

République Algérienne Démocratique et Populaire  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

Université Ammar Telidji LAGHOUAT



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR D'ÉTAT EN  
INFORMATIQUE

OPTION : SYSTÈMES PARALLÈLES ET DISTRIBUÉS

THEME :

# Étude de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

---

Réalisé par

AMEUR AEK Ilyes

YAGOUB Menáa

Proposé et encadré

Mr M.DJOUDI

N° d'ordre : /2008-PFE/DGI  
2007/2008

## REMERCIEMENTS

*En premier lieu, nous remercions Allah qui nous a procuré ce succès.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et reconnaissance à l'égard de notre encadreur Mr. Djoudi Mohamed, la confiance qu'il nous a témoignée et pour ses encouragements qui nous ont été décisifs dans l'accomplissement de ce travail.*

*Notre gratitude va également à nos amis pour leur soutien qui nous a servi à accomplir notre projet. Nous pourrions affirmer également que ce mémoire a vu le jour grâce aux encouragements de beaucoup des membres de notre entourage. Nous gardons pour eux une pensée de reconnaissance éternelle.*

*Enfin, nous tenons vivement à remercier nos familles respectives pour leur encouragement et leur soutien moral et matériel.*

## DEDICACES

*A mes chers parents qui m'ont soutenu durant  
ma vie e et ma scolarité,*

*A mes frères et mes sœurs, A mes grands  
parents, A mes oncles surtout Abdallah et  
Abdelhamid, A mes tantes,*

*A toute la famille AMEUR,  
BABAGHAYOU et YAGOUB.*

*A tous mes amis et en particulier Nadhir,  
Abdou, Yazid, Dady, Bachir, Rida, Menáa et  
l'équipe spéciale de promo.*

*J'exprime mes sentiments les plus sincères et  
les plus profonds en leur dédiant ce modeste  
travail.*

*AMEUR Abdelkader Ilyes*

## DEDICACES

*A mes chers parents qui m'ont soutenu durant  
ma vie et ma scolarité,*

*A mon frère et mes sœurs, A ma grand-mère,  
A mon oncle hanafi, A mes tantes*

*A toute la famille YAGOUB, et toute la  
famille AMEUR, A Mohamed Rebbahi*

*A tous mes amis et notamment Djilali,  
Abdou, Yazid, kada, watya, hita et l'équipe  
spéciale de promo.*

*J'exprime mes sentiments les plus forts et les  
plus profonds en leur dédiant ce modeste  
travail.*

*YAGOUB Menaâ*

# Table des figures

---

<b>Figure 1.1</b> : Différentes catégories de réseaux sans fil.....	3
<b>Figure 1.2</b> : Principales normes de réseaux sans fil.....	4
<b>Figure 1.3</b> : Propagation en vue directe.....	7
<b>Figure 1.4</b> : Effets de propagation.....	8
<b>Figure 1.5</b> : Les différents modes de communication.....	10
<b>Figure 1.6</b> : Cellule.....	11
<b>Figure 1.7</b> : Le réseau cellulaire (GSM).....	12
<b>Figure 1.8</b> : Réseau sans fil point à point (Adhoc).....	12
<b>Figure 1.9</b> : Changement de topologie dans les réseaux ad hoc.....	13
<b>Figure 1.10</b> : Problème de la station cachée.....	14
<b>Figure 1.11</b> : Problème de la station exposée.....	14
<b>Figure 2.1</b> : Le chemin utilisé dan le routage entre la source et la destination.....	18
<b>Figure 2.2</b> : Le mécanisme d'inondation.....	21
<b>Figure 2.3</b> : La décomposition du réseau en groupes.....	22
<b>Figure 2.4</b> : Un exemple de zone dans ZRP.....	28
<b>Figure 2.5</b> : Exemple de propagation de requêtes par bordercasting.....	28
<b>Figure 3.1</b> : Architecture d'un réseau de capteurs.....	34
<b>Figure 3.2</b> : Energie consommée par un noeud de réseau de capteurs.....	35
<b>Figure 3.3</b> : Les composants d'un noeud de capteur.....	37
<b>Figure 3.4</b> : Les composants d'un noeud de capteur.....	39
<b>Figure 3.5</b> : illustration d'une puce MICA.....	39

<b>Figure 3.6</b> : illustration d'une puce MICA2.....	40
<b>Figure 3.7</b> : illustration d'une puce MICA2DOT.....	41
<b>Figure 3.8</b> : caractéristiques des capteurs.....	41
<b>Figure 3.9</b> : Partie logicielle du réseau de capteurs sans fil.....	42
<b>Figure 4.1</b> : Animateur de réseau (NAM).....	54
<b>Figure 4.2</b> : Energie VS nombre de nœuds pour le modèle FreeSpace (réseau épars).....	58
<b>Figure 4.3</b> : Energie VS nombre de nœuds pour le modèle TwoRayGround(réseau épars).....	59
<b>Figure 4.4</b> : Energie VS nombre de nœuds pour le modèle Shadowing(réseau épars).....	60
<b>Figure 4.5</b> : Energie VS nombre de nœuds pour le modèle FreeSpace (réseau denses).....	61
<b>Figure 4.6</b> : Energie VS nombre de nœuds pour le modèle TwoRayGround (réseau denses).....	62
<b>Figure 4.7</b> : Energie VS nombre de nœuds pour le modèle Shadowing(réseau denses).....	63

# Table des matières

---

## Résumé

## Introduction générale

## Chapitre 1: Les réseaux sans fil

1. introduction.....	1
2. Les réseaux sans fils.....	2
2.1. Les différentes technologies de réseaux sans fil.....	2
2.1.1 Les Wireless Personal Area Network (IEEE 802.15).....	4
2.1.2 Les Wireless Local Area Network (IEEE 802.11).....	5
2.1.3 Les Wireless Metropolitan Area Network (IEEE 802.16).....	5
2.1.4- Les Wireless Regional Area Network (IEEE 802.22).....	5
2.1.5- Les Wireless Wide Area Network (IEEE 802.20).....	6
2.2- Communications sans fil.....	6
2.2.1- Ondes radio.....	7
a- la Propagation en vue directe.....	7
b- Evanouissement.....	9
c- Propagation indoor.....	9
2.3- Les caractéristiques des communications sans fil.....	9
2.4 -Modes de communication dans les réseaux sans fils.....	10
3. Les modes opératoires des réseaux mobiles.....	11
3.1- Mode infrastructure (cellulaire).....	11
3.2- Mode ad-hoc.....	12

3.2- Réseaux ad-hoc.....	13
3.2.1 -Problème de la station cachée.....	13
3.2.2-Problème de la station exposée.....	14
3.2.3- Gestion d'énergie en mode Ad-hoc.....	15
3.2.4. Les applications des réseaux mobiles ad hoc.....	15

## **Chapitre 2:Le routage dans les réseaux AD HOC et ses problèmes**

1. Définition.....	18
1.2. Exemple.....	18
2. Problèmes de routage.....	18
2.1. Définition.....	18
2.2. Conception et stratégie de routage.....	20
2.3. Quelques notions.....	21
3. Qualité de protocole.....	22
4. Classification.....	23
4 .1. Proactive et Réactive.....	23
4 .1.1 Les protocoles de routage proactifs.....	23
4.1.2 Les protocoles de routage réactifs.....	25
4.1.3 Les protocoles de routages Hybrides.....	26

## **Chapitre 3: Réseaux de capteurs sans fils**

1. Introduction.....	31
2. Définition.....	31
3. Domaines d'utilisation.....	31
3. 1. Applications militaires.....	32
3. 2. Applications à la sécurité.....	32
3. 3. Applications environnementales.....	32
3. 4. Applications médicales.....	33
3. 5. Applications commerciales.....	33
3. 6. Agriculture.....	33

3. 7. Applications dans le transport.....	33
4. les différentes architectures de réseau de capteurs sans fil.....	33
4. 1. La Topologie en étoile.....	34
4. 2. La topologie en grille (Mesh Network).....	34
4. 3. La topologie hybride.....	35
5. les problèmes (contraintes et facteurs).....	35
5. 1. Limitation de l'énergie.....	35
5. 2. La topologie de réseau.....	36
5. 3. Hétérogénéités.....	36
5. 4. La robustesse.....	36
5. 5. La sécurité des données.....	36
5. 6. La tolérance de fautes.....	36
5. 7. Les médias de transmission.....	36
6. Partie Matérielle.....	37
7. Partie logicielle.....	41
8. Conclusion.....	44

## **Chapitre 4: Simulation et Analyse**

1Network Simulator 2.....	46
Introduction.....	46
Historique.....	46
1.3. Présentation du simulateur NS2.....	46
1.4. Eléments de la simulation.....	48
1.5. Les différents modèles de propagation radio sous NS2.....	48
1.5.1 Le modèle de propagation en espace libre (Free Space model).....	48
1.5.2 Le modèle de propagation utilisant deux rayons (Two-ray ground model).....	49
1.5.3 Le modèle Shadowing.....	49
1.6. Les modèles de mobilité sous NS2.....	50
1.7. Les protocoles de routage disponibles dans NS2.....	51
1.8. Fichier trace.....	52
1.9. L'animateur de réseau NAM.....	53

2. le langage Perl.....	54
2.1 Un aperçu de la syntaxe.....	54
3. MATLAB.....	55
4. Résultats de simulation et analyse.....	55
4 .1. La configuration du noeud mobile.....	55
4. 2.Génération des mouvements et de trafic.....	56
4. 2.1.Génération des mouvements.....	56
4. 2. 2. Génération de trafic.....	56
4 .3. Paramètres de simulation.....	57
4. 4. L'analyse.....	57

**Conclusion générale**

**Bibliographie**

**Annexe1**

**Annexe2**

**Annexe3**

# Résumé

---

*Dans ce mémoire de fin d'études, nous nous intéressons aux réseaux sans fil (RCSF). Dans de tels réseaux, la préservation de l'énergie est une caractéristique essentielle en vue de prolonger la durée opérationnelle du RCSF : tel est le thème essentiel de notre présente étude. L'état de maturité du simulateur de réseaux NS2 (d'ailleurs largement utilisé en recherche) nous a permis de mener une campagne de simulation intensive. Ainsi, les RCSF ont été expérimentés sous trois modèles de propagation : free space, two ray ground et shadowing. De plus, deux types de réseaux ont été considérés : Les réseaux denses et les réseaux épars. Les résultats obtenus et l'analyse faite nous ont permis de mieux cerner et comprendre les aspects pertinents (des RCSF), dont le plus important reste la portée de transmission.*

## **Mots clés**

*Réseaux capteur sans fil, modèle de propagation, portée de transmission, NS2.*

# Abstract

---

*In this work, we focus on the wireless sensor networks (WSN). In such networks, the preservation of energy is an essential feature in order to extend the operational life of WSN.*

*The state of maturity of the simulator networks NS2 (widely used in the research) has allowed us to lead a campaign of intensive simulation. Thus, the WSN have been experienced under three propagation models: free space, two ray ground and shadowing. In addition, two types of networks were considered: the dense networks and sparse networks.*

*The results and analysis have enabled us to identify and better understand the relevant aspects (of WSN); the most important remains the transmission range.*

# Introduction générale

---

*Les avancées technologiques couplées à l'essor sans cesse grandissant des réseaux ont suscité l'intérêt et permis le développement des réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Dans tels réseaux, les nœuds capteurs sont caractérisés par leurs énergies limitées mais surtout non renouvelables d'où le souci permanent de prolonger la durée opérationnelle des RCSF.*

*Le but de ce mémoire est de simuler les RCSF et étudier les facteurs influents sur la consommation de l'énergie.*

*Notre mémoire de fin d'études est structuré en quatre chapitres :*

*Dans le premier chapitre, les concepts fondamentaux des réseaux sans fil (terminologie, normes, caractéristiques et modes de fonctionnement) y sont présents.*

*Le deuxième chapitre concerne le problème de routage dans les réseaux sans fils Adhoc. Un réseau sans fil Adhoc est un réseau ne reposant sur aucune infrastructure matérielle.*

*De ce fait, l'acheminement des données (détermination des chemins) se fait par une contribution des différents nœuds du réseau. A cet effet, les routages Réactif et Proactif sont étudiés en détail.*

*Le troisième chapitre est dédié aux réseaux de capteurs sans fil. Précisément, nous présentons les RCSF, leur domaine d'application ainsi que les composants tant matériel que logiciel des capteurs.*

*Le quatrième chapitre a trait à l'outil de simulation utilisé à savoir NS2, notre scénario de simulation, les résultats obtenus et notre analyse.*

*Enfin, nos travaux se terminent par une conclusion générale mentionnant les connaissances acquises lors d'une telle étude et les perspectives envisageables.*



## Les réseaux sans fil

### 1 Introduction

*Un réseau, au sens général du mot est un ensemble d'objets ou de personnes interconnectés les uns avec les autres permettant de faire circuler des éléments entre eux et ce, selon des règles (protocoles) bien définies.*

*En informatique, un réseau est un ensemble d'équipements informatiques reliés entre eux, grâce à des lignes physiques (câble, fibre optique,...) ou des ondes hertziennes dans le but d'échanger des données numériques[1].*

*Si le lien est un lien physique, (câble, fibre optique,...) on parle de réseau filaire. Si le lien est un lien sous forme d'ondes hertziennes, on parle de réseau sans fil que nous allons détailler par la suite.*

## 2 Les réseaux sans fils

Un réseau sans fils (en anglais wireless network) est, comme son nom l'indique, un réseau dans lequel au moins deux terminaux peuvent communiquer sans liaison filaire. Grâce aux réseaux sans fils, un utilisateur a la possibilité de rester connecté tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus ou moins étendu, c'est la raison pour laquelle on entend parfois parler de "mobilité".

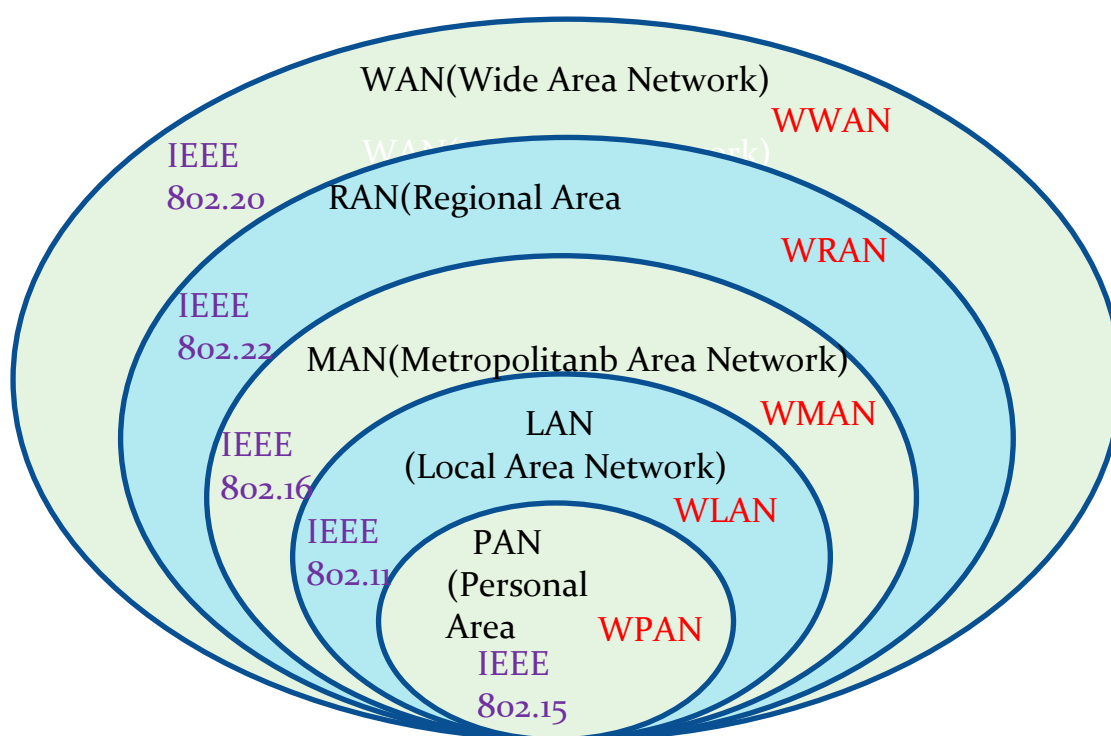
**NB:** Remarque concernant l'orthographe des réseaux sans fils :Malgré l'utilisation de "sans fil", communément admise, les orthographes exactes sont "sans fils" et "sans-fil" On parle ainsi de "réseau sans fils" ou bien "du sans-fil".

Les réseaux sans fils sont basés sur une liaison utilisant des ondes radioélectriques (radio et infrarouges) en lieu et place des câbles habituels. Il existe plusieurs technologies se distinguant d'une part par la fréquence d'émission utilisée ainsi que le débit et la portée des transmissions.

Les réseaux sans fils permettent de relier très facilement des équipements distants d'une dizaine de mètres à quelques kilomètres. De plus l'installation de tels réseaux ne demande pas de lourds aménagements des infrastructures existantes comme c'est le cas avec les réseaux filaires. En contrepartie se pose le problème de la réglementation relatives aux transmissions radioélectriques. De plus les ondes hertziennes sont difficiles à confiner dans une surface géographique restreinte, il est donc facile pour un pirate d'écouter le réseau si les informations circulent en clair. Il est donc nécessaire de mettre en place les dispositions nécessaires de telle manière à assurer une confidentialité des données circulant sur les réseaux sans fils. [2]

### 2.1 Les différentes technologies de réseaux sans fils

Les réseaux sans fil prennent une place importante dans nos sociétés ces dernières années. Des solutions sont en cours de développement par le groupe IEEE aux Etats-Unis et de l'European Telecommunications Standard Institute (ETSI) en Europe. Chacune correspond à un usage différent, en fonction de ses caractéristiques (vitesse de transmission, débit maximum, coût de l'infrastructure, coût de l'équipement connecté, sécurité, souplesse d'installation et d'usage, consommation électrique et autonomie, ...). La figure 1.1 décrit les différentes catégories de réseaux sans fil suivant leur étendue et la figure 1.2 les principales normes de réseaux sans fil. [3]



**Figure 1.1. Différentes catégories de réseaux sans fil**

La présentation des différentes catégories de réseaux se limitera à la présentation des normes sans fil de l'IEEE car elles sont dominantes sur le marché de l'informatique. Les normes de l'ETSI sont plus dédiées au monde des télécommunications.

Les normes IEEE décrivent les deux premières couches du modèle OSI (couche physique et couche liaison). Les couches supérieures, couche réseau et couche transport, définissant les protocoles devant être indépendantes de l'architecture du réseau.

Nom	Norme	Débit	Fréquence
<b>WPAN</b>			
(Bluetooth)	802.15	2Mbit/S	2.45GHz
<b>WLAN</b>			
(WIFI)	802.11b	11Mbit/S	2.4GHz
(WIFI)	802.11a	54Mbit/S	5GHz
(WIFI)	802.11g	54Mbit/S	2.4GHz
<b>WMAN</b>			
(WIMAX)	802.16c	75Mbit/S	10-66GHz
(WIMAX)	802.16 a	75Mbit/S	2-11GHz
(WIMAX)	802.16 e	75Mbit/S	5-6GHz
<b>WWAN</b>	802.20	1	3.5GHz

**Figure 1.2 principales normes de réseaux sans fil**

### 2.1.1 Les Wireless Personal Area Network (IEEE 802.15)

La norme IEEE 802.15 sert à créer de minuscules réseaux sans fil, appelé WPAN pour Wireless Personal Area Network. Ces réseaux sont de l'ordre d'une dizaine de mètres et sont prévus pour interconnecter différents périphériques autonomes entre eux.

Cette norme est souvent appelée Bluetooth, mais ce n'est qu'une application de cette norme. En effet, la norme IEEE 802.15.1 a été adaptée à partir des spécifications Bluetooth déjà existantes. Mais la norme IEEE 802.15 est divisée en quatre parties qui normalisent des gammes de produits en parallèle :

- IEEE 802.15.1 : définit le standard Bluetooth 1.X permettant un débit d'environ 1 Mbit/s. Ce débit est en cours d'être multiplié par 10 avec la norme Bluetooth 2.X. La norme IEEE 802.15.1 est pleinement compatible avec la version Bluetooth 1.1.
- IEEE 802.15.2 : définit des recommandations pour l'utilisation de la bande de fréquence des 2.4 GHz (fréquence utilisé par d'autres réseaux sans fil).
- IEEE 802.15.3 : définit la norme UWB (Ultra Wide Band), ce standard est aussi connu sous le nom de Wimedia, géré par la Wimedia Alliance.
- IEEE 802.15.4 : définit la norme ZigBee qui possède un débit faible mais consommant très peu d'énergie.

### 2.1.2 Les Wireless Local Area Network (IEEE 802.11)

**L**a norme IEEE 802.11 sert à créer des réseaux sans fil, de la taille d'une cinquantaine de mètres. Cette norme est prévue pour transférer des gros débits et se veut le prolongement de la norme IEEE 802.3 pour les réseaux filaires afin de créer un accès permanent au réseau.

Il existe de nombreuses normes dérivées de celle-ci. Les trois plus connues sont la norme IEEE 802.11b qui est à l'origine des réseaux à 11Mbit/s dans la bande de fréquence des 2,4 GHz, la norme IEEE 802.11a qui offre un débit de 54 Mbit/s dans la bande de fréquence des 5,3 GHz et la norme IEEE 802.11g qui est un compromis avec les deux normes précédentes en offrant un débit de 54 Mbit/s dans la bande de fréquence des 2,4 GHz.

Il est intéressant de remarquer que certaines normes dérivées apportent de nombreuses améliorations. Ainsi, la norme IEEE 802.11i met l'accent sur la sécurité d'authentification et le chiffrement des données. La norme IEEE 802.11n doit pouvoir atteindre des débits de 100 Mbit/s sur la bande de fréquence des 2,4 GHz. La norme IEEE 802.11e veut améliorer la qualité de service, surtout dans la transmission de la voix et de la vidéo.

### 2.1.3 Les Wireless Metropolitan Area Network (IEEE 802.16)

**L**a norme IEEE 802.16 est aussi appelée Broadband Wireless Access (BWA). Elle a pour but de créer des réseaux locaux sans fil, de la taille d'une ville. Elle offre une alternative aux réseaux câblés entre différents bâtiments ou au remplacement des lignes xDSL (Digital Subscriber Line).

Il existe plusieurs versions de cette norme. La norme IEEE 802.16 fonctionnant dans la bande de fréquence 10 à 66 GHz a besoin d'antennes en vue directe. La norme IEEE 802.16a fonctionne quant à elle dans la bande de fréquence de 2 à 11 GHz mais ne requiert pas de vue directe pour les antennes. Cette dernière devrait permettre une desserte sur un rayon de 50 kilomètres et atteindre une bande passante totale de 70 Mbit/s. La norme IEEE 802.16c définit les profils d'utilisation dans la bande de fréquence 10 à 66 GHz comme le transport de flux audio/vidéo, la téléphonie numérique, ou les trames ATM. La norme IEEE 802.16e ajoute la mobilité à ces réseaux (Handover).

Enfin, la norme IEEE 802.16.2 permet l'intercompatibilité entre toutes les normes 802.16. Toutes les normes IEEE 802.16 incluent de base la notion de Qualité de Service permettant par exemple le transport de la voix ou de la télévision.

### 2.1.4 Les Wireless Regional Area Network (IEEE 802.22)

**L**a norme IEEE 802.22 vise à créer des réseaux sans fil dont la taille d'une cellule est comprise entre 40 et 100 km, en utilisant la bande de fréquence VHF/UHF (Very High Frequency / Ultra High Frequency) entre 54 et 862 MHz (fréquences de télévision) sans interférer avec les canaux utilisés par la télévision. En effet, les transmissions hertziennes des chaînes de télévision sont séparées par des bandes de fréquences non utilisées. L'espace libre du spectre peut donc permettre à d'autres réseaux d'échanger des données. Pour cela, les protocoles qui implémentent cette norme ne doivent pas interférer avec les transmissions hertziennes. Il est donc prévu une auto-détection des morceaux du spectre qui sont inutilisés.

De même que pour la télévision, la transmission est de type point à multipoint. Cette solution vise à couvrir au maximum le territoire avec des débits et des services de type xDSL.

Ce standard doit pouvoir fonctionner avec les architectures IEEE 802 existantes, et permettre aux réseaux IEEE 802.11 d'avoir de plus gros débits et aux réseaux IEEE 802.16 d'utiliser le spectre VHF/UHF. Cette norme permet donc de fournir un accès sans fil aux régions peu peuplées avec un haut débit.

### 2.1.5- Les Wireless Wide Area Network (IEEE 802.20)

**L**a norme IEEE 802.20, déjà plus connue sous le nom de MBWA (Mobile Broadband Wireless Access) est en cours de développement. Elle doit permettre de créer des réseaux métropolitains mobiles qui ont pour but de permettre le déploiement mondial de réseaux sans fils haut débit à un coût accessible et disponible partout avec une connexion permanente.

De base, cette norme utilise des bandes de fréquences avec licence en dessous des 3,5 GHz. Elle doit permettre des débits maximum par utilisateur de 1 Mbit/s en descente et 300 Kbit/s en montée avec des cellules d'un rayon de 15 km maximum. Elle autorise les terminaux à se déplacer à plus de 250 km/h pour pouvoir être utilisé dans les trains à grande vitesse. D'autres versions sont prévues, utilisant un canal plus large de 5 MHz permettant des débits de 4 Mbits/s en descente et 1,2 Mbit/s en montée pour chaque utilisateur.

A l'inverse de l'UMTS qui fonctionne sur des terminaux centrés voix, cette norme est prévue pour des terminaux centrés sur les données, mais pouvant transférer voix et données.

Elle devrait utiliser les technologies de FHSS, OFDM ou MIMO-OFDM. La qualité de service doit être implémentée pour le transport de la voix en utilisant une logique « pure IP ».

Un réseau « Pure IP » étant un réseau où les données, ou la voix sont transmises avec le protocole IP (Internet Protocol).

## 2.2 Communications sans fil

**D**ans tout système de transmission de données, on définit le support de transmission comme le chemin physique entre l'émetteur et le récepteur. Ce support, aussi appelée média peut être :

- guidé : le long d'un support physique (câble en cuivre, fibre optique,...)
- non guidé : la transmission se fait à travers le milieu ambiant et nécessite l'emploi d'antennes.

Parmi les différentes plages de fréquences utilisables par les communications sans fils, c'est celle correspondante aux ondes radio (30 MHz - 1 GHz) qui est la plus utilisées dans les réseaux sans fils. [4]

## 2.2.1 Ondes radio

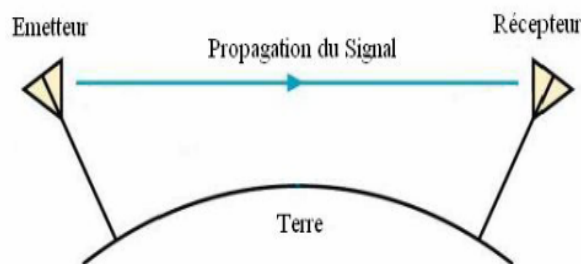
Les ondes radio sont omnidirectionnelles. Les ondes électromagnétiques sont donc propagées dans toutes les directions et peuvent être captées par de nombreuses antennes. La transmission de tels signaux ne requiert donc pas d'alignement spécifique des antennes. La plage de fréquences 30 MHz-1GHz est très efficace pour une diffusion omnidirectionnelle.

En effet, l'atmosphère ne réfléchit pas les ondes de fréquence supérieure à 30 MHz (et les communications via satellite sont donc peu perturbées). De plus, ces fréquences ne sont que peu atténuées par la pluie.

Les interférences les plus importantes, pour ce type de signaux, résultent de la propagation multi trajet, c'est à dire la création de différents chemins de propagation par la réflexion des signaux sur le sol, l'eau et les différents obstacles. A chaque plage de fréquences correspondent un ou plusieurs modes de propagation. Nous nous intéresserons à des ondes de fréquence supérieure à 30 MHz, on parle alors de propagation en vue directe.

## a- La Propagation en vue directe

Dans ce type de transmission, l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice doivent être situées en vue directe l'une de l'autre, comme illustré à la figure 1.3.



**Figure 1.3. Propagation en vue directe**

Le signal reçu sera différent du signal émis étant donné les dégradations qui se produisent durant la transmission. Pour une communication sans fils en vue directe, les sources de perturbation sont [1] :

## 1. affaiblissement :

La puissance d'un signal décroît avec la distance. Pour un média sans guide physique, l'atténuation est fonction de la distance et des conditions atmosphériques. Cet affaiblissement est plus important aux hautes fréquences ce qui entraîne des distorsions plus importantes.

## 2. Affaiblissement en espace libre :

Dans un système de transmission sans fil le signal se disperse avec la distance, ce qui conduit à une diminution de puissance supplémentaire. Cet effet s'ajoute à l'affaiblissement et une antenne recevra donc moins de puissance quand elle est éloignée de l'émetteur.

## 3. Le bruit :

Pendant le trajet, le signal est altéré par des signaux perturbateurs, provenant par exemple d'autres antennes. Ce sont ces signaux qui sont appelés bruit. Ce bruit peut être réparti en plusieurs catégories :

Le bruit thermique : provoqué par l'agitation des électrons, il est présent dans tous les équipements électroniques.

Le bruit d'inter modulation : résultant du partage d'un média par des signaux de fréquences différentes.

La diaphonie : il s'agit d'un couplage perturbateur de trajets de signaux voisins. L'exemple classique, que tout un chacun a déjà expérimenté lors d'une communication téléphonique, est de percevoir une autre conversation. Le bruit impulsif : bruit changeant, apparaissant sous forme de pics irréguliers et dont les causes sont diverses. Il peut provenir de défauts internes à l'antenne ou de perturbations extérieures comme la foudre.

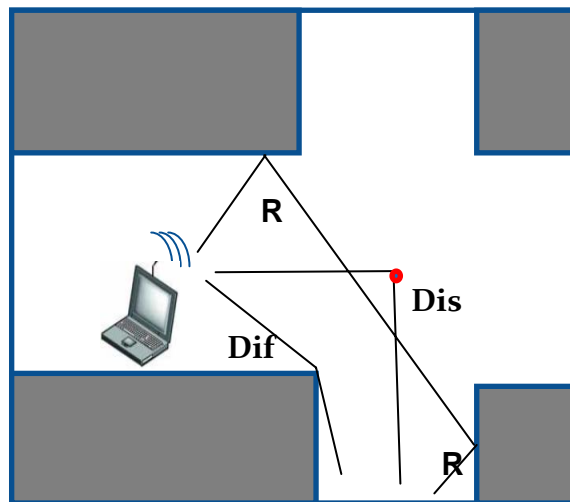
#### 4. Absorption atmosphérique :

La vapeur d'eau et l'oxygène sont deux éléments intervenant fortement dans l'affaiblissement d'un signal, en absorbant une partie de celui-ci.

#### 5. Propagation multi trajet :

Rappelons les trois effets de propagation [5] qui entrent en ligne de compte lors d'une transmission et dont la représentation peut être trouvée à la figure 1.4 :

- La réflexion : survient lorsqu'une onde rencontre une surface qui est plus grande que sa longueur d'onde.
- La diffraction : se produit quand l'onde frappe le coin d'un obstacle plus grand que sa longueur d'onde. Des ondes se propagent alors dans différentes directions à partir de ce coin.
- La dispersion : a lieu quand la taille de l'objet est de l'ordre de la longueur d'onde du signal. Celui-ci est alors dispersé en plusieurs signaux plus faibles.



Légende : réflexion (R), dispersion (Dis), diffraction (Dif)

**Figure 1.4. Effets de propagation**

Dans la plupart des cas, on trouve une multitude d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur. Le signal peut donc être réfléchi un grand nombre de fois et plusieurs copies du signal original peuvent exister. Le récepteur capte alors un signal qui est la résultante du signal principal et de tous les signaux réfléchis qui sont captés par son antenne. Le signal peut être renforcé ou atténué (voire même annulé) par ces différentes composantes et les effets de la propagation multi trajet ont donc une importance considérable sur les transmissions sans fils.

En plus des perturbations dont nous venons de discuter, il y a un autre problème qui surgit dans un environnement mobile, c'est le phénomène d'évanouissement (fading). Ce terme

désigne la variation dans le temps de la puissance du signal reçu, due à des changements dans le support ou dans le chemin de transmission emprunté.

#### b- Evanouissement

Quand une des deux antennes se déplace par rapport à l'autre, l'emplacement relatif des obstacles entre elles est modifié et l'effet de ces obstacles sur la transmission évolue. Comme nous l'avons vu, ces phénomènes vont participer à la propagation multi trajet et avoir une influence constructive ou destructive sur le signal. Le déplacement du mobile va donc induire une variation dans l'apparition des signaux secondaires et influe donc sur le signal reçu.

#### c- Propagation indoor

Dans le cadre d'une communication indoor la situation s'empire : les murs, le plafond et le sol participent à la réflexion et à la dispersion. Les coins des couloirs participent, eux, à la diffraction, sans oublier les meubles qui jouent aussi un rôle. La propagation multi trajet devient plus importante, ce qui rend les transmissions beaucoup plus difficiles en indoor.

De plus, le mouvement des personnes à l'intérieur des bâtiments augmente également la propagation multi trajet. La distance de transmission maximale est donc nettement réduite et sans l'utilisation de relais, il est impossible de couvrir un bâtiment tout entier avec un seul émetteur.

Dans le cas où la station émettrice se situe en dehors du bâtiment où se trouve le récepteur, il faut prendre en compte la pénétration du signal dans le bâtiment. Celle-ci dépend de plusieurs facteurs :

- Les matériaux de construction employés.
- L'orientation du bâtiment.
- La hauteur du bâtiment. En effet la qualité du signal est meilleure en hauteur car les interférences urbaines sont moindres.
- Le pourcentage de fenêtres. La perte de signal à travers une vitre est plus faible qu'à travers un mur. La différence se chiffre aux alentours de 6dB.
- La fréquence de transmission : les pertes dues à la pénétration diminuent avec l'augmentation de la fréquence.

Maintenant que nous sommes familiarisés avec les principes à la base des communications sans fil, nous pouvons nous intéresser aux réseaux sans fil à proprement parler.

### 2.3 Les caractéristiques des communications sans fil

En général, les réseaux sans fil se rapportent à l'utilisation de l'infrarouge ou des signaux des fréquences radio pour partager des informations et des ressources entre les périphériques. De nombreux types d'appareils sans fil sont aujourd'hui disponibles, comme par exemple les terminaux mobiles, les PC de poche, ordinateurs portables, téléphone cellulaire, PDA, les capteurs sans fil, et les récepteurs satellite, etc. [6]

En raison des différences dans la couche physique de ces systèmes, les équipements sans fil et les réseaux montrent des caractéristiques distinctes de leurs homologues filaires mais aussi certaines limitations (inconvenients). Plus précisément :

- 1-L'interférence élevée entraîne une baisse de fiabilité.

2- Une bande passante faible et un taux de transmission plus faible c'est à dire une vitesse beaucoup plus lente par rapport à la vitesse des réseaux filaires, pouvant causer une qualité de service dégradée.

3- Des conditions très variables du réseau:

- Perte de données due à l'interférence.
- Fréquentes déconnexions dues aux mouvements des entités mobiles.
- Puissance de réception diminuant avec la distance.

4- Les ressources limitées : la puissance de calcul, la taille mémoire et la capacité de la batterie sont des caractéristiques inhérentes à toute entité mobile et sont de ce fait réduites.

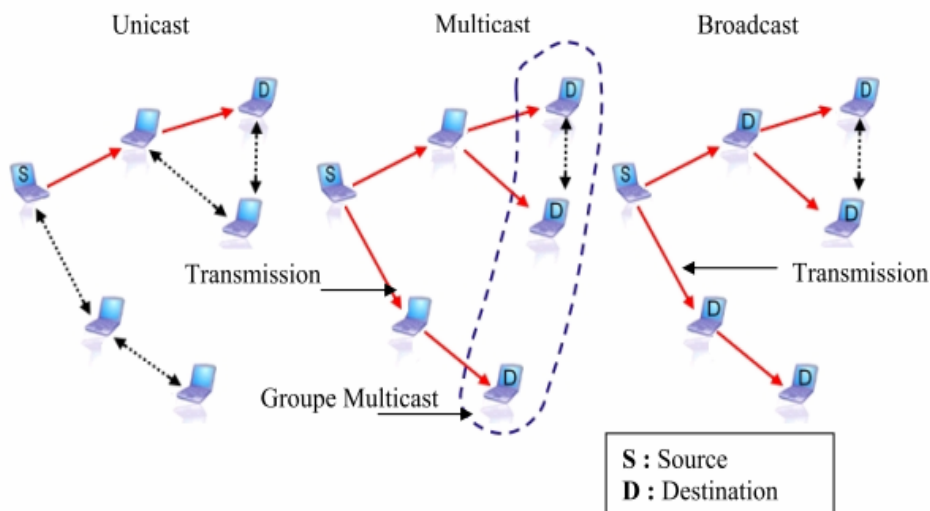
5- Les ressources de transmission limitées:

- Moyen de partage : Toutes les entités mobiles concourent l'accès au médium.
- Disponibilité Limitée des fréquences vu les réglementations restrictives et propres à chaque état

6- Problèmes de sécurité: Etant donné que l'interface radio est accessible par tout le monde, donc le réseau peut être sujet à des attaques.

## 2.4 Modes de communication dans les réseaux sans fils

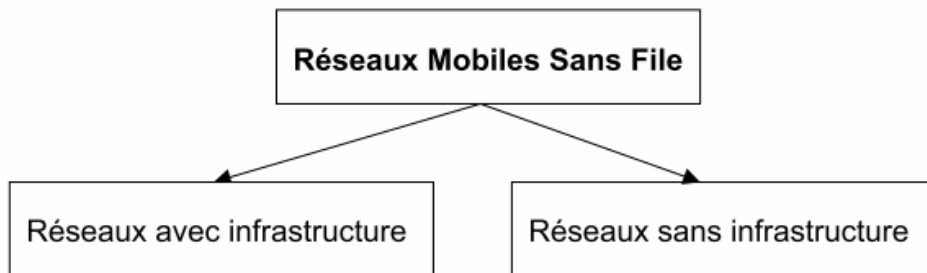
La communication dans les réseaux mobiles utilise plusieurs modes dont : la communication « point à point » ou « Unicast », la communication « multipoint » ou « Multicast », et la diffusion « Broadcast ». Ces trois modes de communication peuvent être schématisés par la figure 1.5.



**Figure 1.5. Les différents modes de communication**

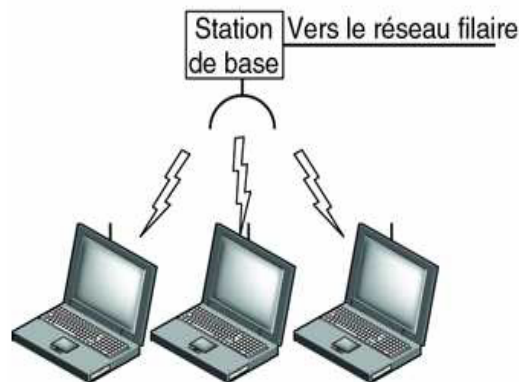
### 3. Les modes opératoires des réseaux mobiles

**L**es réseaux mobiles ou sans fil, peuvent être classés en deux classes : les réseaux avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure.



#### 3.1. Mode infrastructure (cellulaire)

**D**ans ce mode, le réseau sans fil est composé de deux ensembles d'entités distinctes : les « sites fixes » d'un réseau de communication filaire classique, et les « sites mobiles ». Certains sites fixes, appelés stations de bases (SB) sont munis d'une interface de communication sans fil pour la communication directe avec les sites ou les unités mobiles (UM) localisés dans une zone géographique limitée, appelée cellule.

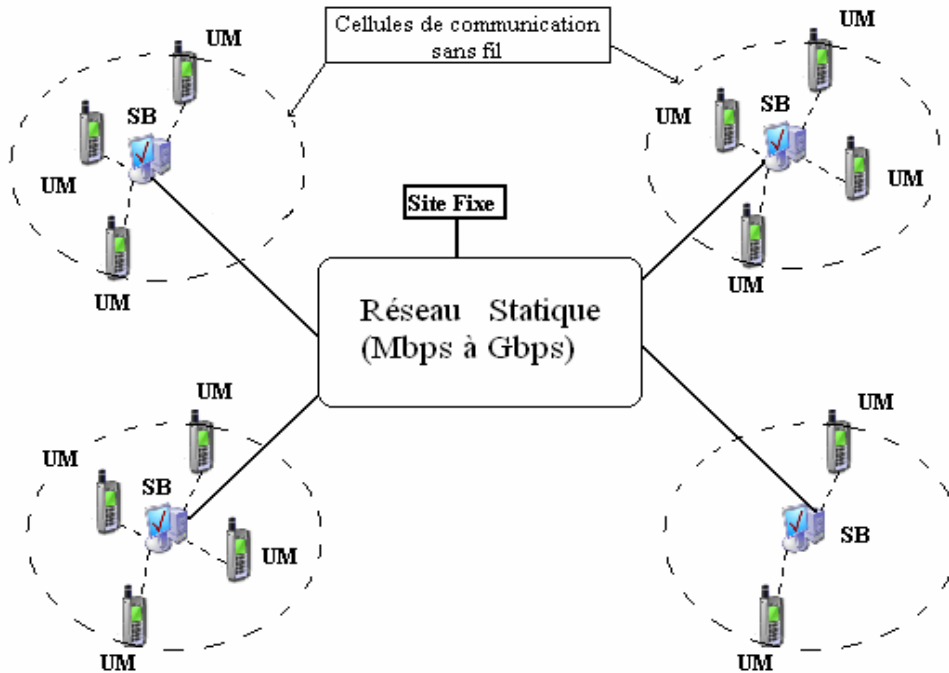


**Figure 1.6. Cellule**

Chaque station de base couvre une cellule à partir de laquelle des unités mobiles peuvent émettre et recevoir des messages. Les sites fixes sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire, généralement fiable et de débit élevé. Les liaisons sans fil ont une bande passante limitée ce qui réduit sévèrement le volume des informations échangées.

Dans ce modèle, une unité mobile ne peut être, à un instant donné, directement connectée qu'à une seule station de base. Elle peut communiquer avec les autres sites à travers la station à

laquelle elle est directement rattachée. L'autonomie réduite de sa source d'énergie occasionne de fréquentes déconnexions du réseau; sa reconnexion peut alors se faire dans un environnement nouveau voire dans une nouvelle localisation. [8]



**Figure 1.7. Le réseau cellulaire (GSM)**

Afin d'agrandir la zone de couverture, plusieurs points d'accès peuvent être installés pour un même 'groupe de travail'. Dans le cas d'utilisateurs mobiles, il y a possibilité de passer d'un point d'accès à un autre sans perte de lien réseau (comme pour un réseau GSM schématisé dans la figure 1.7.). Cette fonctionnalité s'appelle "Roaming".

### 3.2 Mode ad hoc

Ce mode n'a pas besoin d'AP (Access Point) pour fonctionner, ce sont les stations elles-mêmes qui entrent en communication sans s'appuyer sur un équipement extérieur (voir figure 1.8). Tous les noeuds d'un réseau de ce type se comportent comme des routeurs et prennent part à la découverte et à la maintenance des chemins de communication entre les différentes machines..



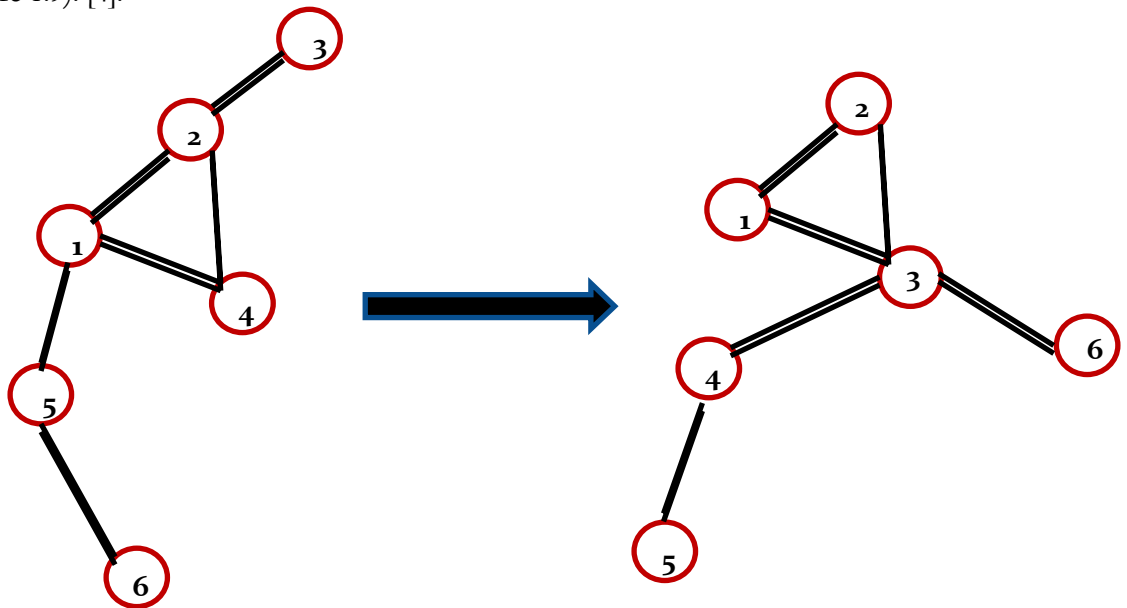
**Figure 1.8. Réseau sans fil point à point (AdHoc).**

L'avantage de ces réseaux réside dans la facilité de mise en place et d'ajout de nouvelles stations sur le réseau. L'absence de structure fixe diminue aussi le coût de leur mise en oeuvre.

### 3.2 Réseaux ad hoc

Un réseau mobile ad-hoc, appelé MANET (Mobile Ad-hoc NETwork), consiste en un grand nombre d'unités mobiles se déplaçant dans un environnement quelconque en utilisant, comme moyen de communication, des interfaces sans fils sans infrastructure préexistante.

Les réseaux ad-hoc sont formés dynamiquement par des stations mobiles (noeuds) qui se connectent sans utiliser d'infrastructure existante. Ces noeuds sont donc libres de se déplacer et de s'organiser arbitrairement, impliquant une grande variabilité de la topologie du réseau (voir figure 1.9). [4].

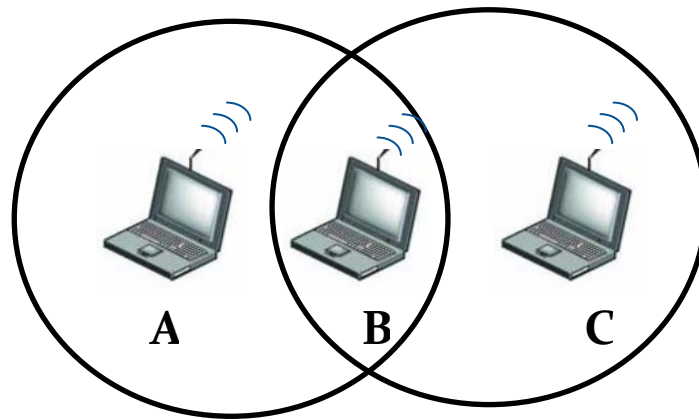


**Figure 1.9. Changement de topologie dans les réseaux ad hoc**

Généralement, les routes entre les noeuds d'un tel réseau sont constituées de plusieurs sauts (hops). Chaque noeud est capable de communiquer directement avec ses voisins (se trouvant dans la zone de portée de leur antenne), voisins par lesquels ils passent pour communiquer avec des noeuds plus éloignés.

#### 3.2.1. Problème de la station cachée

Ce problème survient quand une ou plusieurs stations ne peuvent se détecter (A et C sur la figure 1.10), car elles se trouvent hors de leurs portées respectives, mais leurs zones de transmission ne sont pas disjointes. Une collision peut se produire quand les stations A et C envoient des informations à la station B simultanément.



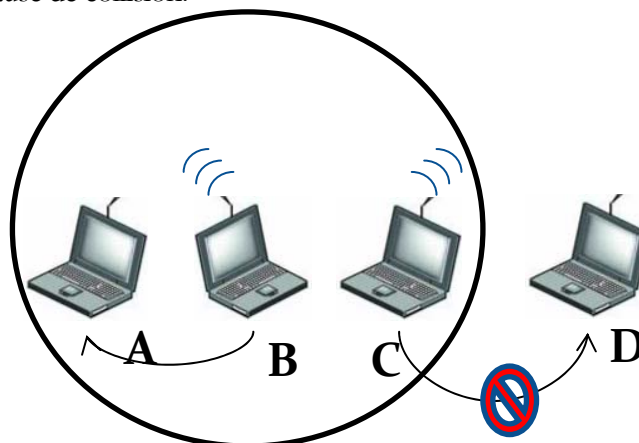
**Figure 1.10. Problème de la station cachée**

Un mécanisme a été pensé afin d'éliminer ce problème : avant l'envoi d'information, l'émetteur transmet un paquet RTS (Request To Send) au récepteur, lui annonçant ainsi une demande de transmission. Le récepteur renvoie un paquet CTS (Clear To Send) s'il est libre. Cette technique permet donc d'obtenir une certaine visibilité de la station cachée.

### 3.2.2-Problème de la station exposée

Ce problème survient quand une station veut établir une transmission avec une deuxième mais doit la retarder car il y a une transmission en cours entre deux autres stations se trouvant dans son voisinage. La figure 1.11 décrit un scénario typique : supposons que les stations A et C peuvent entendre les transmissions de B, mais que la station A n'entend pas C (et vice-versa)

Supposons aussi que B est entraîné d'envoyer des données vers A et que, au même moment, C veut communiquer avec D. En suivant la logique CSMA (Carrier Sense Multiple Acces), la station C va commencer par déterminer si le support est libre. A cause de la communication entre B et A, C trouve le support occupé et il retarde son envoi bien que celui-ci n'eut pas causé de collision.



**Figure 1.11 Problème de la station exposée**

A l'heure actuelle, les recherches dans le domaine des MANETs, couvrent plusieurs secteurs, dont :

– Routage : certaines recherches tentent d'utiliser des informations provenant de toutes les couches du modèle OSI afin d'effectuer un routage optimal.

– Sécurité : La nature même des réseaux ad-hoc rend leur sécurisation encore plus complexe que dans le cas des réseaux sans fils classiques, de nombreux chercheurs tentent de trouver le meilleur moyen de les rendre robustes aux attaques extérieures, Maintenant que nous avons introduit les réseaux 802.11 fonctionnant en mode ad-hoc, nous allons nous intéresser de plus près aux algorithmes nécessaires à leur mise en oeuvre.

Pour établir une communication end-to-end, l'émetteur a besoin de localiser le récepteur au sein du réseau. Il faut donc lier son adresse à sa situation dans le réseau. Une fois la localisation effectuée, il faut router l'information à travers les différents noeuds du réseau.

### 3.2.3 Gestion d'énergie en mode Ad-hoc

Les réseaux sans fil peuvent posséder des terminaux fixes ou mobiles. Le problème principal des terminaux mobiles concerne leur batterie, qui n'a généralement que peu d'autonomie. Pour augmenter le temps d'activité de ces terminaux mobiles, le standard prévoit un mode d'économie d'énergie.[5]

Il existe deux modes de travail pour le terminal :

- Continuous Aware Mode ;
- Power Save Polling Mode.

Le premier correspond au fonctionnement par défaut : la station est tout le temps allumée et écoute constamment le support. Le second permet une économie d'énergie.

Dans ce second cas, les stations qui sont en mode normal stockeront les paquets pour les stations en mode économie d'énergie et vont jouer le rôle de tampon pour ces stations. Lorsqu'une station reçoit une trame pour une station qui est en mode économie d'énergie et que celle-ci n'est pas active, elle la stocke. La station qui la stocke doit être en mode normal pour remplir cette fonctionnalité. Elle émet ensuite des trames ATIM (Ad-Hoc Traffic Information Map) qui informent les stations en mode économie d'énergie, qu'il y a des paquets en attente pour elles. Lorsque, la station en mode économie d'énergie acquitte l'ATIM, la station qui a émis cette trame, lui fait suivre le paquet qu'elle a pour elle.

On peut ajouter que les stations en mode économie d'énergie ne pourront pas, du fait de leur mode de fonctionnement, fournir tous les services réseaux tel que le routage de paquets. Les réseaux Ad-Hoc multi-sauts s'appuient sur les stations en mode normal pour router les paquets vers leurs destinataires.

### 3.2.4 Les applications des réseaux mobiles ad hoc

La particularité du réseau Ad hoc est qu'il n'a besoin d'aucune installation fixe, ceci lui permettant d'être rapide et facile à déployer. Les applications tactiques comme les opérations de secours, militaires ou d'explorations trouvent en Ad Hoc, le réseau idéal. [5]

La technologie Ad Hoc intéresse également la recherche, des applications civiles sont apparues. On distingue :

- Les services d'urgence : opération de recherche et de secours des personnes, tremblement de terre, feux, inondation, dans le but de remplacer l'infrastructure filaire.
- Le travail collaboratif et les communications dans des entreprises ou bâtiments : dans le cadre d'une réunion ou d'une conférence par exemple.
- Home network : partage d'applications et communications des équipements mobiles.

- Applications commerciales : pour un paiement électronique distant (taxi) ou pour l'accès mobile à l'Internet, ou service de guide en fonction de la position de l'utilisateur.
- Réseaux de **senseurs** : pour des applications environnementales (climat, activité de la terre, suivi des mouvements des animaux, Etc.) Ou domestiques (contrôle des équipements à distance).
- Réseaux en mouvement : informatique embarquée et véhicules communicants.
- Réseaux Mesh : c'est une technologie émergente qui permet d'étendre la portée d'un réseau ou de le densifier.

## Le routage dans les réseaux AD HOC et ses problèmes

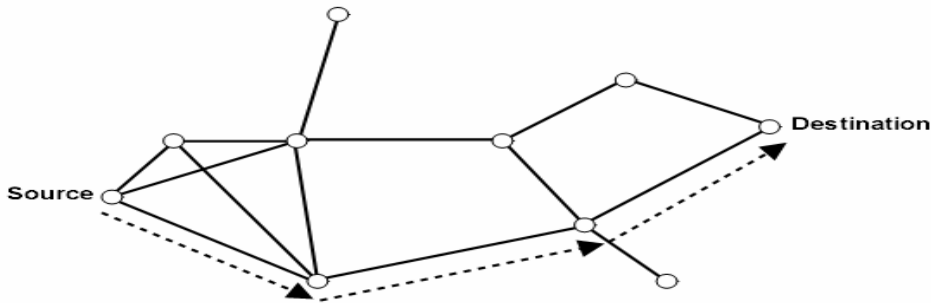
*Les réseaux ad hoc sont des réseaux d'entités mobiles sans fil qui ne reposent sur aucune infrastructure fixe. Ces réseaux reposent sur le principe d'auto organisation puisque toute entité peut disparaître ou apparaître à tout moment laissant le soin au réseau de gérer ces changements de topologie. Si l'absence d'infrastructure fixe permet d'envisager des réseaux extrêmement variés (au niveau de la topologie, de l'utilisation, etc.), elle complique fortement la gestion et les protocoles à mettre en œuvre sur de tels réseaux. Une grande partie des travaux dans les réseaux ad hoc se sont concentrés sur la problématique du routage. Pour pallier à ce type de problème, il existe deux types de routage bien distincts, le routage réactif et le routage proactif. Dans le routage réactif, les routes sont créées à la demande, tandis que dans le routage proactif, les routes sont maintenues en permanence. Il existe enfin des méthodes pour combiner les deux, on parle alors de protocole de routage hybride. Dans ce chapitre, nous présenterons la problématique du routage dans les réseaux ad hoc. On parlera particulièrement les protocoles de routage.*

### 1- Définition

Le routage est une méthode d'acheminement des informations à la bonne destination à travers un réseau de connexion donné. Le problème de routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau au sens d'un certain critère de performance. Le problème consiste à trouver l'investissement de moindre coût en capacités nominales et de réserves qui assure le routage du trafic nominal et garantit sa sûreté en cas de défaillance de lien(s) ou de nœud(s) [6].

### 1-2- Exemple

Si on suppose que les coûts des liens sont identiques, le chemin indiqué dans la figure suivante (figure 2-1) est le chemin optimal reliant la station source et la station destination. Une bonne stratégie de routage utilise ce chemin dans le transfert des données entre les deux stations [6].



**Figure 2.1. Le chemin utilisé dans le routage entre la source et la destination.**

### 2- Problèmes de routage

Les réseaux ad hoc héritent des mêmes propriétés et problèmes liés aux réseaux sans fil. Particulièrement, le fait que le canal radio soit limité en termes de capacité, plus exposé aux pertes (par rapport au médium filaire), et sujet à des variations dans le temps. Le canal est confronté aux problèmes de station cachée et station exposée. En outre, les liens sans fil sont asymétriques et peu sécurisés.

### 2-1- Définition

D'autres caractéristiques spécifiques aux réseaux ad hoc conduisent à ajouter une complexité et des contraintes supplémentaires qui doivent être prises en compte lors de la conception des algorithmes et des protocoles réseaux, à savoir :

1. L'absence d'une infrastructure centralisée :

Chaque nœud joue le rôle d'un routeur pour relayer des communications et générer ses propres données. Donc la gestion du réseau est distribuée sur l'ensemble des nœuds du réseau (pair à pair distribué).

### 2. La mobilité des nœuds et maintenance des routes :

La mobilité continue des nœuds crée un changement dynamique de topologie. Par exemple, un nœud peut rejoindre un réseau, changer de position ou quitter le réseau. Ce déplacement a naturellement un impact sur la morphologie du réseau et peut modifier le comportement du canal de communication. Ajoutons à cela la nature des communications (longues et synchrones, courtes et asynchrones,...). Les algorithmes de routage doivent ainsi résoudre ces problèmes et supporter la maintenance et prendre en charge en un temps limité la reconstruction des routes tout en minimisant la surcharge générée par les messages de contrôle.

### 3. L'hétérogénéité des nœuds :

Un nœud mobile peut être équipé d'une ou plusieurs interfaces radio ayant des capacités de transmission variées et opérant dans des plages de fréquences différentes. Cette hétérogénéité de capacité peut engendrer des liens asymétriques dans le réseau. De plus, les nœuds peuvent avoir des différences en terme de capacité de traitement (CPU, mémoire), de logiciel, de taille (petit, grand) et de mobilité (lent, rapide). Dans ce cas, une adaptation dynamique des protocoles s'avère nécessaire pour supporter de telles situations.

### 4. La taille des réseaux ad hoc

Elle est souvent de petite ou moyenne taille (une centaine de nœuds); le réseau est utilisé pour étendre temporairement un réseau filaire, comme pour une conférence ou des situations où le déploiement du réseau fixe n'est pas approprié (ex : catastrophes naturelles, champ de bataille, etc.). Cependant, quelques applications des réseaux ad hoc nécessitent une utilisation allant jusqu'à des dizaines de milliers de nœuds, comme dans les réseaux de senseurs. Des problèmes liés au passage à l'échelle tels que : l'adressage, le routage, la gestion de la localisation des senseurs et la configuration du réseau, la sécurité, ...etc., doivent être résolus pour une meilleure gestion du réseau.

### 5. La contrainte d'énergie

Les équipements mobiles disposent de batteries limitées, et dans certains cas très limités tels que les PDA, et par conséquent d'une durée de traitement réduite. Sachant qu'une partie de l'énergie est déjà consommée par la fonctionnalité du routage. Cela limite les services et les applications supportés par chaque nœud [10].

La consommation d'énergie n'est pas propre à une couche particulière, des mesures doivent être prises à chaque niveau du modèle OSI :

1. Au niveau physique les recherches se sont essentiellement axées sur la consommation des composants physiques (CPU, mémoire,...) alors que la consommation la plus coûteuse est due à la transmission des données .C'est pourquoi, certains protocoles récents adaptent la puissance de transmission des paquets selon la distance du destinataire.
2. La couche liaison de donnée, constituée de protocoles de congestion et de détection de collisions, peut être améliorée par exemple en autorisant un nœud à passer en mode sleep lorsqu'il ne transmet pas ou ne reçoit aucun paquet.

3. La couche réseau doit également être adaptée, on voit de plus en plus de protocoles incorporant l'autonomie des batteries dans les métriques de routage. Cela assure une meilleure distribution de l'énergie dissipée sur le réseau. En effet, l'utilisation massive d'un même chemin peut amener certains noeuds à leur extinction prématurée.
4. L'impact sur la couche application est surtout lié à la compression des données et à l'encryptage, ces deux opérations sont gourmandes en ressources. Elles constituent à elles seules un domaine de recherche pour trouver le juste compromis entre la consommation d'énergie de l'opération et le gain final lors de la transmission des données compressées [11].

### 2-2- Conception et stratégie de routage

L'étude et la mise en œuvre d'algorithmes de routage pour assurer la connexion des réseaux ad hoc au sens classique du terme (tout sommet peut atteindre tout autre), est un problème complexe. L'environnement est dynamique et évolue donc au cours du temps, la topologie du réseau peut changer fréquemment. Il semble donc important que toute conception de protocole de routage doive étudier les problèmes suivants :

#### 1- La minimisation de la charge du réseau

L'optimisation des ressources du réseau renferme deux autres sous problèmes qui sont l'évitement des boucles de routage, et l'empêchement de la concentration du trafic autour de certains nœuds ou liens.

#### 2- Offrir un support afin d'effectuer des communications multipoints fiables

Le fait que les chemins utilisés pour router les paquets de données puissent évoluer ne doit pas avoir d'incidences sur le bon acheminement des données. L'élimination d'un lien, pour cause de panne ou pour cause de mobilité devrait, idéalement, augmenter le moins possible les temps de latence. La qualité des temps de latence et de chemins doit augmenter dans le cas où la connectivité du réseau augmente [6].

#### 3- Assurer un routage optimal

La stratégie de routage doit créer des chemins optimaux et pouvoir prendre en compte différentes métriques de coûts (bande passante, nombre de liens, ressources du réseau, délais de bout en bout,...etc.). Si la construction des chemins optimaux est un problème assez difficile, la maintenance de tels chemins peut devenir encore plus complexe, la stratégie de routage doit assurer une maintenance efficace des routes avec le moindre coût possible.

## 2-3- Quelques notions

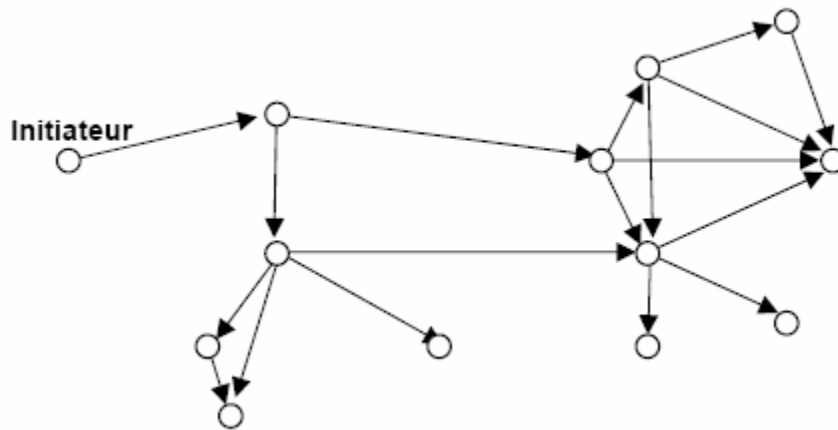
### 1- La notion de "multihopping"

Les stratégies de routage utilisées dans les réseaux ad hoc sont caractérisées par le fait de pouvoir acheminer les paquets de données sans l'aide des stations de base utilisées dans la communication cellulaire.

Dans le modèle cellulaire, la communication entre deux nœuds est faite en utilisant les stations de base et le réseau filaire, par conséquent aucune unité mobile n'est utilisée comme routeur intermédiaire, le modèle cellulaire est dit alors "single hop" (i.e. le nombre de routeurs mobiles intermédiaires est nul). La contrepartie de ce modèle est le modèle de communication sans infrastructure. Dans ce modèle plusieurs nœuds peuvent participer au routage c'est pour cela l'environnement des réseaux ad hoc est dit "multi hop" (i.e. le nombre de stations mobiles pouvant être utilisées comme routeurs intermédiaires peut être grand) [6].

### 2- L'inondation

L'inondation ou la diffusion pure, consiste à faire propager un paquet (de données ou de contrôle) dans le réseau entier. Un nœud qui initie l'inondation envoie le paquet à tous ses voisins directs. De même, si un nœud quelconque du réseau reçoit le paquet, il le rediffuse à tous ses voisins. Ce comportement se répète jusqu'à ce que le paquet atteigne tous les nœuds du réseau (voir la figure 2-2). Notons que les nœuds peuvent être amenés à appliquer - durant l'inondation - certains traitements de contrôle, dans le but d'éviter certains problèmes, tel que le bouclage et la duplication des messages.



**Figure 2-2 : Le mécanisme d'inondation**

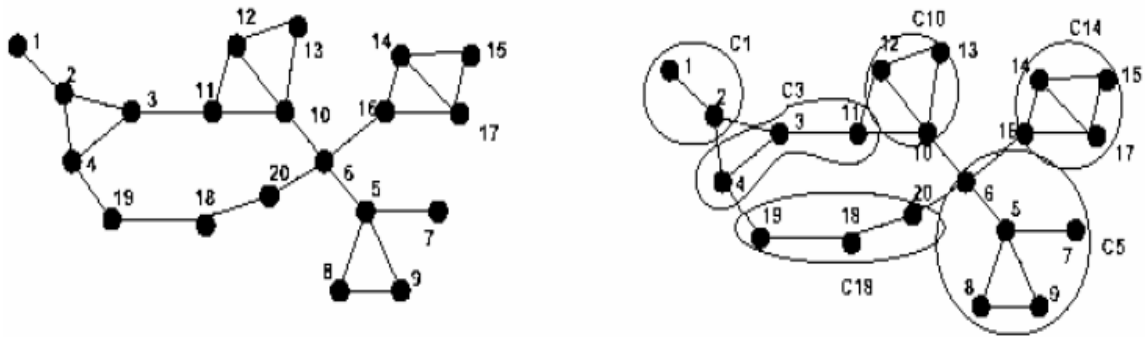
Le mécanisme d'inondation est utilisé généralement dans la première phase du routage plus exactement dans la procédure de découverte des routes, et cela dans le cas où le nœud source ne connaît pas la localisation exacte de la destination. Un paquet de requête de route est inondé par la source afin qu'il atteigne la station destination. Il faut noter que l'inondation est très coûteuse surtout dans le cas où le réseau est volumineux (latence, surcharge des messages...etc.), c'est pour cela que les protocoles de routage essaient de minimiser au maximum la propagation des paquets inondés en rajoutant d'autres paramètres de diffusion.

### 3- Le concept de groupe "clustering"

Dans la communication de groupes, les messages sont transmis à des entités abstraites ou groupes, les émetteurs n'ont pas besoin de connaître les membres du groupe destinataire. La gestion des membres d'un groupe dynamique permet à un élément de se joindre à un groupe, de quitter ce groupe, se déplacer ailleurs puis rejoindre le même groupe. C'est en ce sens que la communication de groupe assure une indépendance de la localisation, ce qui la rend parfaitement adaptée à des topologies de réseaux re-configurables, telles que les architectures avec sites mobiles [12].

Dans le contexte de routage dans les réseaux ad hoc, certains protocoles (comme nous allons voir dans la suite) utilisent des stratégies d'acheminement basées sur les groupes. Le concept de groupe facilite les tâches de la gestion du routage (telles que les transmissions des paquets, l'allocation de la bande passante, la réutilisation spatiale,...etc.) et cela en décomposant le réseau en un ensemble de groupes connectés mais indépendants du point de vue contrôle.

Lin et Gerla proposent dans un algorithme de décomposition en groupes pour les réseaux mobiles sans fil. L'algorithme partitionne le réseau un ensemble de groupes de telle sorte que tout noeud du réseau peut atteindre n'importe quel autre noeud en utilisant, au plus, un seul noeud intermédiaire. La figure suivante reprend l'exemple de partitionnement introduit dans [13].



(a) La topologie du système

(b) le partitionnement en groupe

**Figure 2.3 : La décomposition du réseau en groupes.**

### 3 - Qualité de protocole

Les protocoles de routage doivent être évalués afin de mesurer les performances de la stratégie utilisée et de tester sa fiabilité. L'utilisation d'un réseau ad hoc réel dans une évaluation est difficile et coûteuse, en outre de telles évaluations ne donnent pas généralement des résultats significatifs. Le réseau réel n'offre pas la souplesse de varier les différents paramètres de l'environnement et pose en plus le problème d'extraction de résultats, c'est pour cela que la majorité des travaux d'évaluation de performances utilisent le principe de simulation vu les avantages qu'il offre (il nous permet de tester les protocoles sous une variété de conditions) [6].

Les paramètres mesurés dans une évaluation dépendent de la stratégie de routage appliquée (par exemple dans le cas où on veut comparer deux versions d'un même protocole), mais généralement tout simulateur doit être en mesure d'évaluer :

- a) Le contrôle utilisé dans le mécanisme de mise à jour de routage.
- b) Les délais moyens du transfert des paquets.
- c) Le nombre moyen de noeuds traversés par les paquets de données [6].

### 4 – Classification

Les protocoles de routage peuvent être classés en différentes familles selon le moment auquel ils initient la découverte de route, selon la manière dont les nœuds d'un réseau se partagent le travail de routage et selon la manière dont les informations de routage sont échangées.

Certains protocoles de routage n'utilisent pas tous les nœuds d'un réseau pour faire transiter les messages, au contraire ils en sélectionnent certains, en fonction du voisinage ou pour former des cellules. Ces protocoles sont dits *non uniformes*. Ceux qui utilisent tous les nœuds du réseau capables de router sont appelés *uniformes* [14].

#### 4 -1- Proactive et Réactive

Si un protocole initie la découverte de route lorsque le besoin s'en fait ressentir, c'est à dire lorsqu'un paquet doit être transmis vers une destination dont la route n'est pas connue dans la table de routage, il sera considéré comme faisant partie de la famille des protocoles réactifs. Si le protocole initie des découvertes de route régulièrement sans attendre qu'il y ait un paquet à transmettre, il sera dit proactif. Certains protocoles combinent ces deux manières d'initier des découvertes de routes, à la demande et en avance, et sont donc considérés comme hybrides. [14].

#### 4 -1 -1 Les protocoles de routage proactifs

Un protocole de routage est dit proactif si les procédures de création et de maintenance des routes, durant la transmission des paquets de données, sont contrôlées périodiquement. Cette maintenance reste toujours active même s'il n'y a pas de trafic circulant dans le réseau [8].

Deux principales méthodes sont utilisées dans cette classe de protocoles proactifs : la méthode Etat de lien (Link state) et la méthode Vecteur de distance (Distance Vector). Les deux méthodes exigent une mise à jour périodique des données de routage qui doit être diffusée par les différents nœuds de routage du réseau [6]. Ces méthodes sont utilisées aussi dans les réseaux filaires. Parmi les protocoles de routages proactifs les plus connus on citera le DSDV, FSR, OLSR ... [8].

##### 1- Etat de lien

Dans cette méthode, chaque nœud garde une vision de toute la topologie du réseau et ce par l'intermédiaire des requêtes périodiques portant sur l'état des liaisons avec les nœuds voisins. En effet la mise à jour dans cette méthode se fait pour chaque nœud diffusant l'état

des liens des noeuds voisins dans le réseau. Cette opération est aussi faite en cas de changement dans l'état des liens [6]. ce protocole utilise l'algorithme de DIJKSTRA.

### 2- Vecteur de distance

Dans cette méthode par contre, chaque noeud diffuse à ses noeuds voisins sa vision des distances qui le séparent de tous les hôtes du réseau. En se basant sur les informations reçues par tous ses voisins, chaque noeud de routage fait un certain calcul pour trouver le chemin le plus court vers n'importe quelle destination. Le processus de calcul se répète, s'il y a un changement de la distance minimale séparant deux noeuds, et cela jusqu'à ce que le réseau atteigne un état stable. Cette technique est basée sur l'algorithme distribué de Bellman Ford (DBF) [6].

Nous allons décrire dans ce qui suit, l'un des protocoles les plus importants de cette classe :

#### DSDV (Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector)

- Basé sur l'idée classique de l'algorithme distribué de Bellman-Ford en rajoutant quelques améliorations.
- Chaque station mobile maintient une table de routage qui contient :
  - Toutes les destinations possibles.
  - Le nombre de noeud (ou de sauts) nécessaire pour atteindre la destination.
  - Le numéro de séquences (SN : sequence number) qui correspond à un noeud destination.
- Le SN est utilisé pour faire la distinction entre les anciennes et les nouvelles routes, ce qui évite la formation des boucles de routage.
- La mise à jour dépend donc de deux paramètres : Le temps, c'est à dire la période de transmission, et Les événements.
- Un paquet de mise à jour contient :
  1. Le nouveau numéro de séquence incrémenté du noeud émetteur.

Et pour chaque nouvelle route :

2. L'adresse de la destination.
  3. Le nombre de noeuds (ou de sauts) séparant le noeud de la destination.
  4. Le numéro de séquence (des données reçues de la destination) tel qu'il a été estampillé par la destination.
- Le DSDV élimine les deux problèmes de boucle de routage "routing loop", et celui du "counting to infinity".

Cependant :

- Dans ce protocole, une unité mobile doit attendre jusqu'à ce qu'elle reçoive la prochaine mise à jour initiée par la destination, afin de mettre à jour l'entrée

associée à cette destination, dans la table de distance. Ce qui fait que le DSDV est lent.

- Le DSDV utilise une mise à jour périodique et basée sur les événements, ce qui cause un contrôle excessif dans la communication [6].

### 4-1 -2 Les protocoles de routage réactifs

Ce sont des protocoles dans lesquels la mise à jour ou le contrôle des routes se fait à la demande, c'est-à-dire Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte globale de routes est lancée, et cela dans le but d'obtenir une information spécifiée, inconnue au préalable. Dans ce cadre plusieurs politiques peuvent être adoptées, les plus importantes sont :

#### 1- La Technique d'apprentissage en arrière

Le mécanisme d'apprentissage en arrière ou le backward learning est basé sur le fait que lorsqu'un noeud source veut transmettre un message à une destination précise, il procède tout d'abord à l'opération d'inondation de sa requête sur tout le réseau. Ainsi chaque noeud intermédiaire dit de transit (appartenant au chemin par lequel va passer le message), indique le chemin au noeud source lors de la réception de la requête.

On dit qu'il apprend le chemin au noeud source, tout en sauvegardant la route dans la table transmise. Enfin, lorsque la requête arrive à bon port, le noeud destinataire, et suivant le même chemin, transmet sa réponse sous forme de requête. Notons que le chemin établi entre les noeuds est un chemin Full duplex. Signalant aussi que la source garde trace du chemin tant qu'il restera en cours d'utilisation une fois que le chemin sera calculé [8].

#### 2- Technique du routage source

Dans cette technique, le noeud source détermine toute la liste des noeuds par lesquels doit transiter le message, ainsi le noeud émetteur inclut dans l'entête du paquet une route source. En effet, afin de construire la route, le noeud source doit préciser les adresses exactes des noeuds par lesquels le message transitera jusqu'à atteindre le destinataire. Ainsi, le noeud source transmet le paquet au premier noeud spécifié dans la route. Notons que chaque noeud par lequel le paquet transite, supprime son adresse de l'entête du paquet avant de le retransmettre. Une fois que le paquet arrive à sa destination, il sera délivré à la couche réseau du dernier hôte.

Plusieurs protocoles de routage réactifs existent dont l'AODV, TORA, DSR etc[ 8].

Nous allons décrire dans ce qui suit, l'un des protocoles les plus importants de cette classe :

#### AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector)

- Le protocole **AODV** représente essentiellement une amélioration de l'algorithme **DSDV** discuté plus haut, dans le contexte réactif. Le protocole **AODV**, réduit le nombre de diffusions de messages, et cela en créant les routes lors du besoin, contrairement au **DSDV**, qui maintient la totalité des routes.

- L'**AODV** utilise les principes des numéros de séquence afin de maintenir la consistance des informations de routage.
- A cause de la mobilité des noeuds dans les réseaux ad hoc, les routes changent fréquemment ce qui fait que les routes maintenues par certains noeuds, deviennent invalides. Les numéros de séquence permettent d'utiliser les routes les plus nouvelles (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 noeud de transit appartenant au chemin cherché.
- Un noeud diffuse une requête de route dans le cas où il aurait besoin de connaître une route vers une certaine destination et qu'une telle route n'est pas disponible. 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.
- Le champ numéro de séquence destination du paquet **RREQ**, contient la dernière valeur connue du numéro de séquence, associé au noeud 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 noeud source.
- Afin de maintenir des routes consistantes, une transmission périodique du message "**HELLO**" est effectuée. Si trois messages "**HELLO**" ne sont pas reçus consécutivement à partir d'un noeud voisin, le lien en question est considéré défaillant.
- Le protocole **AODV** ne présente pas de boucle de routage, en outre il évite le problème "counting to infinity" de Bellman-Ford, ce qui offre une convergence rapide quand la topologie du réseau ad hoc change [6].

### 4-1 -3 Les protocoles de routages Hybrides

Les protocoles hybrides tirent avantage des méthodes actives et proactives et limitent leurs inconvénients. Ils utilisent un protocole proactif pour avoir des informations sur les voisins les plus proches (routage intra zone) De cette manière, le processus de routage intra zone est accéléré. Le nombre de nœuds d'une zone est limité pour réduire la surcharge engendrée par la maintenance des tables de routage (au maximum les voisins à deux sauts). Au-delà de cette

zone prédéfinie, le protocole hybride fait appel aux techniques des protocoles réactifs pour chercher des routes (routage interzone). [8] [11].

Ce type de protocoles s'adapte bien aux grands réseaux, cependant, il cumule aussi les inconvénients des protocoles réactifs et proactifs en même temps (messages de contrôle périodique, le coût de détermination d'une nouvelle route). Plusieurs protocoles hybrides existent dont le *CBRP* et le *ZRP (Zone Routing Protocol)* [8].

Nous allons décrire le protocole le plus important de cette classe :

### ZRP (Zone Routing Protocol)

Dans **ZRP**, une zone **Z(k, n)** pour un noeud **n** avec un rayon **k**, est définie comme l'ensemble des noeuds a une distance inférieure ou égale à **k** sauts :

$$Z(k, n) = \{i / H(n, i) \leq k\}$$

Où **H(i, j)** est la distance en nombre de sauts entre le noeud **i** et le noeud **j**. Le noeud **n** est appelé le noeud central de la zone de routage, alors que le noeud **b** telle que **H(n, b) = k** est appelé le noeud frontière de **n**.

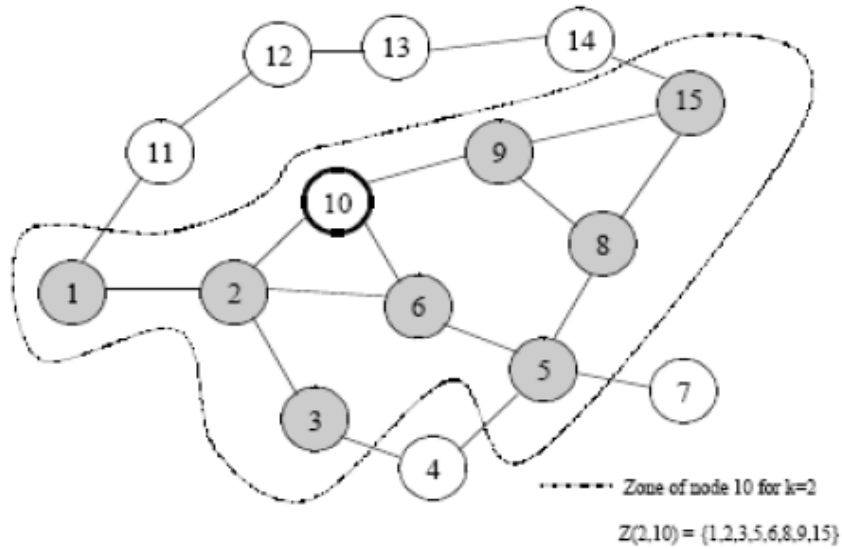
La taille d'une zone affecte les performances de communication et doit être optimisée en fonction du degré de mobilité, de trafic, ainsi que du diamètre du réseau.

**La figure 2.4** illustre le concept de zone dans **ZRP**.

L'architecture du protocole **ZRP** est composée de quatre sous protocoles :

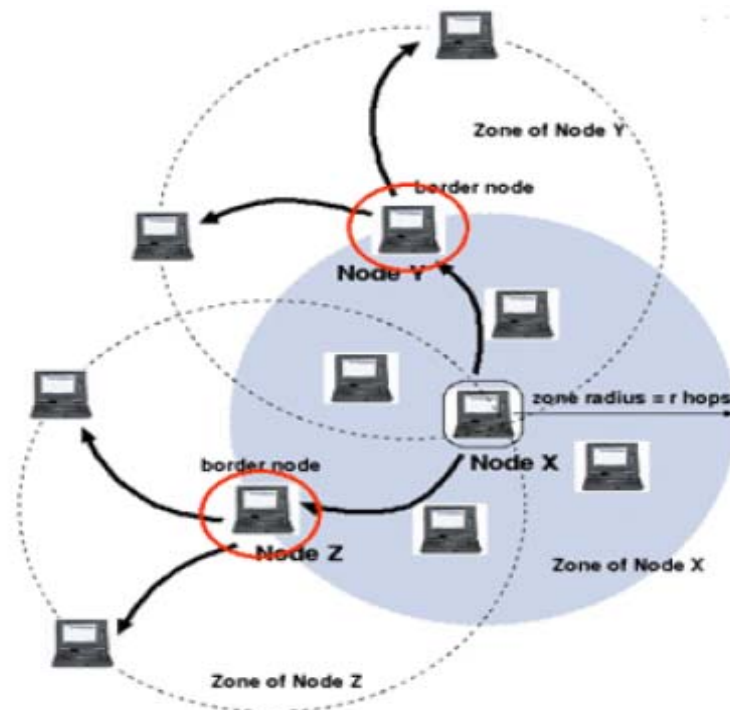
1. l'Intra zone Routing Protocol (**IARP**)
2. l'Interzone Routing Protocol (**IERP**)
3. le Bordercast Resolution Protocol (**BRP**) et
4. le Neighbor Discovery/Maintenance Protocole (**NDP**) qui se situe au niveau de la couche 2.

*IARP* fournit de manière proactive les routes aux noeuds situés dans la même zone que la source. *IARP* repose sur *NDP* pour découvrir ses voisins, son rôle principal est d'assurer que chaque noeud au sein d'une zone possède une table de routage à jour reflétant la route à emprunter pour chaque noeud de la même zone.



**Figure 2.4: Un exemple de zone dans ZRP**

*IERP*, quant à lui, il repose sur les noeuds frontières afin de découvrir de manière réactive les routes interzones lors d'une communication entre deux noeuds d'une zone différente. De manière plus précise, *IERP* permet des paquets de requête aux noeuds frontières via *BRP*, une sorte d'algorithme multicast, afin qu'ils vérifient si le noeud destinataire fait parti de leur zone respective. Si c'est le cas, ils généreront un paquet de réponse vers la source, dans le cas contraire ils propageront la requête vers leurs noeuds frontières. Ce procédé est illustré à la figure 2.5.



**Figure 2.5: Exemple de propagation de requêtes par bordercasting**

Le problème de ce protocole est qu'il n'y a pas de coordination entre les noeuds, il en résulte que les zones se chevauchent et un noeud peut être à la fois membre d'une zone et noeud frontière de plusieurs zones. Dans ces conditions, l'algorithme de recherche peut conduire à des résultats moins bons qu'une diffusion standard. Des solutions ont été proposées dans la littérature pour contrôler et stopper la diffusion redondante des paquets de requête. Afin de palier au problèmes de *ZRP*, une amélioration fut proposée : le *Distributed Dynamic Routing algorithm (DDR)*. Ce protocole est basé sur la construction d'une forêt de zones dynamiques qui ne se chevauchent pas [11].

## Les réseaux de capteurs sans fil

*Les progrès scientifiques dans le 20ème siècle ont permis à l'homme de changer son monde et contrôler son environnement, néanmoins, il reste il reste décrépit devant plusieurs phénomènes qu'ils soient naturels ou artificiels, comme les incendies, les séismes, la guerre ... etc. Pour y remédier des nouveaux réseaux de capteurs viennent au secours de l'environnement et de l'industrie grâce aux récents développements réalisés dans le domaine des techniques sans-fil (wireless). Depuis quelques décennies, le besoin d'observer et de contrôler des phénomènes physiques tels que la température, la pression ou encore la luminosité est essentiel pour de nombreuses applications industrielles et scientifiques. Dans le domaine de l'écologie, la surveillance de polluants comme par exemple l'ozone, le NO<sub>2</sub> ou encore le CO<sub>2</sub> pourrait considérablement augmenter la qualité de vie dans les villes. Il n'y a pas si longtemps, la seule solution pour acheminer les données du capteur jusqu'au contrôleur central était le câblage qui avait comme principaux défauts d'être coûteux et encombrants. Aujourd'hui, grâce aux récents progrès des techniques sans-fil, de nouveaux produits exploitant des réseaux de capteurs sans-fil (Wireless Sensor Network) sont employés pour récupérer ces données environnementales. En plus de ces applications civiles, il existe évidemment des applications militaires des réseaux de capteurs notamment dans la détection d'intrusion, la localisation des combattants sur un champ de bataille, etc.*

## 1- Introduction

Le développement des réseaux de senseurs a été rendu possible grâce aux avancées importantes et à la convergence des systèmes micro-électroniques, des technologies de réseau sans fils et de l'électronique digitale. Les réseaux de senseurs sont composés d'un nombre important de petits appareils ou senseurs, chaque senseur contenant un capteur (détecteur), un processeur, une interface radio et une batterie. La recherche de protocoles efficaces en terme de consommation d'énergie s'est notablement développée durant les dernières années [16].

De ce fait, les micro-capteurs sont de véritables systèmes embarqués. Le déploiement de plusieurs d'entre eux, en vue de collecter et transmettre des données environnementales vers un ou plusieurs points de collecte, d'une manière autonome, forme un réseau de capteurs sans fil.

Nous nous intéressons particulièrement aux opérations de communication. En effet, l'émission et la réception d'un paquet par une interface radio sont un processus très coûteux et il est nécessaire de prendre la contrainte énergétique en compte.

## 2- Définition

Un réseau de capteurs sans-fil RCSF est composé d'un nombre souvent très important de nœuds qui sont, soit posés à un endroit précis, soit dispersés aléatoirement (souvent déployés par voie aérienne à l'aide d'avions ou hélicoptères). Les nœuds de ce type de réseaux consistent en un grand nombre de micro-capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome. Les capteurs ne sont pas intégrés à une quelconque architecture préexistante de réseau, c'est pourquoi ils communiquent à l'aide d'un réseau ad hoc sans fil [17].

Les différentes problématiques autour des réseaux de capteurs concernent l'auto configuration d'un tel réseau, dans un contexte de mobilité et l'économie des ressources énergétiques de ses nœuds (l'objectif est qu'un capteur tienne quatre ans avec une pile AAA). Pour économiser au mieux la batterie d'un nœud, il faut que ses transmetteurs radio soient coupés la plupart du temps. Ceci pose le problème de la synchronisation des nœuds et la répartition des périodes de réveil. Il faut donc une couche MAC permettant aux nœuds d'avoir des phases de sommeil, sans trop, pour autant, nuire à la communication [18].

Afin de résister aux déploiements, ces capteurs doivent être très solides et de plus, ils doivent aussi pouvoir survivre dans les conditions les plus extrêmes dictées par leur environnement d'utilisation (feu ou eau par exemple) [17].

## 3- Domaines d'utilisation

La taille de plus en plus réduite des micro capteurs, le coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations,...) ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs domaines d'applications. Ils permettent aussi d'étendre les applications existantes et de faciliter la conception d'autres systèmes tels que le contrôle et l'automatisation des chaînes de montage.

Les réseaux de capteurs ont le potentiel de révolutionner la manière même de comprendre et de construire les systèmes physiques complexes. Les réseaux de capteurs peuvent se révéler très utiles dans de nombreuses applications lorsqu'il s'agit de collecter et de traiter des informations provenant de l'environnement. Parmi les domaines où ces réseaux peuvent offrir les meilleures contributions, nous citerons les domaines : militaire, environnemental, domestique, santé, sécurité, etc. [19]. Des exemples d'applications dans ces différents domaines sont exposés ci-dessous :

### 3- 1- Applications militaires

Comme dans le cas de plusieurs technologies, le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui rendent ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine. Comme exemple d'application dans ce domaine, on peut penser à un réseau de capteurs déployé sur un endroit stratégique ou difficile d'accès, afin de surveiller toutes les activités des forces ennemies, ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations). Des tests concluants ont déjà été réalisés dans ce domaine par l'armée américaine dans le désert de Californie [19].

### 3- 2- Applications à la sécurité

Les altérations dans la structure d'un bâtiment, suite à un séisme ou au vieillissement, pourraient être détectées par des capteurs intégrés dans les murs ou dans le béton, sans alimentation électrique ou autres connexions filaires. Les capteurs doivent s'activer périodiquement et peuvent ainsi fonctionner durant des années, voire des décennies.

On peut inclure sur les parois des barrages des senseurs qui permettent de calculer en temps réel la pression exercée. Il est donc possible de réguler le niveau d'eau si les limites sont atteintes. On peut aussi imaginer inclure des senseurs entre les sacs de sables formant une digue de fortune. La détection rapide d'infiltration d'eau peut servir à renforcer le barrage en conséquence, cette technique peut aussi être utilisée pour d'autres constructions tels que les ponts, les voies ferrées, les routes de montagnes, les bâtiments et d'autres ouvrages d'art [19].

### 3- 3- Applications environnementales

Des thermo-capteurs dispersés à partir d'un avion sur une forêt peuvent signaler un éventuel début d'incendie dans le champ de captage ; ce qui permettra une meilleure prise en charge concernant la lutte contre les feux de forêt. Les capteurs peuvent être déployés pour détecter des fuites de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.) et alerter les utilisateurs dans un délai suffisamment court pour permettre une intervention efficace. Une grande quantité de capteurs peut être déployée en forêt ou dans un environnement de conservation de la faune afin de recueillir des informations diverses sur l'état du milieu naturel et sur les comportements de déplacement. Par exemple, l'université de Pise en Italie a réalisé des réseaux de capteurs pour le contrôle des parcs naturels (feux, animaux,..). Il est ainsi possible "d'observer", sans déranger, des espèces animales difficiles à étudier dans leur environnement naturel et de proposer des solutions plus adéquates pour la conservation de la faune [19].

### 3- 4- Applications médicales

En implantant sous la peau de mini capteurs vidéo, on peut recevoir des images en temps réel d'une partie du corps sans aucune chirurgie pendant environ 24h. On peut ainsi surveiller la progression d'une maladie ou la reconstruction d'un muscle, la surveillance du niveau de glucose, le monitoring des organes vitaux ou la détection de cancers. Les auteurs d'une récente étude, présentent des capteurs qui fonctionnent à l'intérieur du corps humain pour traiter certains types de maladies. Leur projet actuel est de créer une rétine artificielle composée de 100 micro-capteurs pour corriger la vue [17].

### 3- 5- Applications commerciales

Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré. Grâce aux réseaux de capteurs, les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant leurs coûts.

Dans les immeubles, le système de climatisation peut être conçu en intégrant plusieurs micro-capteurs dans les tuiles du plancher et les meubles. Ainsi, La climatisation pourrait être déclenchée seulement aux endroits où il y a des personnes présentes et seulement si c'est nécessaire.

### 3- 6- Agriculture

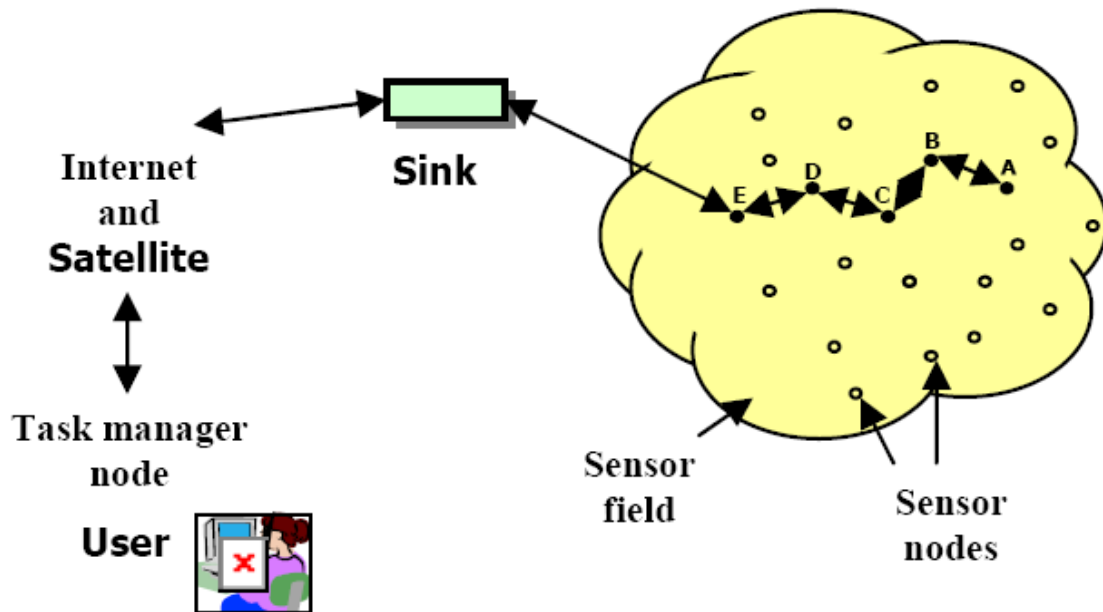
Des noeuds peuvent être incorporés dans la terre, On peut ensuite questionner le réseau de senseurs sur l'état du champ (déterminer par exemple les secteurs les plus secs afin de les arroser en priorité). On peut aussi imaginer équiper des troupeaux de bétail de senseurs pour connaître en tout temps, leur position ce qui éviterait aux éleveurs d'avoir recours à des chiens de berger.

### 3- 7- Applications dans le transport:

Utiliser pour la gestion du trafic (réseau véhiculaire). en disposant ainsi, d'un ensemble de capteurs le long d'autoroute, ou pourrait réguler le trafic et informer les automobilistes en temps réel.

## 4- les différentes architectures de réseau de capteurs sans fil

Les noeuds de senseurs sont organisés en réseaux de senseurs « sensor field » voir Figure 3.1. Chacun de ces réseaux a la capacité de collecter des données et de les transférer au noeud de synchronisation central « sink » par l'intermédiaire d'une architecture multihop. Le sink transmet ensuite ces données par Internet ou par satellite à l'ordinateur central « task manager ».



**Figure 3.1. Architecture d'un réseau de capteurs.**

Il existe plusieurs topologies pour les réseaux de capteurs. Nous présentons dans ce qui suit les topologies applicables aux réseaux de capteurs.

#### 4- 1- La Topologie en étoile

Dans cette topologie une station de base peut envoyer ou recevoir un message à certain nombre de nœuds. Ces nœuds peuvent seulement envoyer ou recevoir un message de l'unique station de base, il ne leur est pas permis de s'échanger des messages. L'avantage de cette topologie est sa simplicité, sa capacité à minimiser la consommation d'énergie des nœuds et la minimisation de latence de la communication entre les nœuds et la station de base. Son inconvénient est que la station de base n'est pas robuste puisque tout le réseau est géré par un seul nœud [19].

#### 4- 2- La topologie en grille (Mesh Network)

Dans ce type de topologie, tout nœud peut envoyer à tout autre nœud dont le réseau se trouvant à sa portée de transmission. Ceci est appelé la communication multi-sauts, dans laquelle, si un nœud veut transmettre un message à un autre nœud qui est en dehors de sa portée de transmission, il peut utiliser un nœud intermédiaire pour envoyer son message au nœud destinataire. L'avantage de cette topologie est la possibilité du passage à l'échelle, la redondance et la tolérance aux fautes, L'inconvénient de cette topologie est la consommation d'énergie dans la communication multi-sauts et la latence qui sont créés par le passage des messages des nœuds par plusieurs autres avant d'arriver à la station de base [19].

### 4- 3- La topologie hybride

Une topologie hybride entre celle en étoile et en grille fournit des communications réseau robustes et diverses, en assurant la minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Dans ce type de topologie, les noeuds capteurs à faible puissance ne routent pas les messages, mais il y a d'autres noeuds qui ont la possibilité de faire le routage des messages. En général, ces noeuds ont une puissance élevée [19].

### 5- les contraintes

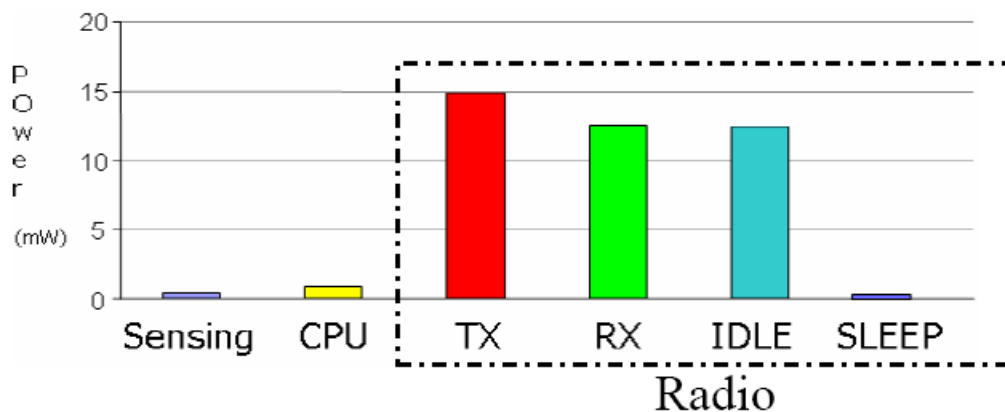
Les principaux facteurs et contraintes influençant sur les réseaux de senseurs sont :

#### 5- 1- Limitation de l'énergie

Un senseur, 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 senseur dépend grandement de la durée de vie de la batterie. Dans un réseau de senseurs (multihop) chaque noeud collecte des données et envoie/transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de quelques noeuds nécessite un changement de la topologie du réseau et un re-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 [17].

La consommation de l'énergie dans un RCSF, peut être divisé selon l'ordre décroissant suivant (Figure 3-2) :

- La communication (émission et réception).
- Traitement de données, agrégation.
- Acquisition ou capture.



**Figure 3.2. Energie consommée par un noeud de réseau de capteurs.**

- Sensing:**Attente.
- CPU:**calcul ou traitement.
- TX:** émission.
- RX:** réception.
- IDLE:**cycles inexploités.
- SLEEP:**sommeil.

### 5- 2- La topologie de réseau

Le déploiement d'un grand nombre de noeuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phases :

- Déploiement
- Post-déploiement (les senseurs peuvent bouger, ne plus fonctionner,...)
- Redéploiement de noeuds additionnels

### 5- 3- Hétérogénéités

Les noeuds utilisés dans un RCSF peuvent avoir des capacités différentes, on peut trouver dans un réseau quelque noeuds avec une grande puissance de calcul et d'autres avec une puissance limitée. L'intégration d'éléments hétérogènes pose plusieurs défis dans la détermination de la meilleure combinaison d'hétérogénéités [17].

### 5- 4- La robustesse

Le milieu dans lequel sont déposés les noeuds peut parfois être hostile, ce qui peut engendrer des défaillances de quelque noeuds et arrêter tout le système. On doit s'assurer que les performances d'un RCSF ne soient pas dégradées par la destruction de l'un de ses noeuds.

### 5- 5- La sécurité des données

Les données captées peuvent être très secrètes et importantes (par exemple : la position des troupes) ce qui nécessite l'utilisation d'algorithmes de cryptage et de chiffrement des données.

### 5- 6- La tolérance de fautes

La tolérance aux fautes est la capacité de garantir les fonctionnalités du réseau de capteurs sous n'importe quelle interruption due aux échecs des noeuds de capteurs. Certains noeuds peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner à cause d'un manque d'énergie, un problème physique ou une interférence.

Un premier défi sera donc d'identifier et de modéliser formellement les modes de défaillances des capteurs, puis de repenser les techniques de tolérance aux fautes à mettre en oeuvre sur le terrain [17].

### 5- 7- Les médias de transmission

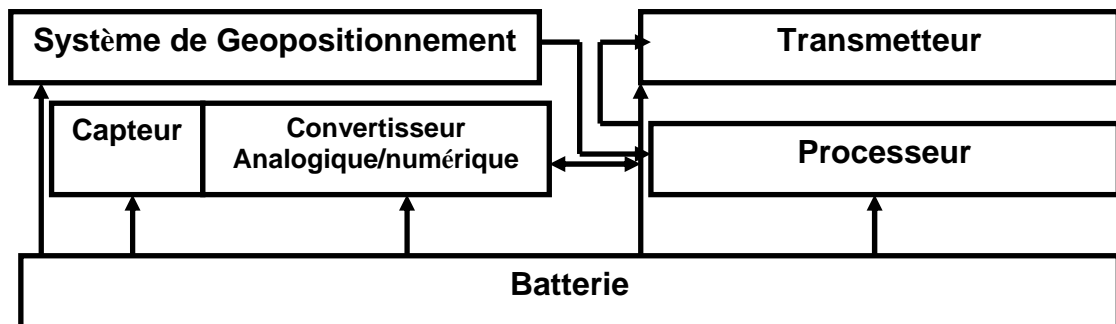
Dans un réseau de senseurs, les noeuds sont reliés par une architecture sans-fil. Pour permettre des opérations sur ces réseaux dans le monde entier, le média de transmission doit être normé. On utilise le plus souvent l'infrarouge (qui est license-free, robuste aux interférences, et peu onéreux), le bluetooth et les communications radio [17].

## 6- Partie Matérielle

Dans le réseau de capteurs sans fil, chaque nœud est composé de quatre éléments de base :

1. Capteurs (sensing unit).
2. Microprocesseur (processing unit).
3. Transmetteur (transceiver unit).
4. Batterie (power unit).

Il peut exister des nœuds dotés de composants supplémentaires comme un système de Geopositionnement GPS (location finding system), mobilisateur (mobilizer) et un générateur d'énergie (power generator). La Figure 3-3 illustre les composants les plus courants d'un nœud.



**Figure 3.3. Les composants d'un nœud de capteur.** [17].

#### 1. Capteurs (sensing unit) :

Les capteurs utilisés doivent être aussi petits, performants avec une très bonne précision et une consommation économique de l'énergie. Les capteurs utilisés sont de plusieurs types (capteurs de températures, humidité, vibration, images, vidéo,...etc.) et peuvent être utilisés en plusieurs technologies comme par exemple les systèmes MEMS qui sont des systèmes électroniques et/ou mécaniques miniatures destinés à effectuer des tâches précises " la majorité des capteurs utilisés sont à sortie analogique ce qui implique l'utilisation de convertisseurs analogique/numérique [20].

#### 2. Microprocesseur (processing unit) :

Il est dédié au traitement des informations, soit acquises par les capteurs installés au niveau du nœud ou soit les informations provenant des autres nœuds. Vu les contraintes d'énergie et pour des raisons plutôt économiques, on utilise des microcontrôleurs avec des capacités de calcul réduites. C'est pourquoi il est préférable que dans un RCSF on introduise quelques nœuds avec des capacités de calcul performantes. La taille des registres utilisés dans les microcontrôleurs varie entre 8 et 32 bits, ils sont dotés d'une mémoire interne généralement de type flash. La plupart des microcontrôleurs utilisés dans le domaine de la recherche sont de 8 bits avec une fréquence d'horloge égale à 16 MHz [21].

### 3. Transmetteur (transceiver unit) :

C'est le composant le plus demandeur d'énergie, et son choix est une tâche délicate qui garantit une durée de vie plus longue au réseau. On peut trouver des transmetteurs optiques passifs ou actifs ou aussi des transmetteurs radio fréquence. L'utilisation d'un transmetteur implique l'utilisation des circuits de modulation/démodulation, filtrage de fréquences, multiplexage ce qui rend l'architecture du noeud plus complexe et plus onéreuse [22].

Les caractéristiques du transmetteur (bande passante – fréquence) changent suivant le rôle prévu pour le noeud, i.e: si le noeud est doté de capteurs qui ne nécessitent pas une grande bande passante comme par exemple un capteur de température, on va lui incorporer un transmetteur avec une petite bande passante ( en général 10 à 100 Kbps), mais s'il contient des capteurs qui utilisent une bande passante très large (comme la capture de vidéo, ou d'images) ou ce noeud joue le rôle d'une passerelle dans le réseau , il est équipé d'un transmetteur avec une large bande passante ( en générale  $\geq 500$  Kbps) [20].

### 4. Batterie (power unit) :

C'est la ressource la plus critique dans un tel réseau. L'utilisation de la batterie dans les RCSF est inévitable car il ne serait pas pratique de recharger ou câbler des milliers de noeuds avec une source d'énergie. Mais on utilise souvent des batteries munies de technique de recharge comme des minis panneaux solaires. On peut trouver aussi dans un réseau quelques noeuds seulement qui sont attachés à une source permanente d'énergie, vu les tâches critiques qu'ils effectuent [17].

Vu que la durée de vie est dépendante de la batterie, on a intérêt à minimiser la consommation d'énergie. On a recourt en général à une technique qui bascule l'état d'un noeud entre le réveil et le sommeil, car une écoute continue que ce soit passif (en attente d'information) ou actif (collecte d'information) demande une quantité non négligeable d'énergie, cela ne veut pas dire que la deuxième est très performante, car en général l'énergie consommée par un transmetteur (émetteur + les circuits modulation, filtrage,...etc.) lors de l'initialisation est aussi importante mais bien sur plus petit que la première ; si on prend par exemple un réseau dans le quel la taille de données n'est pas grande, plus que la moitié de l'énergie sera épuisé dans le réveil et le sommeil du noeud. On peut utiliser la formule suivante pour estimer l'énergie consommée [22] :

$$P_c = N_t [P_t (T_{on} + T_{st}) + P_{out} (T_{on})] + N_R [P_R (R_{on} + R_{st})]$$

**P<sub>T</sub>/P<sub>R</sub>** : l'énergie consommée par le Transmetteur/ Récepteur.

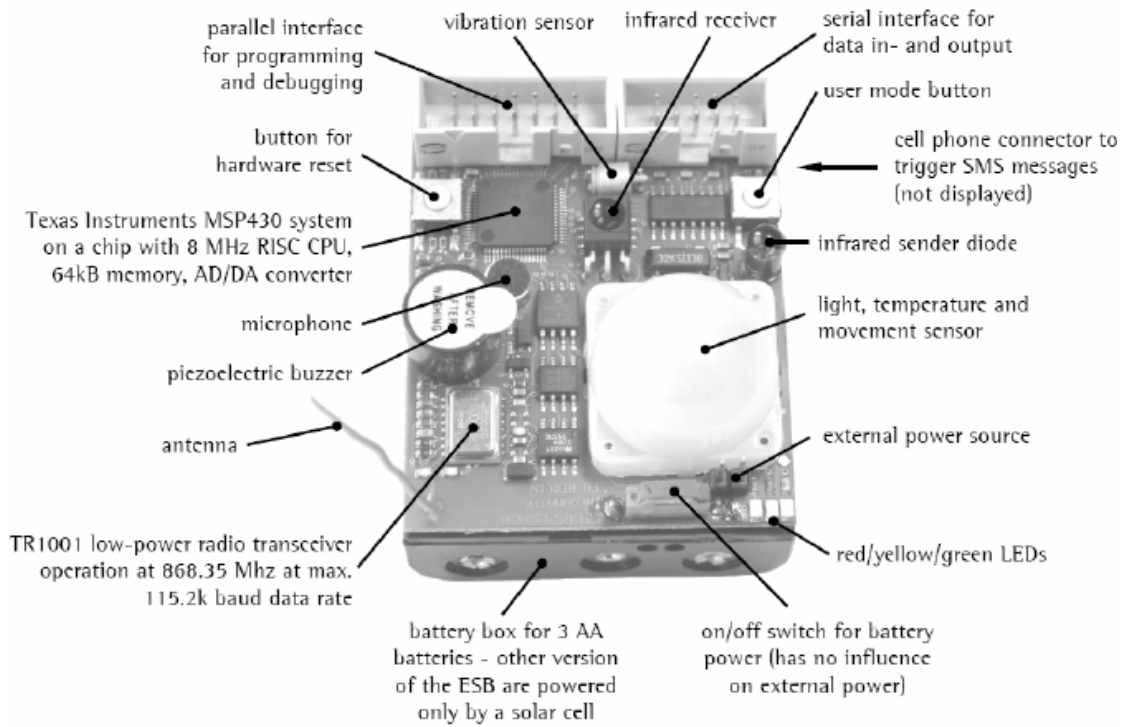
**P<sub>out</sub>** : l'énergie consommée par la sortie du transmetteur.

**T<sub>on</sub>/R<sub>on</sub>**: le temps de réveil du transmetteur.

**T<sub>st</sub>/R<sub>st</sub>** : le temps de démarrage pour le Transmetteur/Récepteur.

**N<sub>T</sub>/N<sub>R</sub>** : le nombre de réveil du transmetteur récepteur par unité de temps.

Les senseurs se déclinent en une multitude de modèles en relation avec l'application à laquelle il est destiné. Parmi les modèles les plus courants, on trouve les MICA, les MICA2 et les MICA2DOT. Même si tous ces modèles sont différents, ils ont tous en commun les mêmes composants de base.

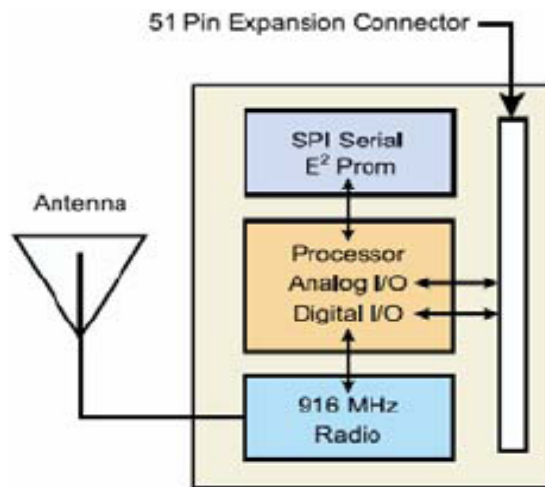


**Figure 3.4. Les composants d'un noeud de capteur. [17].**

1. MICA

Le senseur MICA (Figure 3-5) est un senseur de 2ème génération utilisé pour la recherche et le développement des réseaux de senseur sans-fil et à faible consommation .Le senseur MICA a été développé par l'Université de Berkeley's .On retrouve ce type de noeuds dans les applications suivantes :

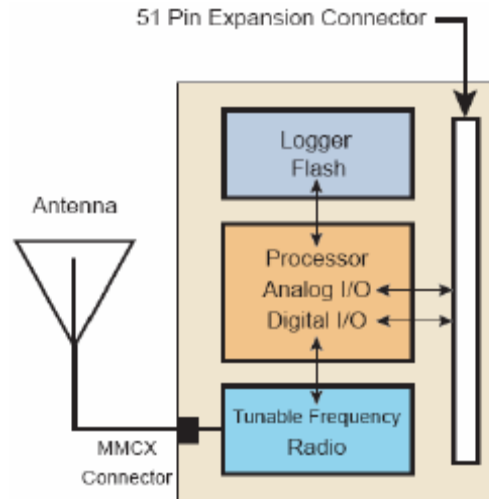
- Réseaux de senseurs sans-fil.
- Contrôles environnementaux.
- Surveillance et sécurité.
- Réseaux de senseurs de grande capacité (+1000 noeuds)



**Figure 3.5. Illustration d'une puce MICA.**

## 2. MICA2

Le senseur MICA2 (Figure 3-6) est un senseur de 3ème generation utilise pour les reseaux de senseur sans-fil et à faible consommation .Le senseur MICA2 est similaire au senseur MICA mis à part quelques nouveautés.



**Figure 3.6. Illustration d'une puce MICA2.**

## 3. MICA2DOT

Le senseur MICA2DOT (Figure 3-7) est un senseur de 3ème generation utilise pour les reseaux de senseur sans-fil et à faible consommation. Le senseur MICA2DOT est similaire au senseur MICA2 mis à part la taille du premier (25mm).Ce facteur très intéressant fait du MICA2DOT le plus répandu des senseurs.

On retrouve ce type de noeuds dans les applications suivantes :

- Réseaux de senseurs sans-fil.
- Contrôles environnementaux.
- Badges.
- Ordinateurs portables.

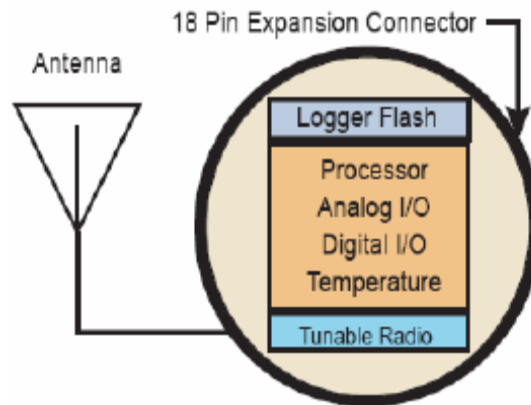


Figure 3.7. Illustration d'une puce MICA2DOT.

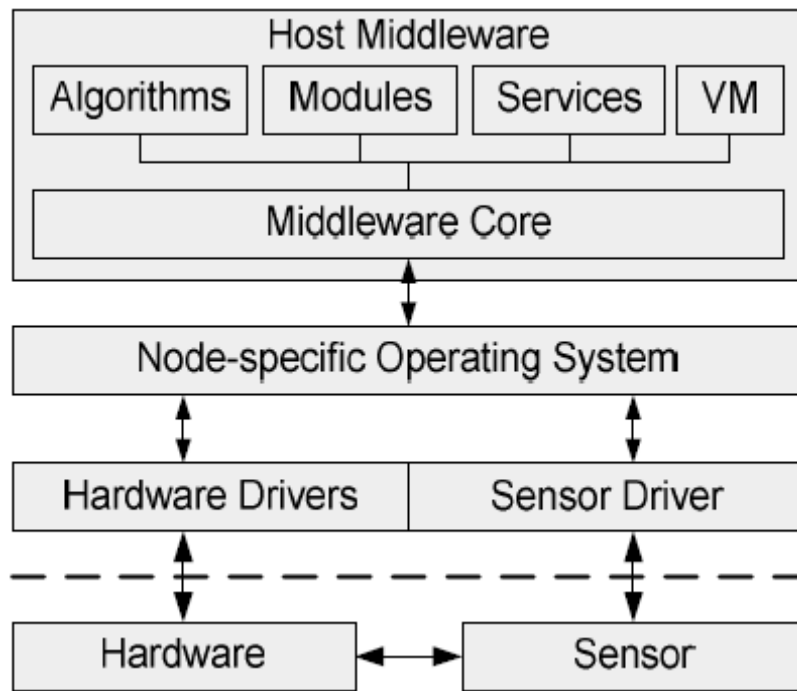
Enfin, voici des autres types de capteurs et leurs caractéristiques (Figure 3-8) :

capteur	WeC	Rene	Dot	Mica	Mica2	Mica2dot	Imote	BtNode
version	1999	2000	2001	2002	2003	2003	2003	2003
Processeur (Mhz)	4				7	4	12	7
RAM (kb)	8	8	16	128	128	128	512	128
Radio (kBaud)	0.5	0.5	1	4	4	4	64	4
Type de Radio	RFM				ChipCon		Zeevo BT	Ericson BT
Microcontroller	Amtel						ARM	Amtel
Extensible	NON	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI

Figure 3.8. Caractéristiques des capteurs.

### 7- Partie logicielle

Cette partie fait partie du défi de réseau de capteurs car elle influe sur l'énergie des nœuds et du réseau en général, la figure suivante représente les différents logiciels utilisés dans un tel réseau :



**Figure 3.9. Partie logicielle du réseau de capteurs sans fil.** [23].

On peut dire que la partie logicielle peut être divisée en 3 sous parties principales :

1- Driver:

Elle est constituée des drivers des capteurs on y trouve au moins un driver, et il y a aussi les drivers des autres composants matériels comme les Timers, la radio etc. [20].

2- Système d'exploitation:

La principale caractéristique des systèmes d'exploitation dans les réseaux de capteurs est leur degré de complexité, ils sont en général dotés d'un système moins complexe que les systèmes d'exploitation ordinaires vu les tâches qu'il accomplit, ils sont chargés de faire les opérations basiques que tout système doit remplir. Cette couche est chargée de la gestion de la mémoire, l'ordonnancement des tâches, de la gestion des processus et aussi la gestion de quelques fonctions reliées au matériel comme l'initialisation des périphériques et le redémarrage. Vu les contraintes matérielles, le système doit avoir une taille très petite, quelques Mo ou Ko et il ne doit pas aussi être très demandeur d'énergie. [20].

Il y a plusieurs systèmes d'exploitation pour le réseau de capteurs mais le plus utilisé est : TinyOS.

### TinyOS (système d'exploitation réduit)

TinyOS est un système d'exploitation intégré, modulaire et open source destiné aux réseaux de capteurs miniatures. Cette plate-forme logicielle ouverte est une série d'outils développés par l'Université Berkeley et enrichie par une multitude d'utilisateurs. En effet, TinyOS est le plus répandu des OS pour les réseaux de senseurs sans-fil. Il est utilisé dans les plus grands projets de recherches sur le sujet (plus de 10'000 téléchargements de la nouvelle version). Un grand nombre de ces groupes de recherches ou entreprises participent activement au développement de cet OS en fournissant de nouveaux modules, de nouvelles applications,...

Cet OS est capable d'intégrer très rapidement les innovations en relation avec l'avancement des applications et des réseaux eux même tout en minimisant la taille du code source en raison des problèmes inhérents a la mémoire dans les réseaux de senseurs. La librairie TinyOS comprend les protocoles réseaux, les services de distribution, les drivers pour senseurs et les outils d'acquisition de données. TinyOS est en grande partie écrit en C mais on peut très facilement créer des applications personnalisées en langages C, NesC, Java ou WWW [24].

#### 3- Middleware :

Il y a deux types de middleware :

- Middleware management

C'est le logiciel de la couche supérieure .sa tâche principale est d'organiser la coopération des nœuds distribués dans le réseau.

- Host Middleware

Ce middleware est l'interface entre les programmes du noeud et le système d'exploitation, le premier objectif de la couche middleware est la suppression de la complexité de l'environnement en isolent les logiciels de la gestion des protocoles, de la gestion des processus et de la mémoire [25].Il gère les quatre composants, qui peuvent être mis en œuvre et échangés selon la tâche des nœuds, ces composants sont :

- Les modules:

Les modules sont des composants supplémentaires qui augmentent les fonctionnalités du logiciel. Modules typiques sont des modules de routage ou de sécurité. [25].

- Les algorithmes:

Ils décrivent le comportement des modules .par exemple, le comportement d'un module de sécurité peut varier si l'algorithme de cryptage a été modifié. [25].

- Les services:

Ils sont les programmes requit pour l'achèvement de certaines tâches, cette couche co-opère en général avec les autres noeuds pour accomplir quelques tâches. [20].

- La virtuelle machine (VM):

Elle nous permet d'exécuter des programmes dans des plates-formes différentes.

## 8- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de présenter les RCSF : les différents composants et leurs caractéristiques, les topologies...etc.

La flexibilité, la tolérance de fautes, le prix réduit et les caractéristiques rapides de déploiement des réseaux de capteurs offrent des possibilités infinies de développement dans tous les domaines d'application. Ceci nous permet de penser que les réseaux de capteurs feront bientôt partie intégrante de nos vies et satisferont sûrement les plus grands projets.

Cependant, la réalisation des réseaux de capteurs doit satisfaire quelques contraintes parmi lesquelles on peut citer : la consommation d'énergie, le changement de topologie, la densité importante des réseaux...

Nous nous intéressons, dans la suite de ce projet, à la simulation des réseaux de capteurs sans fil pour étudier la consommation d'énergie dans un tel réseau.

## Simulation et Analyse

*La simulation permet de tester à moindre coût les nouveaux protocoles et d'anticiper les problèmes qui pourront se poser dans le futur afin d'implémenter la technologie la mieux adaptée aux besoins. Les simulateurs sont très utilisés dans les RCSF, pour le test de nouveaux algorithmes de routage et stratégies de déploiement. Ils sont donc indispensables pour le domaine de la recherche. Dans la seconde moitié des années 90, avec l'élaboration de plusieurs normes pour les réseaux sans fil à portée limitée, un certain nombre de simulateurs ont été développés conjointement. On cite par exemple Network Simulator 2 et son extension « sans fil », OPNET, SensorSim, TOSSIM, SNetSimulator, WSNS ou encore GloMoSim / Qualnet. Dans ce chapitre nous allons essayer de présenter le simulateur NS2, que nous allons utiliser pour évaluer les performances du réseau de capteurs présenté au chapitre 3. Nous allons, tout d'abord, éclaircir certaines fonctionnalités du simulateur NS2 telle que la prise en charge des réseaux (sans fil), et sa consommation d'énergie, la simulation proprement dite comprend plusieurs phases : l'implémentation, le scénario de simulation, et les mesures telles que la connectivité et la mobilité. Nous présentons par la suite les logiciels utilisés pour simplifier la tâche d'analyse comme PERL et MATLAB et enfin l'analyse des résultats obtenus.*

## 1. Network Simulator 2

### 1.1. Introduction

**N**S2 utilise le langage OTCL (Object Tools Command Language), dérivé objet de TCL. À travers ce langage, l'utilisateur décrit les conditions de la simulation : topologie du réseau, caractéristiques des liens physiques, protocoles utilisés, communications...etc. La simulation doit d'abord être saisie sous forme de fichier texte que NS utilise pour produire un fichier trace contenant les résultats. NS est fourni avec différents utilitaires dont des générateurs aléatoires et un programme de visualisation : NAM.

### 1.2. Historique

NS2 est un simulateur à événements discrets développé dans le but de recherche. Il est orienté objet, et il est fourni avec des outils d'analyse complémentaires eux-mêmes écrits en C/C++ ou TCL/Tk. NS2 fournit un environnement permettant de réaliser des simulations entre autres des protocoles IP, TCP, routage et des protocoles multicast dans les réseaux filaires ainsi que dans les réseaux sans fil, avec support de la mobilité des nœuds. Network Simulator 2 a été originellement développé en tant que variante du "REAL network simulator" en 1989, et a considérablement évolué au cours des années. En 1995, NS-2 était développé par le projet VINT (collaboration des chercheurs à UC Berkeley, LBL, USC/ISI et Xerox PARC). Actuellement, son développement est supporté par le DARPA à travers SAMAN et par la NSF à travers CONSER, tout en incluant de nombreuses contributions extérieures, comme en particulier les codes pour les réseaux sans fil des projets Daedalus de l'UCB et Monarch de la CMU et de Sun Microsystems.

### 1.3. Présentation du simulateur NS2

#### Définition

**L**e NS2 est un simulateur de réseaux orienté objet, écrit sur la base du langage C++, avec au devant un interpréteur OTcl. La question qui se pose c'est pourquoi deux langages ? Tout simplement parce que le NS fonctionne suivant deux raisonnements différents. D'une part, la manipulation des bits, des entêtes de paquet, mais aussi de pouvoir implémenter des algorithmes capables de parcourir plusieurs types de données, donc la création rapide et efficace des objets et variables manipulés lors de la simulation. Pour cette tâche une rapidité d'exécution est requise, et est importante (la découverte des erreurs la correction recompilation et enfin ré exécution est moins importante), ceci est offert par le C++. D'autre part la configuration des objets et la gestion des évènements, ou autre exploration d'un grand nombre de scénarios (Changement du modèle et ré exécution), donc le temps d'itération est plus important par rapport à la rapidité d'exécution, ceci par contre est offert par l'OTcl, qui le permet d'une manière interactive. Notons aussi que le tclcl permet aux objets et variables d'apparaître et d'être utilisés par les deux langages. [8]

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. De plus le simulateur possède déjà une palette de systèmes de transmission, d'ordonnanceurs et de politiques de gestion de files d'attente pour effectuer des études de contrôle de congestion. La liste des principaux composants actuellement disponibles dans NS par catégorie est :

- Application Web, ftp, telnet, générateur de trafic (CBR, ...) .
- Transport TCP, UDP, RTP, SRM.
- Routage statique ou dynamique (vecteur de distance).
- Routage Multicast (DVMRP, PIM).
- Gestion de file d'attente : RED, DropTail, Token bucket, etc.
- Discipline de service : CBQ, SFQ, DRR, Fair Queueing.
- Système de transmission : CSMA/CD, CSMA/CA, lien point à point.

Prises ensembles, ces capacités ouvrent le champ à l'étude de nouveaux mécanismes au niveau des différentes couches de l'architecture réseau. NS est devenu l'outil de référence pour les chercheurs du domaine. Ils peuvent ainsi partager leurs efforts et échanger leurs résultats de simulations. Cette façon de faire se concrétise aujourd'hui par l'envoi dans certaines listes de diffusion électronique de scripts de simulations NS pour illustrer les points de vue. [5]

Un modèle de réseau sous NS est constitué de :

- Noeuds de réseau : endroits où est généré le trafic, ou noeuds de routage.
- Liens de communication entre les réseaux.
- Agents de communication, représentant les protocoles de niveau transport (TCP, UDP), ces agents sont attachés aux noeuds et connectés l'un à l'autre, ce qui représente un échange de données (connexion TCP, flux UDP) et D'applications qui génèrent le trafic de données selon certaines lois (CBR, VBR), et se servent des agents de transport.

### 1. Noeud

La classe Node est une classe OTcl: elle n'a donc pas d'existence en tant que telle dans le simulateur .Cette classe et ses méthodes sont définies dans le fichier tcl/lib/ns-node.tcl. Un noeud est une collection de classifieurs et d'agents. Le classifieur démultiplexe les paquets. L'agent est habituellement l'entité d'un protocole.

### 2. Lien

Le lien sert à relier les noeuds. Il modélise le système de transmission. Le lien est principalement caractérisé par un délai de propagation et une bande passante. C'est une classe OTcl qui regroupe un ensemble de composants dérivés de la classe Connector. Cette classe et ses méthodes sont définies dans le fichier tcl/lib/ns-link.tcl. Des liens plus sophistiqués peuvent être dérivés de cette classe.

### 3. Agent et application

L'agent est un autre composant d'un noeud. Il modélise les constructeurs et les consommateurs de paquets IP. La classe agent fournit des méthodes utiles au développement de la couche transport et à d'autres protocoles du plan de signalisation ou de gestion. Cette classe est à la fois dans l'interpréteur et dans le simulateur. C'est la classe de base pour définir des nouveaux protocoles dans NS. Elle fournit l'adresse locale et de destination, les fonctions pour générer les paquets, l'interface à la classe Application. Actuellement NS comporte de nombreux agents citons: UDP, protocoles de routage, différentes versions de TCP, RTP, etc. [27]

## 1.4. Eléments de la simulation

### 1. Simulateur

La simulation est configurée, contrôlée et exploitée via l'interface fournie par la classe OTcl Simulator. Cette classe joue le rôle d'API. Elle n'existe que dans l'interpréteur. Un script de simulation commence toujours par créer une instance de cette classe par la commande:

***set ns\_ [new Simulator]***

### 2. Ordonnanceur

L'Ordonnanceur est défini dans le fichier scheduler. {h,cc}. L'Ordonnanceur a en charge de choisir l'événement le plus proche en terme de temps, d'exécuter les traitements, de faire progresser le temps simulé et d'avancer à l'événement suivant etc. Les événements sont rangés dans un échéancier. Un seul événement est traité à la fois. Si plusieurs événements doivent être traités au même instant. Ils sont exécutés en série mais au même instant en terme de temps simulé.

### 3. Consommation de temps

Aucun objet dans la simulation ne peut faire avancer le temps. Pour consommer du temps, il faut obligatoirement passer par l'Ordonnanceur. Ceci se réalise par

***scheduler::schedule()***

### 4. Traitement séquentiel en temps simulé

Le temps simulé est découplé du temps réel. Si aucun objet ne fait de consommation de temps, vis à vis du temps simulé tous les traitements se font en même temps (mais par rapport au temps réel ils sont exécutés en série). Un simulateur est naturellement une machine pseudo-parallèle.

Le temporisateur d'ordonnancement des événements générés par l'interpréteur est défini dans le fichier *tcl/ex/timer.tcl*.

## 1.5. Les différents modèles de propagation radio sous NS2

NS2 permet également de choisir parmi les modèles de propagation suivants, qui influenceront en particulier sur la manière dont seront atténués les signaux en fonction de la distance :

### 1.5.1 Le modèle de propagation en espace libre (Free Space model)

Ce modèle considère le cas idéal où il y a un seul chemin de propagation entre l'émetteur et le récepteur et qu'il est en vue directe. L'équation suivante permet de calculer la puissance du signal reçu en environnement libre à une distance  $d$  de l'émetteur.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}$$

(1)

Où  $P_t$  est la puissance d'émission,  $G_t$  et  $G_r$  les gains respectifs des antennes de l'émetteur et du récepteur.  $L$  (avec  $L \geq 1$ ) est la perte du système, et  $\lambda$  est la longueur d'onde. Ce modèle de propagation représente les zones de communication comme un cercle autour de l'émetteur. Si un récepteur est dans ce cercle il reçoit tous les paquets, s'il est en dehors il n'en reçoit aucun. [5]

### 1.5.2 Le modèle de propagation utilisant deux rayons (Two-ray ground model)

En environnement réel, il est en fait peu probable que le seul chemin de propagation soit le chemin direct. Le modèle two-ray ground considère donc à la fois le chemin direct et une réflexion sur le sol. Ce modèle donne des résultats plus justes que le modèle de propagation en espace libre quand la distance est assez grande. La puissance reçue à une distance  $d$  est calculée de la manière suivante :

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_r^2 h_t^2}{d^4 L}$$

(2)

Où  $h_t$  et  $h_r$  sont les hauteurs des antennes de transmission et de réception. Afin que NS soit cohérent avec le modèle de propagation en espace libre,  $L$  a été ajouté à l'équation. L'équation précédente présente une décroissance de la puissance reçue en fonction de la distance plus rapide que l'équation (1). Cependant, pour des distances courtes, le modèle à deux rayons ne donne pas de bons résultats. Le modèle de propagation en espace libre est donc utilisé à la place de celui-ci quand  $d$  est suffisamment petit. [5]

### 1.5.3 Le modèle Shadowing

Les modèles de propagation en espace libre ou utilisant deux rayons calculent de manière déterministe la puissance reçue en fonction de la distance. Ils représentent tous deux la zone de communication comme un cercle idéal. Dans la réalité, la puissance reçue à une certaine distance varie de manière aléatoire, à cause des effets de propagation par des chemins multiples. En fait, les deux modèles précédents calculent la puissance moyenne reçue à une distance  $d$ .

Le modèle "shadowing" est composé de deux parties. La première est le modèle d'atténuation en fonction de la distance, qui calcule la puissance moyenne reçue à une distance  $d$ , notée  $P_r(d)$ . Il utilise une distance courte comme référence notée  $d_0$ .  $P_r(d)$  est calculé relativement à  $P_r(d_0)$  de la manière suivante :

$$\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} = \left( \frac{d}{d_0} \right)^\beta$$

(3)

$\beta$  est appelé l'exposant d'atténuation en fonction de la distance, et est généralement déterminé de façon empirique par des mesures en environnement réel. Les grandes valeurs de  $\beta$  correspondent à une obstruction plus forte et donc à une décroissance plus rapide de la puissance reçue en fonction de la distance. [5] La table suivante donne quelques valeurs typiques de  $\beta$ .

Environnement		$\beta$
En extérieur	Espace libre	2
	Zone urbaine obstruée	2.7 à 5
En intérieur	En ligne de vue	1.6 à 1.8
	Obstrué	4 à 6

Pr ( $d_0$ ) peut être calculé à partir de l'équation (1), en prenant par exemple  $d_0 = 1$  mètre.

L'atténuation en fonction de la distance est souvent mesurée en dB. A partir de l'équation (4.3) nous avons :

$$\left[ \frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10 \log \left( \frac{d}{d_0} \right)$$

(4)

La seconde partie du modèle shadowing reflète les variations de la puissance reçue à une distance donnée. C'est une variable suivant une loi log-normale, c'est-à-dire dont la distribution mesurée en dB est gaussienne. L'ensemble du modèle shadowing est représenté par :

$$\left[ \frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10 \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{dB}$$

(5)

Où  $X_{dB}$  est la variable aléatoire gaussienne dont la moyenne est zéro et l'écart type sigma dB. Sigma dB est appelée shadowing déviation, et est également obtenue par des mesures en environnement réel. L'équation (5) est aussi connue sous le nom de log-normal shadowing model. La table suivante donne quelques valeurs typiques pour dB :

Environnement	$\sigma_{dB}$ (dB)
En extérieur	4 à 12
Bureaux, séparations légère	7
Bureaux, murs	9.6
Usine, en ligne de vue	3 à 6
Usine, obstruée	6.8

Le shadowing model étend le cercle idéal de communication à un modèle statistique plus riche ; les nœuds ne peuvent communiquer qu'avec une certaine probabilité lorsqu'ils sont vers la limite de portée. [5]

### 1.6. Les modèles de mobilité sous NS2

Puisque les réseaux sans fil (wireless) sont souvent analysés par des simulations, leurs résultats d'exécution dépendent légèrement des paramètres de réseau de simulation. Les nœuds mobiles peuvent être en mouvement constant, comme ils peuvent être immobiles. Pour cela, dans l'environnement de simulation NS2, nous retrouvons plusieurs types de modèles de simulation.

Grâce à ces modèles, nous pourrions mesurer ce facteur important, qu'est la mobilité. Parmi ces modèles de mobilité nous retrouvons :

### 1. Random Waypoint Model (RWM)

Dans ce modèle la mobilité des noeuds est typiquement aléatoire et tous les noeuds sont distribués uniformément dans l'espace de simulation. En effet il consiste en :

- Le placement d'un certain nombre de 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 choisie aléatoirement après un éventuel temps de pause. [5]

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

### 2. Random Direction Model (RDM)

De la même façon que le modèle précédant (RWM), la destination ainsi que la vitesse du nœud sont choisies aléatoirement. Mais dans le modèle RDM, le nœud en déplacement doit atteindre les bornes de la surface de simulation, puis s'immobilise. Une fois le nœud immobile, et dans un intervalle de  $180^\circ$  par rapport à la position d'arrêt (borne atteinte), le nœud mobile peut entreprendre à nouveau son mouvement aléatoire.

### 3. Modified Random Direction Model (MRDM)

Cette version modifiée du RDM permet aux nœuds mobiles, en déplacement, de ne pas forcément atteindre les bornes de la surface de simulation [8].

Notons que le modèle RWM reflète bien les caractéristiques des réseaux ad hoc. Car il offre une mobilité aléatoire aux nœuds mobiles appartenant au réseau ad hoc. Contrairement aux modèles RDM et MRDM qui, d'une manière indirecte, conditionne le mouvement des nœuds. Cette constatation nous a poussé à choisir ce modèle (le RWM) pour notre simulation.

Dans notre cas les nœuds sont immobiles donc notre réseau est statique

## 1.7. Les protocoles de routage disponibles dans NS2

Après les mises à jours qu'a connues NS (NS2, NS2.26) plusieurs protocoles de routages ont vu le jour dont : AODV, DSR, DSDV et TORA.

Le protocole de routage utilisé dans notre simulation est le protocole AODV qui s'appuie sur le principe de réduction des diffusions de messages en ne créant les routes qu'à la demande d'une source pour communiquer avec une destination bien précise. Lorsqu'une route est établie entre deux noeuds, elle est maintenue pendant la durée de la communication.

## 1.8. Fichier trace

Après avoir exécuté une simulation à partir d'un fichier TCL décrivant le scénario, NS2 génère des résultats sous la forme de deux fichiers texte un pour le NAM et l'autre pour la trace décrivant précisément l'avancement des paquets au sein du réseau de la simulation. En effet, chaque ligne de ce dernier représente un paquet envoyé ou reçu par un nœud du réseau.

Il existe deux formats pour le fichier trace. Le premier est l'ancien format (Normal Trace Format) qui se produit par défaut et le deuxième est le nouveau format (Revised Trace Format) qui est destiné aux réseaux sans fil, Pour utiliser le nouveau format il nous faut ajouter la commande suivante au script :

***\$ns use-newtrace***

Voici un exemple pour le nouveau format :

```
S -t 0.267662078 -Hs 0 -Hd -1 -Ni 0 -Nx 5.00 -Ny 2.00 -Nz 0.00 -Ne -1.000000 -N1 RTR -Nw --- -Ma 0 -Md 0 -Ms 0 -Mt 0 -Is 0.255 -Id -1.255 -It message -Il 32 -If 0 -Ii 0 -Iv 32
```

```
r -t 100.004776054 -Hs 0 -Hd -1 -Ni 1 -Nx 25.05 -Ny 20.05 -Nz 0.00 -Ne -1.000000 -N1 AGT -Nw --- -Ma 2 -Md 1 -Ms 0 -Mt 800 -Is 0.0 -Id -1.0 -It tcp -Il 1020 -If 2 -Ii 21 -Iv 32 -Pn tcp -Ps 0 -Pa 0 -Po 0
```

Le nouveau format de fichier trace peut être divisé en champs comme suit :

**1- Type d'événement :**

**s** : envoi    **r** : réception    **d** : perdu    **f** : renvoie

**2- Temps :**

- **t** temps.

**3- Propriétés de nœud :**

-**Ni**: id de nœud    -**Nx**: les coordonnées(X) de nœud    -**Ny** : les coordonnées(Y) de nœud

-**Nz**: les coordonnées (Z) de nœud    -**Ne**: niveau d'énergie de nœud

-**Nl**: le niveau de trace par exemple AGT, RTR, MAC

**4- Informations de paquet dans le niveau IP**

-**Is** : adresse source. numéro de port    -**Id** : adresse destinataire. numéro de port

-**It** : type de paquet    -**Il** : taille de paquet

-**If** : flow id

-**Ii** : unique id

-**Iv** : valeur ttl

**5- Next hop info**

-**Hs**: id de nœud    -**Hd** : id de nouveau saut vers la destination

**6- Informations de paquet au niveau MAC**

-**Ma** : durée    -**Md** : adresse Ethernet de destinataire

-**Ms** : adresse Ethernet de destinataire    -**Mt** : type d'Ethernet

## 7- Informations de paquet au niveau Application

1- **-P arp** pour les applications de ARP (Address Resolution Protocol).

**-Po** : ARP Request/Reply    **-Pm** : adresse MAC du source

**-Ps** : adresse source    **-Pa** : adresse MAC du destinataire

**-Pd** : adresse destinataire

2- **-P dsr**

**-Pn** : combien de nœuds traversés

**-Pq** : drapeau du demande de routage

**-Pi** : numero de sequence

**-Pw** : drapeau d'erreur

**-Pm** : nombre d'erreurs

3- **-P cbr**

**-Pi** : numéro de séquence    **-Pf** : combien de fois ce paquet a été renvoyé

**-Po** : nombre optimal de renvois

4- **-P tcp**

**-Ps** : numéro de séquence

**-Pa** : numéro d'acquittement

**-Pf** : combien de fois ce paquet a été renvoyé

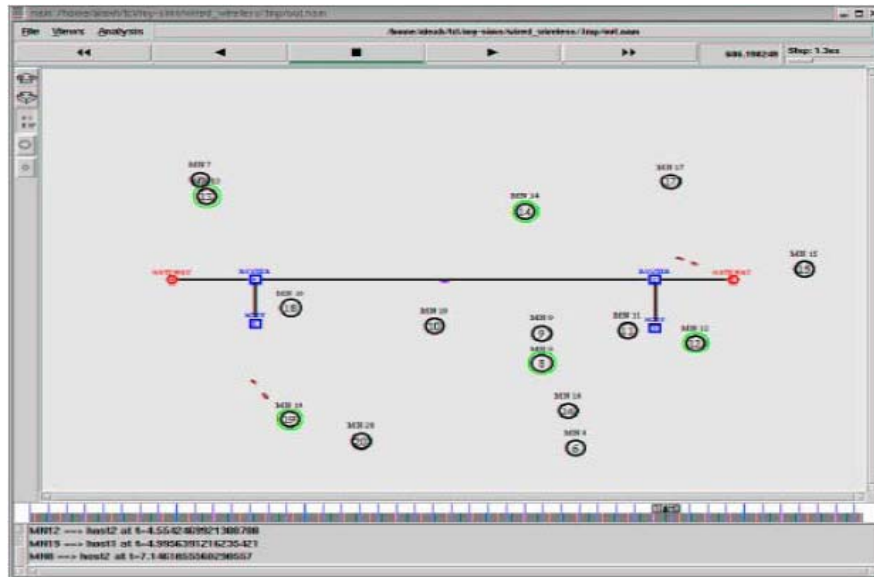
**-Po** : nombre optimal de renvois

### 1.9. L'animateur de réseau NAM

Le Nam est un outil d'animation basé sur Tcl/TK, utilisé dans NS afin de visualiser le tracé de simulation des réseaux, ainsi que les tracés de données. Le modèle théorique du Nam a été non seulement créé pour lire un large ensemble de données d'animation, mais aussi suffisamment extensible pour être utilisé quelque soit le type de réseau simulé (fixe, mobile ou mixte). Ce qui permet de visualiser tout type de situation possible. [28]

Le « NAM » peut être déclenché en utilisant la commande « nam <nam-file>, où <nam file> est le nom du fichier de traces nam qui était généré par le NS ou bien directement en dehors du script de la simulation tcl pour une simulation qu'on veut visualiser.

La figure suivante représente de NAM :



**Figure 5.1. L'animateur de réseau NAM**

## 2. le langage Perl

Le fichier trace est une sortie très importante pour l'analyse parce qu'il peut porter en lui-même énormément d'informations mais pour extraire et représenter de manière synthétique ces informations, il faut souvent appliquer de nombreux traitements à ce fichier. L'analyse des fichiers de trace dans nos simulations est réalisée en utilisant le langage puissant perl pour extraire les champs nécessaires au calcul d'énergie.

Perl est un langage de programmation adapté au traitement des fichiers textes ainsi qu'aux tâches d'administration des systèmes et des applications. Disponible dans le domaine public pour les environnements Unix, Linux, Windows ... il connaît aujourd'hui un développement très important.

Créé en 1986 par Larry Wall, Perl a, depuis connu de nombreuses versions, dans notre thèse nous allons utiliser Perl5, la version 5.6.1 est maintenant définitive.

Perl est un langage interprété et les programmes Perl se diffusent en format source. Le terme interprété est toutefois ambigu car un programme Perl s'exécute en deux phases :

La pré compilation du programme qui produit du pseudo code, puis l'interprétation du pseudo code (l'exécution proprement dite). Le pseudo code de Perl contient plus de 300 métas instructions, à l'issue de la pré compilation on obtient une suite de pseudo codes autonomes qui disposent de pointeurs vers leurs opérandes et la méta instruction suivante. [29]

Pour exécuter un programme Perl il faut utiliser la commande suivante :

***Perl <nom de fichier.pl>***

### 2.1 Un aperçu de la syntaxe

Perl est sensible à la casse (les majuscules et minuscules sont différenciées), c'est à dire que *print* est une fonction du langage, alors que *Print* ne l'est pas, mais peut bien sûr être un identificateur (de

variables, de fonction, de fichier) à la charge du programmeur. Il n'y a pas de formatage particulier dans l'écriture d'une instruction Perl, le séparateur peut être un espace, une tabulation ou même un retour à la ligne. Les instructions sont séparées entre elles par le caractère ; (le point virgule) et un commentaire est introduit en plaçant le caractère # à n'importe quel endroit d'une ligne (mais il ne s'étend que sur une ligne).

Un programme Perl (souvent appelé script) débute en général par une ligne qui indique l'endroit où se trouve le compilateur/interpréteur, c'est ainsi que l'on peut sur des systèmes Unix démarrer une application Perl en citant simplement son nom.

### 3. MATLAB

MATLAB est à la fois un langage de programmation et un environnement de développement développé et commercialisé par la société américaine « The MathWorks ».

MATLAB est utilisé dans les domaines de l'éducation, de la recherche et de l'industrie pour le calcul numérique mais aussi dans les phases de développement de projets. [30] Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique. Il peut donc être utilisé pour la résolution approchée d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles, de systèmes linéaires et tracer des courbes et des bars.

Nous avons utilisé Matlab pour générer nos différents graphes issus de notre expérimentation.

## 4. Résultats de simulation et analyse

### 4.1. La configuration du noeud mobile

Dans notre scénario de script NS2 la configuration de la simulation commence par une série de paramètres à fixer dont voici un tableau récapitulatif. Une copie du script de scénario est donnée en annexe1.

En premier temps, on détermine les valeurs des différents paramètres (les paramètres statiques) du noeud mobile :

Paramètre	Valeur
Type de canal	Channel/WirelessChannel
Type d'interface du réseau	Phy/WirelessPhy
Type de MAC	Mac/802_11
Type de file d'attente	Queue/DropTail/PriQueue
link layer type	LL
Modèle d'antenne	Antenna/OmniAntenna
Max de paquets dans la file	50 paquets
Protocole de routage	AODV
Les coordonnées X de Topologie (Max)	1000m pour les réseaux sparces et 100 pour réseaux denses
Les coordonnées Y de Topologie (Max)	1000m pour les réseaux sparces et 100 pour réseaux denses
Nom de fichier Trace	fichiertrace.tr
Durée de simulation	1000s

La configuration du noeud mobile s'effectue de la façon suivante :

```
$ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
                 -llType $val(ll) \
                 -macType $val(mac) \
                 -ifqType $val(ifq) \
                 -ifqLen $val(ifqlen) \
                 -antType $val(ant) \
                 -propType $val(prop) \
                 -phyType $val(netif) \
                 -channel $chan \
                 -topoInstance $topo \
                 -agentTrace ON \
                 -routerTrace ON \
                 -macTrace OFF \
                 -energyModel EnergyModel \
                 -initialEnergy 100.0 \
                 -txPower 0.6 \
                 -rxPower 0.2 \
```

On voit bien dans la dernière partie que l'énergie initiale est 100mw, l'émission va consommer 0.6mw et la réception va consommer 0.2mw.les autres paramètres sont définis au début de script comme par exemple le protocole de routage est défini comme suit :

***set val(rp) AODV ;***

## 4. 2.Génération des mouvements et de trafic

### 4. 2.1.Génération des mouvements

NS2 supporte les mouvements des nœuds mobiles dans 3dimensions (X, Y, Z =0 par défaut).un générateur aléatoire est disponible dans *ns/indep-utils/cmu-scen-gen/setdest*. Pour utiliser ce générateur, il faut exécuter la commande suivante :

***./setdest [-n nombre de noeuds] [-p temps de pause] [-s vitesse MAX] [-t Temps de simulation] [-x X Max de réseau] [-y Y Max de réseau] > [nom de fichier de mouvement]***

Pour notre cas, nous allons cet outil pour générer les positions initiales des noeuds parce que le réseau est statique.

### 4. 2. 2. Génération de trafic

Pour le trafic, nous allons utiliser un générateur aléatoires disponible dans : *ns/indeputils/cmu-scen-gen* .cet outil peut générer des connexions CBR ou TCP ,pour utiliser ce générateur, il faut exécuter la commande suivante :

***ns cbrgen.tcl [-type cbr|tcp] [-nn nombre de noeuds] [-seed seed] [-mc Max de connexion] [-rate rate] >[ nom de fichier de trafic]***

## 4.3. Paramètres de simulation

Nous avons des paramètres statiques et des paramètres dynamiques que nous allons changer pour tracer nos graphes. Pour les premiers sont définis dans la configuration des nœuds mobiles et les deuxièmes sont définis dans cette partie.

Dans notre expérimentation nous avons deux types de réseaux Sparse et Dense, dans la prochaine partie nous allons étudier par simulation la consommation d'énergie dans un RCSF et montrer l'impact de la portée de transmission.

Par réseaux épars, nous voulons dire un réseau de grande dimension dans lequel le nombre de nœuds capteurs est assez limité. A cet effet les paramètres de la simulation sont mentionnés dans la table ci-dessus :

<b>Nombre de noeuds</b>	<b>20, 35 ou 50</b>
<b>Taille du réseau</b>	<b>1000 x 1000</b>
<b>portée de transmission</b>	<b>50 , 100 , 250 ou 500</b>
<b>modèle de propagation</b>	<b>FreeSpace , TwoRayGround ou Shadowing</b>

Par réseaux Denses, nous voulons dire un réseau de petite dimension dans lequel le nombre de nœuds capteurs est assez grand. A cet effet les paramètres de la simulation sont mentionnés dans la table ci-dessus :

<b>Nombre de noeuds</b>	<b>50, 75 ou 100</b>
<b>Taille du réseau</b>	<b>100 x 100</b>
<b>portée de transmission</b>	<b>20, 35, 50 ou 75</b>
<b>modèle de propagation</b>	<b>FreeSpace, TwoRayGround ou Shadowing</b>

## 4.4. L'analyse

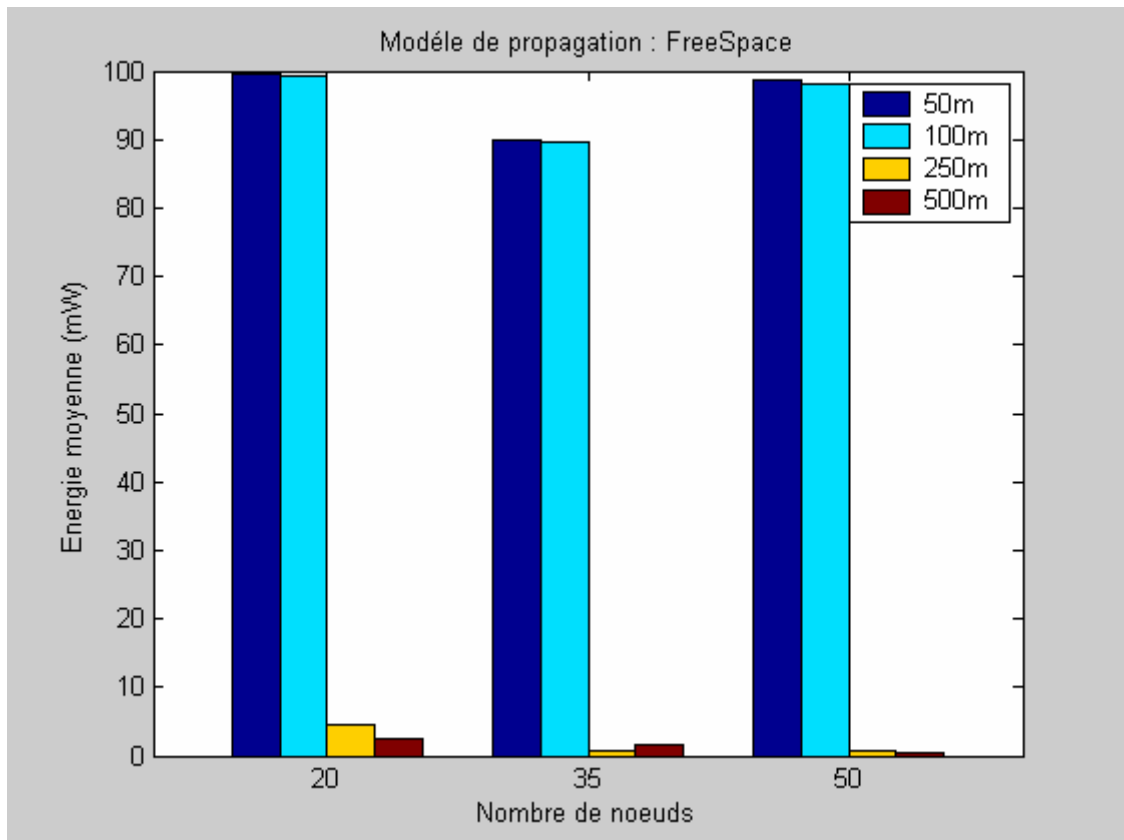
A partir des fichiers traces générés par NS, nous avons tracé les courbes (histogrammes) relatives à l'énergie moyenne des nœuds et les autres paramètres d'évaluation déjà cités.

Comme nous l'avons déjà dit, nous allons diviser le travail selon le type de réseau en deux parties :

## 1. Réseaux épars

## 1- Le modèle FreeSpace

En premier lieu, nous allons mettre en évidence l'évolution pour une durée de 1000 s de l'énergie moyenne dans le réseau ; le modèle de propagation étant « FreeSpace », topologie de 1000×1000(m) et différentes portées de transmission.



**Figure 4.2 : Energie VS nombre de nœuds pour le modèle FreeSpace**

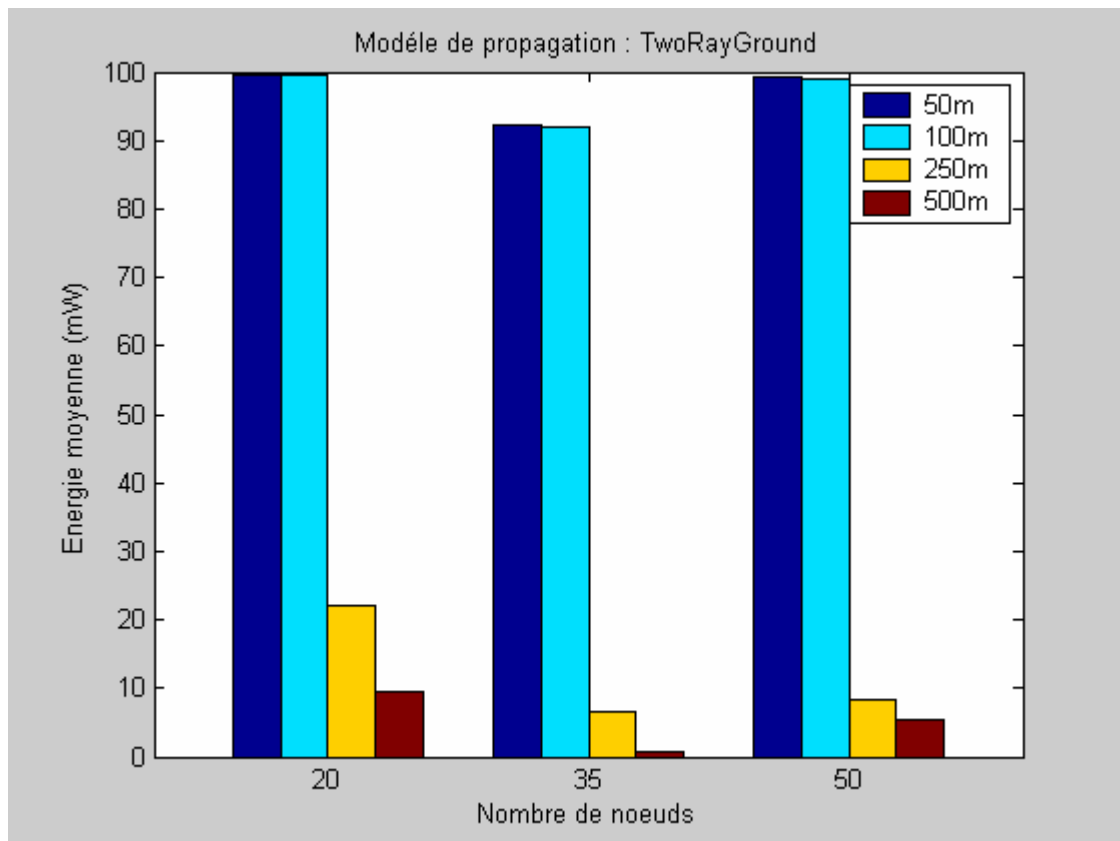
L'analyse de la courbe représentée sur la Figure 4.2, montre bien que la petite portée de transmission permet de conserver plus d'énergie que la grande. La portée de 250m et 500m consomme presque vingt fois plus d'énergie que 50 et 100m.

Notons que par énergie, nous voulons dire énergie moyenne restante dans le réseau ; ceci reste valable pour toute la suite.

Les raisons que nous pouvons invoquer sont :

- Quand la portée de transmissions devient relativement grande, la possibilité qu'il y ait des collisions augmente aussi.
- Pour s'en convaincre, il suffit de considérer la portée de 500 m dans un réseau 1000 m × 1000m. Pour cette dernière l'énergie moyenne est la plus petite. Le fait que des collisions arrivent, un nœud désirant transmettre doit faire plusieurs tentatives. Ces dernières consomment de l'énergie vu que le nœud doit rester continuellement à l'écoute du média.

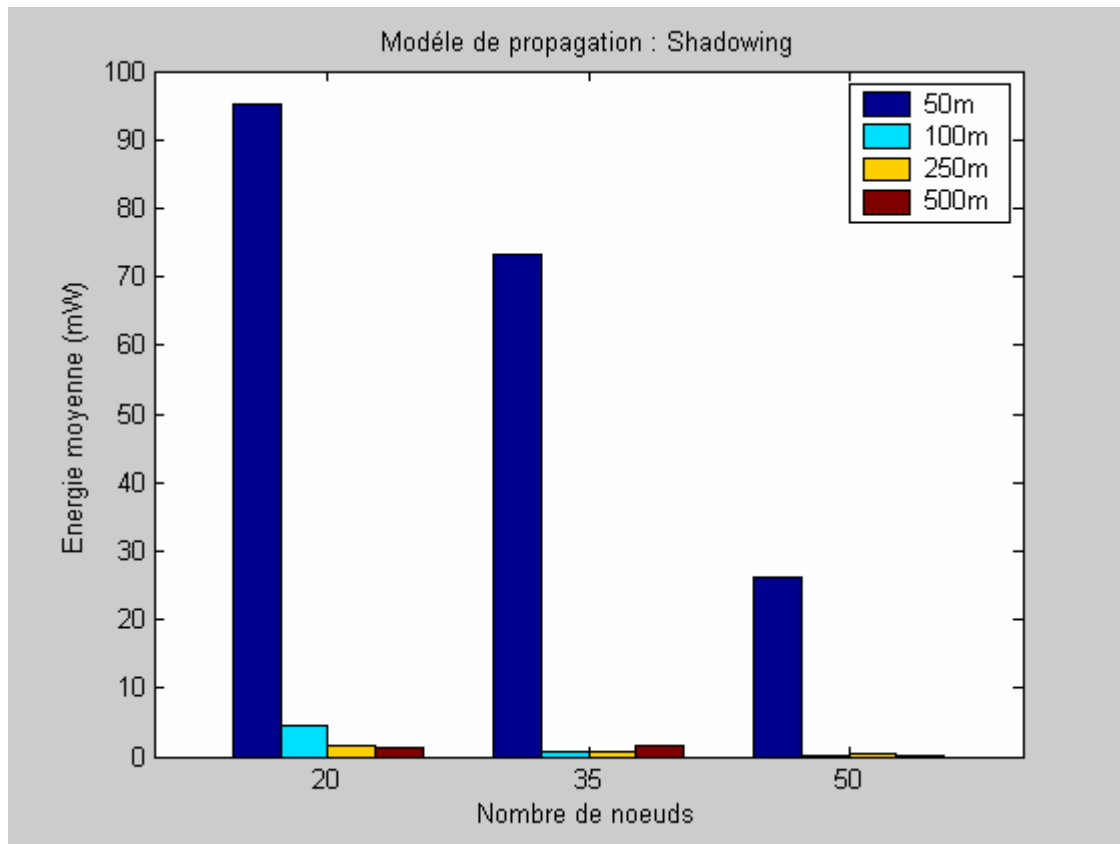
## 2- Le modèle TwoRayGround



**Figure 4.3 : Energie VS nombre de nœuds pour le modèle TwoRayGround**

Dans le but d'évaluer et de voir si le modèle de propagation pouvait influencer sur la consommation, nous avons expérimenté sous les mêmes paramètres (que le modèle FreeSpace). La figure 4.3 montre l'énergie moyenne du réseau, à l'issue de la simulation. la tendance est la même que celle de la figure 4.2 ; mais avec une légère amélioration pour les portées 250, et 500m.

## 3- Modèle de propagation Shadowing



**Figure 4.4 : Energie VS nombre de nœuds pour le modèle Shadowing**

La figure 4.4 montre que la consommation d'énergie des portées de transmission 250m et 500m est toujours plus élevée mais aussi pour la portée de 50m et 100m en plus la consommation augmente avec le nombre de nœuds .

Le modèle Shadowing est celui qui consomme le plus d'énergie .Ceci est normal car ce modèle reflète bien l'environnement urbain ou plusieurs obstacles existent d'où la retransmission des messages.

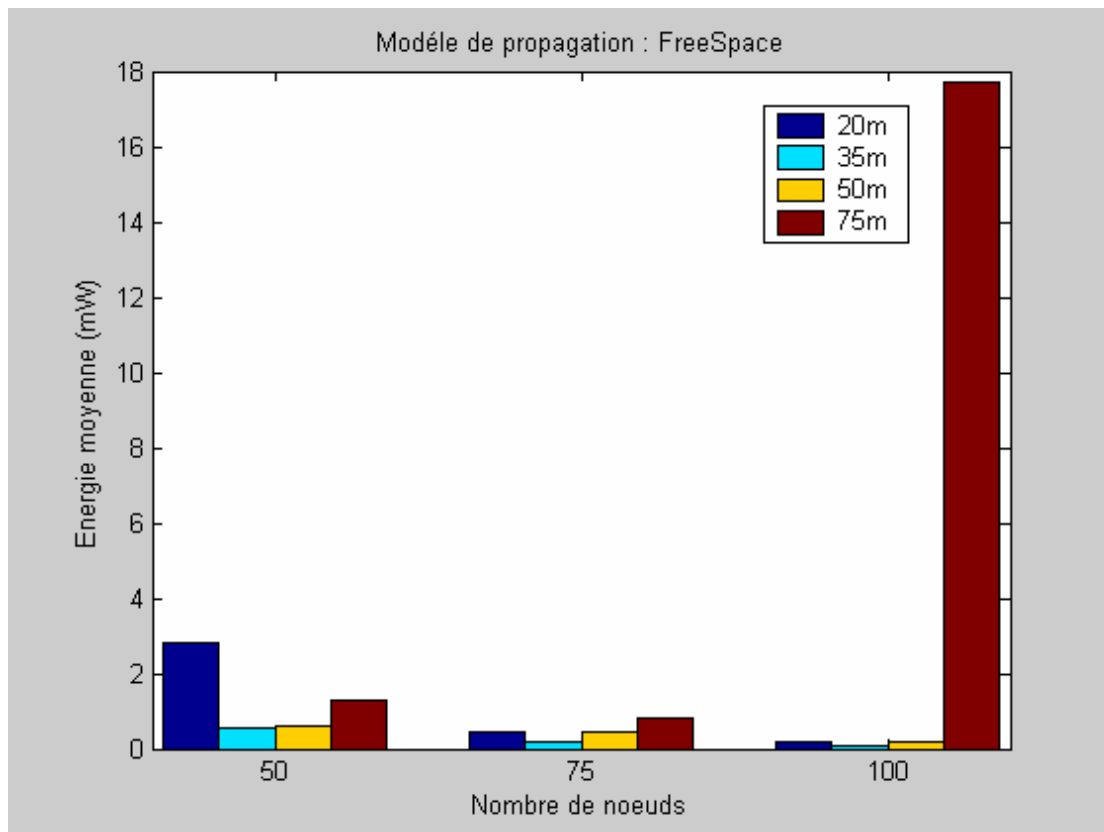
En conclusion :

Dans les réseaux éparés, l'énergie globale du réseau dépend de la portée de transmission, mais le modèle de propagation a aussi une influence certaine.

## 2. Réseaux Denses

Pour ce qui est des réseaux, les mêmes paramètres utilisés précédemment sont considérés à nouveau ,pour tenir compte de la densité du réseau, les dimensions sont  $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ .

## 1- Le modèle FreeSpace

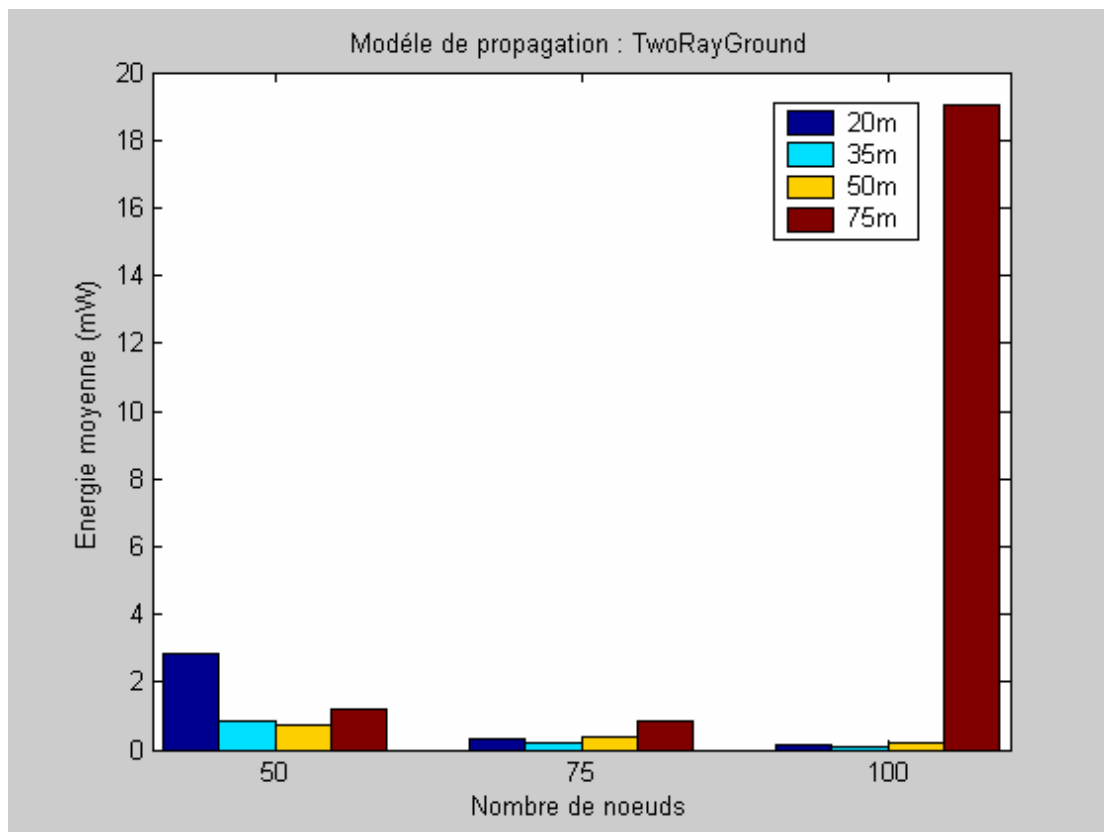


**Figure 4.5 : Energie VS nombre de nœuds pour le modèle FreeSpace**

La figure 4.5 montre que pour un réseau dense, la consommation d'énergie est plus importante que pour un réseau éparé.

Il est clair que le nombre de nœuds qui vont concourir (entrer en compétition) pour l'accès au canal est grand et de ce fait beaucoup de tentatives vont avoir lieu menant à une dépense d'énergie.

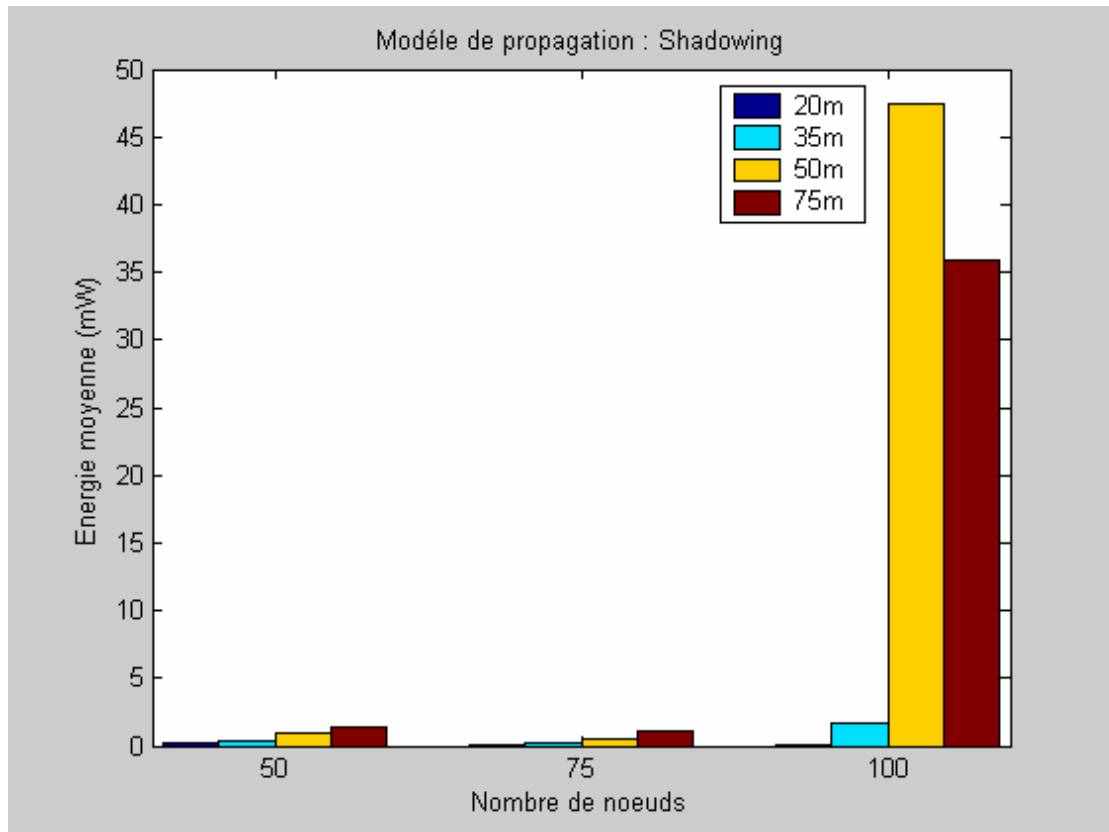
## 2- Le modèle TwoRayGround



**Figure 4.6 : Energie VS nombre de nœuds pour le modèle TwoRayGround**

La figure 4.6 montre des résultats similaires à ceux du modèle FreeSpace. Une explication possible de cette tendance est qu'indépendamment du modèle, une grande proportion de nœuds dans une petite surface pose les mêmes problèmes.

## 3- Modèle de propagation Shadowing



**Figure 4.7 : Energie VS nombre de nœuds pour le modèle Shadowing**

D'après la figure 4.7, la consommation d'énergie est encore plus grande sous ce modèle.

Paradoxalement, pour un nombre de nœuds plus élevé (voir pour 100 nœuds), la consommation est moindre. Il existe des (dans notre cas) seuils /valeurs critiques de la portée de transmission 50m pour les quelles, la tendance s'inverse sur la figure (4.7) pour 100 nœuds et une portée de transmission 50m la consommation d'énergie est la plus petite.

# Conclusion générale

---

*Dans ce projet de fin d'études, nous avons concentré notre travail sur la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.*

*Sur un plan purement théorique, nous, avons étudié, compris et donc assimilé les principaux concepts des réseaux de capteurs sans fil. De plus, l'un des problèmes majeurs, à savoir la consommation d'énergie de tels réseaux, a été abordé, sous divers paramètres tel que le modèle de propagation, la portée de transmission et la taille des réseaux.*

*Comme nous l'avons constaté, ce problème suscite toujours de l'intérêt (domaines de recherche), vu son importance dans beaucoup de domaines : militaire, médical, environnemental...etc.*

*Par contre, sur un plan pratique, nous avons pu maîtriser un outil très intéressant dans la simulation des réseaux, à savoir le NS2 et utiliser Perl pour l'analyse et enfin utiliser MATLAB pour tracer les courbes avec précision.*

*Cependant, comme perspective, il nous semble opportun de développer des protocoles de routage qui garantissent la QoS (qualité de service). De plus, la formation de groupe (clustérisation) est un autre aspect méritant de l'intérêt. Les nœuds sont ainsi, structurés en groupes dont la communication se fait via un chef de groupe ou clusterhead. la formation de tel groupe est basée sur des méthodes heuristiques et à cet effet une caractérisation approfondie (modèle de propagation, nombre des nœuds) est souhaitable.*

# Bibliographie

---

- [1] " Les reseaux fixes".  
CASES LUXEMBOURG
  
- [2] Nadjib BADACHE  
" Réseau Sans-fil : La technologie Wifi".
  
- [3] Jérémie DEFAYE  
" Les différent types de réseaux sans fil ".  
Mémoire DEA d'informatique à l'université Rhône Alpes Centre de  
Lion
  
- [4] Van der Meerschen Jerome  
" Hybridation entre les modes adhoc et infrastructure dans les réseaux  
de type Wi-Fi ".  
Mémoire de fin d'études - Université Libre de Bruxelles
  
- [5] Mariam DAWOUD et Zoubir MAMMERI.  
" Analyse du protocole AODV ".  
Mémoire DEA d'informatique à l'université Paul Sabatier - I.R.I.T en  
2006
  
- [6] Tayeb LEMLOUMA et Nadjib BADACHE  
" Le Routage dans les Réseaux Mobiles Ad Hoc ".  
MINI PROJET -USTHB Alger
  
- [8] BEDOUHENE Rafik et BENMEDDOUR Mohamed  
" Protocole De Connexion Des Réseaux AdHoc à Internet".  
Mémoire de fin d'études - DES SCIENCES ET DE LA  
TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE USTHB Alger.

- [10] Rabah MERAIHI  
" Gestion de la qualité de service et contrôle de topologie dans les réseaux ad hoc".  
Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur  
L'Ecole nationale supérieure des télécommunications Paris
- [11] Esteban Zimányi  
" Protocoles de routage pour l'interconnexion des réseaux AdHoc et UMTS".  
Mémoire DEA d'informatique à l'Université Libre de Bruxelles
- [12] Nadjib Badache.  
"La mobilité dans les systèmes répartis".  
Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur- USTHB Alger
- [13] Chunhung Richard Lin and Mario Gerla.  
"Adaptive clustering for mobile wireless networks".  
The National Science Council, Taiwan, R.O.C.
- [14] Valerie Gayraud , Lout Nuaymi.  
"La Sécurité dans les Réseaux Sans Fil Ad Hoc"  
Thomson R&I, Security Lab, ENST Bretagne,
- [16] G. Chelius , E. Fleury and T. Mignon  
"Bornes sur l'énergie de la diffusion/couverture dans les réseaux de senseurs".  
ARES INRIA / CITI INSA de Lyon
- [17] Angélique Byrde.  
" Les Réseaux de Senseurs".  
Haute école de ingénierie et de gestion du Canton de Vaud Suisse
- [18] Julien Vaudour, Vincent Gauthier  
" Comparaison de différentes couches MAC pour les réseaux de capteurs".  
Rapport de Recherche INT N\_06006RST Institut National des Télécommunications, Evry, France
- [19] WIKIPEDIA  
" Réseau de capteurs sans-fil ".
- [20] <http://www.tinyos.net/>

- [21] Bhaskar Krishnamachari  
" Networking Wireless Sensors".  
isbn-13 978-0-511-14055-6 Cambridge universite Press 2005
- [22] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci  
" Wireless sensor networks: a survey"  
School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of  
Technology, Atlanta, GA 30332, USA
- [23] Jan Blumenthal  
" Service-Oriented Software Architecture for Sensor Networks".  
IuK Tage Rostock, 20th June 2003
- [24] DJEKIDEL Mohamed Nadhir  
" Systèmes embarques a réseau de capteurs".  
Istitut national d'informatique I.N.I Alger
- [25] Jan Blumenthal, Matthias Handy,  
" Wireless Sensor Networks - New Challenges in Software Engineering"  
Richard-Wagner-Str. 31, 18119 Rostock,GERMANY
- [27] P. Anelli & E. Horlait  
" NS-2: Principes de conception et d'utilisation".  
UPMC - LIP6 Manuel NS
- [28] <http://www.isi.edu/nsnam/nam/index.html>
- [29] François Dagorn et Olivier Salaun  
" Débuter en Perl".  
<http://perso.univ-rennes1.fr/Francois.Dagorn/perl>
- [30] WIKIPEDIA  
"MATLAB".  
<http://fr.wikipedia.org/wiki/MATLAB>

# ANNEXE 1

---

## Notre programme NS2

```
#####
# définir les options #
#####

set val(chan) Channel/WirelessChannel      ;# type de canal
set val(prop) Propagation/TwoRayGround    ;# model du propagation radio
set val(netif) Phy/WirelessPhy           ;# type d'interface réseau
set val(mac) Mac/802_11                   ;# type de mac
set val(ifq) Queue/DropTail/PriQueue     ;# type interface de file d'attente
set val(ll) LL                            ;# link layer type
set val(ant) Antenna/OmniAntenna         ;# model d'antenne
set val(x) 1000                           ;# X dimension du topologie
set val(y) 1000                           ;# Y dimension du topologie
set val(cp) "/home/ilyes/Dossier de simulation/cbr-20-noeuds" ;# fichier
du model de movement des nœuds

set val(sc) "/home/ilyes/Dossier de simulation/scen-20-1000" ;# fichier
du model de trafic

set val(ifqlen) 50                        ;# max de paquets dans la file
set val(nn) 20                            ;# nombre des noeuds mobiles
set val(seed) 1.0                         ;# grain random
set val(stop) 800.0                       ;# temps de simulation (durée)
set val(tr) fichiertrace.tr               ;# nom de fichier trace
set val(rp) AODV                          ;# protocole de routage
set AgentTrace ON
set RouterTrace ON
set MacTrace OFF

# Modification dans la portée de signal

Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 1.42681e-08

# Initialisation des variables globales

set ns_ [new Simulator]

# utiliser la nouvelle format de fichier trace
$ns_ use-newtrace

# ouvrir le fichier trace
set tracefd [open $val(tr) w]
$ns_ trace-all $tracefd
```

```

#visualiser les resultats (NAM)
set namfile [open out.nam w]
$ns_ namtrace-all-wireless $namfile $val(x) $val(y)

# Charger les objets de topography
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)

# Creation de canal
set chan [new $val(chan)]

# Creation de God
create-god $val(nn)

# Création de nombre spécifier de noeuds mobiles [$val (nn)] et les attacher
aux canal
# Configuration de chaque noeud

    $ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
        -llType $val(ll) \
        -macType $val(mac) \
        -ifqType $val(ifq) \
        -ifqLen $val(ifqlen) \
        -antType $val(ant) \
        -propType $val(prop) \
        -phyType $val(netif) \
        -channel $chan \
        -topoInstance $topo \
        -agentTrace ON \
        -routerTrace ON \
        -macTrace OFF \
        -energyModel EnergyModel \
        -initialEnergy 100.0 \
        -txPower 0.6 \
        -rxPower 0.2 \

    for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
        set node_($i) [$ns_ node]
        $node_($i) random-motion 0           ;# disactiv  "random motion"
    }

# Initialisation de GOD
set god_ [God instance]

#
# Appel des fichiers des mouvements et du trafic
#

# Appel des fichiers des mouvements
if { $val(cp) == "" } {
    puts "**** NOTE: no connection pattern specified."
    set val(cp) "none"
} else {
    puts "Loading connection pattern..."
    source $val(cp)
}

```

```

# Appel des fichiers de trafic

if { $val(sc) == "" } {
    puts "*** NOTE: no senario file specified."
    set $val(sc) "none"
} else {
    puts "Loading scenario file..."
    source $val(sc)
    puts "Load complete..."
}

# La grandeur des noeuds dans le NAM

for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {

    # La fonction doit être appelé après la définition de modèle de mobilité

    $ns_ initial_node_pos $node_($i) 60

}

# stopper les noeuds apres la fin de la durée de simulation

for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {
    $ns_ at $val(stop) "$node_($i) reset";
}
$ns_ at $val(stop) "stop"
$ns_ at $val(stop) "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"

proc stop {} {
    global ns_ tracefd
    $ns_ flush-trace
    close $tracefd
}

puts "Starting Simulation..."
$ns_ run

```

# ANNEXE 2

---

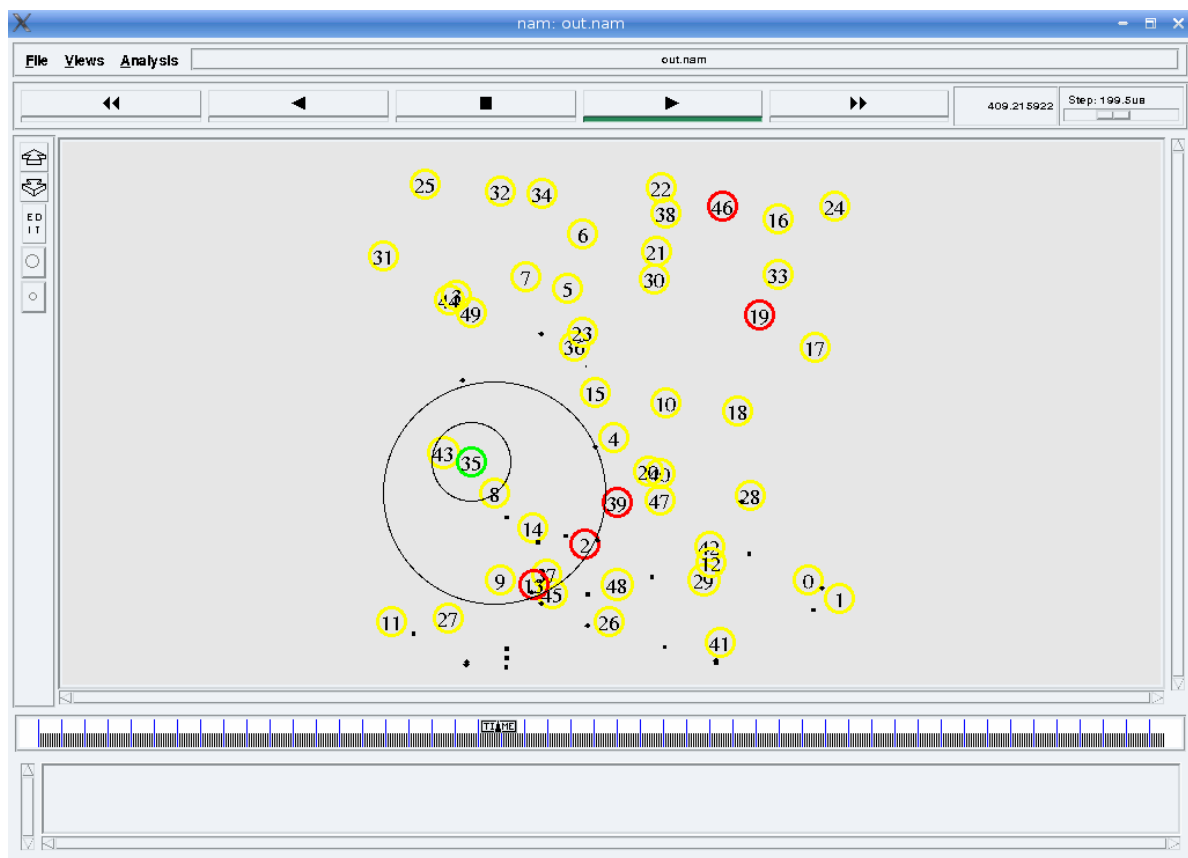
## Script Perl

```
#!/usr/bin/perl

use strict;
my $nn = 0;
my $temp;
print " Quel est le nombre de noeuds \n " ;
$nn = <stdin>;
chomp $nn;
if ( $nn != 20 && $nn != 35 && $nn != 50 && $nn != 75 && $nn != 100 ) {
    print " ERREUR Nombre de noeuds est incorrect \n " ;
}
else
{
    open Trace,"< fichiertrace.tr" or die "le fichier n'existe pas! \n";
    my @noeuds ;
    my $i = 0;
    my $n = 0;
    my $e = 0;
    my $moy = 0;
    for ($i=0; $i<$nn; $i++){
        $noeuds[$i] = 100;
    }
    while(<Trace>){
        my @line = split;
        if ($line[0] eq "N" ) {
            $n = $line[4];
            $e = $line[6];
        }
        else{
            $n = $line[8];
            $e = $line[16];
        }
        if ($noeuds[$n] > $e ) {
            $noeuds[$n] = $e;
        }
    }
    for ($i=0; $i<$nn; $i++){
        print "$i ----- $noeuds[$i] \n";
        $moy = $moy + $noeuds[$i];
    }
    $moy = $moy/$nn;
    print "la moyenne est ----- $moy \n";
}
close(Trace);
```

# ANNEXE 3

## Résultat de simulation sur le Animateur de réseau



**Nous remarquons que les couleurs des nœuds varient l'un de l'autre parce que le niveau d'énergie est différent.**