

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCCEN
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE et ELECTRONIQUE



Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme

d'Ingénieur d'Etat en Télécommunication

Options : Système de Télécommunication

Réalisé par

BOUGUER SAFIA

THEME

**ETUDE ET SIMULATION COMPARATIVE ENTRE
LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FILS
TRADITIONNELS ET LES RESEAUX DE CAPTEURS
VEHICULAIRES**

Soutenu en Juin 2012 devant le Jury, composé de :

Mr.A. Djemai	M.A à l'Université de Tlemcen	Président
Mr. H. Zerrouki	M.A à l'Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen	Examinateur
Mr.M.Hadjila	M.A à l'Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen	Examinateur
Mr.R. Merzougui	M.C à l'Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen	Encadreur
Melle.B. Boukenadil	Doctorante à l'Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen	Co-Encadreur

Dédicaces

À mes chers parents, qui sont la cause de mon existence dans cette vie, pour leur soutien, leur patience et leur amour qui m'ont donné la force pour continuer mes études.

À la mémoire de Lili,

Tu me manqueras à jamais,

À ma très chère Bahidja, Hayat,

À mes sœurs Soraya, Amina,

À mes frères Karim, Mohamed Amin,

À toute ma grande famille,

À toi, qui ne seras pas là,

À Tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

Remerciements

Je remercie ALLAH, le tout puissant, qui m'a donné la force, la volonté et surtout le courage pour accomplir ce modeste mémoire.

Je tiens à remercier **Mr R. MERZOUGUI**, Maitres conférence à l'université Abou-bekr Belkaid Tlemcen pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce sujet. J'aimerais lui adresser mes plus vifs remerciements pour sa disponibilité et son suivi.

Je tiens également à remercier mon Co-Encadreur **M^{elle} B. BOUKENADIL**, Doctorante au laboratoire STIC à l'université Abou-bekr Belkaid Tlemcen pour son soutien, ses encouragements, ses conseils avisés pendant toute la durée de ce travail et pour tous ses efforts afin de m'orienter au mieux.

Je suis reconnaissante envers **Mr. A. DJEMAI**, M.A à l'université de Tlemcen d'avoir présidé le jury. Je tien aussi à remercier **Mr. M. HADJILA** et **Mr. H. ZERROUKI**, Maitres Assistants à l'université Abou-bekr Belkaid Tlemcen, d'avoir bien voulu examiner ce travail.

J'adresse de tout mon cœur mes remerciements à ma très chère mère, je lui suis infiniment reconnaissante pour son soutien illimité. Qu'elle trouve dans ce travail le fruit de ses sacrifices.

Enfin, je remercie mon père qui a toujours cru en moi et m'a soutenue dans les meilleurs et les pires moments, je lui exprime mon infinie reconnaissance.

Résumé

Le développement des technologies sans fil permet actuellement d'étendre la notion de mobilité pour permettre l'accès à l'information et à la communication n'importe où et n'importe quand. Avec l'émergence des réseaux de capteurs (Traditionnels (**WSN**) et véhiculaires (**VSN**)), des nouvelles thématiques ont été ouvertes et des nouveaux défis ont vu le jour pour répondre aux besoins des personnes et aux exigences de plusieurs domaines d'application. La recherche aujourd'hui s'est beaucoup focalisée sur les réseaux de capteurs véhiculaires (**VSN**), des efforts considérables sont apparus pour introduire l'intelligence dans les systèmes de transport dont le but est d'améliorer la sécurité, l'efficacité et la convivialité dans les transports routiers.

Ces réseaux sont appelés à jouer un rôle important dans la construction de l'Internet du futur, où ils serviront de support à des applications communicantes variées et intégrées à notre vie quotidienne.

Dans ce mémoire, nous avons exploré différents points d'études qui concernent les réseaux de capteurs traditionnels et les réseaux de capteurs véhiculaires, où nous nous sommes intéressés plus particulièrement à une étude comparative entre eux. Notre travail consiste à étudier le comportement des deux réseaux (**WSN**, **VSN**). Deux comparaisons sont faites: la première théorique et la deuxième pratique portera sur le routage avec une approche réactive (**AODV**) et une approche proactive (**DSDV**). Nous avons focalisé notre attention sur les trois critères de performance qui sont: l'évolution de la bande passante, les pertes des paquets et le délai. Les performances de ces protocoles sont étudiées, évaluées et simulées sous **NS-2**.

MOTS- CLES : réseaux de capteurs, **WSN**, réseaux de capteurs véhiculaires, **VSN**, protocole de routage.

Abstract

Currently, the development of wireless technology allows extending the notion of mobility for access to information and communication anywhere and anytime. With the emergence of sensor networks (Traditional (**WSN**) and vehicular (**VSN**)), new themes have been opened and new challenges have emerged to meet the needs of individuals and the requirements of several application areas. Research today is much focused on vehicular sensor networks (**VSN**), considerable efforts have emerged to introduce intelligence into transport systems whose aim is to improve safety, efficiency and usability in road transport.

These networks will play an important role in building the Future Internet, where they will serve as a support for various communication applications and integrated into our daily lives. In this paper, we explored different points of study that relate to traditional sensor networks and vehicular sensor networks, where we were interested, particularly, to a comparative study between them. Our job is to study the behavior of both networks (**WSN**, **VSN**). Two comparisons are made, the first theoretical and practical focus on the second with a reactive routing (**AODV**) and proactive (**DSDV**). We have focused our attention on the three performance criteria are: the evolution of the bandwidth, packet loss and delay. The performance of these protocols is evaluated by simulation using **NS-2** tool.

Key words: Wireless Sensor Network, **WSN**, Vehicular Sensor Network, **VSN**, routing protocols.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Les réseaux de capteurs sans fil (WSN)	5
1.1 Préambule	5
1.2 Réseau de capteurs (Wireless Sensor Network-WSN)	5
1.3 Composants d'un nœud capteur	6
1.4 Architecture des réseaux de capteurs	7
1.4.1 Réseaux de capteurs sans fil plats	7
1.4.2 Réseaux de capteurs hiérarchiques	8
1.5 Caractéristiques des réseaux de capteurs	8
1.5.1 Densité « importante » des nœuds	8
1.5.2 Topologie dynamique	8
1.5.3 Auto organisation	9
1.5.4 Tolérance aux fautes	9
1.5.5 Scalabilité	9
1.6 Routage et types des protocoles	9
1.6.1 Définition et types de routage	9
1.6.2 Propriétés d'un protocole de routage	10
1.6.3 Classification des protocoles de routage	10
1.6.3.1 Protocoles proactifs	11
1.6.3.2 Protocoles réactifs	15
1.6.3.3 Protocoles hybrides	18
1.7 Domaines d'applications des réseaux de capteurs	21
1.8 Contraintes et facteurs	23
1.9 Conclusion	25
Chapitre 2 : Les STI et les réseaux de capteurs véhiculaires (VSN)	27
2.1 Introduction	27
2.2 Réseaux de véhicules	28
2.2.1 Services et applications des réseaux de véhicules	28
2.2.2 Architectures des réseaux de véhicules	29
2.2.2.1 Communications de Véhicule à Véhicule (V2V)	29
2.2.2.2 Communications de Véhicule à Infrastructure (V2I)	30
2.2.2.3 Communications hybrides	30
2.3 Réseaux de capteurs véhiculaires (VSN)	31
2.4 Composants des VSN	31
2.5 Caractéristiques des VSN	31
2.6 Principes de fonctionnement	31
2.6.1 Véhicule et les systèmes embarqués	31
2.6.2 Réseau de télécommunications	33
2.6.3 Système d'information	34
2.7 Utilité des Systèmes de Transport Intelligents	34
2.8 Développement du transport multimodal	35
2.9 Avantages des VSN	36
2.9.1 Prévention des accidents	36

2.9.2 Réduction des dégâts en cas de collision	38
2.9.3 Gestion des secours	39
2.9.4 L'utilisation optimale des infrastructures	39
2.9.5 Hiérarchisation des transports	40
2.10 Comparaison entre les VSN et les WSN	41
2.11 Déploiement des STI dans le monde	43
2.12 Conclusion	44
Chapitre 3 : La simulation	46
3.1 Introduction	46
3.2 Présentation de network simulator	46
3.3 Pourquoi choisir NS	47
3.4 La simulation	47
3.4.1 Objectifs de la simulation	47
3.4.2 Présentation de la méthodologie	48
3.4.3 L'environnement de simulation	48
3.4.3.1 Modèle de simulation	49
3.4.3.2 Modèle de trafic	49
3.4.3.3 Modèle de mobilité	49
3.4.4 Scénarios de simulation	50
3.4.4.1 L'impact de la mobilité	51
3.4.4.2 L'impact de l'état de réseau	52
3.4.5 Interprétations des résultats	60
3.5 Conclusion	61
Conclusion générale	
Bibliographie	

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Les composants d'un nœud capteur	6
Figure 1-2 : Architecture d'un réseau de capteurs	7
Figure 1-3 : Routage plat	7
Figure 1-4 : Routage hiérarchique	8
Figure 1-5 : Classification des protocoles de routage ad-hoc et de capteurs	11
Figure 1-6 : L'établissement de route "DSDV"	12
Figure 1-7 : La requête RREQ	16
Figure 1-8 : La réponse RREP	17
Figure 1-9 : CBRP et notion de groupe	20
Figure 1-10 : Applications des WSN	23
Figure 2-1 : Réseaux de véhicules	28
Figure 2-2 : Types de communication dans un réseau de véhicules	29
Figure 2.3 : Réseaux de capteurs véhiculaires	30
Figure 2-4 : Les technologies de capteurs dans la voiture	32
Figure 2-5 : La voiture du confort	35
Figure 2-6 : Lorsqu'un obstacle encombre la chaussée, les véhicules sont immédiatement guidés vers un itinéraire de contournement	40
Figure 2-7 : Les STI permettent la gestion hiérarchisée des flux de transport	41
50	
Figure 3-1 : Le modèle de mobilité Citymob	
Figure 3-2 : la bande passante, le délai, le taux de perte en fonction de la vitesse des nœuds	51
Figure 3-3 : la bande passante, le délai, le taux de perte en fonction du nombre des nœuds	53
Figure 3-4 : la bande passante, le délai, le taux de perte en fonction du nombre de connexions	54
Figure 3-5 : la bande passante, le délai, le taux de perte en fonction de la vitesse des véhicules	56

Figure 3-6 : la bande passante, le délai, le taux de perte en fonction de nombre des nœuds 57

Figure 3-7 : la bande passante, le délai, le taux de perte en fonction du nombre de connexions 58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : les capteurs dans la voiture	31
Tableau 2.2 : Comparaison entre les réseaux WSN et VSN	43
Tableau 3.1 : Paramètres de simulation	49
Tableau 3.2 : Paramètres de générateur de trafic	49
Tableau 3.3 : les modèles de mobilité pour les deux réseaux de capteurs	49
Tableau 3.4 : Paramètres de simulation pour scénario 1	51
Tableau 3.5 : Paramètres de simulation pour scénario 2	53
Tableau 3.6 : Paramètres de simulation pour scénario 3	54
Tableau 3.7 : Paramètres de simulation pour scénario 1	55
Tableau 3.8 : Paramètres de simulation pour scénario 2	56
Tableau 3.9 : Paramètres de simulation pour scénario 3	58
Tableau 3.10 : Résultats des simulations	60

Liste des abréviations

AODV	Ad hoc O n demand D istance V ector
CALM	Communications A ccess for L and M obiles
CBRP	Cluster B ased R outing P rotocol
CBR	Constant B it R ate
DARPA	Defense A dvanced R esearch P roject A gency
DSN	Distributed S ensor N etwork
DSR	Dynamic S ource R outing
DSDV	Dynamic D estination- S equenced D istance V ector
GSM	Global S ystem for M obile C ommunication
GPS	Global P ositioning S ystem
IARP	IntrAzone R outing P rotocol
ISO	International S tandard O rganisation
I2I	Infrastructure to I nfrastucture
I2V	Infrastructure to V ehicle
ITS	Intelligent T ransportation S ystems
IERP	IntErzone R outing P rotocol

JBREWS **J**oint **B**iological **R**emote **E**arly **W**arning **S**ystem

LKS **L**ane **K**eeping **S**upport

MANET **M**obile **A**d hoc **N**etwork

MEMS **M**icro-**E**lectro-**M**echanical **S**ystems

NS **N**etwork **S**imulator

OTCL **O**bject **T**ools **C**ommand **L**anguage

PFA **P**ath-**F**inding **A**lgorithm

RSU **R**oad **S**ide **U**nits

RVC **R**oadside-to-**V**ehicle **C**ommunication

RWP **R**andom **W**ay **P**oint

VSN **V**ehicular **S**ensor **N**etworks

V2V **V**ehicle to **V**ehicle

V2I **V**ehicle to **I**nfrastructure

WSN **W**ireless **S**ensor **N**etwork

WATS **W**ide **A**rea **T**racking **S**ystem

WRP **Wireless Routing Protocol**

ZRP **Zone Routing Protocol**

Introduction générale

Introduction générale

L'objectif de l'intelligence ambiante est de créer un espace quotidien intelligent immédiat d'utilisation, intégré dans les murs de nos maisons, dans nos bureaux, dans nos routes, dans nos voitures..., en somme partout. Ce nouveau concept doit être invisible, il doit en effet se fondre dans notre environnement quotidien et doit être présent au moment où nous en avons besoin.

Les progrès réalisés ces dernières décennies dans les domaines de la microélectronique, de la micromécanique, et des technologies de communication sans fil, ont permis de produire avec un coût raisonnable des composants de quelques millimètres cubes de volume. Ces derniers, appelés micro-capteurs, sont des véritables systèmes qui forment un réseau de capteurs sans fil (**WSN**; **Wireless Sensor Network**) [1].

Les réseaux de capteurs sans fil sont susceptibles d'être largement déployée à l'avenir parce qu'ils étendront considérablement notre capacité pour surveiller et contrôler l'environnement physique des endroits éloignés. Récemment la recherche collective et les entreprises automobiles ont été équipées les véhicules réguliers avec des capteurs. Donc pratiquement la création d'un réseau de capteurs mobile à base de véhicule (**VSN** ; **Vehicular Sensor Network**).

Les Réseaux de capteurs véhiculaires sont en train de devenir un nouveau paradigme du réseau de première importance, en particulier pour la collecte d'informations de surveillance proactive en milieu urbain.

L'objectif de ce mémoire est de faire une étude comparative entre les réseaux de capteurs (traditionnel statique-**WSN**) et les réseaux de capteurs véhiculaire (**VSN**). La première comprend les concepts théoriques caractérisant les deux réseaux tandis que la deuxième portera sur le routage avec une approche réactive (**AODV**) et une approche proactive (**DSDV**).

Ce projet est composé de trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous allons décrire les réseaux de capteur (**WSN**), les principales caractéristiques et les différents domaines d'applications qui ont recours à ce type des réseaux sans fil ainsi que leurs différentes contraintes.

Le deuxième chapitre décrit le concept des réseaux de capteurs véhiculaires (**VSN**) en précisant leurs architectures de communication ainsi que leurs principes de fonctionnement.

Le troisième chapitre présente une étude comparative des deux réseaux (VSN et WSN) basée sur la simulation sous NS2 des approches proactives et réactives, toute en implémentant les métriques de performances.

En fin de ce mémoire, une conclusion est donnée pour résumer les apports essentiels de notre travail et perspective de recherche.

Chapitre 1

Les réseaux de capteur sans fil (WSN)

Sommaire

- 1.1 Préambule**
- 1.2 Définition d'un réseau de capteurs (Wireless Sensor Network-WSN)**
- 1.3 Composant d'un nœud capteur**
- 1.4 Architecture des réseaux de capteurs**
- 1.5 Caractéristiques des réseaux de capteurs**
- 1.6 Routage et types des protocoles**
- 1.7 Domaines d'applications des réseaux de capteurs**
- 1.8 Contraintes et facteurs**
- 1.9 Conclusion**

1.1 Préambule

Grâce aux avancées technologiques, il devient aujourd'hui envisageable de produire en masse des systèmes d'une taille extrêmement réduite et embarquant des unités de calcul et de communication sans fil pour un coût réduit. Ayant ces caractéristiques, les nœuds capteurs sont capables de générer et d'échanger des données d'une manière autonome et complètement transparente pour les utilisateurs.

Les réseaux de capteurs représentent actuellement un nouveau domaine, en plein développement, émergeant des innovations des technologies de communication.

L'objectif de ce chapitre est de faire une description synthétique des réseaux de capteurs, leurs architectures, leurs caractéristiques et contraintes ainsi que leurs domaines d'applications.

1.2 Réseau de capteurs (Wireless Sensor Network-WSN)

Les réseaux de capteurs sont souvent composés d'un nombre très important des nœuds appelés capteurs. Ces nœuds sont des entités capables d'opérer en toute autonomie afin de collecter, traiter et envoyer les données relatives à leur environnement. Les capteurs communiquent par radio afin de concentrer l'information sur une station collectrice située au cœur ou en bordure du territoire, appelée nœud « Sink » [2, 3, 4].

Ces entités doivent être équipées d'une batterie qui est une source d'énergie non durable, ce qui présente la contrainte la plus gênante pour la survie d'un tel réseau.

Les réseaux de capteur ne définissent pas une architecture préexistante puisque les capteurs peuvent se trouver fixés à un endroit précis ou mobile, formant ainsi un réseau sans infrastructure prédéfinie. Un tel réseau ne se limite pas à un domaine particulier mais il peut s'adresser à une diversité de secteurs [2, 3, 4, 5] comme la biologie, la chimie, l'environnement, ainsi que la surveillance sismique et même la télésurveillance personnelle.

1.3 Composants d'un nœud capteur

Un nœud capteur est constitué des principaux composants suivants :

- ✚ **Unité de captage (Sensing Unit)** : elle permet de capturer le phénomène observé et le convertir depuis un signal analogique en un numérique. Il sera ensuite fourni à l'unité -de calcul.

- ✚ **Unité de traitement (Processing Unit)** : elle est chargée d'exécuter les protocoles de communication qui permettent aux nœuds capteurs de collaborer avec les autres nœuds pour accomplir la requête en question.
- ✚ **Unité de transmission (Transceiver Unit)**: elle est chargée d'effectuer toutes les émissions et les réceptions des données.
- ✚ **Unité de contrôle d'énergie (Power Unit)** : elle effectue des opérations de contrôle de l'énergie restante et de mesure de la durée de vie du nœud capteur.
- ✚ **système de localisation (Location Finding System)** : il fournit des informations sur la localisation requise par les techniques de routage.
- ✚ **mobilisateur (Mobilizer)** : il est appelé si le nœud capteur doit être déplacé pour accomplir la requête à traiter.

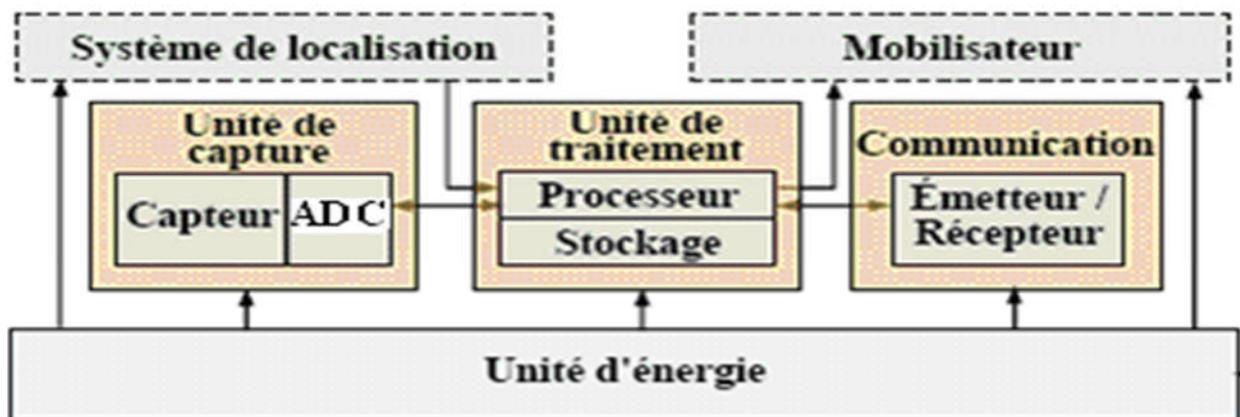


Figure 1.1 : Les composants d'un nœud capteur

1.4 Architecture des réseaux de capteurs

Les nœuds de capteurs sont habituellement dispersés dans un champ de capteur « sensor field ». Ils forment ainsi un réseau sans fil à multi-saut. Chaque nœud a pour mission la collecte des données et leurs routages vers le nœud de contrôle « Sink ». À son tour, le nœud de contrôle transmet les informations reçues à travers l'Internet ou par satellite à l'utilisateur final.

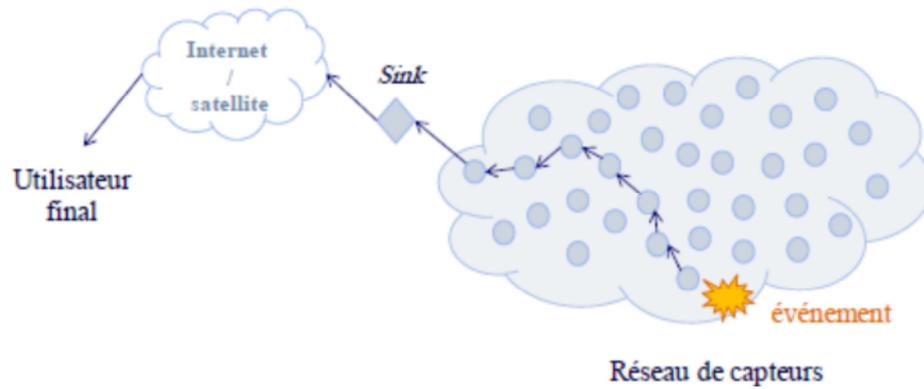


Figure 1.2 : Architecture d'un réseau de capteurs

Il existe deux types d'architectures pour les réseaux de capteurs: les réseaux de capteurs plats et les réseaux de capteurs hiérarchiques [3, 4].

1.4.1 Réseaux de capteurs sans fil plats

Un réseau de capteurs sans fil plat est un réseau homogène, où tous les nœuds sont identiques en termes de batterie et des fonctions, excepté le « Sink » [4].

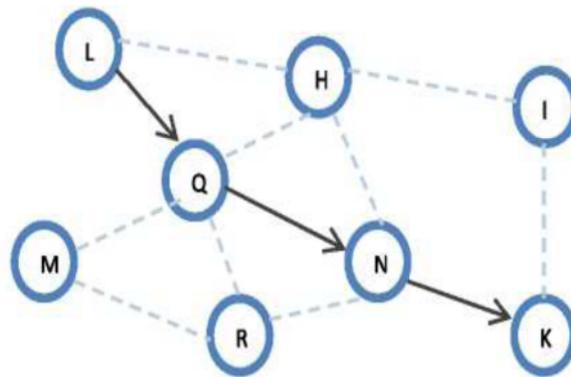


Figure 1.3 : Routage plat

Le Sink joue le rôle d'une passerelle, il est responsable de la transmission de l'information collectée à l'utilisateur final.

1.4.2 Réseaux de capteurs hiérarchiques

Une architecture hiérarchique a été proposée pour réduire le coût et la complexité de la plupart des nœuds capteurs. Elle consiste à introduire un ensemble des nœuds plus coûteux et plus puissants, en créant une infrastructure qui décharge la majorité des nœuds simples à faible coût de plusieurs fonctions du réseau (Voir figure 1.4).

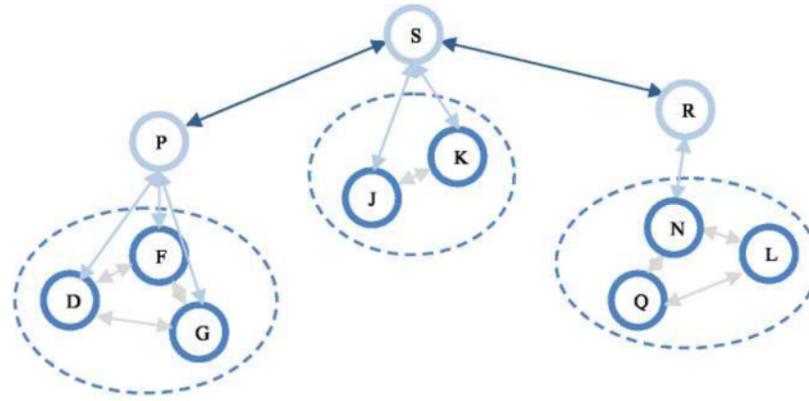


Figure 1.4 : Routage hiérarchique

L'architecture hiérarchique est composée de plusieurs couches: une couche de capteur, une couche de transmission et une couche de point d'accès.

1.5 Caractéristiques des réseaux de capteurs

Les principales caractéristiques des réseaux de capteurs se résument dans ce qui suit :

1.5.1 Densité « importante » des nœuds

Les réseaux de capteurs se composent généralement d'un nombre très important des nœuds pour garantir une couverture totale de la zone surveillée. Ceci engendre un niveau de surveillance élevé et assure une transmission plus fiable des données sur l'état du champ de capteur.

1.5.2 Topologie dynamique

La topologie des réseaux de capteurs instable est le résultat des trois facteurs essentiels suivants:

- ✚ **Mobilité des nœuds** : les nœuds capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent librement et arbitrairement, introduisant ainsi une topologie instable du réseau.
- ✚ **Défaillance des nœuds** : du fait de l'autonomie énergétique limitée des nœuds, la topologie du réseau n'est pas fixée (les nœuds « morts » sont, d'un point de vue logique, simplement supprimés).
- ✚ **L'ajout des nouveaux nœuds** : de nouveaux nœuds peuvent facilement être rajoutés. Il suffit de placer un nouveau capteur qui soit dans la portée de communication d'au moins un autre nœud capteur du réseau déjà existant.

1.5.3 Auto organisation

L'auto organisation s'avère très nécessaire pour ce type de réseau afin de garantir sa maintenance. Ces différentes raisons nous permettent d'avoir une topologie instable du réseau de capteur sans fil. Il devra être capable de s'auto-organiser pour continuer ses applications.

1.5.4 Tolérance aux fautes

Le réseau doit être capable de maintenir ses fonctionnalités sans interruptions en cas de défaillance d'un ou plusieurs de ses capteurs. Cette défaillance peut être causée par une perte d'énergie, ou par dommage physique ou interférence de l'environnement. Le degré de tolérance dépend du degré de criticité de l'application et des données échangées [5].

1.5.5 Scalabilité

Les réseaux de capteurs peuvent contenir des centaines voire des milliers des nœuds capteurs [5]. Un nombre aussi important engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que le nœud « Sink » soit équipé d'une mémoire importante pour stocker les formations reçues.

1.6 Routage et types des protocoles [6]

1.6.1 Définition et types de routage

Le routage peut être défini comme un ensemble d'opérations dont l'objectif est de trouver un chemin qui minimise les dépenses énergétiques tout en assurant le transport des données. On distinguera entre le routage des données et le routage des requêtes :

🚦 **Routage des données** : se fait d'un senseur à un autre senseur, ou à d'un point de contrôle, ou encore à un utilisateur à travers le réseau.

🚦 **Routage des requêtes** : pouvant provenir d'un senseur, d'un point de contrôle ou d'un utilisateur jusqu'au senseur ayant détecté le stimulus.

On parlera aussi d'un routage à priori et d'un routage sur demande :

Concernant **le routage à priori**, il y a un calcul préliminaire des routes dans le réseau, ceci nécessite une maintenance continuelle des routes et par conséquent, l'utilisation de l'énergie du réseau, même si certaines routes ne sont jamais utilisées.

Concernant **le routage sur demande**, la découverte des routes se fait seulement quand il y en a besoin. Les données ne sont pas envoyées tant que la route n'est pas établie. Si les paquets de découverte de route sont perdus, alors le délai augmente.

1.6.2 Propriétés d'un protocole de routage

Un protocole de routage dans le réseau de senseurs a les propriétés suivantes :

- ✚ Il doit pouvoir s'auto-configurer.
- ✚ Il doit être robuste dans le cas des pannes de senseurs (de changement de topologie) tout en minimisant la consommation des ressources d'énergie.
- ✚ Il devrait prendre en compte la collaboration locale des senseurs pour diminuer la bande passante.
- ✚ Il doit supporter le passage à l'échelle (scalability): les réseaux de senseurs sont destinés à être denses, donc il s'agit d'un problème essentiel.

1.6.3 Classification des protocoles de routage

Plusieurs types de protocole sont proposés pour résoudre le problème du routage sans fil. Dans une première approximation on peut considérer qu'il existe deux types de base de protocole: les protocoles réactifs et les protocoles proactifs.

Les protocoles réactifs ne vont chercher à calculer une route que sur demande d'une application. Ils réduisent ainsi le trafic de contrôle mais augmentent le délai nécessaire pour obtenir la route vers sa destination.

Les protocoles proactifs au contraire vont entretenir toutes les routes du réseau par l'échange de trames périodiques de contrôle. Ils peuvent ainsi fournir instantanément la route vers sa destination mais sacrifient de la bande passante pour envoyer périodiquement des informations de contrôle qui seront utilisées pour construire la topologie.

Enfin, il est évidemment possible de mélanger les techniques de ces deux classes de protocoles, pour obtenir ainsi des protocoles hybrides.

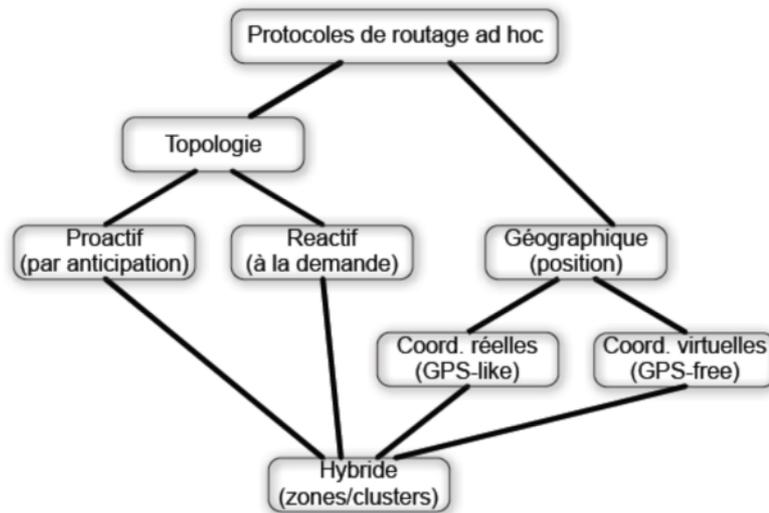


Figure 1.5 : Classification des protocoles de routage ad-hoc et de capteurs

Nous disposons donc la classification suivante :

- Protocoles réactifs
- Protocoles proactifs
- Protocoles hybrides

1.6.3.1 Protocoles proactifs

Le principe de base des protocoles proactifs est de maintenir à jour les tables de routage. Ces protocoles sont basés essentiellement sur les protocoles de routage classique (vector distance, link state). Les tables de routage sont donc maintenues grâce à un échange continu des paquets de contrôle. Le choix des routes s'effectue en se basant sur le nombre de sauts, ou bien la bande passante sur la route. L'avantage principal de ces protocoles est qu'ils permettent d'assurer un routage optimal, mais l'échange permanent des tables de routage consomme considérablement la bande passante du réseau. Voici quelques protocoles qui sont basés sur l'approche proactifs et leur fonctionnement.

➤ Le protocole DSDV :

Le protocole **DSDV** [7] signifie « Vecteur de Distance à Dynamique Séquencée » (« **D**ynamic **D**estination-**S**equenced **D**istance **V**ector »). Cet algorithme de routage a été conçu spécialement pour les réseaux mobiles. Il a été créé à partir de l'algorithme distribué de

Bellman-Ford. La métrique utilisée par **DSDV** est tout simplement le nombre de nœud séparant l'hôte de la destination. La table de routage de ce protocole prend en compte :

- Toutes les destinations possibles
- Le nombre de sauts nécessaire afin d'atteindre la destination
- Un numéro de séquence permettant de faire la distinction entre les anciennes et les nouvelles routes. La figure 1.6 illustre le protocole **DSDV**.

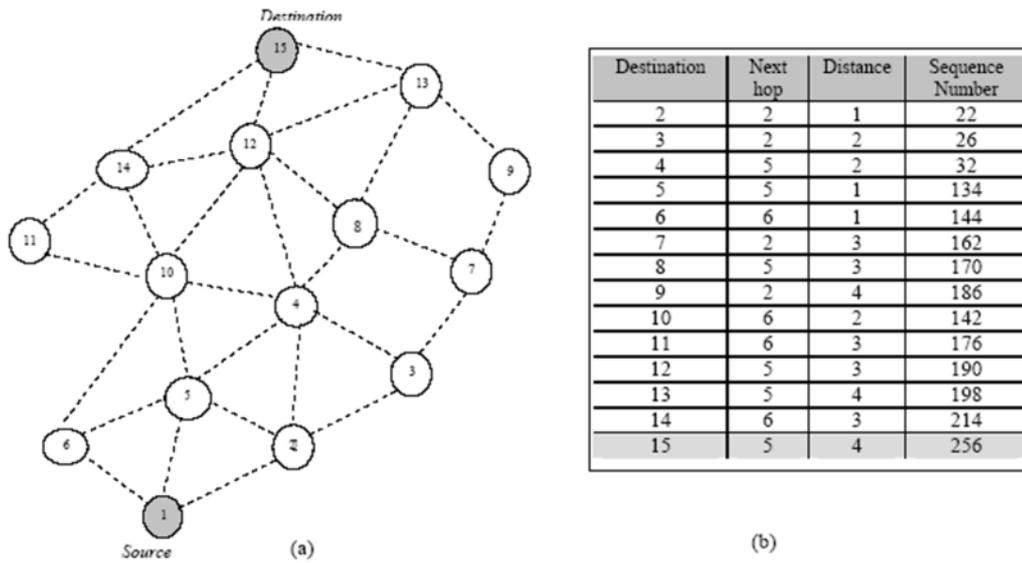


Figure 1. 6 : L'établissement de route "DSDV"

Dans un routage à vecteur de distance, des boucles de routage peuvent se produire si la convergence lente d'un réseau avec une nouvelle configuration entraîne des entrées de routage incohérentes. Les tables de routage ne peuvent plus assurer leur fonction pour une ou plusieurs destinations. Ainsi tous les paquets destinés à une entrée erronée seront transmis mais ne parviendront jamais à l'hôte de destination. Ils circuleront sur une boucle constituée de plusieurs routeurs. Pour permettre de faire la distinction entre les anciennes et les nouvelles routes et ainsi éviter les boucles de routage, **DSDV** utilise des numéros de séquence (NS). Le numéro de séquence est une amélioration apportée à l'algorithme distribué de Bellman-Ford. Pour chaque nœud « i », un numéro de séquence de la destination « j » est associé à chaque entrée de distance « Dijk » pour chaque voisin « k ».

Un autre problème important est celui de la métrique de mesure infinie, c'est à dire l'incrément du vecteur de distance du nombre de saut à l'infini par le routeur lors d'envoi des mises à jour erronées. **DSDV** résout ce problème en limitant l'infini à une valeur réelle.

Un lien rompu sera donc matérialisé par une valeur supérieure à la valeur définie comme valeur infinie.

Le **DSDV** élimine ainsi les deux problèmes qui sont la boucle de routage et le problème de métrique de mesure infinie. Les paquets de mise à jour contiennent :

- Le nouveau NS incrémenté, du nœud émetteur.
- Les informations concernant chaque nouvelle route :
 - L'adresse de la destination.
 - Le nombre de sauts entre le nœud et la destination.
 - Le NS (des données reçues de la destination)

Lors d'une mise à jour, les données reçues sont comparées avec celle déjà disponibles. La route avec le plus grand NS (donc la plus récente) sera conservée. Si elle possède le même numéro de séquence alors celle avec la meilleure métrique sera retenue.

La topologie des réseaux mobiles étant peu stable, chaque nœud envoie périodiquement sa table de routage à ses voisins directs mais aussi lors d'évènement entraînant la modification de celle-ci.

La mise à jour de la table de routage peut s'effectuer de manière complète ou de manière incrémentale. Un nœud procédant la mise à jour complète transmet sa table en totalité ce qui implique plusieurs paquets des données envoyés. Tandis qu'une mise à jour incrémentale n'entraîne pas l'envoi des entrées ayant subi un changement donc moins des paquets de données qu'une mise à jour complète.

Dans un réseau assez stable, la méthode incrémentale serait préconisée car le nombre d'évènement serait moindre. Dans le cas contraire, les évènements seront fréquents.

Avec le protocole **DSDV**, chaque modification de la table de routage locale d'un nœud est aussitôt diffusée à l'ensemble de ses voisins. Les routes reçues par une diffusion seront aussi envoyées quand le récepteur procédera à l'envoi de ses paquets de routage. Sans oublier qu'il devra incrémenter les métriques des routes reçues avant l'envoi car il représente un nœud en plus. L'unité mobile doit alors attendre la prochaine mise à jour initiée par la destination afin de mettre à jour l'entrée associée à celle-ci rendant ainsi le **DSDV** lent. En outre, **DSDV** utilise les mises à jour périodiques et basées sur les évènements causant un contrôle excessif au point de vue de la communication.

➤ **Le protocole WRP**

Le protocole **WRP** [8] signifie « Protocole de routage sans-fil » (« **W**ireless **R**outing **P**rotocol »).

Ce protocole est basé sur les algorithmes de recherche de chemin nommé **PFA** (« **P**ath-**F**inding **A**lgorithm »). Afin d'éviter le problème de métrique de mesure infinie, les **PFA** garde en mémoire le nœud prédécesseur du chemin le plus court correspondant à chaque destination.

Par contre, le problème de **PFA** est l'apparition des boucles de routage temporaires dans le chemin spécifié du prédécesseur avant la convergence, c'est à dire lorsqu'ils auront une vue précise et cohérente de la nouvelle topologie du réseau. Pour résoudre ce problème, dans **WRP**, chaque nœud maintient :

- une table de distance
- une table de routage
- une table des coûts des liens
- une liste de retransmission des messages (« **MRL** »)

La table de distance d'un nœud « i » est une matrice contenant pour chaque destination « j » et pour chaque voisin k de « i », la distance D_{ijk} avec le prédécesseur P_{ijk} de k .

La table de routage d'un nœud « i » est représentée par un vecteur dont chaque entrée est associée à une destination « j » connue. Une entrée doit comporter l'adresse de destination, la distance vers celle-ci (« D_{ij} », du plus court chemin), le prédécesseur (« P_{ij} »), le successeur (« S_{ij} ») et une marque (« tag ij »). Cette marque est utile lors de la mise à jour des tables de routage. En cas de boucle « tag $ij = \text{error}$ » ou en cas de destination non marquée « tag $ij = \text{null}$ » sinon « tag $ij = \text{correct}$ ».

La table des coûts des liens d'un nœud « i » contient les coûts (« L_{ik} ») pour chaque voisin « k » et le nombre de durées périodiques de mise à jour depuis le dernier message de type « error-free » du nœud « k » reçus. Le coût d'un lien défaillant est considéré comme étant infini.

La **MRL** d'un nœud « i » sert à connaître les voisins « k » n'ayant pas acquittés son message de mise à jour à fin de le retransmettre.

Les mises à jour s'effectuent après réception des données de mise à jour d'un voisin ou lors d'un changement d'état de lien d'un voisin. Les voisins présents dans la MRL doivent acquitter après réception du message. Si la table de routage n'a pas été modifiée lors de la dernière mise à jour, un message « HELLO » est envoyé afin de s'assurer de la connectivité. Le protocole **WRP** vérifie ainsi sa connexion avec ses voisins à chaque fois qu'un changement d'état d'un lien est détecté.

Le protocole **WRP** permet ainsi d'aider à l'élimination des boucles de routages mais aussi de minimiser le temps de convergence du protocole.

1.6.3.2 Protocoles réactifs

Le principe des protocoles réactifs est de ne rien faire tant qu'il n'y a pas une demande explicite de l'établissement de la route par une station. Cela permet d'économiser la bande passante et de l'énergie. Lorsqu'une liaison doit être établie, le protocole de routage va chercher un chemin jusqu'à la destination. Une fois ce chemin est trouvé, il est inscrit dans la table de routage et peut être utilisé. En général, cette recherche se fait par inondation. L'avantage majeur de cette méthode est qu'elle ne génère de trafic, que lorsqu'il est nécessaire. Le principal inconvénient est le coût de l'inondation qui va faire intervenir tous les nœuds du réseau en très peu de temps et créer un délai de l'établissement des routes. Nous citons quelques protocoles :

➤ Le protocole AODV

Le protocole **AODV** [9] qui signifie "Routage avec Vecteur de Distance à la Demande" (**AODV: Ad hoc On demand Distance Vector**).

Représente essentiellement une amélioration de l'algorithme **DSDV**. Le protocole **AODV**, réduit le nombre de diffusions des messages, et cela en créant des routes en cas de besoin, contrairement au **DSDV**, qui maintient la totalité des routes. L'**AODV** est basé sur l'utilisation des deux mécanismes "Découverte de route" et "Maintenance de route" (utilisés par le **DSR**), en plus du routage nœud-par-nœud, le principe des numéros de séquence et l'échange périodique du **DSDV**.

L'**AODV** utilise les principes des numéros de séquence à fin de maintenir la consistance des informations de routage. A cause de la mobilité des nœuds dans les réseaux ad hoc, les routes changent fréquemment ce qui fait que les routes maintenues par certains nœuds, deviennent

invalides. Les numéros de séquence permettent d'utiliser les routes les plus récentes ou autrement dit les plus fraîches (fresh routes).

De la même manière que dans le **DSR**, l'**AODV** utilise une requête de route dans le but de créer un chemin vers une certaine destination. Cependant, l'**AODV** maintient les chemins d'une façon distribuée en gardant une table de routage, au niveau de chaque nœud de transit appartenant au chemin cherché. Une entrée de la table de routage contient essentiellement:

- 1- L'adresse de la destination.
- 2- Le nœud suivant.
- 3- La distance en nombre de nœud (i.e. le nombre de nœud nécessaire pour atteindre la destination).
- 4- Le numéro de séquence destination.
- 5- Le temps d'expiration de l'entrée de la table.

Quand un nœud de transit (intermédiaire) envoie le paquet de la requête à un voisin, il sauvegarde aussi l'identificateur du nœud à partir duquel la première copie de la requête est reçue. Cette information est utilisée pour construire le chemin inverse, qui sera traversé par le paquet (réponse de route) (cela veut dire que l'**AODV** supporte seulement les liens symétriques). Puisque le paquet (réponse de route) va être envoyé à la source, les nœuds appartenant au chemin de retour vont modifier leurs tables de routage suivant le chemin contenu dans le paquet de réponse.

Un nœud diffuse une requête de route (**RREQ: Route REQuest**), dans le cas où il aurait besoin de connaître une route vers une certaine destination et qu'une telle route n'est pas disponible (figure 1.7).

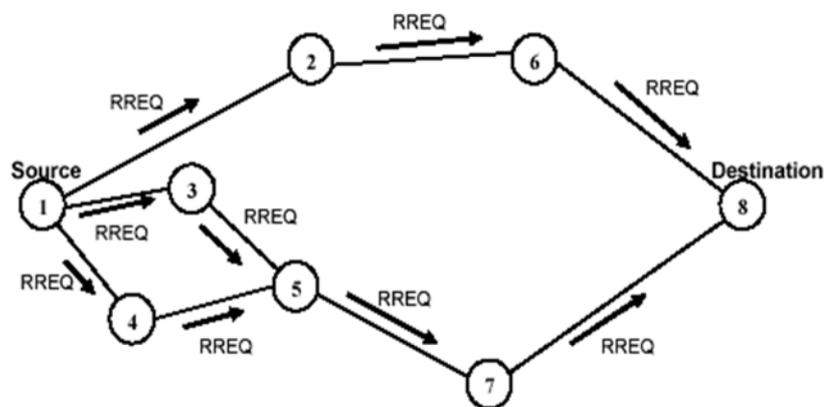


Figure 1.7 : La requête RREQ

Cela peut arriver si la destination n'est pas connue au préalable, ou si le chemin existant vers la destination a expiré sa durée de vie ou il est devenu défaillant (i.e. la métrique qui lui est associée est infinie). Le champ numéro de séquence destination du paquet **RREQ**, contient la dernière valeur connue du numéro de séquence, associé au nœud destination. Cette valeur est recopiée de la table de routage.

Si le numéro de séquence n'est pas connu, la valeur nulle sera prise par défaut. Le numéro de séquence source du paquet **RREQ** contient la valeur du numéro de séquence du nœud source. Comme nous avons déjà dit, après la diffusion du **RREQ**, la source attend le paquet réponse de route (**RREP: Route REPLY**).

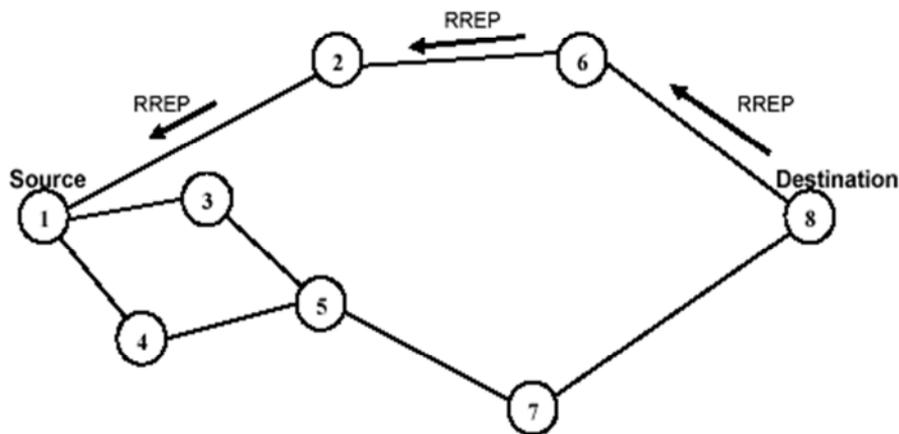


Figure 1.8 : La réponse RREP

Si ce dernier n'est pas reçu durant une certaine période (appelée **RREP_WAIT_TIME**), la source peut rediffuser une nouvelle requête **RREQ**. A chaque nouvelle diffusion, le champ Broadcast ID du paquet **RREQ** est incrémenté. Si la requête **RREQ** est rediffusée un certain nombre de fois (**RREQ_RETRIES**) sans l'obtention de réponse, un message d'erreur est délivré à l'application.

➤ **Le protocole DSR (Dynamic Source Routing)**

Le protocole **DSR** [(10), (11)] est un protocole de routage réactif qui utilise le routage de source afin d'envoyer des paquets de données. Dans ce type de routage, les entêtes des paquets de données portent la séquence des nœuds à travers lesquels le paquet doit passer. Ceci signifie que les nœuds intermédiaires ont juste besoin de garder des traces de leurs voisins intermédiaires afin de transférer les paquets de données. Le nœud source a besoin de savoir l'ordre complet des nœuds jusqu'à la destination.

Comme dans **AODV**, la demande d'une route dans **DSR** exige une inondation avec des paquets (Route Request). Un nœud recevant ce paquet cherche dans sa « cachette de route » (similaire à la table de routage dans **AODV**), où toutes ses routes connues sont stockées, une route contenant la destination demandée. S'il n'y a pas de route trouvée, le nœud transfère le paquet (Route Request) plus loin après avoir ajouté sa propre adresse à la séquence des nœuds stockée dans le paquet (Route Reques). Le paquet se propage dans le réseau jusqu'à l'arrivée à destination ou à un nœud possédant une route vers cette destination. Si une route est trouvée, un paquet (Route Reply) contenant la séquence des nœuds appropriée pour atteindre la destination est renvoyé en unicast au nœud source. **DSR** ne prend pas en compte la bidirectionnalité des liens puisque le paquet (Route Reply) est envoyé au nœud source selon une route déjà stockée dans la « cachette de routes » d'un nœud intermédiaire ou à l'aide d'une réponse du nœud destinataire.

Afin d'éviter des inondations inutiles du réseau avec des messages (Route Request), la procédure de demande de route commence d'abord à questionner les nœuds voisins s'ils ont une route disponible dans le voisinage direct. Ceci est fait en envoyant le premier paquet (Route Request) avec une limite de sauts égale à zéro, afin que celui-ci ne soit pas transféré ensuite aux voisins. S'il n'y a pas de réponses obtenues lors de cette demande initiale, un nouveau paquet (Route Request) est diffusé dans le réseau entier.

Un nœud **DSR** est capable de connaître des routes en lisant des paquets qui ne lui sont pas adressés [12]. Cependant, cette technique exigeant un récepteur actif dans le nœud, peut être plutôt consommatrice d'énergie. Dans les réseaux où les nœuds ont une capacité énergétique limitée, le but est de mettre en veille l'émetteur-récepteur afin de conserver l'énergie le plus possible.

1.6.3.3 Protocoles hybrides

Les protocoles hybrides combinent les approches réactive et proactive. Le principe est de connaître notre voisinage de manière proactive jusqu'à une certaine distance (par exemple trois ou quatre sauts), et si jamais une application cherche à envoyer quelque chose à un nœud qui n'est pas dans cette zone, d'effectuer une recherche réactive à l'extérieur. Avec ce système, on dispose immédiatement des routes dans notre voisinage proche, et lorsque la recherche doit être étendue plus loin, elle en est optimisée (un nœud qui reçoit un paquet de recherche de route réactive va tout de suite savoir si la destination est dans son propre voisinage. Si c'est le cas, il va pouvoir répondre, et sinon il va propager de manière optimisée la demande hors de sa zone proactive). Selon le type de trafic et les routes demandées, ce type

de protocole hybride peut cependant combiner les désavantages des deux méthodes : échange des paquets de contrôle réguliers et inondation de l'ensemble de réseau pour chercher une route vers un nœud éloigné. Il existe plusieurs protocoles hybrides tels que le protocole de routage « **ZRP** » et « **CBRP** » que nous allons expliciter.

➤ **Le Protocole ZRP :**

Le protocole **ZRP** [13] signifie « Protocole de zone de routage » (« **Zone Routing Protocol** »). Il définit pour chaque nœud une zone de routage qui incluse tous les nœuds dont la distance minimum à ce nœud est x , les nœuds qui sont exactement à distance x sont appelés nœud périphérique. Pour trouver une route vers des nœuds qui sont à distance supérieure à x , **ZRP** utilise un système réactif qui envoie une requête à tous ses nœuds périphériques. **ZRP** a deux types de fonctionnement : **IARP** (**IntrAzone Routing Protocol**) et **IERP** (**IntErzone Routing Protocol**). **IARP** donne suivant une technique proactive toutes les routes jusqu'à une distance x . **IARP** est basé sur un protocole de type vecteur de distance. **IERP** donne de façon réactive les routes pour des destinations qui seraient à plus de x sauts.

Le processus de recherche de route fonctionne comme suit : si une route est connue cela signifie que la destination est à moins de x sauts alors cette route est la route retournée par le protocole, sinon si aucune route n'est connue cela signifie que le nœud est à distance supérieur à x . Dans ce cas le nœud envoie une requête par **IERP** à tous ses nœuds de périphérie. Si un nœud périphérique connaît une route il renvoie une réponse sinon le protocole se poursuit récursivement jusqu'à obtention d'une route.

➤ **Le protocole CBRP**

Le protocole **CBRP** [14] signifie « Protocole de Routage Basé sur les groupes » (« **Cluster Based Routing Protocol** »).

Dans **CBRP**, le réseau est décomposé en groupe (figure 1.9). Chaque groupe est constitué des nœuds membres et un représentant de groupe. Un nœud n'ayant pas de statut (ni membre, ni représentant) active un timer et diffuse un message « HELLO ». Lorsqu'un représentant d'un groupe reçoit ce message, il envoie immédiatement une réponse à la source. A sa réception, le nœud peut alors devenir membre de ce groupe à condition que l'attente de la réponse n'ait pas dépassé le timeout. En cas de dépassement du timeout et si le nœud possède au moins un lien bidirectionnel vers un nœud voisin, le nœud peut se proclamer représentant d'un groupe.

Sinon, il reste dans l'état indécis et répète la même procédure mais l'instabilité des réseaux Ad Hoc fait que l'attente des nœuds indécis soit souvent courte.

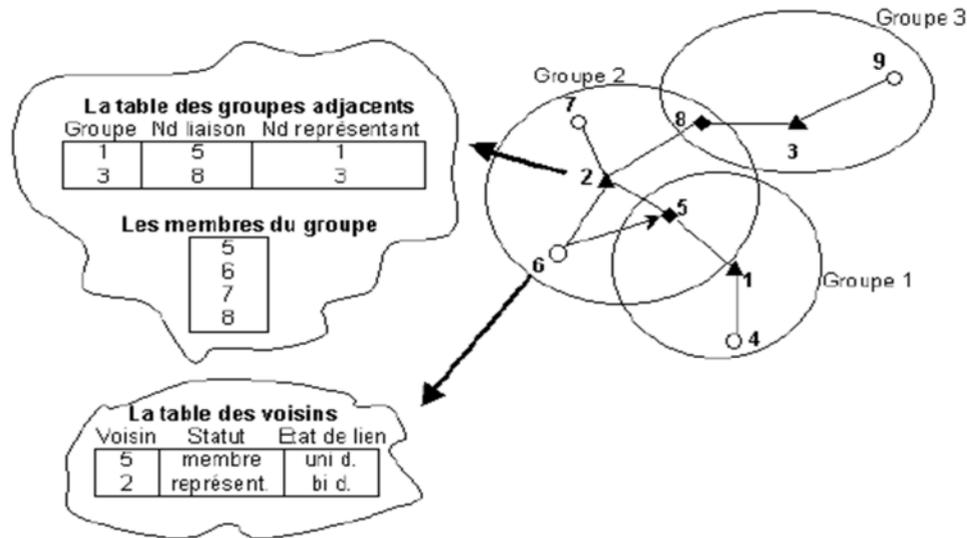


Figure 1.9 : CBRP et notion de groupe

Les nœuds maintiennent une table des voisins dont chaque entrée est associée à un voisin. Elle indique l'état des liens (uni ou bidirectionnel) et le statut du voisin. Le représentant d'un groupe regroupe les informations concernant ses membres et possède une table contenant les groupes adjacents. Une entrée de cette table est associée à un groupe voisin. La table des groupes adjacents contient l'identificateur du groupe, l'identificateur du nœud de son groupe permettant la liaison avec ce dernier et l'identificateur du représentant de ce groupe.

La requête de demande de chemin s'effectue par inondation et elle est destinée uniquement aux représentants des groupes voisins. Un représentant de groupe recevant ce message vérifiera, en utilisant sa table de membres de groupes, l'existence du nœud de destination dans son groupe. S'il s'y trouve, il lui envoie directement la requête. Dans le cas contraire, il fait poursuivre le message aux autres représentants voisins en y inscrivant au préalable son adresse. Un représentant pourra ainsi ignorer les requêtes déjà traitées. Quand la requête parvient au destinataire, celui-ci répond par l'envoi du chemin qui a été sauvegardé dans le paquet de la requête. Si le nœud source ne reçoit pas de réponse au bout d'une certaine période, il envoie de nouveau la requête.

Lorsqu'un nœud détecte un lien défaillant pendant l'acheminement des données, il retourne un message d'erreur à la source et applique un mécanisme de réparation locale. Ce mécanisme cherche si le nœud inaccessible ou le nœud après celui-ci dans le chemin peut-être atteint à travers un autre voisin. En cas de réussite, les données sont acheminées en utilisant le chemin réparé.

1.7 Domaines d'applications des réseaux de capteurs

La miniaturisation, l'adaptabilité, le faible coût et la communication sans fil permettent aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs domaines d'applications. Ils permettent aussi d'étendre le domaine des applications existantes. Parmi ces domaines où ces réseaux se révèlent très utiles et peuvent offrir de meilleures contributions, on peut noter le militaire, la santé, l'environnemental, et les maisons intelligentes...

Applications militaires

Le faible coût, le déploiement rapide, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes sont des caractéristiques qui ont rendu les réseaux de capteurs efficaces pour les applications militaires.

Plusieurs projets ont été lancés pour aider les unités militaires dans un champ de bataille et protéger les villes contre des attaques, telles que les menaces terroristes. Le projet **DSN (Distributed Sensor Network)** au **DARPA (Defense Advanced Research Project Agency)** était l'un des premiers projets dans les années 80 ayant utilisés les réseaux de capteurs pour rassembler des données distribuées. Les chercheurs du laboratoire national Lawrence Livermore ont mis en place le réseau **WATS (Wide Area Tracking System)**. Ce réseau est composé de détecteurs des rayons gamma et des neutrons pour détecter et dépister les dispositifs nucléaires.

Il est capable d'effectuer la surveillance constante d'une zone d'intérêt. Il utilise des techniques d'agrégation de données pour les rapporter à un centre intelligent. Ces chercheurs ont mis en place ensuite un autre réseau appelé **JBREWS (Joint Biological Remote Early Warning System)** [15] pour avertir les troupes dans le champ de bataille des attaques biologiques possibles. Un réseau de capteurs peut être déployé dans un endroit stratégique ou hostile, afin de surveiller les mouvements des forces ennemies, ou analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection des armes chimiques, biologiques ou radiations). L'armée américaine a réalisé des tests dans le désert de Californie.

Applications à la surveillance

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains.

Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure. Le déploiement d'un réseau de capteurs de mouvement peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance.

Applications environnementales

Le contrôle des paramètres environnementaux par les réseaux de capteurs peut donner naissance à plusieurs applications. Par exemple, le déploiement des thermo-capteurs dans une forêt peut aider à détecter un éventuel début de feu et par suite faciliter la lutte contre les feux de forêt avant leur propagation. Le déploiement des capteurs chimiques dans les milieux urbains peut aider à détecter la pollution et analyser la qualité d'air. De même leur déploiement dans les sites industriels empêche les risques industriels tels que la fuite de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.).

Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole. Cette expérimentation a été réalisée par Intel Research Laboratory and Agriculture and Agri-Food Canada sur une vigne à British Columbia.

Applications médicales

Dans le domaine de la médecine, les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs. Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que : la tension artérielle, battements du cœur... à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière. Les données physiologiques collectées par les capteurs peuvent être stockées pendant une longue durée pour le suivi d'un patient [16]. D'autre part, ces réseaux peuvent détecter des comportements anormaux (chute d'un lit, choc, cri...) chez les personnes dépendantes (handicapées ou âgées).

Domotique

Avec le développement technologique, les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs, les

magnétoscopes... [17]. Ces capteurs embarqués peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe via Internet pour permettre à un utilisateur de contrôler les appareils domestiques localement ou à distance. La figure 1.10 illustre les applications des WSN.

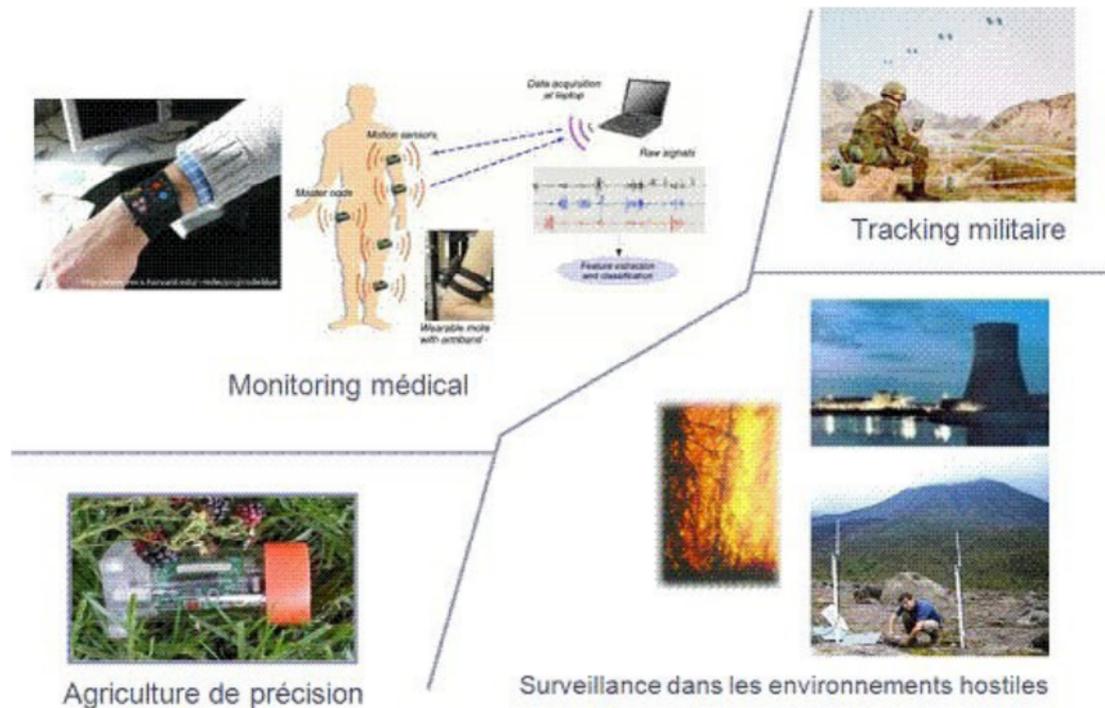


Figure 1.10 : Applications des WSN

Le déploiement des capteurs de mouvement et de température dans les futures maisons dites intelligentes permet d'automatiser plusieurs opérations domestiques telles que : la lumière s'éteint et la musique se met en état d'arrêt quand la chambre est vide, la climatisation et le chauffage s'ajustent selon les points multiples de mesure, le déclenchement d'une alarme par le capteur anti-intrusion quand un intrus veut accéder à la maison.

1.8 Contraintes et facteurs [18]

Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit :

- ✚ **Tolérance des fautes** : Certains nœuds peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner à cause d'un manque d'énergie, un problème physique ou une interférence. Ces problèmes n'affectent pas le reste du réseau, c'est le principe de la tolérance des fautes. La tolérance des fautes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruptions dues à une erreur intervenue sur un ou plusieurs capteurs.

- ✚ **L'échelle** : Un nombre aussi important des nœuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que les puits "sink" soit équipé de beaucoup de mémoire pour stocker les informations reçues.
- ✚ **Coûts de production** : Souvent, les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre des nœuds. Le prix d'un nœud est critique afin de pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel.
- ✚ **L'environnement** : Les capteurs sont souvent déployés en masse dans des endroits tels que des champs de bataille au delà des lignes ennemies, à l'intérieur des grandes machines, au fond d'un océan, dans des champs biologiquement ou chimiquement souillés,... Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiques éloignées.
- ✚ **Topologie de réseau** : Le déploiement d'un grand nombre des nœuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phases : Déploiement, Post-déploiement (les capteurs peuvent bouger, ne plus fonctionner,...), Redéploiement des nœuds additionnels.
- ✚ **Contraintes matérielles** : La principale contrainte matérielle est la taille du capteur. Pour Les autres contraintes la consommation d'énergie doit être moindre pour que le réseau survive le plus longtemps possible. Le réseau s'adapte aux différents environnements (fortes chaleurs, eau,...), et il soit autonome et très résistant vu qu'il est souvent déployé dans des environnements hostiles.
- ✚ **Médias de transmission** : Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont reliés par une architecture sans-fil. Pour permettre des opérations sur ces réseaux dans le monde entier, le média de transmission doit être normé.
- ✚ **Consommation d'énergie** : Un capteur, de par sa taille, est limité en énergie ($< 1.2V$). Dans la plupart des cas le remplacement de la batterie est impossible. Ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de la batterie. Dans un réseau de capteurs (multi-sauts) chaque nœud collecte des données et envoie/transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de quelques nœuds nécessite un changement de la topologie du réseau et un ré-routage des paquets. Toutes ces opérations sont gourmandes en énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens de réduire cette consommation.

1.9 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil se propagent dans plusieurs domaines d'application. Ils sont devenus indispensables pour les mesures de température, humidité, vibration, etc.

La mobilité est un facteur clé pour les réseaux de capteurs, par exemple, quand les capteurs sont embarqués sur des dispositifs mobiles tels que les véhicules. Pour cela, nous avons essayé dans le chapitre suivant, de décrire un réseau de capteur véhiculaire en précisant ses caractéristiques et ses avantages.

Chapitre 2

STI et Les réseaux de capteurs véhiculaires (VSN)

Sommaire

2.1 Introduction

2.2 Réseaux de véhicules

2.3 Réseaux de capteurs véhiculaires (VSN)

2.4 Composants des VSN

2.5 Caractéristiques des VSN

2.6 Principes de fonctionnement

2.7 Utilité des Systèmes de Transport Intelligents

2.8 Développement du transport multimodal

2.9 Avantages des VSN

2.10 Comparaison entre les VSN et les WSN

2.11 Déploiement des STI dans le monde

2.12 Conclusion

2.1 Introduction

Les **Systèmes de Transport Intelligents (STI)** (**Intelligent Transportation Systems (ITS)**) désignent les applications des nouvelles technologies de l'information et de la communication au domaine des transports. On les dit "Intelligents" parce que leur développement repose sur des fonctions généralement associées à l'intelligence : capacités sensorielles, mémoire, communication, traitement de l'information et comportement adaptatif. On trouve les **STI** dans plusieurs champs d'activité : dans l'optimisation de l'utilisation des infrastructures de transport, dans l'amélioration de la sécurité (notamment de la sécurité routière) et de la sûreté ainsi que dans le développement des services.

Les **STI** sont l'une des réponses technique et économique au défi des transports du XXI^e siècle. Elles devraient permettre à une population de plus en plus nombreuse de se déplacer de plus en plus souvent, sans risque d'accident, avec des ressources en énergie limitées, et en réduisant les nuisances environnementales.

Une des principales composantes de ces systèmes **ITS** est la communication inter véhicules. En effet, les communications impliquant des véhicules joueront un rôle important dans les années à venir, que ce soit afin de communiquer entre véhicules ou encore avec les infrastructures existantes. Les voitures de demain ne se contenteront plus de détecter les dangers grâce à des radars ou des cameras installés sur les routes. Elles seront capables de recevoir des messages d'alertes envoyées par les autres usagers ou par l'infrastructure et de transmettre ces informations à d'autres véhicules. Les voitures seront dotées d'une batterie de capteurs divers (**VSN, Vehicular Sensor Networks**).

L'objectif de ce chapitre est de faire une description synthétique des réseaux de capteurs véhiculaire, leurs architectures, leurs caractéristiques ainsi que leurs déploiement.

2.2 Réseaux de véhicules

Les réseaux véhiculaires sont une projection des systèmes de transports intelligents (**Intelligent Transportation Systems - ITS**). Les véhicules communiquent les uns avec les autres par l'intermédiaire de la communication inter-véhicule (**Inter-Vehicle Communication - IVC**). Elles communiquent aussi avec les équipements de la route par l'intermédiaire de la communication d'équipement-à-véhicule (**Roadside-to-Vehicle Communication - RVC**). Le but optimal est que les réseaux véhiculaires contribueront à des routes plus sûres et plus efficaces à l'avenir en fournissant des informations opportunes aux conducteurs et aux autorités intéressées [19].

2.2.1 Services et applications des réseaux de véhicules

Les réseaux véhiculaires regroupent deux grandes classes d'applications [20], [21] à savoir les applications permettant de bâtir un système de transport intelligent **ITS** (**I**ntelligent **T**ransport **S**ystem) et celles liées au confort ou au divertissement du conducteur et des éventuels passagers.

Les applications liées à la sécurité routière (applications **ITS**) représentent une part importante des applications des réseaux véhiculaires.

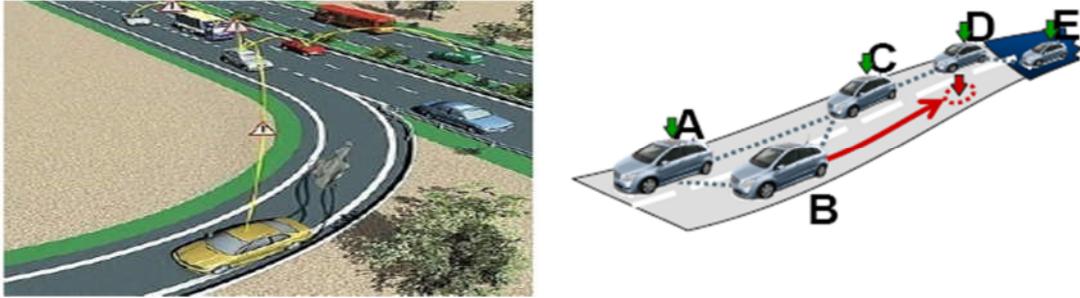


Figure 2.1 Réseaux de véhicules [22]

Ces applications comprennent la diffusion des messages rendant compte de l'état du trafic, de la météo, de l'état de la chaussée, des accidents, des travaux ou encore des messages rappelant les limitations de vitesse ou les distances de sécurité. Les applications **ITS** comprennent aussi les systèmes d'aide à la conduite et les véhicules coopératifs : aide aux dépassements des véhicules, prévention des sorties des voies en ligne ou en virage, etc.

Les exemples de service ne se limitent pas seulement aux applications de sécurité routière mais à d'autres types d'applications, notamment la diffusion d'informations pratiques par des fournisseurs des services aux automobilistes. Ces applications offrent des perspectives intéressantes pour les opérateurs de télécommunications qui cherchent des nouvelles niches des services.

Au regard de ces potentialités, les réseaux véhiculaires représentent un nouveau marché porteur et prometteur en termes de déploiements d'infrastructures réseau et de fourniture des services associés.

2.2.2 Architectures des réseaux de véhicules

Dans ces réseaux de véhicules, les services proposés permettent de distinguer plusieurs communications possibles (figure 2.2) :

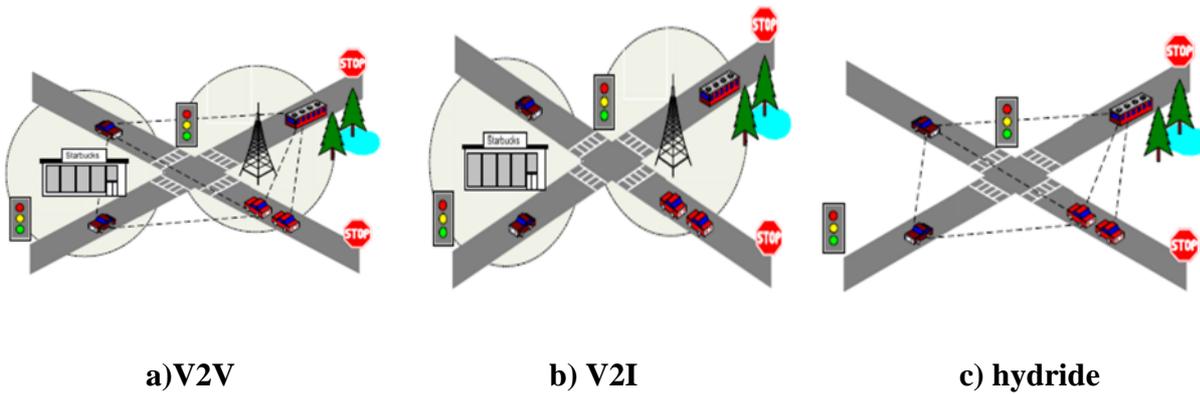


Figure 2.2 Types de communication dans un réseau de véhicules [23]

Les réseaux véhiculaires peuvent donc être déployés par des opérateurs des réseaux ou des services suivant les configurations ou la combinaison des configurations suivantes :

2.2.2.1 Communications de Véhicule à Véhicule (V2V)

Dans cette approche (figure 2.2.a), un réseau de véhicules est vu comme un cas particulier des réseaux mobiles ad hoc **MANET** (**M**obile **A**d hoc **N**etwork) où les contraintes d'énergie, de mémoire et de capacité de calcul sont relaxées, et le modèle de mobilité n'est pas aléatoire, mais prévisible avec une très forte mobilité. Cette architecture peut être utilisée dans les scénarios de diffusion d'alerte (freinage d'urgence, collision, ralentissement...) ou pour la conduite coopérative. En effet, dans le cadre de ces applications de sécurité routière, les réseaux à infrastructure montrent leurs limites, surtout en termes de délai. En outre, il est clair qu'une communication ad hoc multi-sauts est plus performante qu'une communication passant par un réseau d'opérateur.

2.2.2.2 Communications de Véhicule à Infrastructure (V2I)

Nous ne nous concentrons donc pas seulement sur des simples systèmes de communications inter véhicules, mais prenons aussi en compte des applications qui utilisent des points d'infrastructure **RSU** (**R**oad **S**ide **U**nits), (figure 2.2.b). Ceux-ci démultiplient les services grâce à des portails Internet communs. Des services à base d'infrastructure profitent aux clients et peuvent motiver des conducteurs à investir dans l'équipement sans fil supplémentaire pour leurs véhicules.

2.2.2.3 Communications hybrides

La combinaison de ces deux types de communications permet d'obtenir une communication hybride très intéressante (figure 2.2.c). En effet, les portées des infrastructures étant limitées, l'utilisation des véhicules comme relais permet d'étendre cette distance. Dans un but économique et en évitant de multiplier les bornes à chaque coin de rue, l'utilisation de sauts par véhicules intermédiaires prend toute son importance.

2.3 Réseaux de capteurs véhiculaires (VSN)

Les réseaux VSN (Vehicular Sensor Networks) est un cas particulier de l'architecture hybride. En effet, les VSN émergent en tant que nouvelle architecture des réseaux de véhicules, qui a pour objectif la collecte et la diffusion proactive et en temps réel des données relatives à l'environnement dans lequel évoluent les véhicules plus particulièrement en zones urbaines.

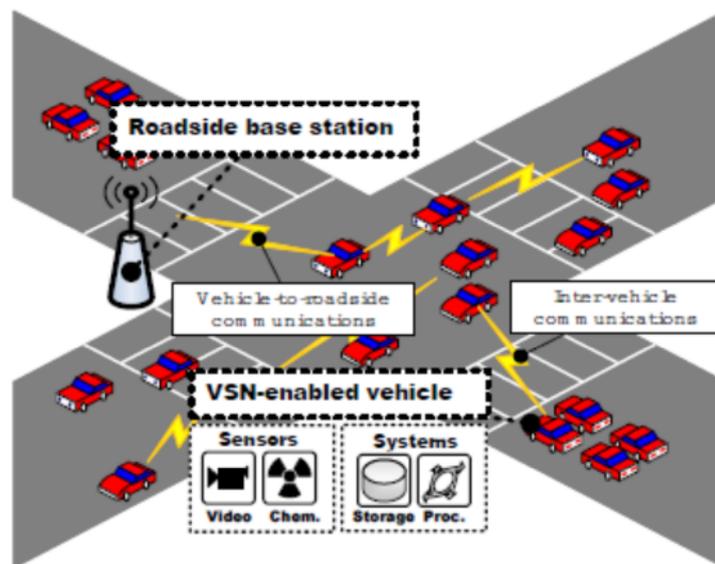


Figure 2.3 : Réseaux de capteurs véhiculaires [24]

En effet, les voitures sont munies de plus en plus de capteurs de toutes catégories (cameras, capteurs de pollution, capteurs de pluies, capteurs de l'état des pneumatiques, GPS, etc.). Ceux-ci peuvent être utiles pour l'obtention d'informations sur le trafic routier ou sur les places de parking disponibles ou encore pour des applications de surveillance, via les cameras embarquées sur des voitures [25].

2.4 Composants des VSN

De nos jours, les véhicules sont équipés avec des capteurs multiples et des systèmes enfoncés à réunir des données concernant la conduite et les environnements du conducteur. Le tableau 2.1 résume certain composants des VSN :

Capteurs véhiculaires (VSN)	Inférence des données
Données GPS	Localisation
Traction de control	Neige, glace, pluie, humidité, trottoir des chaussées
ABS déferlant	Fin d'escarpé
Vitesse	Approche la vitesse du signal, vitesse limités, encombrement assuré
Airbag	Accident
Essuie-glaces	Humidité
Phares	Obscurité
Brouillard blond	Brouillard
Température ambiante	Congélation

Tableau 2.1 : les capteurs dans la voiture

2.5 Caractéristiques des VSN

Les réseaux de capteurs véhiculaires disposent les caractéristiques suivantes :

- Déploiement à grand échelle.
- Pouvoir de calcul.
- Grande mobilité.
- Réseau de communications fiables en raison de la mobilité.
- Vaste quantités de stockage mobile qui transporte des données générées.
- Consommation d'énergie.

2.6 Principes de fonctionnement [26]

2.6.1 Véhicule et les systèmes embarqués

Les systèmes embarqués sont constitués des moyens matériels et immatériels intégrés au véhicule. C'est la face du système la plus visible. On y retrouve les systèmes de collecte, de traitement et de diffusion des informations dans le périmètre du véhicule.

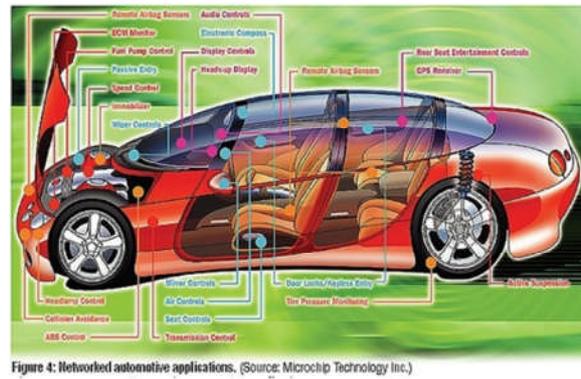


Figure 4: Networked automotive applications. (Source: Microchip Technology Inc.)

Figure 2.4 : Les technologies de capteurs dans la voiture [27]

Dans le cadre des **STI**, la collecte d'informations s'effectue à deux niveaux distincts. Le premier concerne le recueil des données effectué par le véhicule. Le deuxième concerne les données collectées à l'extérieur du véhicule (météo, surveillance trafic, niveau de pollution...). Les automobiles utilisées aujourd'hui sont déjà équipées de multiples capteurs. Parmi les plus communs on trouve, par exemple, le capteur de température d'eau, la jauge à carburant, le compteur de vitesse, le compte-tours, le poste de radio.

Depuis quelques années des dispositifs plus spécifiques ont été ajoutés tels que les capteurs de rotation de roue, les capteurs de pluie, les radars de recul, les **GPS**. On peut ajouter à cette liste un autre capteur, qui est encore rarement solidaire du véhicule : le téléphone portable. Cet appareil tend de plus en plus à être relié au véhicule, notamment au moyen de la technologie Bluetooth. D'autres systèmes de détection plus ou moins sophistiqués (caméras internes et externes, capteurs de positionnement sur la chaussée, radars de détections d'obstacle) sont déjà disponibles sur plusieurs gammes de véhicules (Audi, BMW, Ford, Infiniti, Lexus, Mercedes, Opel, Volkswagen, Volvo...).

Les informations sont actuellement traitées par des multiples systèmes et de manière indépendante. L'un des principaux apports des **STI** est justement de centraliser ces informations et de les traiter dans leur globalité. Parmi les centres de traitement embarqués, on peut citer le calculateur du véhicule, le **GPS**, le téléphone portable. A ceux-ci s'ajoutent les centres de traitement de bord de route (télé péages, radars de vitesse) et les centres de régulation de la circulation.

A l'avenir, on assistera au regroupement des systèmes de traitement ou, à une interconnexion entre eux afin de leur permettre de « dialoguer » et de s'enrichir mutuellement. Ainsi, dans la voiture, le calculateur central communiquera avec l'appareil de géo localisation, avec l'équipement de téléphonie mobile, ou avec tout autre appareil de bord. Après traitement, les informations recueillies doivent être rediffusées aux multiples utilisateurs embarqués, afin que ces derniers puissent ajuster leurs choix à partir des données collectées.

2.6.2 Réseau de télécommunications [26]

Le rôle de l'infrastructure de télécommunication est extrêmement important. Celle-ci permet d'établir les liens nécessaires au transfert d'informations entre les véhicules et les plateformes de service. C'est un maillon essentiel dans la chaîne de communication. On distingue la communication entre véhicules (**V2V**, **V**ehicle to **V**ehicle), la communication du véhicule avec la structure bord de route (**V2I**, **V**ehicle to **I**nfrastructure), la communication de la structure avec la voiture (**I2V**, **I**nfrastructure to **V**ehicle) et la communication d'infrastructure à infrastructure (**I2I**, **I**nfrastructure to **I**nfrastructure). L'infrastructure est composée, d'une part, de la partie physique (le matériel) et, d'autre part, d'une composante immatérielle (les protocoles de communication).

L'échange d'informations entre les différents éléments constituant l'infrastructure de communication se fait sur des courtes et des longues distances. Les liaisons entre infrastructures peuvent être réalisées avec des fils. Mais, pour des raisons évidentes, les autres liaisons s'appuient exclusivement sur la transmission sans fil. On distingue plusieurs catégories des réseaux sans fil selon la zone de couverture, la vitesse de transmission et la fiabilité requise. Les principaux modes de transmission sans fil utilisés actuellement sont la transmission infrarouge (pour les très faibles distances, inférieures à 30 mètres), la transmission par **GSM**, la transmission par ondes radio (pour les courtes et longues distances), et la communication par satellite (pour les très longues distances). Ces différents modes de transmission exigent des structures matérielles spécifiques à chacun d'entre eux.

Mais à chaque fois, il faut un émetteur et un récepteur, et, dans certains cas, il faut également ajouter des points relais. Ainsi, les transmissions satellites nécessitent, comme leur nom le suggère, le support d'un ou des plusieurs satellites géostationnaires. Les transmissions sur des moyennes et longues distances requièrent la présence d'antennes positionnées sur des points hauts. Pour cette raison, elles sont placées sur des pylônes, des châteaux d'eau, ou d'autres constructions hautes. C'est notamment le cas des antennes pour la téléphonie mobile. Les transmissions de faible portée requièrent des émetteurs et des récepteurs de beaucoup plus petites tailles. Les systèmes Bluetooth, ou bornes Wifi en sont la parfaite illustration.

En raison des différents modes de transmission et de la variété des technologies utilisées pour acheminer les données, il est nécessaire de définir un protocole commun de communication afin que chacune des interfaces puisse échanger avec les autres. Dans ce but, l'**ISO** a développé une famille de standards internationaux autour des liaisons filaires et sans fil applicables au secteur des **STI**. Il s'agit de la norme **ISO TC 204 WG 16**, qui est basée sur le concept **CALM** (**C**ommunications **A**ccess for **L**and **M**obiles). Cette norme intègre une

multitude des technologies telles que la communication cellulaire de 2e et 3e générations, les satellites, les infrarouges, les micro-ondes...

2.6.3 Système d'information

Les informations circulent à travers plusieurs modes de transmission bâtis autour des réseaux. La gestion de ces réseaux est confiée à des opérateurs publics ou privés. C'est le cas par exemple pour les opérateurs de téléphonie mobile. De la même manière qu'un ordinateur ne peut être utilisé sans logiciel, l'infrastructure précédemment décrite n'est utile que si elle est assortie d'une application ad hoc. Ce sont les fournisseurs des services qui développent ces applications. Certaines sont payantes, d'autres sont gratuites. Elles s'adressent aux différentes parties prenantes décrites plus haut: les pouvoirs publics, les constructeurs automobiles, les conducteurs, les gestionnaires des flottes, les loueurs des voitures, les gestionnaires d'infrastructures, les compagnies d'assurance...

C'est le cas par exemple du **GPS (Global Positioning System)**. Le conducteur qui dispose d'un récepteur **GPS** peut connaître sa position exacte et bénéficier d'un géo guidage gratuit. Mais il peut aussi souscrire à un service additionnel payant qui calcul son itinéraire en tenant compte des conditions de trafic.

2.7 Utilité des Systèmes de Transport Intelligents

Il est vrai que les voitures haut de gamme ont été les premières à adopter des équipements individuels connectés. Mais les **STI** ont vocation à équiper la quasi-totalité des véhicules en circulation, ainsi que toutes les infrastructures. L'efficacité d'un système de transport coopératif est proportionnelle au nombre des véhicules et d'infrastructures équipés.



Figure 2.5 : la voiture du confort [27]

On ne pourra pas continuer à construire des routes et des équipements à l'infini. Seul le développement des **STI** permettra d'absorber l'accroissement du trafic, d'améliorer sa sécurité et sa performance énergétique. En outre, les **STI** ne concernent pas que les automobiles; ils facilitent la mobilité de tous les voyageurs, y compris les piétons.

Certes, l'installation des **STI** coûte cher. Mais il faut comparer ce coût aux économies réalisées dans le domaine de la sécurité routière, dans la rapidité et la fluidité des transports, et dans les économies d'énergie. Au total, on estime que les **STI** pourraient permettre de réduire de 10% la mortalité sur les routes, et de 25% la durée et le coût des transports.

2.8 Développement du transport multimodal [26]

Un transport est dit multimodal à partir du moment où la personne emploie au moins deux moyens de transport consécutifs différents pour réaliser son déplacement. Mais au cours du siècle passé, la société moderne a eu tendance à se reposer sur un seul mode de transport, devenu exclusif de tous les autres : la voiture. Le renouveau du transport multimodal est lié aux nuisances causées par l'excès de voiture et à l'émergence des nouveaux outils permettant de concevoir les déplacements de façon plus efficace.

La mobilité multimodale suppose trois conditions : l'existence de plusieurs modes de transport adaptés à chaque situation ; l'abondance d'informations permettant de faire en temps réel des choix pertinents entre plusieurs options (notamment au moyen du téléphone portable), et enfin un changement des habitudes et du comportement social. L'offre des transports en

commun performants est l'une des clés de succès de la mobilité multimodale. Les **STI** peuvent grandement contribuer à accroître leur efficacité.

Quelques exemples illustrent les développements futurs. Grâce à des capteurs positionnés sur les autobus et le long du parcours, l'utilisateur peut être informé immédiatement du temps d'attente réel avant l'arrivée du bus, de la durée prévisionnelle du trajet et d'éventuels obstacles. Il peut donc comparer le temps et le coût d'un trajet effectué par ce moyen avec le temps et le coût d'un trajet effectués en voiture. Les **STI** peuvent aussi lui proposer d'autres modes de transport et des nouveaux services à la mobilité (vélo, tram, voiture partagée...). En outre, la circulation des bus (ou des taxis, des navettes, des tramways) peut être facilitée par l'octroi des priorités de passage (déroulement des feux calés sur le passage des transports en commun). Ces systèmes existent déjà dans de nombreuses villes mais sont souvent limités à une application isolée (octroi d'une priorité à tel carrefour, indépendamment du contexte de la circulation globale dans le quartier).

Les **STI** permettent l'articulation de ces règles de priorité avec d'autres règles d'optimisation et la rationalisation globale des transports. L'abondance et la précision des informations disponibles permettent la conception des trajets multimodaux ou le développement de transports alternatifs, comme l'auto partage. Ce dernier connaît un essor dans plusieurs villes, notamment à Dubaï, Oslo, Paris et Singapour.

2.9 Avantages des VSN

2.9.1 Prévention des accidents

Les **VSN** permettent au conducteur de mieux maîtriser son véhicule, mais aussi d'évaluer sa propre capacité à le conduire. De très nombreuses applications technologiques sont déjà entrées depuis longtemps dans l'usage courant. Sans même y penser, par un simple coup d'œil sur le tableau de bord, le conducteur vérifie des multiples indicateurs essentiels à la sécurité ou au bon fonctionnement du véhicule qu'il conduit : niveau de carburant et d'huile, température du moteur, vitesse, kilométrage effectué, allumage des phares, etc. Les véhicules haut de gamme offrent des indicateurs plus précis et plus spécialisés : pression des pneumatiques, accrochage des ceintures de sécurité, radar anticollision, température extérieure, signal sonore d'un risque de verglas ou de brouillard, etc. Toutes ces technologies mises en place au cours de ces vingt dernières années renforcent la sécurité et le confort du voyage. Mais elles reposent sur un postulat : le conducteur sera capable de comprendre les informations que les instruments de bord lui adressent ; il saura les interpréter et il prendra les bonnes décisions pour ajuster sa conduite.

Les **STI** sont une réponse à ce paradoxe. Il ne s'agit plus seulement d'accroître le nombre, la nature ou la précision des indicateurs de bord, mais de compenser les limites ou les défaillances humaines.

Par exemple: l'aptitude du conducteur à piloter son véhicule. Pour des raisons culturelles et par habitude, le conducteur a tendance à surestimer ses capacités et à minimiser les risques auxquels il s'expose. La nervosité, le stress, la dépression, ou au contraire une excitation excessive ou une joie euphorique perturbent le discernement et peuvent être à l'origine d'accidents. Tout comme l'abus d'alcool, ainsi que le prouvent les tests d'alcoolémie : les chauffeurs sous-estiment systématiquement la quantité d'alcool consommée et peinent à admettre leur incapacité à réagir rapidement et correctement à des situations inattendues. Les **VSN** des nouvelles générations d'équipements embarqués vont déceler cette faiblesse en mesurant différents paramètres et pourrissent alerter le conducteur avant qu'il ne prenne la route, ou éventuellement bloquer le véhicule en cas de comportement incohérent.

Il en va de même pour ce qui concerne le manque de sommeil. La somnolence au volant est la cause des nombreux accidents. Des capteurs situés sur le tableau de bord ou dans les équipements (volant, fauteuil, bord extérieur du véhicule) vont en déceler les symptômes les plus caractéristiques et donneront l'alerte.

Non seulement les **VSN** pourront déclencher une alarme (un message sonore, une sonnette dans la voiture, à l'intention du pilote), mais encore pourront-ils prévenir du danger les autres usagers de la route. Par exemple, le système peut avertir un conducteur venant un sens inverse qu'il risque une percussio n frontale en raison de la trajectoire anormale du premier véhicule. En cas d'endormissement profond se traduisant par un écart de trajectoire, l'aide au suivi de la trajectoire (**Lane Keeping Support, LKS**) peut également être activée (le système « prend la main » sur le véhicule et l'oblige à rester dans l'axe de la chaussée afin d'éviter les collisions longitudinales ou latérales). Elle peut même permettre une coordination avec la trajectoire des autres véhicules identifiés dans l'environnement proche. Le « platooning » consiste à faire rouler un groupe des véhicules ensemble selon des paramètres préétablis afin de prévenir tout risque de collision. Des « Cybernetic Transport Systems » peuvent même gérer des flottes des véhicules totalement automatisées.

Autre exemple : la vue. On estime qu'un tiers des accidents sont liés, d'une façon ou d'une autre, à un manque de visibilité. Les **VSN** permettent de compenser les faiblesses de l'œil humain. Il ne s'agit pas de science fiction. Les ingénieurs ne prévoient pas d'équiper les conducteurs d'yeux électroniques. Grâce à la géo localisation par satellite (**GPS, GALILEO**),

on connaît la position exacte d'un véhicule sur une route ; on sait dans quelle direction il progresse et l'on peut évaluer très précisément sa vitesse de déplacement.

Grâce à ce même procédé, on peut identifier de la même façon un autre véhicule, situé par exemple cent mètres derrière le premier véhicule. Imaginons que ce deuxième véhicule circule à une vitesse bien plus élevée que le premier, malgré un épais brouillard. Il y a risque de collision, car le conducteur du second véhicule ne peut pas voir le véhicule qui le précède et vers lequel il se dirige. Dans cette hypothèse, les **VSN** permettent d'établir un lien entre les deux situations: en temps réel, le système d'information identifie chacun des véhicules, signale les positions respectives et émet une alerte en raison du risque d'accident. Le système peut suggérer au premier véhicule d'accélérer afin de maintenir une distance de sécurité longitudinale ou de se ranger sur le côté de la route, et recommander au second véhicule de ralentir ou d'anticiper un dépassement. Grâce à l'entremise du système, et en complément des systèmes d'assistance à la conduite autonomes embarqués dans le véhicule, les conducteurs des deux véhicules se « voient », malgré la distance et le brouillard.

Mais la prévention des risques ne se limite pas au « dialogue » entre véhicules (que l'on appelle **V2V**, pour « Véhicule to Véhicule ») ; elle concerne aussi la relation entre véhicules et infrastructures (ou **V2I**, pour « Véhicule to Infrastructure »). A l'approche d'un carrefour équipé, l'automobiliste sera informé de la dangerosité d'un croisement, de l'état éventuellement défectueux de l'installation, voire de la présence d'autres véhicules à risque ou d'un piéton.

2.9.2 Réduction des dégâts en cas de collision

La voiture connectée va bénéficier des plusieurs avantages sur le véhicule autonome. Le système d'information ayant pu déceler juste avant la collision l'imminence de celle-ci, il peut procéder à des mesures immédiates destinées à en réduire l'impact. Par exemple, il peut mesurer précisément le poids, la morphologie et la position de chaque occupant du véhicule afin de déterminer le moment exact de déclenchement des airbags et le niveau de gonflement requis de façon à réduire le choc du gonflage. Il peut aussi « prendre la main » sur le véhicule et gérer au mieux le système de freinage en fonction des paramètres multiples, impossibles à appréhender de façon aussi efficace par le conducteur dans un délais très court, de l'ordre de la fraction de seconde.

Les **VSN** calculent alors instantanément la vitesse du véhicule, sa position sur la chaussée, l'existence d'obstacles particuliers sur celle-ci (autres véhicules, piétons), les conditions météo spécifiques (pluie, verglas) et agit sur les paramètres de la collision.

2.9.3 Gestion des secours

Le déclenchement des secours constitue une étape très importante dans la prise en charge des accidents de la circulation et détermine une partie du bilan traumatique. En un temps très bref, il faut prendre des dispositions pour éviter le sur-accident (un accident supplémentaire causé par le premier accident), évaluer l'étendue des dégâts (humains, matériels) et déclencher l'alerte (prévenir la police, les pompiers, les autres automobilistes).

Autrefois, l'automobiliste n'avait d'autre recours que de marcher jusqu'au village le plus proche pour donner l'alerte. Avec l'installation des bornes d'urgence sur les bords d'autoroute, la communication a été grandement facilitée. Le téléphone portable permet désormais d'aller beaucoup plus loin et de prévenir les secours immédiatement. Mais encore faut-il pour cela que la personne accidentée soit capable d'analyser correctement la situation (le traumatisme de l'accident altère le discernement), et qu'elle soit consciente.

Les **VSN** permettent justement de réagir immédiatement quel que soit l'état du ou des passagers. La détection du choc est immédiate (le **GPS** identifie instantanément l'arrêt brutal et anormal du véhicule ; le choc est détecté par des capteurs embarqués programmés pour déclencher l'activation des aibags). L'analyse de l'environnement (autres véhicules à l'approche) est automatique et permet de déclencher sur-le-champ des bornes d'alerte (feux clignotants), de façon à réduire le risque de sur-accident. Les **VSN** permettent ensuite d'évaluer précisément les dégâts : à l'aide de capteurs et en utilisant le réseau de communication **GSM** (**G**lobal **S**ystem for **M**obile **C**ommunication), on peut chiffrer le nombre des personnes à bord du véhicule, déterminer si elles sont conscientes ou non, estimer le risque d'incendie ou d'explosion, indiquer aux secours la position exacte du véhicule, s'il est sorti de la chaussée, s'il s'est retourné, etc.

Un grand nombre de ces applications auront dans un proche avenir un effet sur le taux de gravité des accidents et deviendront obligatoires à bord des véhicules, comme le seront prochainement les systèmes « d'Emergency Call » (déclenchement automatique de la communication avec les secours en cas de choc). L'appel d'urgence est d'ailleurs déjà sur le marché depuis des nombreuses années en Europe (BMW, Mercedes, PSA, Volvo...).

2.9.4 L'utilisation optimale des infrastructures

Une grande partie des infrastructures routières bâtie à grand frais sont sous utilisées, tandis que d'autres sont surchargées. Jusqu'à présent, les meilleurs systèmes d'information s'appuyaient sur des extrapolations d'événements passés pour prédire l'état du trafic. Les flux, et donc les risques, n'étaient pas évalués en temps réels. Le niveau d'approximation

étant assez élevé, les performances du système étaient limitées. La mise en place des véhicules traceurs, équipés des capteurs qui donnent l'état réel du trafic grâce au réseau cellulaire modifie radicalement le niveau de précision de l'information et donc de gestion du trafic. Ce dernier peut désormais être suivi heure par heure, pratiquement sur tous les axes routiers, pour un coût extrêmement réduit.

Mieux : grâce aux **STI**, les gestionnaires de trafic peuvent anticiper les risques d'altération de flux (approche de véhicules à risque ; probabilité accrue d'accident ou de panne susceptible de perturber les flux, travaux d'urgence effectués sur la chaussée...).

En période de congestion, l'autorité régulatrice peut ordonner la restriction occasionnelle des voies, définir des règles d'acheminement prioritaire ou stratégique, guider vers des axes moins encombrés, modifier les profils de vitesse optimale, changer la synchronisation des feux: les **STI** permettent le micro acheminement et une meilleure répartition des flux sur l'ensemble de l'infrastructure.

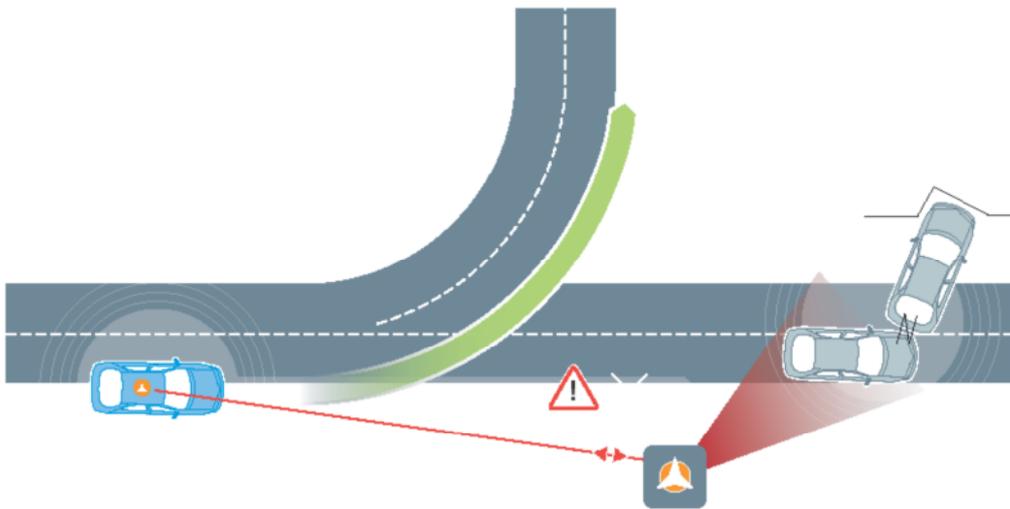


Figure 2.6 : Lorsqu'un obstacle encombre la chaussée, les véhicules sont immédiatement guidés vers un itinéraire de contournement.

A Los Angeles, un système de limitation temporaire de vitesse permet de réguler les flux. Ce système est aussi en opération depuis plusieurs années sur le réseau autoroutier d'ASF en France, mais aussi aux Pays-Bas. Une majorité des pays européens ont mis en place une gestion dynamique des vitesses limites affichées sur des panneaux à messages variables.

2.9.5 Hiérarchisation des transports

Un autre avantage des **STI** tient à la possibilité d'appliquer des règles de priorité variables, afin de favoriser selon les heures de la journée, selon les jours ou les périodes de l'année, les transports en commun, les véhicules prioritaires, les transports des marchandises

dangereuses ou hors gabarit, ou même les poids lourds. Il peut s'avérer intéressant de placer aux carrefours des capteurs qui identifient l'approche des camions et qui modifient la synchronisation des feux.

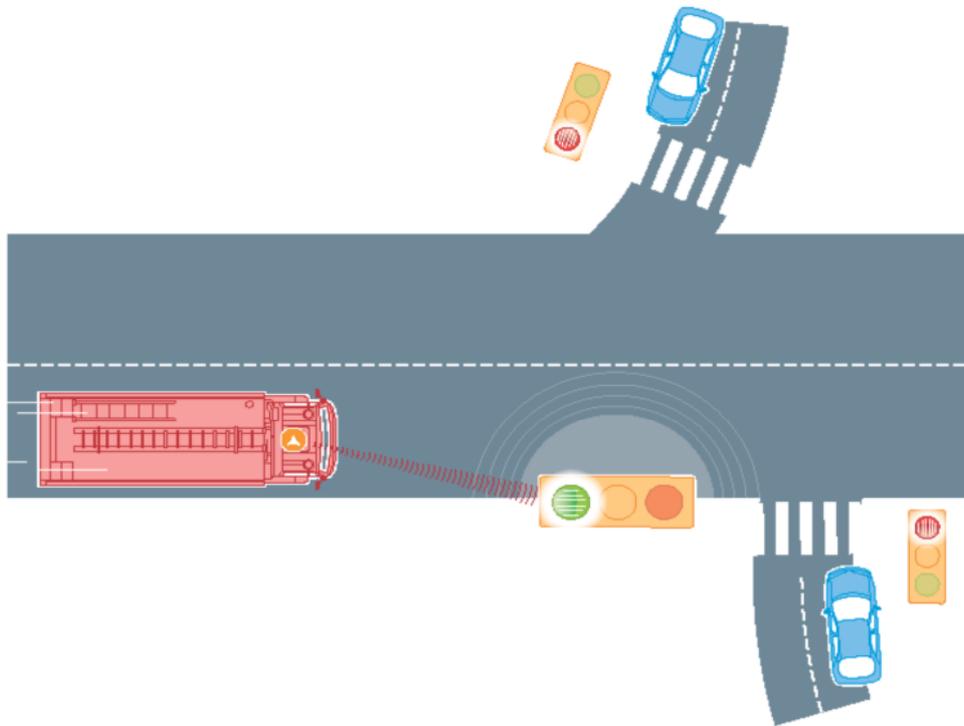


Figure 2.7 : Les STI permettent la gestion hiérarchisée des flux de transport

Les STI permettent aussi la micro gestion des couloirs en site propre. Les couloirs de bus ont pour avantage de fluidifier la circulation des transports en commun, mais ils préemptent une grande part de la chaussée pour un trafic limité. Certaines zones urbaines ou certaines infrastructures surchargées (ponts, tunnels) peuvent être instantanément prosrites à certains types de véhicules en fonction des heures de la journée ou des jours de la semaine.

2.10 Comparaison entre les VSN et les WSN

À notre connaissance, pour l'instant la mobilité des réseaux de capteurs n'est pas largement traitée. La majorité des recherches existantes considèrent des réseaux statiques. Dans cette section, nous allons brièvement illustrer les différences entre les réseaux de capteurs statiques et mobiles. Un réseau de capteurs est constitué d'un ensemble des nœuds déployé dans une zone d'intérêt dans le but de la surveiller, et de transmettre les informations à l'utilisateur final (l'observateur).

Un réseau de capteurs statique **WSN** ne considère aucune mobilité des nœuds, ni de l'observateur, ni de la zone d'intérêt. Dans ce cas, les capteurs sont regroupés pour capter par

exemple la température dans une région déterminée. Cela exige une mise en place initiale des infrastructures de communication afin de créer le chemin entre l'observateur et les capteurs.

D'autre part, dans un réseau de capteurs mobile **VSN** les nœuds, la zone d'intérêt, et l'observateur sont mobiles. Si les nœuds se déplacent, cela implique un changement de la zone d'intérêt qui devient alors « mobile ». Comme la zone se change, l'observateur sera obligé de reconstruire le chemin d'accès et de briser l'ancien. Dans ce cas l'observateur a intérêt à construire plusieurs chemins entre lui et les nœuds et à choisir le plus bénéficiaire. Comment un nœud peut-il être mobile ? Il peut être attaché à un robot, à un être humain, véhicule, etc. Par exemple dans des applications militaires, les nœuds peuvent être attachés à des soldats ou des camions, ou bien dans d'autres cas attachés à des animaux pour suivre leurs mouvements.

L'objectif des réseaux de capteurs mobiles est de recueillir plus d'informations sur un environnement en utilisant moins des nœuds capteurs, et de permettre au réseau d'organiser lui-même ses nœuds. En outre, il devient capable de déplacer ses capteurs dynamiquement selon les changements environnementaux, ce qui le rend adaptable à l'évolution de son environnement. [28]

Bien que les **VSN** et les **WSN** présentent plusieurs caractéristiques communes, mais ils se différencient en plusieurs aspects [29] :

- ✚ La caractéristique principale des nœuds constituant un **VSN** est la mobilité, tandis que les nœuds capteurs dans un **WSN** sont statiques.
- ✚ Dans les **VSN** la communication peut s'effectuer entre des nœuds quelconques du réseau, tandis que dans un **WSN** la communication est à partir des nœuds puits.
- ✚ Les **VSN** sont caractérisés par une plus faible densité par rapport aux **WSN**.
- ✚ Dans un **VSN** tous les nœuds sont égaux, de ce fait la panne de n'importe quel nœud a la même importance, tandis qu'un **WSN** est plus sensible à la panne des nœuds puits qu'à celle des capteurs.

	WSN	VSN
Objectif	But ciblé	Général/Communication
Collaboration	Nœuds collaborent ensemble pour le même objectif	Chaque nœud à son propre objectif
Flux des données	Many-to-one	Any-to-Any, One-to-All, One-to-Many
Identité	Très grand nombre des nœuds sans ID	Présence de la notion d'ID
Principale facteur	Ressource d'énergie	Débit, QoS
Type de communication	Broadcast	Point'Point (Unicast), Multicast, Broadcast
La mobilité 3	Les nœuds sont statiques	Les nœuds sont mobiles
Capacité de calcul	Faible capacité de calcul	Pouvoir de calcul
Espace de stockage	Faible capacité de stockage	Puissance de stockage
Capacité de communication	Faible capacité de communication	Réseaux de communication fiable
Consommation d'énergie	Limitée	N'ont pas de limite en termes d'énergie
Volume des données	Un petit volume des données générées sur les types d'applications	Un grand volume des données générées

Tableau 2.1 : Comparaison entre les réseaux WSN et VSN

2.11 Déploiement des STI dans le monde

Le développement des **STI** représente un coût considérable. La mise en place de l'infrastructure comporte quatre postes de coût : les équipements embarqués du véhicule

VSN, le téléphone portable (ou la carte SIM insérée dans un boîtier fixe à bord du véhicule), l'équipement de bord de route (EBU) et la création d'un centre de gestion des flux d'information. A ces dépenses viennent s'ajouter les budgets de fonctionnement (applications et télécommunications) et de maintenance.

Le déploiement des **ITS** va avoir un impact financier important pour l'investissement et l'exploitation des infrastructures, pour le financement du développement des applications et pour le prix à payer par l'utilisateur final. L'un des points les plus délicats concerne l'évaluation du prix que les utilisateurs finaux, publics et privés, seront prêts à payer pour avoir accès à ces nouveaux services.

Les solutions mises en œuvre par les constructeurs doivent être relayées par les fournisseurs de service. Les gouvernements doivent trouver entre eux des accords de partage internationaux des informations et mettre à disposition des gérants de réseau des infrastructures adaptées. Il faut donc que chacune des parties prenantes s'engage en concertation avec les autres et mette en place un schéma de convergence. La nécessité de coopération entre les différents acteurs des secteurs publics et privés est la raison d'être d'organisations comme **ERTICO – ITS Europe**. Qui offre une plateforme et des services adaptés aux besoins pour accomplir le développement et le déploiement des **STI**. L'enjeu le plus important est la définition d'un protocole de communication permettant l'établissement de passerelles entre les systèmes et la constitution d'un « back office » unique, autorité technique et politique gérant simultanément toutes les dimensions du trafic. A ce jour, Singapour est le seul Etat qui soit parvenu à ce niveau d'intégration.

2.12 Conclusion

Les réseaux de capteurs véhiculaires **VSN** sont passés du stade de simple curiosité pour revêtir aujourd'hui un intérêt certain aussi bien du point de vue de l'industrie automobile que des opérateurs des réseaux et services. Ces réseaux sont en effet une classe émergente des réseaux sans fil permettant des échanges des données entre véhicules ou encore entre véhicules et infrastructure.

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur les réseaux véhiculaires par l'exposition du concept de réseau de capteurs véhiculaire (**VSN**) avec ses différents services. Puis nous avons présenté les différentes caractéristiques et avantages liés aux **VSN**.

Dans le chapitre suivant, nous allons simuler et interpréter les résultats pour chaque type des réseaux de capteurs (**WSN, VSN**) étudié précédemment.

Chapitre 3

La simulation

Sommaire

3.1 Introduction

3.2 Présentation de network simulator

3.3 La simulation

3.4 Conclusion

3.1 Introduction

Face à la complexité des réseaux de communication, la simulation a été et reste toujours l'outil privilégié pour évaluer les performances de réseau et étudier le comportement des protocoles. Nous pouvons facilement modifier les conditions de fonctionnement du réseau et comparer les mesures d'intérêt d'un scénario à autre.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation pour chaque type des réseaux de capteurs (traditionnel-**WSN**, véhiculaire-**VSN**). Nous avons choisi le routage comme un outil de comparaison entre les deux réseaux, puis nous avons choisi les métriques de performances (la bande passante, le délai et le taux de perte des paquets) comme outil de comparaison entre les deux protocoles de routage (**DSDV**, **AODV**).

3.2 Présentation de network simulator

Le simulateur du réseau **NS2** (Network Simulator-2) est un outil logiciel de simulation des réseaux informatique. Il est principalement bâti avec les idées de la conception par objets, de réutilisation du code et de modularité.

NS-2 est écrit en C++ et utilise le langage **OTCL** (Object Tools Command Language) dérivé de TCL. A travers **OTCL**, l'utilisateur décrit les conditions de la simulation : la topologie du réseau, les caractéristiques des liens physiques, les protocoles utilisés, les communications qui ont lieu. La simulation doit d'abord être saisie sous forme de fichier que NS va utiliser pour générer un fichier contenant les résultats. Mais l'utilisation de l'**OTCL** permet aussi à l'utilisateur de créer ses propres procédures (par exemple s'il souhaite enregistrer dans un fichier l'évolution d'une variable caractéristique du réseau au cours du temps).

Il contient les fonctionnalités nécessaires à l'étude des algorithmes de routage unicast ou multicast, des protocoles de transport, de réservation, des services intégrés, des protocoles d'application.

Pour une documentation générale de **NS**, Nous avons référé à [30] et au tutorial disponible sur les sites web cités ci-dessous.

3.3 Pourquoi choisir NS ?

- ✚ Support pour la recherche en réseau (et l'enseignement des réseaux)
 - Conception des protocoles, études de trafic, etc.
 - Evaluation et comparaison des protocoles.
 - Evaluation de performances.
- ✚ Mise à disposition d'un environnement propice à la collaboration.

- Librement distribué (partage du code, des protocoles,des modèles, etc).
- Permet une comparaison aisée des protocoles aux fonctionnalités similaires.
- Augmente la confiance dans les résultats :
 - ✓ Modèles testés dans des nombreuses situations par beaucoup de chercheurs.
 - ✓ Des nouveaux modèles sont développés par des experts.
- ✚ Plusieurs niveaux de détails dans le simulateur.
 - Niveaux d'abstraction différents (routage, propagation paquets, modèle de trafic, application, etc).
- ✚ NS-2 possède une bibliothèque des modèles et des protocoles relativement riche.

3.4 La simulation

3.4.1 Objectifs

Le but principale de notre simulation est la comparaison entre les réseaux de capteurs (WSN et VSN), qui consiste à mesurer les paramètres de performances (la bande passante, le délai et le taux des paquets perdus) pour les deux protocoles de routage (AODV, DSDV), en jouant sur certain propriétés du réseau tel que la mobilité des nœuds , la taille et la charge du réseau.

3.4.2 Présentation de la méthodologie

Pour les protocoles de routage, le simulateur NS supporte quatre protocoles dont trois sont réactifs (AODV, DSR, TORA), et un proactif (DSDV).

Parmi les protocoles qu'ils nous intéressent, l'algorithme AODV et l'algorithme DSDV.

➤ Métriques de performances

Nous nous sommes intéressés à comparer les deux protocoles AODVet DSDV en mesurant les métriques de performances suivantes :

❖ *Délai*

C'est le temps qui s'écoule entre le nœud émetteur et le nœud récepteur du message. En d'autres termes, le délai de transit représente le temps consommé par un flux pour aller d'une source vers une destination. C'est un paramètre très critique surtout pour les applications de voix (dans ce cas, il ne doit pas dépasser 250 ms pour que l'oreille humaine ne détecte pas de vide).

❖ *Débit garanti (Bande passante)*

C'est la capacité de transmission des données. Il représente le taux de transfert des données maximum entre deux nœuds terminaux dans un réseau. Avec une bande passante énorme, on peut transférer une grande quantité des données.

❖ *Fiabilité*

C'est la capacité d'un réseau d'assurer la bonne livraison des paquets. Elle dépend du canal de transmission et du protocole de transport. Avec un canal de transmission défectueux, on peut subir des conséquences graves telles que :

- *Pertes des paquets.*
- Désordre dans les paquets arrivés.
- Déformation du canal reçu par le récepteur.
- Congestion.

Nous avons choisi les pertes des paquets comme métrique dans nos simulations pour voir la fiabilité du réseau.

3.4.3 L'environnement de simulation

Dans tout environnement de simulation, il existe deux types de paramètres à contrôler un ensemble des paramètres constant et un autre variable. Ce dernier (l'ensemble des paramètres variable) n'est autre que les paramètres permettant la prise de mesure nécessaire à la réalisation des tests de performance du protocole simulé. D'autre part les paramètres constants se résument dans notre cas en se qui suit :

3.4.3.1 Modèle de simulation

Les simulations sont faites sur **NS** version 2.29 sous Windows. Le tableau 3.1 illustre les constantes utilisées pour cette simulation :

Paramètres	valeurs
Couche MAC	IEEE 802.11
Antenne	OmniAntenna : omnidirectionnel
Modèle de propagation radio	TwoRayGround réflexion
Temps de simulation	200s
Surface de simulation	500*500 m ²
Protocole de routage	DSDV, AODV

Tableau 3.1 Paramètres de simulation

3.4.3.2 Modèle de trafic

Dans notre travail, **Nous** avons choisi que les sources de trafics soient à débit constant **CBR** (Constant **B**it **R**ate). Le trafic entre les nœuds ait produit en utilisant un générateur de trafic qui est caractérisé par les paramètres suivants :

Paramètres	valeurs
Taille des paquets de données	512 octets
Intervalle inter paquets	0.25s
Maximum des paquets	1000

Tableau 3.2 Paramètres de générateur de trafic

3.4.3.3 Modèle de mobilité

	WSN	VSN
Modèle de mobilité	RWP	CityMob

Tableau 3.3 les modèles de mobilité pour les deux réseaux de capteurs

➤ **Modèle de mobilité random waypoint (RWP)**

Dans ce modèle la mobilité des nœuds est typiquement aléatoire, tous les nœuds sont distribués uniformément dans l'espace de simulation. **RWP** consiste à :

- un placement d'un certain nombre des mobiles dans une zone carrée de laquelle ils ne peuvent sortir.
- L'affectation d'une position, d'une vitesse et d'une destination initiale à chaque mobile.
- Le déroulement proprement dit de la simulation, où à chaque fois que les mobiles atteignent leur destination dans le carré, ils repartent vers une autre destination choisi aléatoirement après un éventuel temps de pause.

Du fait de la simplicité de ce modèle, il n'est pas toujours adapté pour décrire des comportements de mobilité complexes.

➤ **Modèle Citymob [31]**

Citymob est un générateur de modèle de mobilité particulièrement conçu pour étudier les différents modèles de mobilité dans les réseaux de véhicules, et leur impact sur les

performances de communication d'inter-véhicule. Cet outil est complètement compatible avec l'outil de la simulation NS-2.

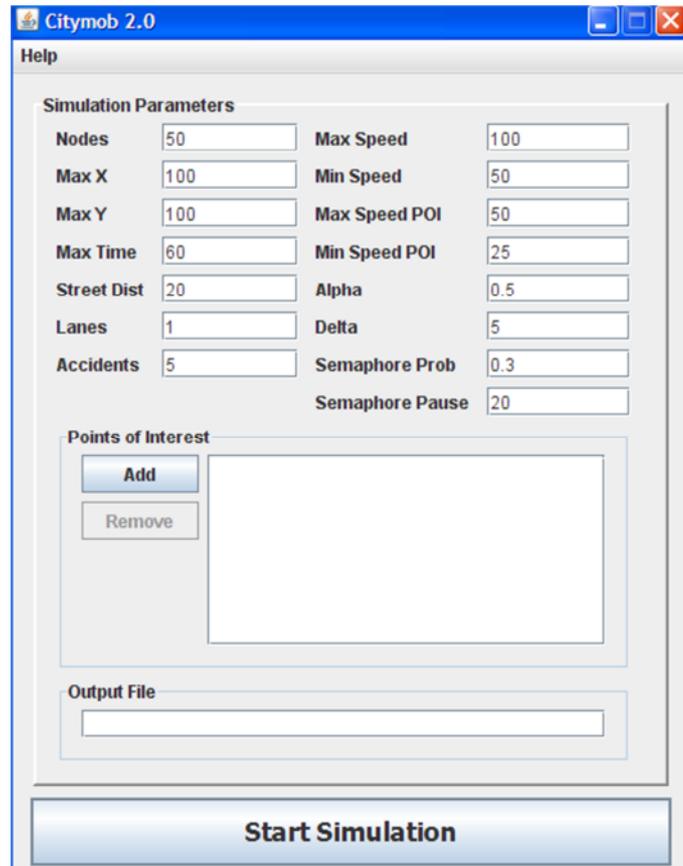


Figure 3.1 : Le modèle de mobilité Citymob

3.4.4 Scénarios de simulation

Nous avons varié deux types de paramètre caractérisant un réseau, un paramètre de mobilité (vitesse de déplacement), et des paramètres d'état du réseau (la taille et la charge du réseau).

✚ Simulation pour WSN (réseau de capteur traditionnel)

3.4.4.1 L'impact de la mobilité :

Nous avons basé dans notre étude sur un paramètre de la mobilité:

- la vitesse de déplacement des nœuds: c'est un paramètre important qui caractérise les réseaux mobiles. Nous avons varié la vitesse maximale de déplacement entre 40m/s et 100m/s.
- les autres paramètres seront fixés à leurs valeurs moyennes

Scénario 1: La vitesse de mobilité

Dans ce scénario, nous faisons varier la vitesse de mobilité des nœuds. Les valeurs montrées dans le tableau 3.4 représentent la valeur maximale que peut atteindre un nœud (la vitesse varie entre 40-100m/s).

Nombre de nœuds	50
Temps de pause	100s
Nombres de connexions	25
Vitesses de mobilité	40, 60, 80,100m/s

Tableau 3.4 : Paramètres de simulation pour scénario 1

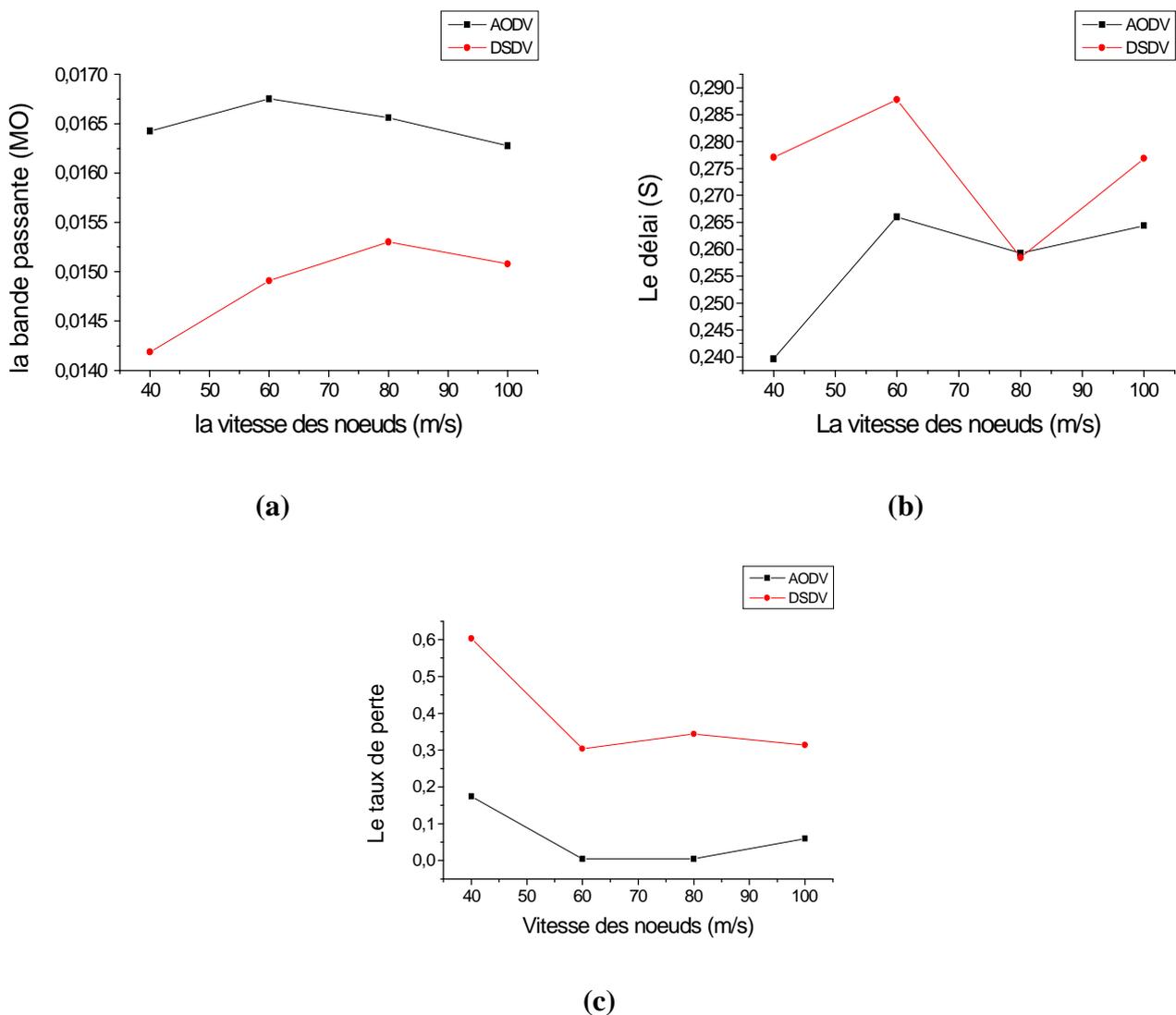


Figure 3.2 : la bande passante, le délai, le taux de perte en fonction de la vitesse des nœuds

- **La bande passante :** **DSDV** offre une bande passante moindre que **AODV**, car elle est consommée par l'échange des informations de routage, donc **AODV** est mieux.
- **Le délai :** Le **DSDV** provoque un délai plus grand. Ceci s'explique par le fait que le déplacement des nœuds avec une certaine vitesse implique un changement rapide de la topologie du réseau, qui implique à son tour une mise à jour des tables de routage plus difficile. Par contre le protocole **AODV** n'est pas très influencé par la vitesse.
- **Le taux de perte :** La vitesse de déplacement des nœuds influence l'état du réseau, ce qui pose un problème pour le protocole **DSDV**. Dans des cas pareils **AODV** est mieux placé pour le routage.

3.4.4.2 L'impact de l'état de réseau :

Dans ce point, nous avons étudié deux paramètres : la taille du réseau et le nombre de connexions. Ils sont deux paramètres importants, car dans les réseaux de capteurs, un nœud joue un double rôle: routeur et station. La taille du réseau et le flux qui y circule, influe directement sur le routage.

- La taille du réseau: Nous avons fait des simulations pour différentes taille du réseau (petite, moyenne, grande).
- Nombre de connexions: donne une idée sur le flux qui circule dans le réseau.
- Les autres paramètres restants seront fixés à leurs valeurs moyennes.

Scénario 2 : Nombre des nœuds (taille du réseau) :

Dans ce scénario, nous avons considéré des réseaux des différentes tailles (petites, moyennes et grandes)

Nombre des nœuds	40, 70, 80, 100
Temps de pause	100s
Maximum de connexions	25
Vitesse de mobilité	10m/s

Tableau 3.5 : Paramètres de simulation pour scénario 2

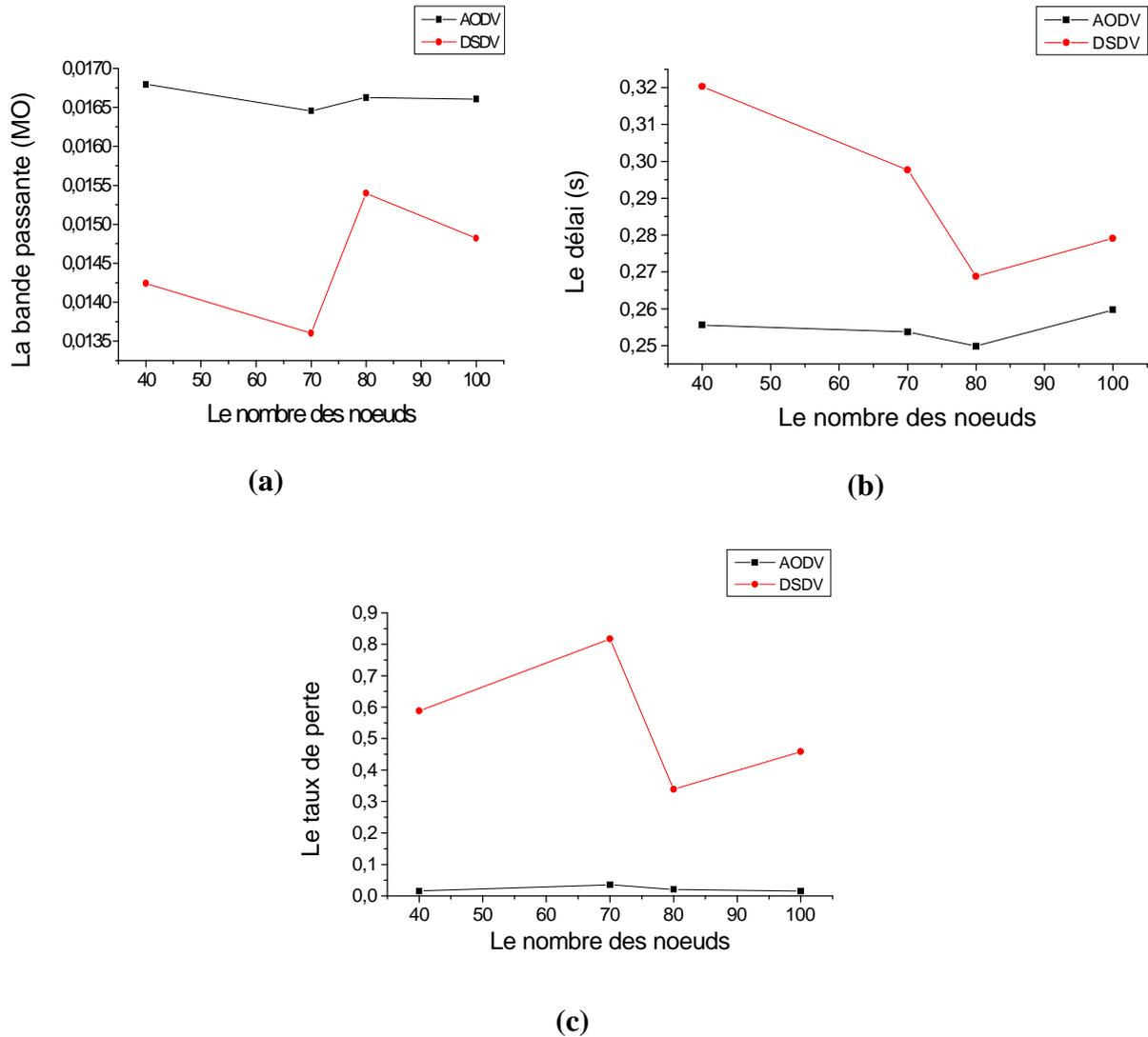


Figure 3.3 : la bande passante, le délai, le taux de perte en fonction du nombre des nœuds

- **La bande passante** : Dans le cas général la bande passante augmente l'orsqu'on augmente la taille du réseau. Globalement **AODV** offre une bande passante plus large par rapport à **DSDV**.
- **Le délai** : On remarque que le protocole **AODV** a un délai inférieur à celui du protocole **DSDV**. Donc **AODV** réagit mieux que **DSDV**.
- **Le taux de perte** : Le protocole **AODV** se comporte mieux que le protocole **DSDV** pendant toute la période de variation des nombres des nœuds.

Scénario 3 : Nombre de connexions

Nombre de nœud	50
Temps de pause	100s
Nombre de connexions	30, 40, 50, 60
Vitesse de mobilité	10m/s

Tableau 3.6 : Paramètres de simulation pour scénario 3

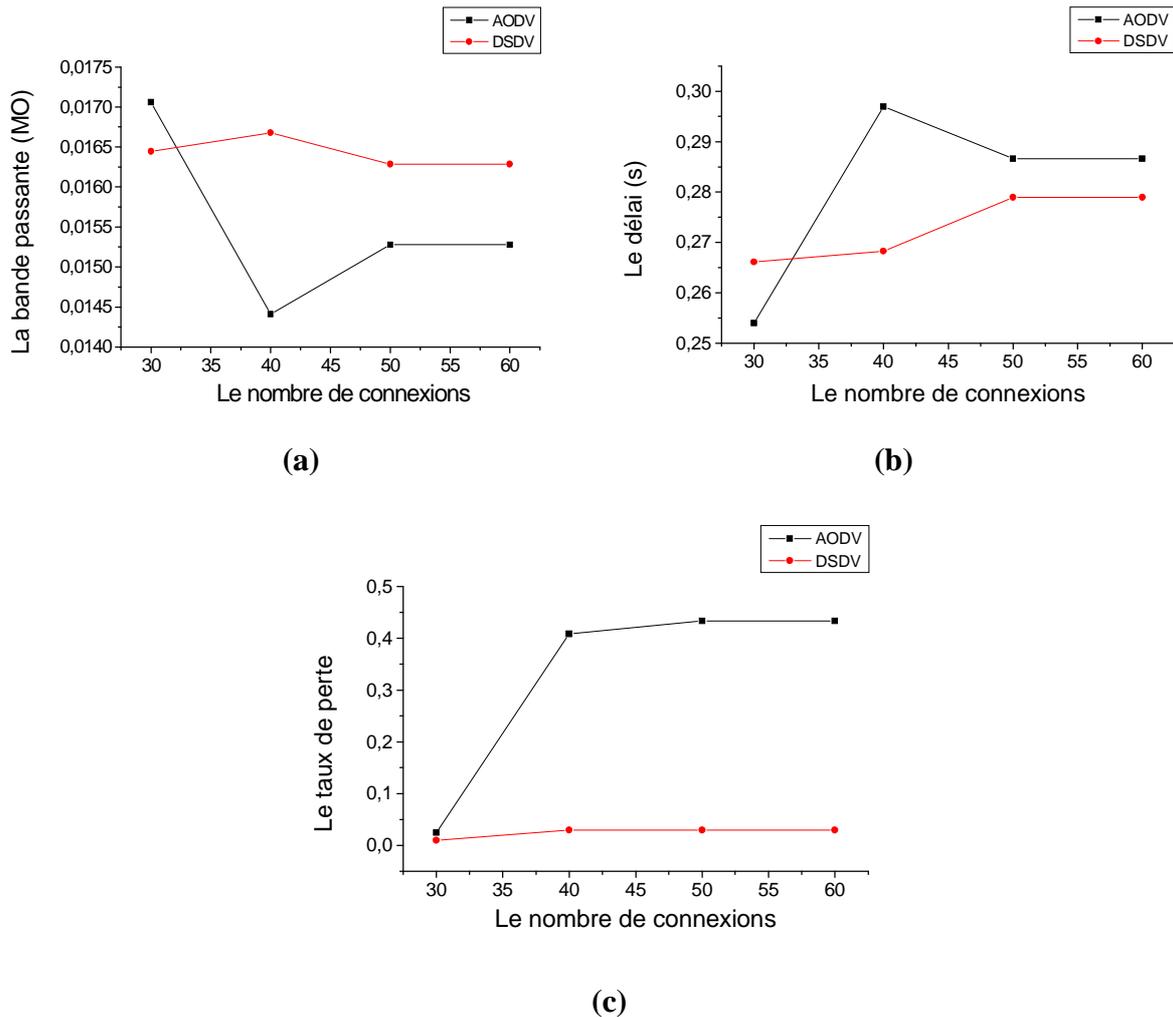


Figure 3.4 : la bande passante, le délai, le taux de perte en fonction du nombre de connexions

- **La bande passante :** AODV fournit une valeur maximale de la bande passante, mais au moment où le nombre de connexions entre les nœuds augmente la bande passante diminue. DSDV présente des meilleurs résultats.
- **Le délai :** Pour les réseaux de petite charge, AODV a un meilleur délai que DSDV, mais pour les réseaux de grande charge DSDV réagit mieux que AODV. Ceci

s'explique par le fait que **DSDV** a une vue globale sur le réseau et il peut trouver le chemin rapidement, mais **AODV** utilise l'inondation de tout le réseau pour trouver un chemin, ce qui va prendre un temps considérable lorsqu'il s'agit des réseaux de grande charge, c'est pour cela **DSDV** a un meilleur délai que **AODV**.

- **Le taux de perte :** Comme le réseau est plus stable, **DSDV** se comporte mieux que **AODV** pendant toute la période de variation des nombres de connexions.

📌 Simulation pour VSN (réseau de capteur véhiculaire)

Scénario 1: La vitesse de mobilité

Nombre des véhicules	50
Temps de pause	100s
Nombres de connexions	25
Vitesses de mobilité	60, 80, 120 Km/h

Tableau 3.7 : Paramètres de simulation pour scénario 1

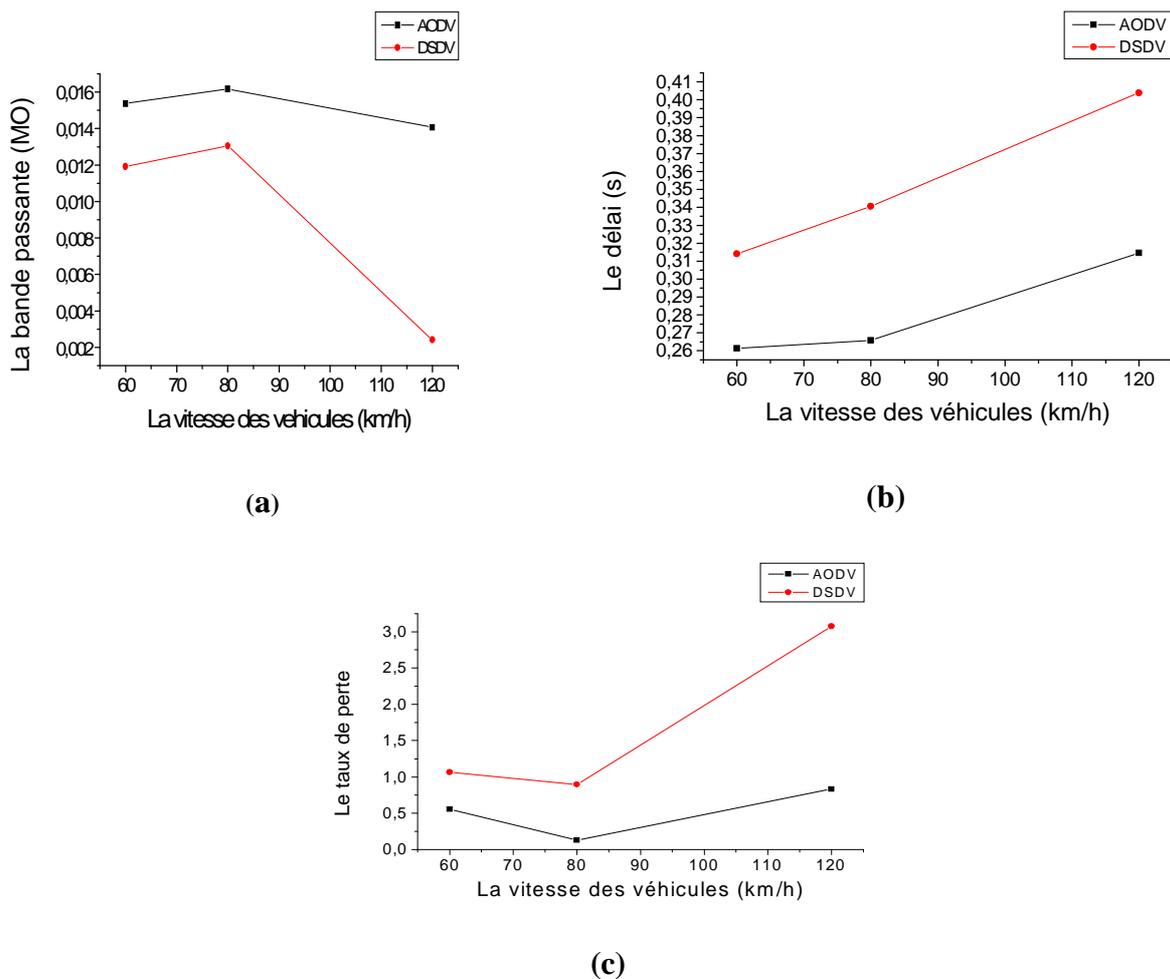


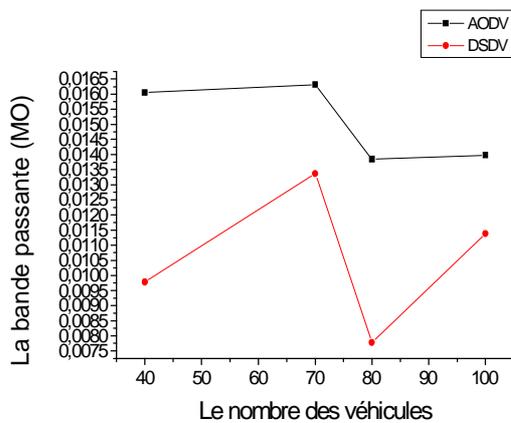
Figure 3.5 : la bande passante, le délai, le taux de perte en fonction de la vitesse des véhicules

- **La bande passante :** Malheureusement **DSDV** atteint rapidement sa limite avec l'accroissement de la mobilité, les changements topologiques sont fréquents. Le réseau sera ainsi constamment inondé par les paquets de contrôle, ce qui réduit considérablement la bande passante. Conséquemment **DSDV** offre une bande passante moindre que **AODV**, car elle est consommée par l'échange des informations de routage. Donc **AODV** est mieux .
- **Le délai :** Le **DSDV** provoque un délai plus grand. Ceci s'explique par le fait que le déplacement des véhicules avec une certaine vitesse implique un changement rapide de la topologie du réseau, qui implique à son tour une mise à jour des tables de routage plus difficile. Par contre le protocole **AODV** n'est pas très influencé par la vitesse. Il provoque un faible délai par rapport à **DSDV**.
- **Le taux de perte :** La vitesse de déplacement des véhicules influence l'état du réseau, ce qui pose un problème pour le protocole **DSDV**. Donc **AODV** est mieux placé pour le routage.

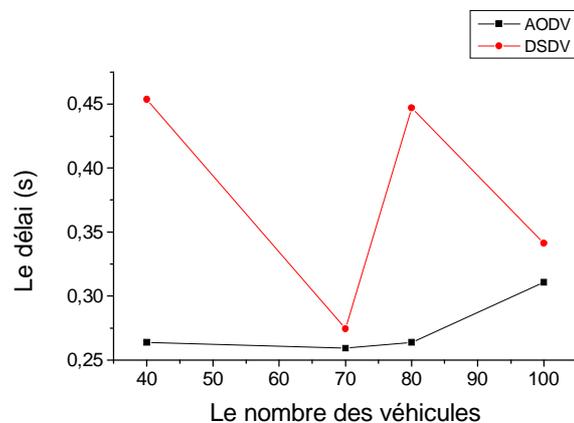
Scénario 2 : Nombre des véhicules (taille du réseau)

Nombre des véhicules	40, 70, 80, 100
Temps de pause	100s
Maximum de connexions	25
Vitesse de mobilité	60 Km/h

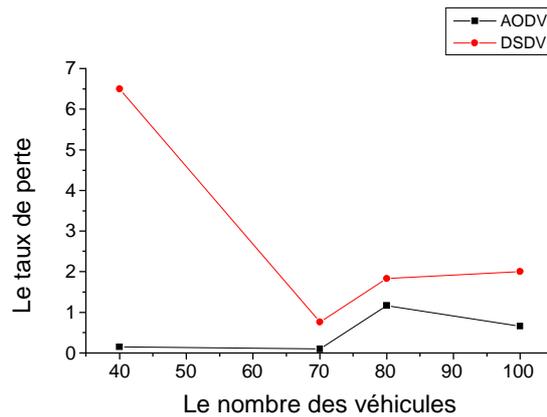
Tableau 3.8 : Paramètres de simulation pour scénario 2



(a)



(b)



(c)

Figure 3.6 : la bande passante, le délai, le taux de perte en fonction du nombre des véhicules

- **La bande passante :** Le **DSDV** offre une bande passante moindre que **AODV**, car elle est consommée par l'échange des informations de routage. Donc **AODV** offre une bande passante plus grande et plus stable que **DSDV**.
- **Le délai :** **AODV** provoque un délai petit par rapport à **DSDV** car le **AODV** réduit le nombre de diffusion des messages et cela en créant les routes à la demande.
- **Le taux de perte :** **AODV** se comporte mieux que **DSDV** quelque soit la taille de réseau.

Scénario 3 : Nombre de connexions

Nombre des véhicules	50
Temps de pause	100s
Nombre de connexions	30, 40, 50, 60
Vitesse de mobilité	60 Km/h

Tableau 3.9 : Paramètres de simulation pour scénario 3

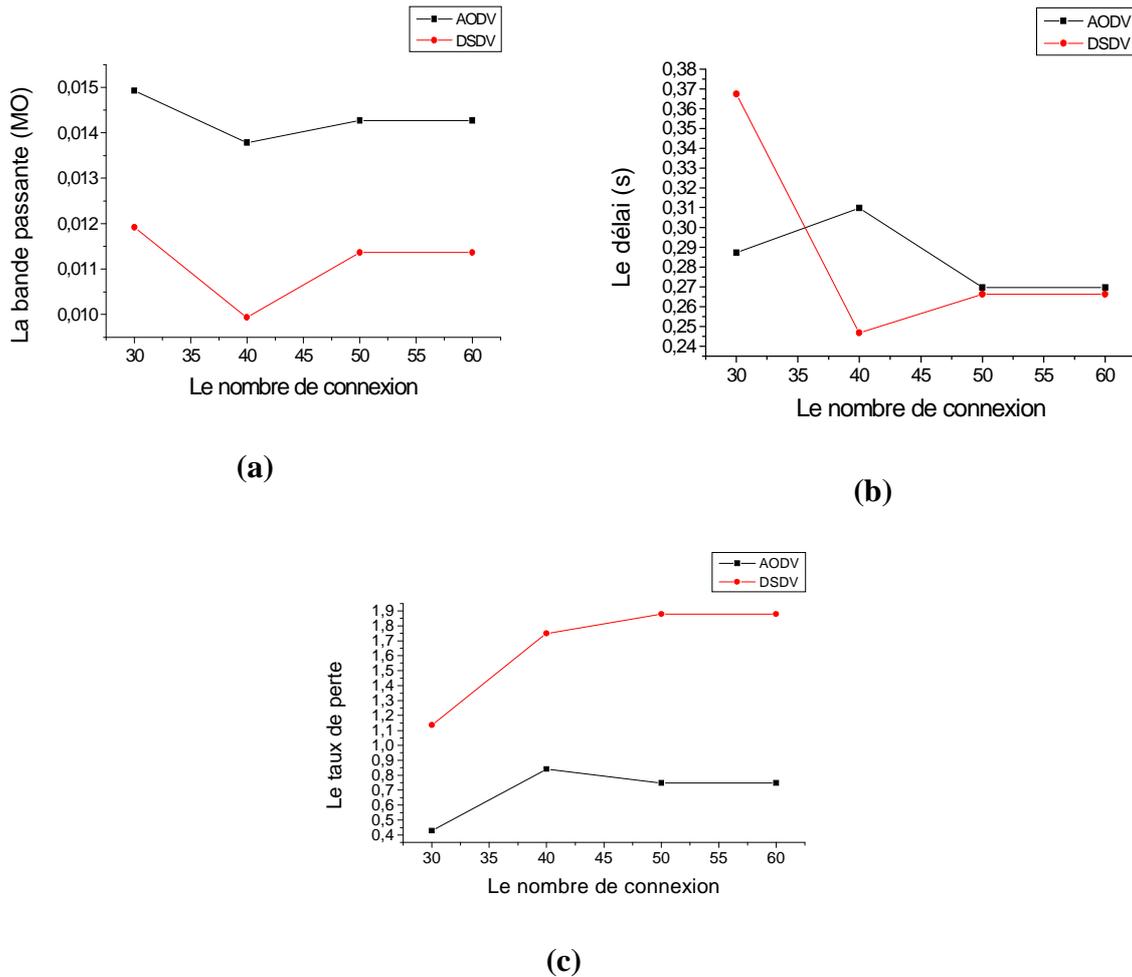


Figure 3.7 : la bande passante, le délai, le taux de perte en fonction du nombre de connexions

- **La bande passante :** AODV a une bande passante large et stable par rapport à DSDV quelque soit la charge de réseau.
- **Le délai :** Pour les réseaux de petite charge, AODV a un meilleur délai que DSDV, mais pour les réseaux de grande charge, DSDV réagit mieux que AODV. Ceci s'explique par le fait que DSDV a une vue globale sur le réseau et il peut trouver le chemin rapidement, mais AODV utilise l'inondation de tout le réseau pour trouver un chemin, ce qui va prendre un temps considérable lorsqu'il s'agit des réseaux de grande charge, c'est pour cela DSDV a un meilleur délai que AODV.
- **Le taux de perte :** AODV provoque une perte des paquets moindre que DSDV donc AODV se comporte mieux.

3.4.5 Résultat des simulations

Les résultats des simulations sont illustrés sur le tableau suivant :

	Réseaux véhiculaires (VSN)									Réseaux traditionnels (WSN)								
	impact de la mobilité			impact de l'état de réseau						impact de la mobilité			impact de l'état de réseau					
	vitesse de mobilité			nombre des nœuds			nombre de connexions			vitesse de mobilité			nombre de nœuds			nombre de connexions		
	faible	moyenne	forte	faible	Moyenne	forte	faible	moyenne	Grande	Faible	moyenne	forte	faible	moyenne	forte	faible	moyenne	grande
AODV	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	
DSDV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	
<p>AODV est le meilleur dans tous les scénarios de Simulation.</p>									<p>DSDV est le mieux adapté pour les réseaux de moyenne et grande charge, tandis qu'AODV est mieux pour les réseaux denses avec mobilité.</p>									

Tableau 3.10 : Résultats des simulations

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une simulation des deux protocoles dans deux environnements différents (les réseaux de capteurs traditionnel-**WSN** et les réseaux de capteurs véhiculaires-**VSN**). La simulation a révélé que l'approche proactive est adaptée dans les **WSN** pour les réseaux de moyenne et grande charge, tandis que l'approche réactive est adaptée pour les réseaux denses avec mobilité. Pour les **VSN**, les résultats sont montrés que l'approche proactive n'est plus adaptée pour ce type de réseau, par contre l'approche réactive est la mieux placée.

Conclusion générale

Conclusion & perspectives

Les réseaux de capteurs (**WSN**, **VSN**) vont sans doute dans les années à venir constituer un développement technologique majeur apportant des solutions aux différents problèmes dans plusieurs domaines d'applications liés à la sécurité routière, la santé, la domotique, etc. Ceci nous permet de penser que les réseaux de capteurs feront bientôt partie intégrante de nos vies.

Dans ce mémoire nous avons essayé de faire une étude comparative entre les réseaux de capteurs traditionnels et les réseaux de capteurs véhiculaires. L'étude théorique nous a permis de connaître le domaine de ces réseaux de capteurs en générale. Cette étude théorique était suivie par une simulation dont le but d'analyser les comportements des protocoles de routage (**AODV** et **DSDV**) dans les deux environnements.

Les résultats de simulations ont montré que l'approche réactive est meilleure pour les **VSN**, tandis que l'approche proactive est adaptée dans les **WSN** pour les réseaux de moyenne et grande charge.

Chaque réseau (**WSN**, **VSN**) a ses propres caractéristiques et ses particularités donc forcément il faut adapter à chacun de ces réseaux des protocoles spécifiques à ses environnements par conséquent les approches de routage seront différent pour les deux types de réseaux de capteurs.

La conception et l'implémentation d'un nouveau paradigme de routage dans ces types de réseaux posent plusieurs problèmes. Ces problèmes sont liés, d'une part, à l'instabilité et à la capacité limitée du médium de communication sans fil, et d'autre part, à la grande mobilité des véhicules qui provoquent un grand changement de topologie. Tous ces problèmes ont contraint les chercheurs à réviser toute la pile des protocoles de communication traditionnelle. Ce qui a ouvert les portes pour plusieurs travaux de recherche concernant le routage.

Perspectives

Ce qui reste à faire qui constitue une suite de ce travail :

- Après cette simulation nous avons constaté que les capteurs, ces dispositifs qui forment un réseau quant ils communiquent entre eux, exigent des protocoles de routage plus performants. Donc généraliser l'étude pour d'autres protocoles.
- Cette comparaison ouvre des horizons pour d'autres axes de recherches liés aux systèmes de transports intelligents.
- Ainsi, déterminer finement les points de changement qui désigne quelle approche de routage est plus commode pour chaque réseau.

Bibliographie

Références bibliographiques

- [1] Fatima Zohra Benhamida, «Tolérance aux Pannes dans les Réseaux de capteurs sans fil », Mémoire Magister, Ecole Doctorale Oued-Smar Alger, 2008.
- [2] C.Y. Chong and S.P. Kumar, “Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges”, In Proceedings of the IEEE, vol.91, no.8, pp. 1247-1256, 2003.
- [3] I.F. Akyildiz, Y. Sankara Subramaniam, E. Cayirci, “Wireless sensor networks ”, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, USA, 20 December 2001.
- [4] Archana Bharathidasan, Vijay ponduru, “Sensor Networks: An Overview”, Department of Computer Science, University of California, 2000.
- [5] Laura Raileanu et Fatemi Nastaran, « Les Réseaux de Senseurs », Rapport de recherche, Haute école d’ingénierie et de gestion du Canton de Vaud, 10/01/2006.
- [6] Kamal Beydoun, « Conception d’un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs », Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comte, 16 décembre 2009.
- [7] C. E. Perkins, P. Bhagwat, “Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computer”, ACM SIGCOMM-94, pp. 234-244, 1994.
- [8] S. Murthy, J. Garcia-Luna-Aceves, "A routing protocol for packet radio networks", Proceeding de IEEE Mobicom, pp 86-95, November 1995.
- [9] C. E. Perkins, E. M. Royer, Samir R. Das, "Ad-hoc on demand distance Vector (AODV) routing", IETF, Intern- Draft, draft-ietf-manet-aodv-05.txt, March 2000.
- [10] J. Kleinrock, A. Silvester, « Protocols for adaptive wireless and mobile computing », IEEE Personal Communications. Vol. 3, 1, February 1996.
- [11] David B.Johnson, A. Maltz, and Josh Broch, ”The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks”, Kluwer Academic Publishers, pp. 153-181, 1996.
- [12] Josh Brosh, David B. Johnson, David A. Maltz, ”The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks”. Internet Draft, March 1998. <http://www.ietf.org/proceedings/98dec/I-D/draft-ietf-manet-dsr-00.txt>.

- [13] Zygmunt J. Haas, Marc R. Pearlman, et Prince Samar, "The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad-Hoc Networks", Internet Draft – draft-ietf-manet-zone-zrp-04.txt, 2002.
- [14] M.Jiang, J. Li, Y.C. Tay, "Cluster Based Routing Protocol", IETF Draft, 1999. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-cbrp-spec-01.txt>.
- [15] M. J. Brown, "Joint Biological Remote Early Warning System", Users Guide Developed for the JBREWS Project, Technical Report LA-UR-99-4676, Los Alamos National Laboratory of California University, 1999.
- [16] P. Johnson and D. Andrews, "Remote continuous monitoring in the home", Journal of Telemedicine and Telecare, vol.2, no.2, pp.107-113, June 1996.
- [17] E.M. Petriu, V.Z. Groza, "Sensor-based Information Appliance", IEEE Instrumentation Measurement Magazine, vol.3, no.4, pp.31-35, December 2000.
- [18] Yacine.Challal, « Réseaux de capteurs sans fils », Version 1, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/fr/17/11/2008>.
- [19] Zhengming .Li, « Security Provisioning in VANET », Nov. 17, 2009. www.ece.mtu.edu/.../VANET%20Security-zl-11-1.
- [20] W. Kiess, J. Rybicki, M. Mauve, "On the nature of Inter-Vehicule Communication", Proceedings of the 4th Workshop on Mobile Ad-Hoc Networks, pp. 493-502, Switzerland, March 2007.
- [21] J. Luo and J-P Hubaux, "A survey of inter-vehicle communication", Technical report, EPFL, Lausanne, 2004.
- [22] Elmar Schoch, « Intrusion Detection in VANETs », Sevecom Workshop, Paris, June 27th, 2006.
- [23] Kevin C. Lee, Uichin Lee, Mario Gerla, «Survey of Routing Protocols in Vehicular Ad Hoc Networks », IEEE journal on selected areas in communications, Vol. 17, no. 8, August 2009.
- [24] A. Steed, S. Spinello, B. Croxford, C. Greenhalgh, "Urban Pollution Monitoring", In UK e-Science All Hands Meeting, Nottingham, Septembre 2003.
- [25] Moez. JERBI, « Protocoles pour les communications dans les réseaux de véhicules en environnement urbain », Thèse de Doctorat, Université d'Evry Val d'Essonne, Novembre 2008.

- [26] Les Cahiers du Challenge Bibendum : challenge.bibendum.com
- [27] Youssef Regueb, « Collecte et analyse d'informations à partir de capteurs embarqués en vue de la détection de situations d'engorgement », Mémoire de Master, Université de Havre, Avril 2009.
- [28] Abdallah Makhoul, « Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données », Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Novembre 2008.
- [29] S.L. Wu, Y.C. Tseng, « Wireless Ad Hoc Networking: Personal-Area, Local-Area, and the Sensory-Area Networks », USA, Auerbach publications, ISBN: 0-8493-9254-3, 2007.
- [30] P. Anelli & E. Horlait : NS-2: Principes de conception et d'utilisation, Version 1.3. www-sop.inria.fr/rodeo/personnel/Pierre.Ansel/Manuel_NS1.3.pdf
- [31] Citymob's source code is available at <http://www.grc.upv.es/>.

Tutorial de NS disponible sur :

<http://titan.cs.uni-bonn.de/~greis/ns/>

<http://titan.cs.uni-bonn.de/~greis/ns/nstutorial.tar.gz>

www.ietf.org

www.ieee.org

www.sourceforge.org

Résumé

Le développement des technologies sans fil permet actuellement d'étendre la notion de mobilité pour permettre l'accès à l'information et à la communication n'importe où et n'importe quand. Avec l'émergence des réseaux de capteurs (Traditionnels (**WSN**) et véhiculaires (**VSN**)), des nouvelles thématiques ont été ouvertes et des nouveaux défis ont vu le jour pour répondre aux besoins des personnes et aux exigences de plusieurs domaines d'application. La recherche aujourd'hui s'est beaucoup focalisée sur les réseaux de capteurs véhiculaires (**VSN**), des efforts considérables sont apparus pour introduire l'intelligence dans les systèmes de transport dont le but est d'améliorer la sécurité, l'efficacité et la convivialité dans les transports routiers.

Ces réseaux sont appelés à jouer un rôle important dans la construction de l'Internet du futur, où ils serviront de support à des applications communicantes variées et intégrées à notre vie quotidienne.

Dans ce mémoire, nous avons exploré différents points d'études qui concernent les réseaux de capteurs traditionnels et les réseaux de capteurs véhiculaires, où nous nous sommes intéressés plus particulièrement à une étude comparative entre eux. Notre travail consiste à étudier le comportement des deux réseaux (**WSN**, **VSN**). Deux comparaisons sont faites: la première théorique et la deuxième pratique portera sur le routage avec une approche réactive (**AODV**) et une approche proactive (**DSDV**). Nous avons focalisé notre attention sur les trois critères de performance qui sont: l'évolution de la bande passante, les pertes des paquets et le délai. Les performances de ces protocoles sont étudiées, évaluées et simulées sous **NS-2**.

MOTS- CLES : réseaux de capteurs, **WSN**, réseaux de capteurs véhiculaires, **VSN**, protocole de routage.

Abstract

Currently, the development of wireless technology allows extending the notion of mobility for access to information and communication anywhere and anytime. With the emergence of sensor networks (Traditional (**WSN**) and vehicular (**VSN**)), new themes have been opened and new challenges have emerged to meet the needs of individuals and the requirements of several application areas. Research today is much focused on vehicular sensor networks (**VSN**), considerable efforts have emerged to introduce intelligence into transport systems whose aim is to improve safety, efficiency and conviviality in road transport.

These networks will play an important role in building the Future Internet, where they will serve as a support for communication applications varied and integrated into our daily lives. In this memoir, we explored different points of study that relate to traditional sensor networks and vehicular sensor networks, where we were interested, particularly, to a comparative study between them. Our work consists in to studying the behavior of both networks (**WSN**, **VSN**). Two comparisons are made, the first theoretical one and the second practical will relate to the routing with a reactive approach (**AODV**) and proactive approach (**DSDV**). We have focused our attention on the three performance criteria are: the evolution of the bandwidth, packet loss and delay. The performance of these protocols is evaluated by simulation using **NS-2**.

Key words: Wireless Sensor Network, **WSN**, Vehicular Sensor Network, **VSN**, routing protocols.