débit moyen du réseau

Tableau 4-7 Le débit moyen du réseau pour les deux modèles utilisés.

Nombre de point d'accès	Le débit réseau moyen (Kb/s)
3	2.63
6	2.38

Nous avons évalué le débit moyen de deux politiques de routage multi-niveau en utilisant le Wifi pour former une couche supérieure. Tableau 5-7 montre que la duplication du nombre de point d'accès a diminué le débit moyen de 2,63 à 2,38 Kbps vu que nous n'avons pas exploité correctement la portée de la technologie WiFi et nous avons augmenté par suite le nombre des sauts au niveau de la couche réseau supérieure.

4.6.2 *Le délai de bout en bout*

Les résultats de simulation montrent que le nombre de points d'accès utilisé a un impact important sur le délai moyen de bout en bout. Tableau 4-8 montre que la duplication du nombre de points d'accès a augmenté de façon significative le délai moyen de bout en bout de 40,95 ms à 105,5 ms est du au l'encapsulation et la décapsulation des paquets dans la couche Wifi supérieure puisque nous avons augmenté le nombre des points d'accès au niveau de cette couche. Par conséquent, nous constatons que nous devons choisir le nombre de points d'accès approprié en fonction de la longueur du train. L

Tableau 4-8 Le délai de bout en bout moyen pour les deux modèles utilisés.

Nombre de points d'accès	Le délai de bout en bout moyen (ms)
3	40.9509
6	105.5011

4.6.3 *La durée de vie du réseau*

Nous avons étudié l'impact de l'augmentation du nombre de points d'accès sur la durée de vie du réseau. La figure 4.12 montre la durée de vie des deux architectures réseau multi-niveau utilisant 3 points d'accès dans le modèle 1 et six points d'accès dans le modèle 2. En effet, nous avons trouvé que le modèle 2 garde les nœuds de capteurs vivants pour une durée plus longue par rapport au modèle 1 puisque le modèle 2 divise le train en des segments plus petits ce qui réduit le nombre de sauts dans la couche réseau inférieure.

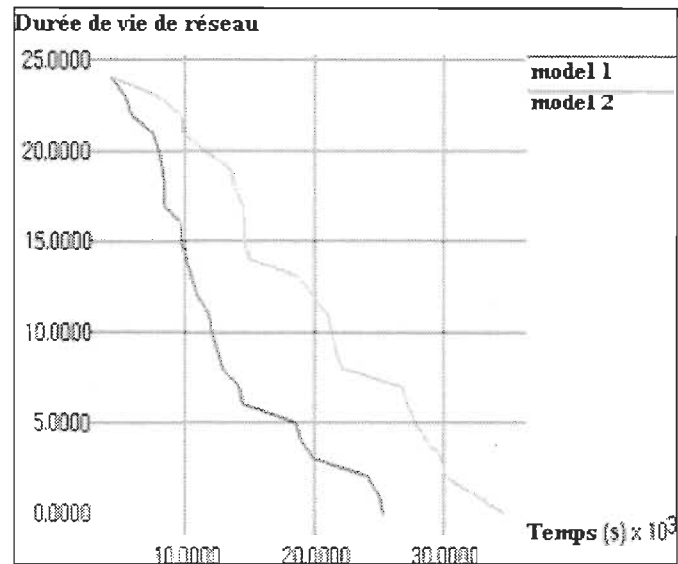


Figure 4.12 La durée de vie de réseau pour les deux modèles utilisés.

4.7 Analyse des résultats

Dans ce travail, nous avons évalué la performance des stratégies de routage utilisant le protocole de routage AODV dans un environnement réaliste pour la surveillance du train. La politique de routage multi-niveau multi-saut a montré des meilleurs résultats en termes de délai de bout en bout, le débit et l'énergie résiduelle du nœud de capteur. En outre, l'utilisation du Wifi pour diviser le train en trois parties a permis d'atteindre une durée de vie du réseau trois fois plus longue que l'approche multi-saut classique.

Les résultats des simulations montrent aussi que l'augmentation du nombre de points d'accès dans une architecture réseau multi-niveau a ses avantages et aussi ses faiblesses. En effet, elle étend de façon significative la durée de vie du réseau, mais elle provoque une augmentation importante en termes de délai de bout en bout, en raison de l'encapsulation et de décapsulation des paquets. Par conséquent, nous devons choisir la bonne distance entre deux points d'accès consécutifs selon la longueur du train afin d'établir un compromis entre l'économie d'énergie et le délai moyen de bout en bout.

4.8 Conclusion

Après la définition d'un cadre de simulation pour modéliser un environnement de propagation réaliste, nous avons présenté, dans ce chapitre, les résultats d'évaluation de performance des différentes stratégies de routage proposées pour des réseaux de capteurs installés dans un train.

En plus, nous avons effectué de nombreuses optimisations pour notre modèle de système pour réduire l'impact du multi-saut sur les performances du réseau. Ce travail peut être étendu pour étudier l'impact des nœuds mobiles lorsqu'un environnement réaliste est considéré.

Chapitre 5 - Conclusion générale

L'utilisation de la technologie des RCSF dans le domaine du transport ferroviaire participe de façon significative au développement de l'infrastructure de chaque pays et cherche à satisfaire les attentes des passagers. Le présent travail consiste à améliorer la transmission de données à bord des trains pour offrir un cadre d'intégration de plusieurs services.

Ce travail a permis de concevoir et implémenter des idées et des solutions techniques en utilisant les réseaux de capteurs pour assurer un service fiable, ponctuel et économique en effectuant l'acquisition et le traitement sans fil à bord des trains des différents paramètres comme l'accélération, la température, l'humidité et le positionnement.

Vu que les nouvelles applications exigent des garanties en termes de délai et de capacité d'exécution, l'emploi des réseaux de capteurs avec ses limitations dans ce domaine représente un défi dont le but est de concevoir un réseau qui répond aux exigences de ces applications.

Ce travail a présenté un cadre de simulation réaliste qui caractérise le milieu de propagation radio à bord d'un train. Ensuite, j'ai proposé une approche de routage multi-niveau qui a étendu la durée de vie de réseau trois fois mieux que l'approche multi-saut classique. Une optimisation de la topologie réseau a été menée dans les conditions de propagation considérées en étudiant les avantages et les faiblesses de l'augmentation du nombre de points d'accès dans une stratégie de routage multi-niveau.

Les résultats présentés dans ce mémoire ont fait l'objet d'un article déjà publié dans la conférence Sensornets organisée du 7 à 9 Janvier 2014 à Lisbonne, Portugal [30]. (3rd international conference on sensor networks). En plus, une étude de routage multi-niveau de données à bord d'un train en considérant des nœuds mobiles représente une extension et des travaux futurs pour ce projet de recherche.

Bibliographie

- [1] M. Gruden, A. Westman, J. Platbardis, P. Hallbjorner, A. Rydberg, "Reliability experiments for wireless sensor networks in train environment," *Wireless Technology Conference, 2009. EuWIT 2009. European* , pp.37,40, 2009.
- [2] I.S. AlShawi, Y. Lianshan, P.Wei; L. Bin L., "Lifetime Enhancement in Wireless Sensor Networks Using Fuzzy Approach and A-Star Algorithm," *Sensors Journal, IEEE* , vol.12, no.10, pp.3010,3018, Oct. 2012
- [3] H. Zhang, H. Shen, "Balancing energy consumption to maximize network lifetime in data-gathering sensor networks," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 20, no. 10, pp. 1526–1539, Oct. 2009.
- [4] C. Hua, T. P. Yum, "Optimal routing and data aggregation for maximizing lifetime of wireless sensor networks," *IEEE ACM Trans. Netw.*, vol. 16, no. 4, pp. 892–903, Aug. 2008.
- [5] J. N. Al-Karaki, A. E. Kamal. , "Routing techniques in wireless sensor networks: A survey." *IEEE Wireless Communications Magazine*, 11(6):6–28, Dec. 2004.
- [6] Y.Liu, N. Xiong, Y. Zhao, A.V. Vasilakos, J. Gao, Y. Jia, "Multi-layer clustering routing algorithm for wireless vehicular sensor networks," *Communications, IET* , vol.4, no.7, pp.810,816, April 2010
- [7] J. Chulhee, H.L. Jae, "Outage Analysis and Optimization of DF-Based Multi-Hop Transmission for Fading Channels With Large Path-Loss Exponent," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* , vol.61, no.9, pp.4183,4189, Nov. 2012
- [8] S. Gumbo, H.N. Muyingi, "Performance Investigation of Wireless Sensor Network for Long Distance Overhead Power Lines; Mica2 Motes, a Case Study," *Broadband Communications, Information Technology & Biomedical Applications, 2008 Third International Conference on* , vol., no., pp.443,450, 23-26 Nov. 2008
- [9] J. H. Chang and L. Tassiulas, "Maximum lifetime routing in wireless sensor networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 12, no. 4, pp. 609–619, Aug. 2004.
- [10] L. Sang Hyuk, L. Soobin, S. Heecheol, L. Hwang, "Gradual cluster head election for high network connectivity in large-scale sensor networks," *Advanced Communication Technology (ICACT), 2011 13th International Conference on* , vol., no., pp.168,172, 13-16 Feb. 2011

- [11] D. Djenouri, "Preventing vehicle crashes through a wireless vehicular sensor network," *24th Biennial Symposium on Communications*, pp.320-323, 2008.
- [12] www.tafats.fr
- [13] R.A. Athura, and S.V.K. Raja, "QoS routing in wireless sensor networks—A survey," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, Vol 45, Issue 1, November 2012.
- [14] C. Houaidia, H. Idoudi, A. Van Den Bossche, T. Val, and L.A. Saidane, "Impact of IEEE 802.11 PHY/MAC Strategies on Routing Performance in Wireless Mesh Networks," *27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*, pp.803-808, March 2013.
- [15] T. Yang, G. Mino, L. Barolli, A. Durresi, and F. Xhafa, "Comparison Evaluation for Mobile and Static Sensor Nodes in Wireless Sensor Networks Considering TwoRayGround and Shadowing Propagation Models," *14th International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS)*, , pp.186-193, 2011.
- [16] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.
- [17] G. L. Stuber, *Principles of Mobile Communication*, 2nd Edition, Boston, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [18] A. Pal, and A. Nasipuri, "DRCS: A Distributed Routing and Channel Selection scheme for multi-channel wireless sensor networks," *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)*, pp.602-608, March 2013.
- [19] A. Nandi, and S. Kundu, "On Energy Level Performance of Adaptive Power Based WSN in Shadowed Channel," *IEEE Devices and Communications (ICDeCom)*, pp.1-5, Feb. 2011.
- [20] P. Mahasukhon, H. Sharif, M. Hempel, T. Zhou, " Multi-tier Multi-hop Routing in Large-scale Wireless Sensor Networks for Real-time Monitoring", *Sensors, IEEE*, 2010.
- [21] <http://www.isa.org/>
- [22] Q. Razouqi, A. Boushehri, M. Gaballah, and L. Alsaleh, "Extensive Simulation Performance Analysis for DSDV, DSR and AODV MANET Routing Protocols," *IEEE 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, pp.335-342, March 2013.
- [23] P. Goswami, and A.D. Jadhav, "Evaluating the performance of routing protocols in Wireless Sensor Networks," *IEEE Computing Communication & Networking Technologies (ICCCNT)*, pp.1-4, July 2012.

- [24] V. Neehaarika, and S. Sindhura, "Evaluation of routing protocols used in wireless sensor networks monitoring temperature in composting heaps," IEEE India Conference (INDICON), pp.1-4, Dec. 2011.
- [25] F. Rabeb, N. Nejah, K. Abdennaceur, and S. Mounir, "An extensive comparison among DSDV, DSR and AODV protocols in Wireless Sensor Network," IEEE Education and e-Learning Innovations (ICEELI), pp.1-4, July 2012.
- [26] W. Nan, M. Qingfeng, Z. Bin, L. Tong, and M. Qinghai," Research on Linear Wireless Sensor Networks Used for Online Monitoring of Rolling Bearing in Freight Train," Journal of Physics: Conference Series 305 (2011) 012024, 2011.
- [27] The Manna Research Group,"Mannasim Framework classes Manual" available on <http://www.mannasim.dcc.ufmg.br/download/mannasim-classes-manual.pdf>, 2006.
- [28] L.J. Feng, H. Jianglong, "A RESTful information service method in Hybrid Sensor and Vehicular Networks, " *International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence ACAI 2012*, pp.283-286, 2012.
- [29] A.S. Ihbeel, H.I.Sigiuk, and A. Alhsh "Simulation Based Evaluation of MANET Routing Protocols for Static WSN," IEEE INTECH, 2012.
- [30] O. Drissi, A.O. Dahmane, T. Medjeldi," Performance Evaluation of routing schemes inWSN for train monitoring" 3rd international conference on sensor networks Sensornets conference, January 2014

Annexe A – Les caractéristiques du standard IEEE 802.15.4

La norme IEEE 802.15.4 a été créée par IEEE et elle représente un protocole de communication dédié pour les réseaux de capteurs sans fil. Cette norme définit une couche de communication au niveau 2 du modèle OSI.

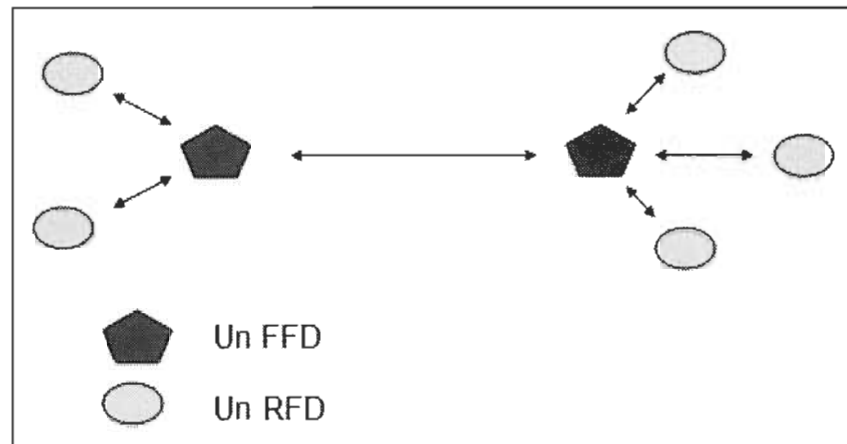
La norme IEEE 802.15.4 est largement utilisée dans différentes applications et elle est le protocole dominant sur le marché des réseaux de capteurs [2]. Elle spécifie la couche physique et la couche de liaison des données qui contient la couche de contrôle d'accès au support (MAC).

La norme IEEE 802.15.4 définit les catégories de capteurs qui peuvent être utilisés dans un réseau. Un dispositif peut avoir toutes les fonctionnalités (FFD) ou bien des fonctionnalités réduites (RFD). Le FFD contient de bonnes capacités en termes de traitement et mémoire et peut fonctionner en tant que coordinateur ou comme une simple entité de détection. Il peut communiquer dans un réseau avec un autre FFD ou un RFD. Le RFD a des capacités limitées et il est utilisé généralement dans des applications simples où il n'est pas nécessaire de transmettre de grandes quantités de données; et où il doit communiquer uniquement avec un FFD spécifique.

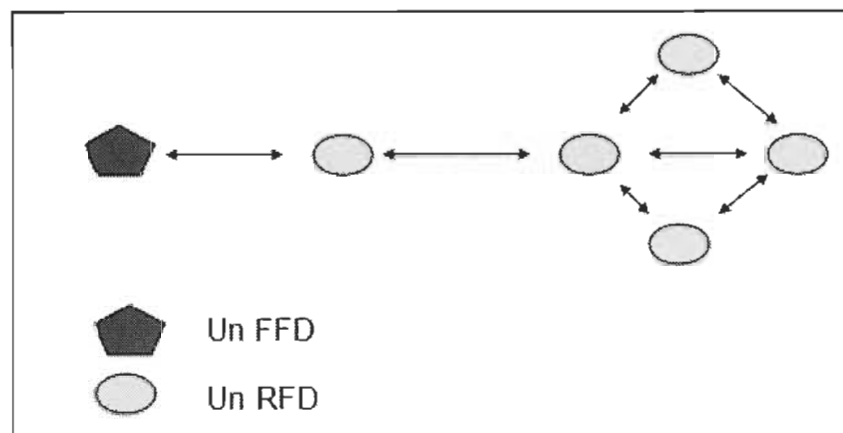
Dans ce cadre, deux modes de communications entre les capteurs sont représentés:

- ❖ Mode maître /esclave
- ❖ Mode point à point

En effet, le mode de communications entre les capteurs est choisi selon la topologie de réseau. Dans la topologie en étoile (maitre/esclave), LE RFD communique généralement avec un seul coordinateur de PAN. En plus, le coordinateur de PAN peut effectuer la même fonction que le RFD, mais il prend en charge le contrôle de la totalité du réseau. La figure illustre les communications entre les différents capteurs.



Dans un modèle point à point, tous les capteurs communiquent entre eux afin de transmettre les données vers le coordinateur de réseau. Le réseau peut avoir aussi plusieurs coordinateurs



- La Couche MAC du standard IEEE 802.15.4

La couche liaison de données de la norme IEEE 802.15.4 contient différentes sous couches [2]. La plus importante sous couche est la sous-couche MAC qui fournit une interface entre les couches supérieures et la couche physique. La norme IEEE 802.15.4 définit quatre types de trames: la balise, trames de données, accusé de réception, et trames de contrôle.

La couche Mac est responsable des tâches suivantes :

- Création et gestion des trames : La nature de trame utilisée dépend de la catégorie de capteur. En effet, si Le capteur est un coordinateur alors le coordinateur peut déterminer s'il doit fonctionner dans un mode où la structure de super-trame est utilisée.
- Accès au canal de transmission : Comme la plupart des autres protocoles conçus pour les réseaux sans fil, la norme IEEE 802.15.4 utilise le mécanisme CSMA-CA pour l'accès au canal.
- Fiabilité : La sous-couche Mac fournit divers mécanismes pour améliorer la fiabilité de la liaison entre deux capteurs comme un accusé de réception, retransmission de trame et la vérification des données

- La Couche physique du standard IEEE 802.15.4

Les canaux disponibles pour un réseau de capteurs sans fil sont divisés en trois bandes de fréquences différentes:

- La bande 2450 MHz (16 canaux)
- La bande 915 MHz (10 canaux)

- La bande 868MHz (un seul canal)

La couche physique assure plusieurs fonctionnalités afin d'établir les communications entre les différents capteurs.

- Activation / désactivation de l'antenne radio: Mettre l'émetteur-récepteur radio dans un des trois états : transmission, réception ou en veille selon la demande de la sous-couche MAC.
- Indication de la qualité du lien radio : La mesure de la qualité de canal est effectuée pour chaque réception d'un paquet. En effet, la couche physique se base sur des critères comme la détection de l'énergie de réception et le rapport signal sur bruit pour évaluer la qualité du canal.
- La détection de l'énergie de réception: ce paramètre est très utile pour sélectionner le canal de transmission. Il s'agit d'une estimation de la puissance du signal reçu à l'intérieur de la largeur de bande du canal.
- Sélection du canal radio : la couche physique sélectionne le canal de transmission parmi les 27 canaux offerts en se basant sur la détection de l'énergie de réception.

Transmission et réception des données : cette tâche comprend le codage et décodage de l'information, modulation ainsi que les techniques d'étalement de spectre.

Annexe B – Les protocoles de routage dans un RCSF

Dans la plupart des domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil, le réseau est composé d'un grand nombre de nœuds déployés dans une zone étendue dans laquelle tous les nœuds sont reliés entre eux. L'acheminement des données vers la destination est une tâche difficile à concevoir puisqu'elle dépend de plusieurs contraintes [9,10]. Le routage est le processus de détermination d'un trajet entre le nœud source et le nœud destination suite à une demande de transmission de données. Ensuite, l'échange de données s'effectue généralement à travers des communications multi-sauts étant donné que le nœud source ne peut pas atteindre directement le puits; ou encore, la communication directe entre le capteur et le puits peut forcer les nœuds à émettre leurs messages avec une puissance élevée que leurs ressources pourraient être rapidement épuisées. Par conséquent, la collaboration des autres nœuds est essentielle pour assurer que les nœuds distants communiquent avec le puits.

De cette manière, les messages sont propagés par les nœuds intermédiaires de telle sorte qu'un lien entre le nœud source et le puits est établi. Ainsi, les nœuds de capteurs intermédiaires doivent relayer les paquets. La mise en œuvre des tables de routage donne la solution pour acheminer les données vers le puits.

Les protocoles de routage sont responsables de la découverte et de l'entretien des routes dans le réseau. Cependant, le caractère approprié d'un protocole de routage particulier dépend principalement de la capacité des nœuds et les exigences de l'application

Les protocoles de routage dans un RCSF peuvent être classés selon :

- La façon d'établissement des chemins de routage : Les chemins de routage peuvent être établis de façon proactive, réactive ou hybride [22]. Les Protocoles proactifs calculent toutes les routes avant qu'elles ne soient vraiment utilisées et puis ils stockent ces routes dans une table de routage de chaque nœud. Lorsqu'il y a une modification d'un chemin, le changement doit être propagé dans tout le réseau. Par contre, les protocoles réactifs consistent à trouver les routes vers la destination suite à une demande d'établissement de chemins. Les protocoles hybrides utilisent une combinaison de ces deux idées.
- La structure du réseau : les nœuds peuvent être distribués sur une zone en mode point à point et ils possèdent les mêmes fonctionnalités; ce qui forme une structure réseau plate. Lorsque les nœuds ne jouent pas les mêmes rôles en communiquant en mode maître/esclave, il s'agit alors d'une structure réseau hiérarchique.

Dans notre projet, nous avons utilisé différents protocoles de routages pour évaluer la performance des réseaux de capteurs dans un environnement ferroviaire.

- Exemples :

Le protocole AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector) est un protocole de routage réactif. Il est largement utilisé soit pour des réseaux filaires ou sans fil [22]. Il est l'un des protocoles de routage les plus efficaces en termes d'établissement de chemin le plus court et le plus faible en consommation d'énergie. Il est principalement utilisé pour des réseaux ad hoc, mais aussi dans les réseaux de capteurs sans fil. Il utilise les concepts de découverte et maintenance de chemin en établissant des liens entre les nœuds à la demande. En effet, le nœud source déclenche le processus de découverte de chemin, en envoyant une demande

d'établissement de route (RREQ) à ses voisins. Les nœuds intermédiaires régénèrent la requête jusqu'à la réponse de nœud destination RREP (Request REPLY).

Le protocole DSDV est un protocole de routage proactif. Chaque nœud maintient une table de routage contenant le prochain saut et le nombre de sauts pour toutes les destinations possibles. Pour éviter les boucles, DSDV utilise des numéros de séquence pour chaque chemin. Un chemin R est considéré comme plus favorable qu'un autre R', si R a le plus grand numéro de séquence. Si deux trajets ont le même numéro de séquence, alors R est plus favorable s'il comporte un nombre inférieur de sauts. Le numéro de séquence pour un trajet est défini par le nœud source et il est incrémenté à chaque nouvelle mise en garde de la route. Quand un nœud détecte un lien endommagé à destination D, il met à jour le nombre de sauts à cette entrée de destination dans la table avec une valeur infinie et incrémente son numéro de séquence.

Annexe C– Installation NS2

Une des particularités que NS2 adopte c'est d'utiliser une hiérarchie simple, et compréhensible. En effet, NS-allinone comprend principalement 3 répertoires:

- ns-2.34 : Ce répertoire contient l'ensemble des fichiers .h et .cc de NS, ces fichiers seront appelés par les scripts tcl pour répondre à une simulation attendue.
- nam-1 : c'est l'outil de visualisation des résultats de la simulation: l'animateur réseau.
- tclcl : sources du code assurant la liaison entre l'interpréteur et le simulateur.

Dans le répertoire ns-2.34, nous trouvons les répertoires:

- tcl : pour tous les codes interprétés.
- bin : pour les utilitaires et les exécutables pour la réalisation du binaire ns-2
- lib : pour la bibliothèque de libg++
- gen : pour les sources générées lors de la réalisation du binaire ns-2 par le makefile.
- test_output : pour les résultats des simulations.
- tous les fichiers .h et .cc des classes C++ du simulateur.

Le répertoire tcl contient les répertoires :

- lib : pour les méthodes OTcl des classes de l'arborescence interprétée. Dans ce répertoire, les fichiers ns_lib.tcl et ns_default.tcl ont un rôle particulier. Le premier est d'interpréter automatiquement le lancement de NS. Il contient l'ensemble du code interprété de NS via la commande Tcl "source" (lecture d'un fichier) des différents fichiers OTcl. Les

valeurs par défaut affectées aux objets sont déclarées dans le second. Les autres fichiers de ce répertoire sont l'API OTcl de NS. Ils ont un nom préfixé par ns.

- ex : pour les scripts de simulation donnés à titre d'exemple.
- test : il recense l'ensemble des scripts des suites de tests pour la validation du simulateur.

Après l'exécution du script, NS nous fournit un utilitaire intitulé « nam » qui permet une animation graphique pour simuler ce qui se passe dans notre topologie,

Enfin, pour mettre en claire le fonctionnement du simulateur NS2, soit on utilise l'API que fournit NS2, soit on ajoute notre propre module, qu'on le compile, et où on pourra visualiser le résultat qu'on cherche à simuler.

Si nous voulons utiliser l'API existante, nous devons donc rédiger notre propre script tcl, ensuite on fait appel au simulateur ns pour l'exécuter. Dans ce cas, il va faire appel aux fonctions écrites en c++, les exécuter, et enfin générer le fichier trace qui contient toute la simulation produite.

Sinon, nous pourrions faire ce qu'on appelle « extending NS ». Dans ce cas nous devons créer nos propres modules, les compiler, les additionner au fichier Makefile. Ensuite nous rédigeons notre script tcl, la même manière, nous aurons la simulation du scénario désiré.

I.3.4. Installation de NS2 :

NS2 est un outil de simulation libre. Il fonctionne sous différents plateformes notamment Linux (Unix), Windows et les systèmes Mac.

Parce qu'il est développé dans un environnement Linux, NS2 a le meilleur comportement sur ce type d'environnements. Par contre il peut fonctionner sans problèmes sur les autres d'environnements.

Les codes sources de NS2 sont distribués en deux formes : le package « all-in-one » et le « component-wise ». Avec le « all-in-one » package l'utilisateur obtient tous les composants requis pour l'installation même avec les composants optionnels. C'est le choix recommandé pour les utilisateurs débutants. Ce package fournit un script d'installation nommé « install » qui configure l'environnement d'installation et crée un exécutable en utilisant l'utilitaire « make ».

La version courante du package « all-in-one » de NS2 contient principalement les composants suivants :

- Tcl release 8.4.18
- Tk release 8.4.18
- Otcl release 1.13
- TclCL release 1.19
- Ns release 2.34
- Nam release 1.14
- Xgraph version 12
- CWeb version 3.4g
- SGB version 1.0 (builds sgblib for all UNIX type platforms)
- Gt-itm gt-itm and sgb2ns 1.1

L'idée de l'approche « component-wise » consiste à télécharger les packages nécessaires et les installer individuellement. Cette option permet d'économiser considérablement le temps de téléchargement et l'espace mémoire alloué pour l'installation.

a) Installation de NS2 sur une plateforme Linux :

1. Télécharger les codes sources dans un package « all-in-one »

```
$ wget http://nchc.dl.sourceforge.net/sourceforge/nsnam/ns-allinone-2.34.tar.gz
```

2. Extraire le package compressé :

```
$ tar -xzvf ns-allinone-2.34.tar.gz  
$ cd ns-allinone-2.34  
$ sudo apt-get install build-essential autoconf automake libxmu-dev
```

3. Maintenant exécuter la commande install :

```
$ ./install
```

4. Ajouter les variables d'environnement :

```
$ gedit ~/.bashrc
```

```
# LD_LIBRARY_PATH

OTCL_LIB=/home/networklab/ns/ns-allinone-2.34/otcl-1.13

NS2_LIB=/home/networklab/ns/ns-allinone-2.34/lib

X11_LIB=/usr/X11R6/lib

USR_LOCAL_LIB=/usr/local/lib

export LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH:$OTCL_LIB:$NS2_LIB:$X11_
LIB:$USR_LOCAL_LIB

#TCL_LIBRARY

TCL_LIB=/home/networklab/ns/ns-allinone-2.34/tcl8.4.14/library

USR_LIB=/usr/lib

export TCL_LIBRARY=$TCL_LIB:$USR_LIB

# PATH

XGRAPH=/home/networklab/ns/ns-allinone-2.34/bin:/home/networklab/ns/
ns-allinone-2.34/tcl8.4.14/unix:/home/networklab/ns/ns-allinone-2.34/tk8.4.14/unix

NS=/home/networklab/ns/ns-allinone-2.34/ns-2.34/

NAM=/home/networklab/ns/ns-allinone-2.34/nam-1.13/

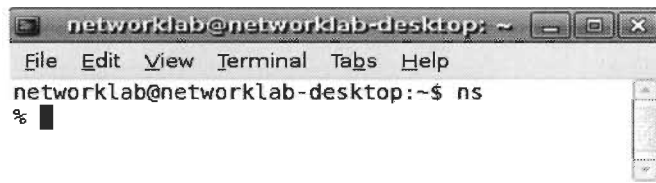
PATH=$PATH:$XGRAPH:$NS:$NAM
```

```
$ source ~/.bashrc
```

Note: Si ns ne s'exécute pas. Il est recommandé de redémarrer X Windows, ou redémarrer le système. Après la fin de l'installation, pour exécuter NS il suffit de taper :

```
$ ns
```

Un symbole en forme de pourcentage“%” apparaîtra sur l'écran. Il suffit de taper sur “exit” to pour quitter ce mode et revenir en mode normal “\$”.

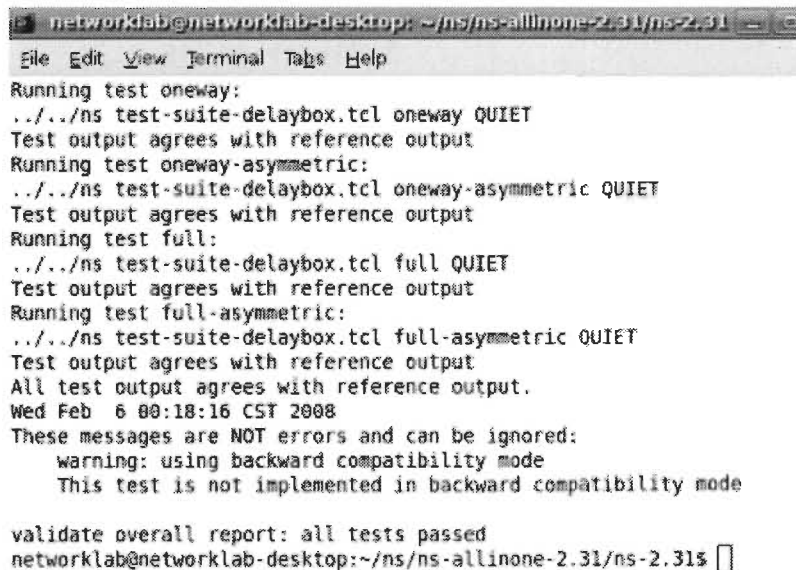


```
networklab@networklab-desktop: ~
File Edit View Terminal Tabs Help
networklab@networklab-desktop:~$ ns
% █
```

5. Validation :

```
$ cd ns-2.34
```

```
$ ./validate
```



```
networklab@networklab-desktop: ~/ns/ns-allinone-2.31/ns-2.31
File Edit View Terminal Tabs Help
Running test oneway:
../ns test-suite-delaybox.tcl oneway QUIET
Test output agrees with reference output
Running test oneway-asymmetric:
../ns test-suite-delaybox.tcl oneway-asymmetric QUIET
Test output agrees with reference output
Running test full:
../ns test-suite-delaybox.tcl full QUIET
Test output agrees with reference output
Running test full-asymmetric:
../ns test-suite-delaybox.tcl full-asymmetric QUIET
Test output agrees with reference output
All test output agrees with reference output.
Wed Feb 6 00:18:16 CST 2008
These messages are NOT errors and can be ignored:
warning: using backward compatibility mode
This test is not implemented in backward compatibility mode

validate overall report: all tests passed
networklab@networklab-desktop:~/ns/ns-allinone-2.31/ns-2.31$ █
```

Annexe D – Installation Mannasim

Dans ce cadre, l'utilisateur télécharge le code source complet et doit mettre les modifications des fichiers MannaSim et ns - 2.34 dans les endroits appropriés. Cette version est destinée aux utilisateurs dont la distribution NS- 2.34 a déjà été modifiée.

Suivez les étapes présentées ci-dessous pour l'installation de code MannaSim Source :

Obtenez ns - 2.34 tout-en- un paquet de ns site.

Décompresser MannaSim tar.gz .

Décompressez le fichier tar.gz dans ns - 2.34 dossier principal (si vous utilisez la distribution ns-allinone-2.34/ns-2.34).

Ainsi il faut remplacer les ns - 2.34 fichiers listés ci-dessous par sa version MannaSim stockée dans les fichiers modifiés ns / dossier dans mannasim / répertoire.

- ✓ ns-2.34/apps/udp.cc
- ✓ ns-2.34/common/ns-process.h
- ✓ ns-2.34/common/packet.cc
- ✓ ns-2.34/common/packet.h
- ✓ ns-2.34/mac/mac-802_11.cc
- ✓ ns-2.34/tcl/lib/ns-lib.tcl
- ✓ ns-2.34/tcl/lib/ns-default.tcl

✓ ns-2.34/Makefile.in

Dans ns - 2.34 dossier principal réexécution du script de configuration et puis ré-compiler le système :

```
./ configure
```

```
./ make
```