

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU**  
**FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE**  
**DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE**



# **Mémoire**

**De fin d'études**

**En vue d'obtention du diplôme de Master en Informatique**  
***Spécialité : Ingénierie des systèmes d'information***

## **Thème :**

**Etude comparative de protocoles  
de routage dans les RCSFs**

**Proposé et dirigé par :**

**M<sup>me</sup> M.Belkadi**

**Réalisée par :**

**M<sup>elle</sup> BERZIGA Farida**

**Promotion 2012-2013**

---

# *Remerciements*

---

*Je tiens à remercier mon dieu, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la patience jusqu'à l'achèvement de ce travail.*

*J'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à ma promotrice Mme BELKADI Malika pour sa disponibilité et son encadrement, ainsi que pour son soutien tout au long de l'année.*

*Egalement, je remercie les membres de jury, qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail.*

*J'aimerais également remercier tous mes amis(e) de leurs soutient et aide et qui m'ont donnés la force pour résisté.*

# *Dédicaces*

---

*Je dédie ce travail à :*

*Mes très chers parents ;*

*La mémoire de mon cher et tendre frère,*

*Son décès nous affecte à jamais ;*

*Ma belle-sœur Zahia et mon neveu Yassine ;*

*Mes autres frères et sœurs ;*

*Sans oublier tous mes amis ;*

# ***TABLE DES MATIERES***

# Table des matières

---

## Table des matières

Introduction générale

### Chapitre I : généralités sur les réseaux de capteurs sans-fil

I.1 Introduction .....	1
I.2-Les capteurs sans fil.....	1
I.3- Les réseaux de capteurs sans fil.....	3
I.3.1-Objectifs de base des RCSFs.....	4
I.3.2-Composants d'un réseau de capteurs.....	4
I.3.3-Caractéristiques des réseaux de capteurs .....	5
I.4- Les domaines d'application des RCSF.....	8
I.4.1-Domaine militaire.....	8
I.4.2- Domaine environnemental .....	9
I.4.3- Domaine médical.....	9
I.4.4- Domaine commercial .....	9
I.5-La communication dans les RCSFs .....	9
I.6- Architecture des réseaux de capteurs sans fil.....	9
I .6.1-Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs.....	10
I.6.1.1 -Les niveaux de gestion dans RCSF.....	11
I.6.1.2 -Les couches protocolaires .....	12
I.7-Technologie et standard de communication.....	13

# Table des matières

---

I.8-Contraintes liées aux réseaux de capteurs .....15

I.9-Conclusion.....17

## **Chapitre II : Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil**

II.1-Introduction.....19

II.2-Consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs.....19

II.2.1-Energie de capture.....19

II.2.2-Energie de traitement.....19

II.2.3-Energie de communication.....20

II.3-Facteurs intervenant dans la consommation d'énergie.....20

II.3.1- Etat du module radio.....20

II.3.2- Accès au médium de transmission.....21

II.3.3- Classe d'application.....23

II.3.4-Routage des données.....23

II.4-Techniques de minimisation de la consommation d'énergie.....24

II.5- Routage dans les réseaux de capteurs.....24

II.5.1 Facteurs pour le développement de protocole de routage.....24

II.5.2- Métriques de mesure d'efficacité d'un protocole de routage .....26

II.6- Classification des protocoles de routage pour les RCSFs.....26

II.6.1-Selon la topologie du réseau.....27

II.6.2- Sous-classes des protocoles de routage.....29

II.7-Conclusion.....32

# Table des matières

---

## **Chapitre III : Etude expérimentale**

III.1-Introduction.....	33
III.2- Motivation.....	33
III.3- Les protocoles de routage retenus.....	34
III.3.1- DC (Direct Communication) .....	34
III.3.2 MTE (Minimum Transmission Energy) .....	35
III.3.3 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) .....	36
III.4- Comparaison de la durée de vie des noeuds avec MTE, DC et LEACH.....	38
III.5- Environnement de simulation.....	39
III.6-Simulation et évaluation des performances.....	40
III.6.1- Scénario de simulation.....	40
III.6.2 Critères de performance .....	41
III.6.3-Discussion des résultats.....	42
III.7 Conclusion.....	46
Conclusion générale et perspectives.....	47
Annexe.....	49
Références bibliographique.....	58

---

***INTRODUCTION***  
***GENERALE***

## Introduction générale

---

Les progrès réalisés dans le domaine des réseaux sans fil ont contribué à l'évolution de l'Internet en facilitant l'accès aux usagers indépendamment de leurs positions géographiques. L'évolution dans le domaine des communications sans fil et l'informatique mobile gagne de plus en plus de popularité, et les composants mobiles deviennent de plus en plus fréquents. Comme beaucoup de développements technologiques, les réseaux de capteurs sans fil ont émergé pour des besoins militaires tels que la surveillance sur le terrain de combat. Puis, ils ont trouvé leur chemin pour des applications civiles.

Aujourd'hui Les réseaux de capteurs présentent un champ d'application très vaste, citons par exemple : le domaine scientifique, logistique, militaire, domotique, environnementale ou encore de la santé. Selon MIT's Technology Review, il s'agit de l'une des dix nouvelles technologies qui bouleverseront le monde et notre manière de vivre et de travailler.

La batterie est un composant important d'un capteur. En général, elle n'est ni remplaçable ni rechargeable. Elle peut être, en partie, alimentée par une unité génératrice d'énergie comme les cellules solaires de petite taille. Elle fournit donc une quantité d'énergie très limitée à l'échelle de 1 à 2J par nœud (capteur). Elle limite ainsi la durée de vie du capteur et influe sur le fonctionnement global du réseau. C'est pourquoi, les protocoles permettant d'économiser l'énergie occupent, aujourd'hui, un axe important de recherche dans ce domaine.

Un capteur assure l'acquisition, le traitement de données et leurs communications. C'est cette dernière tâche qui est la plus consommatrice d'énergie. Un bon schéma de gestion d'énergie doit donc, en priorité, prendre en compte les communications. La plupart des protocoles de communications dans les réseaux Ad Hoc ne s'adaptent pas aux particularités des réseaux de capteurs. D'où, la nécessité de les améliorer ou de développer de nouveaux protocoles. Les deux principales classes de protocoles utilisées, à l'heure actuelle, dans les réseaux de capteurs sans fil, s'appuient sur la technique de routage multi sauts ou le clustering (voir une hybridation des deux).

Plusieurs approches sont proposées pour calculer le chemin optimal dans les protocoles de routage multi sauts. Certaines proposent de prendre le chemin le plus court, en termes de distance, vers la station de base. D'autres, se basent sur le niveau d'énergie dans les nœuds tout au long du chemin en privilégiant les nœuds ayant des quantités d'énergie résiduelle maximales. D'autres encore, choisissent un chemin optimal en privilégiant certains nœuds dont la présence dans le chemin permet de consommer moins d'énergie. Cependant, le

# Introduction générale

---

premier inconvénient du routage multi sauts dans les réseaux de capteurs sans fil est la périodicité des messages envoyés pour maintenir les itinéraires valides, ce qui a pour effet d'encombrer le réseau et de consommer ainsi de l'énergie supplémentaire.

Dans ce mémoire , nous allons nous intéresser aux protocoles de routages à économie d'énergie, et plus exactement aux protocoles DC (*Direct Communication*), MTE (*Minimum Transmission Energy*), et LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*), nous allons les étudier, les comparer pour arriver à des conclusion et à des solutions pour router les données tous en économisons l'énergie dans les réseaux de capteur sans fils.

Ce manuscrit s'articule autour de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous définissons les réseaux de capteurs sans fil, leur architecture, leurs caractéristiques et leurs domaines d'applications, Nous spécifions par la suite le type de communication utilisé dans ces réseaux, pour discuter à la fin des contraintes liées à ce type de réseau, ainsi que les axes de travaux de recherches.

Dans le deuxième chapitre, nous nous concentrons sur la contrainte énergétique, nous présentons les différentes opérations qui consomment l'énergie, et les techniques de minimisation de cette consommation. Dans la deuxième partie, nous présenterons les facteurs et les métriques à utiliser pour le développement des protocoles de routages pour les réseaux de capteurs sans fil. Nous enchaînons ensuite avec les protocoles de routage les plus connus dans les réseaux de capteurs sans fil et leur classification.

Dans le troisième chapitre, nous étudions, les trois protocoles DC (*Direct Communication*), MTE (*Minimum Transmission Energy*), et LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) que nous allons comparer, pour en tirer des conclusions quant à leur efficacité sur la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Par la suite nous présentant l'outil de simulation utilisé qui est TinyOS. Et nous montrons à travers une série de simulation réalisé, quelques résultats et conclusions sur les trois protocoles que nous avons étudiés.

Nous terminant enfin avec une conclusion et quelque perspective d'avenirs.

# **Chapitre I.**

---

## **Généralités sur les réseaux de capteurs sans-fil**

## I.1 Introduction :

Le besoin d'observer, de capturer, et éventuellement de contrôler des phénomènes physiques tels que la température, la pression, le son, l'humidité, le degré d'irradiation ou encore la luminosité est essentiel pour de nombreuses applications industrielles, scientifiques, et même grand public.

Cette tâche est déléguée aux capteurs dont la fonction principale est l'acquisition de l'information sur les phénomènes observés, voir même l'exécution des traitements qui s'y attachent. L'utilisation des capteurs n'est pas une nouveauté en soi. En effet, de nombreux domaines en font usages, principalement dans l'aéronautique, l'industrie pétrolière, l'automobile, etc. Ce qui est nouveau, c'est leur miniaturisation grandissante et leur perfectionnement constant ainsi que l'abandon des câblages encombrants traditionnellement utilisés au profit des communications radio, à des coûts raisonnables.

En effet, grâce aux récents progrès les Réseaux de Capteurs Sans-fil sont basés sur la collaboration d'un grand nombre de nœuds qui opèrent d'une manière autonome et complètement transparente pour l'utilisateur. Ces nœuds, appelés capteurs, sont des dispositifs d'une taille minuscule qui intègrent des unités de calcul et de communication sans fil. Le rôle de ces capteurs consiste à détecter un phénomène dans un environnement, de traiter les données captées et enfin envoyer le résultat de l'analyse via un support de transmission sans fil.

Dans ce premier chapitre, nous présenterons un ensemble de généralités sur les réseaux de capteurs sans-fil et notamment sur leur architecture, caractéristiques, et leurs domaines d'applications.

## I.2-Les capteurs sans fil : [3]

L'utilisation des capteurs sans fil est de plus en plus demandée dans la vie courante. Les industries proposent des capteurs sans fil performant qui peuvent renseigner l'utilisateur sur plusieurs données selon le domaine d'application. Ces capteurs ont une architecture et des caractéristiques qui seront détaillées ci-dessous.

Un capteur est un petit appareil autonome capable d'effectuer des mesures simples sur son environnement immédiat, comme la température, la vibration, la pression, etc. Chaque capteur assure trois fonctions principales : la collecte, le traitement et la communication de l'information vers un ou plusieurs points de collecte appelés station de base (SB). Il est constitué de quatre unités principales comme le montre la figure I.01 :

- **Unité de capture (Sensing unit)** : elle est composée d'un dispositif de capture physique qui prélève l'information de l'environnement local et d'un convertisseur analogique/numérique appelé CAN (Convertisseur Analogique Numérique) qui va convertir l'information captée et la transmettre à l'unité de traitement.

- **Unité de traitement (Processing unit)** : est composée de deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une autre pour l'unité de transmission. Cette unité est également composée d'un processeur et d'une mémoire. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les stocke en mémoire ou les envoie à l'unité de transmission.
- **Unité de transmission (Transceiver unit)** : elle est composée d'un émetteur/récepteur (module radio) pour assurer toutes les émissions et réceptions de données.
- **Unité d'énergie (Power unit)** : elle est responsable de la gestion de l'énergie et de l'alimentation de tous les composants du capteur. Elle consiste, généralement, en une batterie qui est limitée et irremplaçable, ce qui rend l'énergie une principale contrainte pour un capteur.

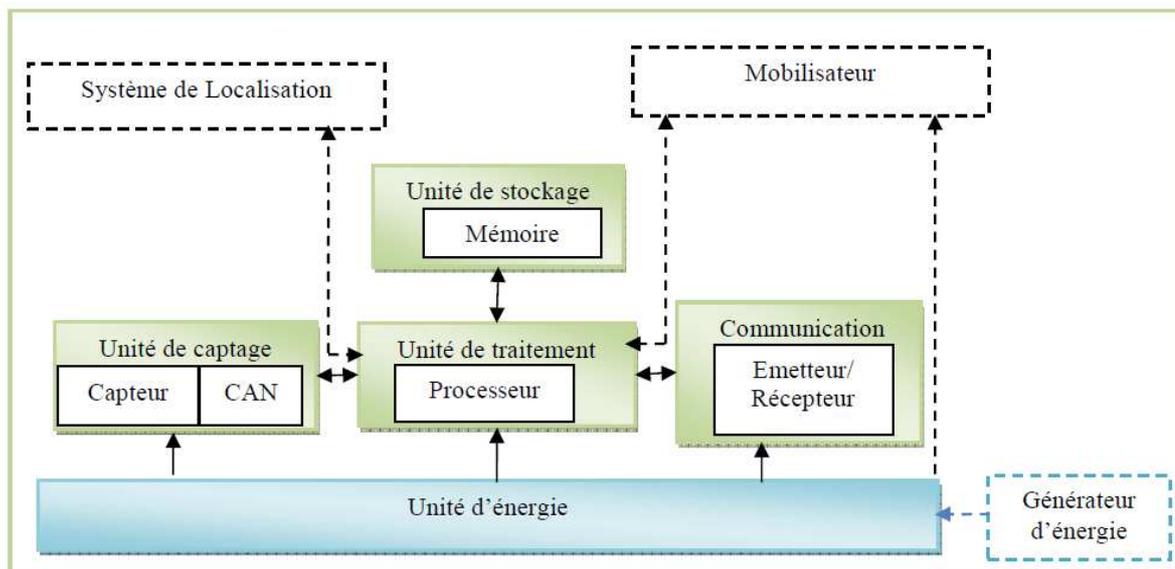


Figure I.01: Architecture matérielle d'un capteur.

### I.3- Les réseaux de capteurs sans fil :

Depuis quelques décennies, le besoin d'observer et de contrôler des environnements hostiles est devenu essentiel pour de nombreuses applications militaires et scientifiques. Les nœuds utilisés doivent être autonomes, d'une taille miniature et peuvent être déployés d'une manière dense et aléatoire dans le champ surveillé. Une classe spéciale de réseaux dite réseaux de capteurs sans fil est apparue ces dernières années, grâce aux développements technologiques tels que la miniaturisation des composants électroniques, la diminution des coûts de fabrication et l'augmentation des performances et des capacités de stockage, d'énergie et de calcul [2].

Les réseaux de capteurs sans-fil sont considérés comme un type spécial des réseaux ad hoc ou l'infrastructure fixe de communication et l'administration centralisée sont absentes et les nœuds jouent, à la fois, le rôle des hôtes et des routeurs. Les nœuds capteurs sont des capteurs intelligents "smart sensors", capables d'accomplir trois tâches complémentaires : le relevé d'une grandeur physique, le traitement éventuel de cette information et la communication avec d'autres capteurs. L'ensemble de ces capteurs, déployés pour une application, forme un réseau de capteurs. Le but de celui-ci est de surveiller une zone géographique, et parfois d'agir sur celle-ci (il s'agit alors de réseaux de capteurs-actionneurs) [1].

### **I.3.1-Objectifs de base des RCSFs :**

Les objectifs de base des réseaux de capteurs sans-fil dépendent généralement des applications, cependant les tâches suivantes sont communes à plusieurs applications :

- Déterminer les valeurs de quelques paramètres suivant une situation donnée. Par exemple, dans un réseau environnemental, on peut chercher à connaître la température, la pression atmosphérique, la quantité de la lumière du soleil, et l'humidité relative dans un nombre de sites, etc.
- Détecter l'occurrence des événements dont on est intéressé et estimer les paramètres des événements détectés. Dans les réseaux de contrôle de trafic, on peut vouloir détecter le mouvement de véhicules à travers une intersection et estimer la vitesse et la direction du véhicule.
- Classifier l'objet détecté. Dans un réseau de trafic par exemple, un véhicule est-il une voiture, un bus, etc.

### **I.3.2-Composants d'un réseau de capteur :**

Un réseau de capteurs sans fil générique est composé d'un grand nombre de nœuds capteurs dispersés dans le terrain d'intérêt appelé champ de captage. Les nœuds ont la possibilité de collecter périodiquement les données sur le phénomène surveillé et envoyer les rapports de captage à un nœud spécial appelé puits (sink ou station de base). Ce nœud est responsable, en plus de la collecte de donnée, de la diffusion des demandes sur les types de données requise aux capteurs via des messages de requêtes [1].

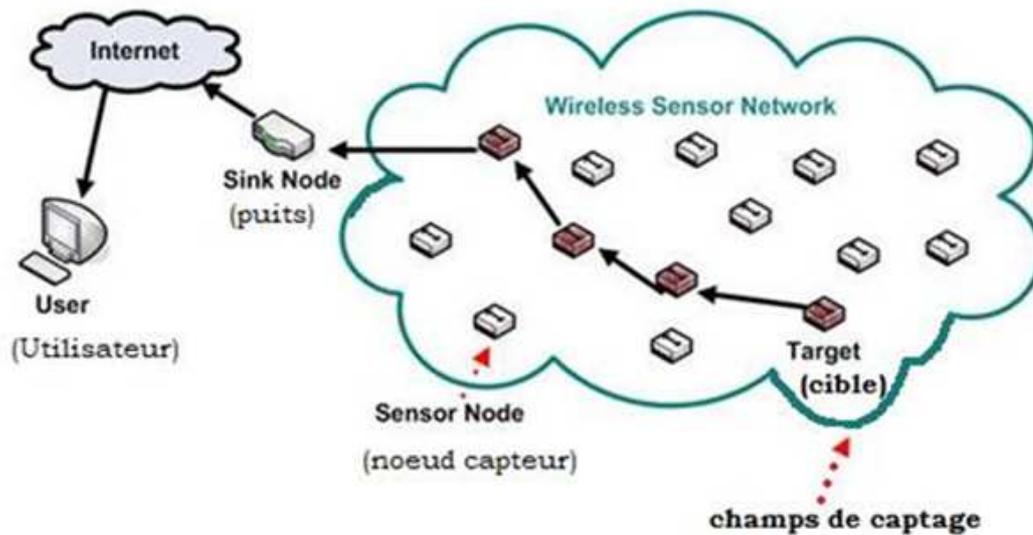


Figure I.02 : Le champ de captage dans un réseau de capteurs sans fil

### I.3.3- Caractéristiques des réseaux de capteurs :

Dans ce qui suit on va détailler les caractéristiques spécifiques aux RCSFs

- **Contrainte d'énergie**

Dans les réseaux ad hoc, la consommation d'énergie a été considérée comme un facteur déterminant mais pas primordial car les ressources énergétiques peuvent être remplacées par l'utilisateur. Ces réseaux se focalisent plus sur la QoS (qualité de service) que sur la minimisation de la consommation d'énergie. Par contre, dans les réseaux de capteurs, la consommation d'énergie est une contrainte très importante puisque généralement les capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles. Ainsi, il est difficile voire impossible de remplacer les batteries après leur épuisement. De ce fait, la consommation d'énergie au niveau des capteurs a une grande influence sur la durée de vie du réseau en entier [2].

- **Forte densité**

Les réseaux de capteurs sont caractérisés par une grande densité des nœuds déployés dans la région à surveiller. Un réseau peut contenir des centaines voire des milliers de nœuds capteurs.

- **Ressources limitées**

Les capteurs sont des objets communicants à taille très réduite ce qui limite leurs ressources en termes de : mémoire disponible, puissance de traitement, bande passante et particulièrement en quantité d'énergie embarquée.

Il existe, en effet, plusieurs stratégies pour déployer les nœuds d'un réseau de capteurs sur une zone à surveiller, le choix d'une de ces stratégies dépend du type de l'application et de l'objectif du réseau. Le déploiement peut être déterministe ou aléatoire [7, 2].

Dans la première stratégie, les capteurs sont placés manuellement et les données sont conduites via des chemins prédéterminés, mais cette solution devient impossible

dès que l'on considère un très grand nombre de capteurs. Le déploiement aléatoire consiste à disperser les capteurs sur le champ de captage en masse (ex : lâchés d'un avion). D'autre part, un mélange de ces deux techniques peut être envisagé. Les caractéristiques de déploiement, le fonctionnement autonome et la fréquence élevée de pannes (due à l'épuisement d'énergie ou la destruction) rendent la maintenance de la topologie d'un réseau de capteurs complexe. En effet, plusieurs centaines de capteurs sont déployés avec une densité pouvant être supérieure à 20 nœuds par m<sup>2</sup>, ce qui exige une bonne gestion de la maintenance de la topologie du réseau déployé. De plus, il est toujours préférable de prévoir une forte densité autour de la station de base car toutes les données sont acheminées vers cette station.

- ***Mobilité***

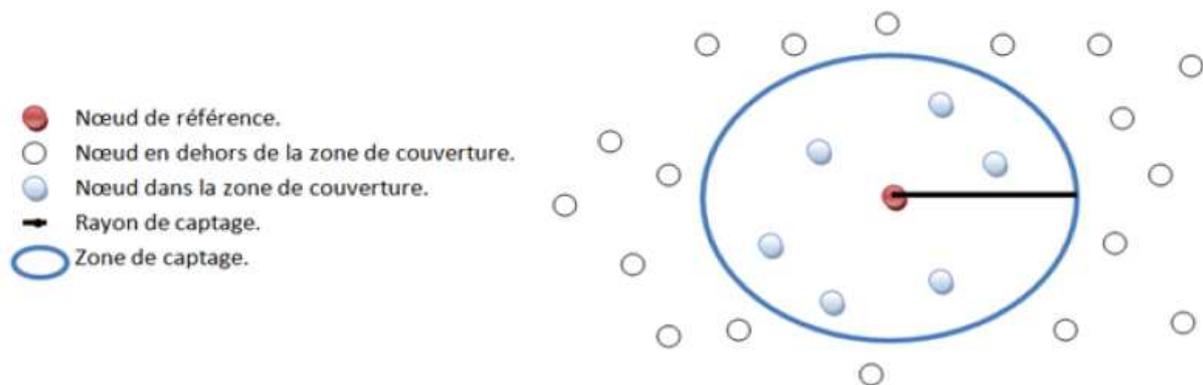
La mobilité devient une question clé pour certains types de réseaux de capteurs. Par exemple, dans des applications de détection où les capteurs sont embarqués sur des dispositifs mobiles tels que les véhicules, ou sur des animaux. Si la mobilité est trop fréquente, elle ne peut être considérée comme un problème secondaire dans ce type d'environnement. Ainsi, la détection des voisins et la reconfiguration du réseau exigent habituellement un nombre important de messages de contrôle de topologie, ce qui induit à une dépense importante en énergie. En outre, un autre type de mobilité pourrait être pris en compte, qui est la mobilité de la station de base et dans d'autres cas la mobilité des deux dispositifs en même temps : nœuds et station de base [2].

- ***Auto organisation du réseau et évolutivité de la topologie***

Ceci peut être nécessaire, vu la grande densité des nœuds capteurs et leur déploiement dans des zones d'intérêt critiques où aucune intervention humaine ne peut être possible pour assurer leur organisation. Et donc, les nœuds peuvent échouer (par manque d'énergie ou destruction physique), comme de nouveaux nœuds peuvent rejoindre le réseau. Par conséquent, le réseau doit être capable de s'auto organiser et de se modifier périodiquement de sorte qu'il puisse s'adapter aux changements de la topologie tout en assurant son fonctionnement [2].

- ***Couverture limitée***

Dans les réseaux de capteurs, chaque nœud obtient une certaine vue locale de l'environnement qui est limitée par sa portée. La couverture d'une vaste surface est composée de l'union de nombreuses couvertures de petite taille assurée par ces nœuds.



**Figure I.03 :** Couverture d'un nœud capteur

▪ **Connectivité**

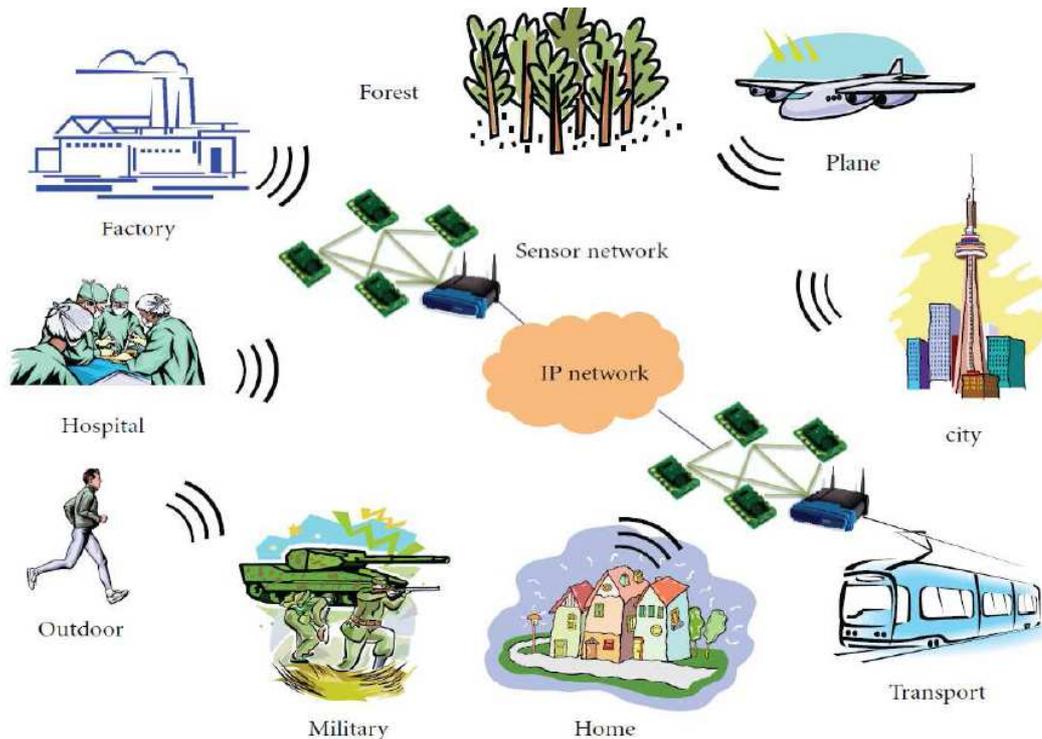
La densité très élevée des nœuds dans les réseaux de capteurs exclue complètement leur isolement et augmente ainsi leur connectivité. Un réseau de capteurs est dit connecté si et seulement si, il existe au moins une route entre chaque paire de nœuds [8]. La connectivité dépend essentiellement de l'existence des routes. Elle est affectée par les changements de la topologie dû à la mobilité et à la défaillance de ces nœuds.

▪ **Sécurité physique limitée**

A l'instar des réseaux ad hoc, les réseaux de capteurs sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui minimisent le contrôle sur les données transférées [9].

#### **I.4- Les domaines d'application des RCSF :**

Les réseaux de capteur sans fil pénètrent de plus en plus dans notre vie quotidienne. Ils sont employés dans plusieurs domaines d'applications comme l'illustre la figure I.04 ou ils peuvent offrir les meilleures contributions parmi lesquels nous citons :



**Figure I.04 :** exemples de domaines d'applications des réseaux de capteurs

#### **I.4.1-Domaine militaire :**

Un réseau de capteurs peut être déployé dans un endroit stratégique ou hostile, afin de surveiller les mouvements des forces ennemies, ou analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection des armes chimiques, biologiques ou radiations) [10] [11].

#### **I.4.2- Domaine environnemental :**

Dans ce domaine, les capteurs peuvent être exploités pour détecter les catastrophes naturelles (feux de forêts, tremblements de terre, ...), traquer les mouvements des animaux et surveiller les conditions d'environnement qui affectent les récoltes, les stocks et tout autre système d'agriculture. De même leur déploiement dans les sites industriels empêche les risques industriels tels que la fuite de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.) [12][10].

#### **I.4.3- Domaine médical :**

L'utilisation des réseaux de capteurs dans le domaine de la médecine peut apporter une surveillance permanente des patients et une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de maladies grâce à des micro- capteurs qui pourront être ingérés ou implantés sous la peau. D'autre part, ces réseaux peuvent détecter des comportements anormaux (chute d'un lit, choc, cri, ...) chez les personnes handicapées ou âgées [13] [10].

#### **I.4.4- Domaine commercial:**

Les capteurs peuvent être utilisés pour le contrôle environnemental des bâtiments, pour permettre une meilleure gestion des ressources à faibles coûts, la surveillance de l'état du matériel, le contrôle et l'automatisation des processus d'usinage [3] [12].

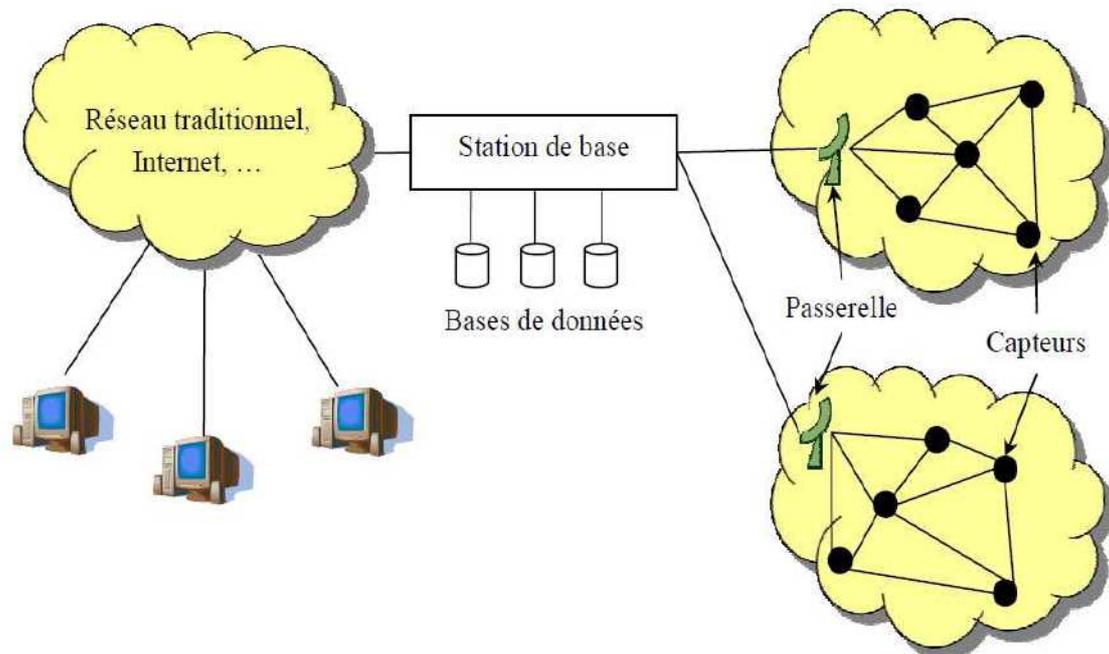
#### **I.5-La communication dans les RCSF :**

Dans les réseaux de capteurs, les nœuds doivent bien réagir avec l'environnement où ils sont placés. Ainsi, ils doivent permettre une communication multi sauts pour les données qui circulent dans la zone de capture. Pour cela, un modèle de communication est proposé par les auteurs de [14] dont le rôle principal est la standardisation de la communication entre les participants afin que différents constructeurs puissent mettre au point des produits (logiciels ou matériels) compatibles. Ce modèle combine l'énergie et le routage, intègre les données avec les protocoles réseaux et promet une communication efficace entre les différents nœuds à travers un medium sans fil.

#### **I.6- Architecture des réseaux de capteur sans fil :**

Dans les réseaux de capteurs, les nœuds sont déployés dans un environnement sans infrastructure, en n'ayant aucune information sur la topologie globale, même locale du réseau construit. Pour cela, les nœuds capteurs doivent graduellement établir l'infrastructure de communication durant une phase d'initialisation. Cette infrastructure doit leur permettre de répondre aux requêtes venant des sites distants, d'interagir avec l'environnement physique, réagir aux données captées, et transmettre ces données via une communication multi-sauts .

Les nœuds capteurs sont généralement dispersés sur un champ de surveillance d'une manière arbitraire (comme nous montre la figure ci-dessous), chacun de ces nœuds a la capacité de collecter les données, les router vers le nœud puits (sink/station de base), et par la suite vers l'utilisateur final via une communication multi-sauts. Le nœud puits peut communiquer avec le nœud coordinateur de tâches (administrateur) par Internet ou par satellite.



**Figure I.05 :** Architecture d'un RCSF

### **I .6.1-Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs :**

La pile protocolaire utilisée par le nœud puits ainsi que tous les autres capteurs du réseau prend en charge le problème de consommation d'énergie, intègre le traitement des données transmises dans les protocoles de routage, et facilite le travail coopératif entre les capteurs [15].

Elle est composée de Cinq couches : application, transport, réseau, liaison de données, physique, ainsi que de trois niveaux qui sont : le niveau de gestion d'énergie, de gestion de tâches et le niveau de gestion de mobilité, comme le montre la figure I.06.

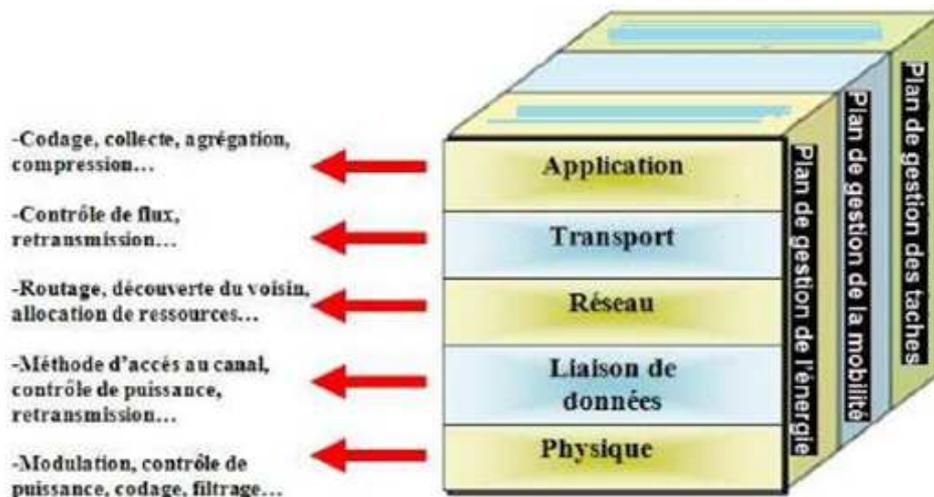


Figure I.06: Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs.

### I.6.1.1 -Les niveaux de gestion dans RCSF :

- **plan de gestion d'énergie**

Les fonctions intégrées à ce niveau consistent à gérer l'énergie consommée par les capteurs, dès lors, un capteur peut par exemple éteindre son interface de réception dès qu'il reçoit un message d'un nœud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués. De plus, quand un nœud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser un message aux autres capteurs pour les informer de son incapacité à participer aux tâches de routage, et conserver l'énergie restante aux fonctionnalités de captage [16].

- **plan de gestion de mobilité :**

Ce niveau détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds capteurs, d'une manière à leur permettre de garder continuellement une route vers l'utilisateur final, et maintenir une image récente sur les nœuds voisins, cette image est nécessaire pour pouvoir équilibrer l'exécution des tâches et la consommation d'énergie [16].

- **plan de gestion des tâches :**

Lors d'une opération de capture dans une région donnée, les nœuds composant le réseau ne doivent pas obligatoirement travailler avec le même rythme. Cela dépend essentiellement de la nature du capteur, son niveau d'énergie et la région dans laquelle il a été déployé. Pour cela, le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau [16].

### **I.6.1.2 -Les couches protocolaires :**

- **La couche Application**

Cette couche assure l'interface avec les applications. Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par les logiciels.

- **La couche Transport**

Cette couche est chargée du transport des données, de leur découpage en paquets, du contrôle de flux, de la conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.

- **La couche Réseau**

Cette couche permet de gérer l'adressage et le routage des données, c'est-à-dire leur acheminement via le réseau.

- **La couche liaison de données**

Elle spécifie comment les données sont expédiées entre deux nœuds/routeurs dans une distance d'un saut. Elle est responsable du multiplexage des données, du contrôle d'erreurs, de l'accès sur le media, etc. Elle assure la liaison point à point et point à multipoint dans un réseau de communication. Elle est composée de la couche de contrôle de liaison logique (LLC pour Logical Link Control) qui fournit une interface entre la couche liaison et la couche réseau en encapsulant les segments de messages de la couche réseau avec des informations d'entête additionnelles, et la couche de contrôle d'accès au medium (MAC pour Medium Access Control) qui contrôle la radio.

Comme l'environnement des réseaux de capteurs est bruyant et les nœuds peuvent être mobiles, la couche liaison de données doit garantir une faible consommation d'énergie et minimiser les collisions entre les données diffusées par les nœuds voisins.

- **La couche Physique**

S'occupe de la spécification du câblage, des fréquences porteuses, etc. Cette couche doit assurer des techniques d'émission, de réception et de modulation de données d'une manière robuste.

### **I.7-Technologie et standard de communication :**

Pour assurer la communication sans fil entre les nœuds d'un réseau de capteurs, un certain nombre de supports de communication peuvent être employés. Par exemple: la radio, la lumière diffusée, le laser...etc.

Parmi les standards les plus aptes à être exploités dans les réseaux de capteurs on retrouve :

- **WIFI (IEEE 802.11)**

Ce standard [7] soutenu par l'alliance WECA (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*), est très connu actuellement, son nom vient de l'expression anglaise "*Wireless Fidelity*". Un certain nombre de normes dérivées ont été créés. La

technologie WiFi (802.11 et ses variantes), bien qu'elle soit conçue pour les LANs sans fil qui se composent habituellement d'ordinateurs portables, de téléphone, et de PDAs, est également supposée utilisable aux réseaux de capteurs.

Cependant, la consommation d'énergie élevée et le débit excessif rendent les protocoles 802.11 non appropriés aux réseaux de capteurs. Ce fait a motivé les chercheurs à concevoir des protocoles MAC efficaces en énergie et spécifiques aux réseaux de capteurs.

▪ **Bluetooth (IEEE 802.15.1 et .2)**

La technologie Bluetooth, dont Ericsson a initié le projet en 1994 a pour but principal de remplacer les câbles sur de petites distances. Elle est utilisée dans les téléphones portables comme interface de connexion pour accéder à un PC. Malheureusement, le grand défaut de cette technologie est sa trop grande consommation d'énergie. Elle ne peut donc pas être utilisée par des capteurs qui sont alimentés par une batterie et qui, idéalement, devraient fonctionner durant plusieurs années [16]. En voici quelques caractéristiques de la technologie Bluetooth tirées de [17] :

- Bluetooth est une technologie sans fil, déposé comme standard à l'IEEE, c'est la 802.15.
- Elle fonctionne dans le spectre de fréquences 2,4 GHz.
- Bluetooth est destiné à un usage personnel et se classe dans la catégorie PAN (*Personal Area Network*), réseau à zones restreintes de quelques dizaines de mètres.
- La technologie sans fil Bluetooth est orientée vers les applications données et voix.
- Elle peut fonctionner sur une distance de 10 ou de 100 mètres selon la classe de l'appareil Bluetooth. Le débit de données maximal s'élève à 3 Mbits/s.
- Les ondes de la technologie sans fil Bluetooth peuvent traverser des objets massifs.
- Cette technologie est omnidirectionnelle et ne nécessite pas la visibilité directe des appareils connectés.

Lors du développement de la spécification Bluetooth, la sécurité a toujours été et continue d'être une priorité.

▪ **Zigbee (IEEE 802.15.4)**

La technologie Zigbee, gérée par la Zigbee alliance et combiné avec IEEE 802.15.4, offre des caractéristiques qui répondent mieux aux besoins des réseaux de capteurs. Cette technologie qui est destiné aux environnements à faible consommation d'énergie et équipements électroniques portables permet un transfert stable de données, une installation facile, un coût réduit ainsi qu'une très basse consommation d'énergie nettement moins que Bluetooth [16,17]. Ces performances en termes de consommation d'énergie ont poussé plusieurs industriels de capteurs à l'intégrer dans leurs produits capteurs comme MicaZ, Telos, ...etc. Zigbee fonctionne globalement sur la bande de fréquences des 2,4 GHz mais également à 916 MHz en Amérique du nord et à 866 MHz bande libre en Europe.

Ses principales caractéristiques sont :

- Débits compris entre 20 et 250 Kbits/s.

- Supporte différents types de topologies réseau (étoile, mesh).
- Signal robuste et résistant aux interférences.
- Pénétration à travers les murs et plafonds.
- Sécurité: exige un contrôle d'accès, cryptage de données.
- Permet de connecter jusqu'à 255 matériels par réseau sur une portée allant jusqu'à 100 mètres.
- Cycles d'émissions/réceptions et connexions au réseau très rapides ce qui permet une faible consommation d'énergie.

## **I.8-Contraintes liées aux réseaux de capteurs :**

Les principaux facteurs et contraintes influençant les réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit :

- **La tolérance aux pannes**

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

- **La densité**

Une des caractéristique des RCSFs est qu'ils peuvent contenir des centaines voire des milliers de nœuds capteurs. Le réseau doit être capable de fonctionner avec ce nombre de capteurs tout en permettant l'augmentation de ce nombre et la concentration des nœuds dans une région (pouvant dépasser 20 nœuds/m<sup>3</sup>).

Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales (implémentation d'une détection d'erreur, d'un contrôle de flux,..) et nécessite que le puits soit équipé de beaucoup de mémoire pour stocker les informations reçues [1].

- **Les coûts de production**

Le cout de production d'un seul capteur est très important pour l'évaluation du cout global du réseau. Si ce dernier est supérieur a celui nécessaire pour le déploiement des capteurs classiques, l'utilisation de cette nouvelle technologie ne serait pas financièrement justifiée.

Par conséquent, réduire le cout de production jusqu'à moins de 1 dollar par nœud est un objectif important pour la faisabilité de la solution des réseaux de capteurs sans-fil [18].

- **Les contraintes matérielles**

Un nœud doit être placé dans une petite surface n'excédant pas, généralement, un centimètre cube (1cm<sup>3</sup>). En outre de cette contrainte de surface, un ensemble de conditions doit être satisfaits. Un nœud capteur doit:

1. consommer le minimum d'énergie,
2. opérer dans une haute densité,
3. avoir un coût de production réduit,
4. être autonome et pouvoir opérer sans assistance,
5. être adaptatif à l'environnement [1].

- **La topologie**

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

1<sup>ère</sup> phase : Déploiement

2<sup>ième</sup> phase : Post-déploiement (les senseurs peuvent bouger, ne plus fonctionner,...)

3<sup>ième</sup> phase : Redéploiement de nœuds additionnels [18].

- **Support de transmission**

Les nœuds sont reliés de manière sans-fil. Ce lien peut être réalisé par radio, signal infrarouge ou un média optique.

Il faut s'assurer de la disponibilité du moyen de transmission choisi dans l'environnement de capture afin de permettre au réseau d'accomplir la totalité de ses tâches. Pour les liens de communication via les fréquences radio, les bandes ISM (Industrial Scientific Medical bands) peuvent être utilisées. Pour les réseaux de capteurs, les unités de transmission intégrées au niveau des nœuds doivent être de petite taille et à faible consommation d'énergie [1].

- **La consommation d'énergie**

Comme les nœuds capteurs sont des composants micro-électroniques, ils ne peuvent être équipés que par des sources limitées d'énergie (<5 Ampère-heure, 1.2 V).

De plus, dans certaines applications, ces nœuds ne peuvent pas être dotés de mécanismes de rechargement d'énergie, par conséquent, la durée de vie d'un nœud capteur dépend fortement de la durée de vie de la batterie associée.

Sachant que les réseaux de capteurs sont basés sur la communication multi-sauts, chaque nœud joue à la fois un rôle de terminal (poste de travail) et de routeur également, le mauvais fonctionnement d'un certain nombre des nœuds entraîne un changement significatif sur la topologie globale du réseau, et peut nécessiter un

routage de paquets différent et une réorganisation totale du réseau. C'est pour cela que le facteur de consommation d'énergie est d'une importance primordiale dans les réseaux de capteurs [7].

### **I.9-Conclusion:**

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant vu la diversité de ces applications : santé, environnement et industrie. De plus, le développement de nouveaux capteurs permettra d'étendre les domaines d'applications qui sont déjà large et de faire des réseaux de capteurs une partie intégrante de notre quotidien.

Avec les réseaux de capteurs un pas de plus est franchi dans la direction des réseaux sans fil. Cependant, la réalisation de telles infrastructures dynamiques et reconfigurables, doit satisfaire quelques contraintes, parmi lesquelles on peut citer la consommation d'énergie, le prix du matériel, le changement de topologie et l'adaptation à l'environnement. Ces contraintes exigent que des nouvelles techniques de gestion de réseau sans-fil soient mises au point. Ceci explique pourquoi cette nouvelle technologie est malheureusement encore trop peu répandue sur le terrain.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude détaillée du concept d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil et les techniques utilisées pour sa conservation, et la présentation des protocoles de routages à contrainte énergétique déployés pour ces réseaux.

# **Chapitre II.**

---

## **Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil**

## **II.1-Introduction :**

Le routage est la méthode d'acheminement des données d'une source à la bonne destination à travers un réseau de connexion. Le but du routage est de trouver l'investissement de moindre coût qui assure le routage du trafic et garantit la survie du réseau devant toute panne de lien ou de nœud [19].

Le problème qui se pose dans le contexte des RCSFs est l'adaptation de l'approche de routage utilisée avec le grand nombre de nœuds existants, dans un environnement caractérisé par de modestes capacités de calcul, des réserves d'énergie et de capacité mémoire limitées. Il semble donc important que toute conception de protocole de routage doive passer par l'étude des problèmes importants tels que la tolérance aux fautes, l'utilisation optimale des ressources des nœuds, le passage à l'échelle et l'assurance d'une bonne qualité de service, et bien sûr tenir compte de la contrainte énergétique.

## **II.2-Consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs :**

L'analyse systématique de l'énergie est extrêmement importante pour identifier les problèmes dans le système énergétique pour permettre une optimisation efficace.

L'énergie consommée par un nœud capteur est due essentiellement aux opérations suivantes la capture, le traitement et la communication de données.

### **II.2.1-Energie de capture :**

L'énergie de capture est dissipée pour accomplir les tâches suivantes : échantillonnage, traitement de signal, conversion analogique/numérique et activation de la sonde de capture. En général, l'énergie de capture représente un faible pourcentage de l'énergie totale consommée par un nœud.

### **II.2.2-Energie de traitement :**

L'énergie de traitement se divise en deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel). Par contre, l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En

général, l'énergie de traitement est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication.

### II.2.3-Energie de communication :

L'énergie de communication se décline en deux parties : l'énergie de réception et l'énergie de l'émission. Cette énergie est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance. Quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Notons que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur.

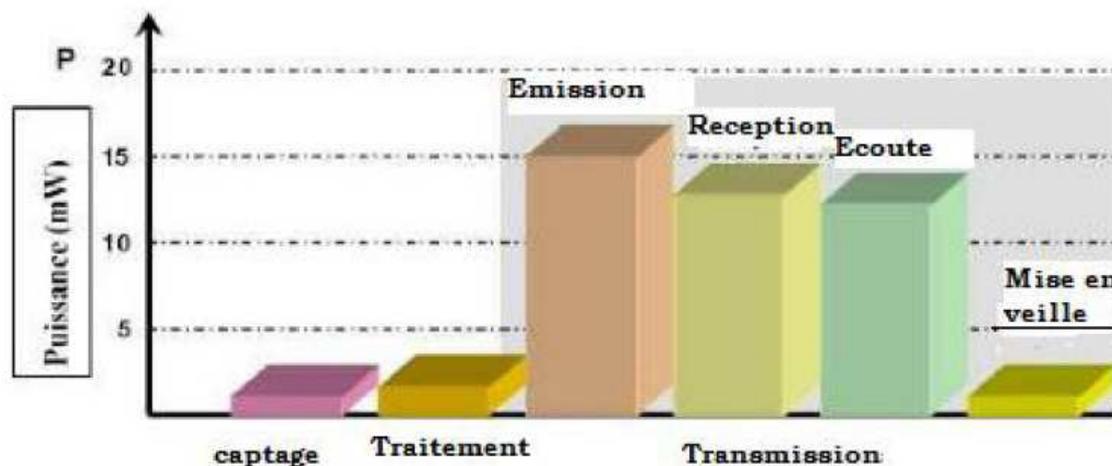


Figure II.01: Consommation d'énergie en captage, traitement et transmission.

### II.3-Facteurs intervenant dans la consommation d'énergie :

La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs dépend de plusieurs facteurs qui sont expliqués ci-dessous

#### II.3.1- Etat du module radio :

Le module radio est le composant du nœud capteur qui consomme le plus d'énergie, puisque c'est lui qui assure la communication entre les nœuds. On distingue quatre états des composants radio (transmetteur et récepteur) : actif, réception, transmission et sommeil.

- Etat actif : la radio est allumée, mais elle n'est pas employée. En d'autres termes, le nœud capteur n'est ni en train de recevoir ni de transmettre. Cet état provoque une perte de l'énergie suite à l'écoute inutile du canal de transmission.
- Etat sommeil : la radio est mise hors tension.
- Etat transmission : la radio transmet un paquet.
- Etat réception : la radio reçoit un paquet.

Dans la plupart des cas, la consommation d'énergie est relativement élevée dans le mode actif, puisque ce dernier nécessite que le module radio soit mis sous tension et décode continuellement les signaux radio afin d'apercevoir l'arrivée des paquets. Comme première solution, mettre le module radio en état de sommeil. Le passage fréquent de l'état actif à l'état sommeil peut avoir comme conséquence: une consommation d'énergie plus importante que de laisser le module radio en mode actif. Cela est dû à la puissance nécessaire pour la mise sous tension du module radio. Cette énergie est appelée l'énergie de transition. Il est ainsi souhaitable d'arrêter complètement la radio, plutôt que de transiter dans le mode sommeil. Le changement d'état du module radio doit être géré par un protocole de la couche MAC [20].

### **II.3.2- Accès au médium de transmission :**

Le bon fonctionnement du réseau dépend, dans une large mesure, sur l'efficacité du contrôle d'accès au médium de transmission c.à.d. le protocole MAC utilisé. Ce dernier assure l'accès au support de transmission, le contrôle de flux, la fiabilité de la communication, la détection des erreurs et la retransmission des paquets en cas de collisions. En effet, la couche MAC essaye de faire en sorte que les transmissions de deux nœuds ne seront pas interférées les unes avec les autres et par conséquent coordonner les transmissions des différents capteurs pour minimiser les collisions et réduire la perte d'énergie [21].

Les principales causes de perte d'énergie au niveau de la couche MAC sont [22] :

- **La retransmission due à la collision ou la congestion :**

La communication dans les réseaux de capteurs est généralement par diffusion radio. Ce mode de communication est caractérisé par sa non fiabilité : si plusieurs capteurs émettent de façon simultanée il y a un risque de collision et aucun paquet ne pourra être reçu correctement (les paquets seront corrompus). Afin d'assurer une transmission robuste, un nœud capteur ayant détecté une collision doit retransmettre son paquet de données. En raison de la capacité limitée du canal sans fil, le réseau peut courir un

risque de congestion si la quantité de messages échangés entre les nœuds est très élevée. Dans ce cas, une retransmission des données perdues est inévitable.

- **L'écoute active :**

Un nœud ne sait pas quand il sera le destinataire d'un message envoyé par l'un de ses voisins, pour cela il doit tenir sa radio en mode actif tout le temps. Ceci est connu sous le phénomène de l'écoute active (idle listening) du canal.

Pour cette raison, une énergie supplémentaire est perdue. Cette énergie consacrée à l'écoute d'un canal vide (dans les réseaux de capteurs le canal est libre la plupart du temps) est considérable par rapport à l'énergie consommée dans la réception ou l'émission des données. [29]

- **La surécouté :**

Les données transmises par un nœud capteur peuvent atteindre d'autres nœuds qui se trouvent dans sa portée de transmission. Ceci est dû au partage du médium de communication sans fil (tous les nœuds communiquent via un médium commun). Un nœud peut alors recevoir des paquets qui ne lui sont pas destinés.

- **La surcharge :**

Plusieurs protocoles de la couche MAC fonctionnent par échange de messages de contrôle, dans le but est d'assurer différentes fonctionnalités tels que: la signalisation, la connectivité et l'établissement de plan d'accès pour éviter les collisions. Tous ces messages échangés nécessitent une énergie additionnelle. Par exemple, les trames de contrôle RTS/CTS (*Request To Send/ Clear To Send*) ne véhiculent aucune information alors que leur transmission consomme de l'énergie.

- **La surémission :**

Le phénomène de surémission se produit quand un capteur envoie les données à un destinataire qui n'est pas prêt à les recevoir. En effet, ces messages envoyés sont considérés inutiles et consomment une énergie additionnelle.

- **La taille des paquets :**

La taille des messages échangés dans le réseau a un effet sur la consommation d'énergie des nœuds émetteurs et récepteurs. Ainsi, la taille des paquets ne doit être ni

trop grande ni trop petite. Si la taille est petite, le nombre de paquets de contrôle (acquittements) générés augmente l'over head. Dans le cas contraire, une grande puissance de transmission est nécessaire pour transmettre ces paquets de grande taille.

### **II.3.3- Classe d'application :**

Les applications dans les réseaux de capteurs sont classées en quatre catégories : orientées temps (*time driven*), orientées événements (*event driven*), orientées requêtes (*query driven*) et hybride [17]. Le type d'application a un impact direct sur la fonction de capture, le taux des données transmises et la topologie du réseau, et par conséquent, sur la durée de vie totale du réseau. Par exemple, dans un réseau *time driven*, approprié à des applications nécessitant un prélèvement périodique de données, si les durées inter transmission sont élevées, dans ce cas, la consommation d'énergie est minimale. Ce prélèvement périodique de données est inadapté pour les applications *event driven* qui sont généralement des applications temps réel, où les capteurs envoient leurs données seulement si un événement spécifique se produit. Pour cela, les capteurs doivent réagir et donner des réponses rapides à l'occurrence de cet événement. Ce type de scénarios exige que les nœuds contrôlent leurs radios continuellement, ce qui consomme de l'énergie. De plus, les alarmes qui sont remontées à la station de base doivent respecter certains délais de transmission.

Alors que dans un scénario orienté requête, un capteur n'envoie l'information que suite à une demande explicite de la station de base. Dans ce cas, la consommation d'énergie est liée aux exigences de l'utilisateur (délais de réponse, taux de transfert et nombre de requêtes).

### **II.3.4-Routage des données :**

Les réseaux de capteurs sont basés sur un routage multi sauts. L'acheminement des paquets d'une source donnée à une destination se fait à travers plusieurs nœuds intermédiaires. Ainsi, un nœud consomme l'énergie soit pour transmettre ses données ou pour relayer les données des autres nœuds. Une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau. C'est pour cela, l'énergie est considérée comme ressource très précieuse dans les réseaux de capteurs dont les protocoles de routage doivent tenir compte.

## II.4-Techniques de minimisation de la consommation d'énergie :

Après la description des principales causes de consommation d'énergie dans les RCSFs, nous présentons dans ce qui suit les différentes techniques utilisées pour minimiser cette consommation. Ces techniques sont appliquées soit au niveau de la couche liaison soit au niveau de la couche réseau. Le schéma suivant présente les principaux axes qu'ils ont été identifiés dans la tentative de faire de la gestion d'énergie, problématique essentielle pour la démarche générale de concevoir et optimiser les réseaux de capteurs sans fil.

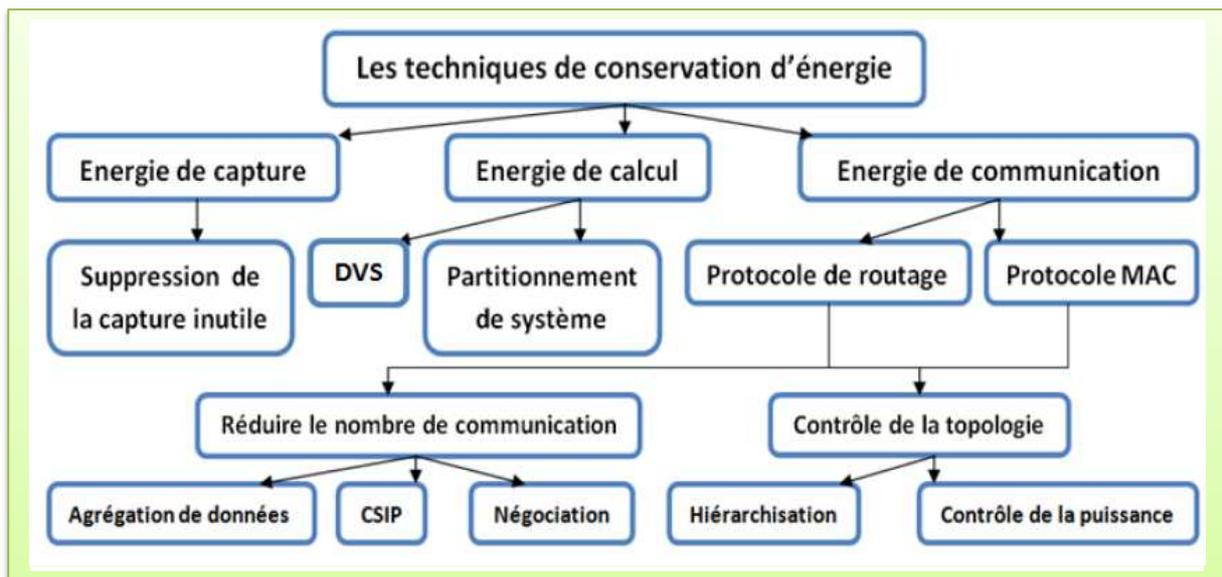


Figure II.02: les techniques de conservation d'énergie [30]

## II.5- Routage dans les réseaux de capteurs :

### II.5.1 Facteurs pour le développement de protocole de routage :

La conception de protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans fil, est influencée par beaucoup de facteurs qui doivent être surmontés. Dans ce qui suit, nous récapitulons certains des défis [11]:

- **Evolutivité :**

L'évolutivité est un facteur important dans les réseaux de capteurs sans fil. Une zone de réseau n'est pas toujours statique, elle change selon les besoins des utilisateurs. Tous les nœuds dans le domaine du réseau doivent être évolutifs ou être en mesure de s'adapter aux changements dans la structure du réseau en fonction de l'utilisateur.

- **Energie :**

Chaque nœud utilise peu d'énergie pour des activités telles que la détection, le traitement et beaucoup pour la transmission. Un nœud dans le réseau doit savoir combien d'énergie sera utilisée pour effectuer une nouvelle tâche à laquelle il est soumis. L'énergie consommée peut varier selon le type de fonctionnalité ou l'activité qu'il a à accomplir.

- **Temps de traitement :**

Il se réfère au temps pris par le nœud dans le réseau pour assurer l'ensemble de l'opération commençant par la détection, le traitement ou le stockage des données, la transmission ou la réception sur le réseau.

- **Schéma de transmission :**

La transmission de données par les nœuds capteurs vers la destination ou la station de base se fait par un schéma de routage à un seul saut ou à multi sauts.

- **Capacité du réseau :**

Tous les nœuds du réseau de capteurs utilisent certaines ressources du réseau qui les aident à accomplir certaines activités comme la détection ou la transformation.

- **Synchronisation :**

Dans les communications radio entre les nœuds capteurs d'un WSN, les capteurs écoutent en permanence les transmissions et consomment de l'énergie s'ils ne sont pas synchronisés les uns les autres. Pour cela, un nœud doit avoir la même notion de temps pour se mettre en veille et se réveiller que ses voisins.

- **Contrôle de paquets :**

Un paquet envoyé avant la transmission entre deux nœuds est appelé le paquet de contrôle. Le paquet de contrôle contient le nombre de bits de données envoyés, l'adresse du nœud de destination et certaines informations qui contribuent à éviter les collisions pendant la transmission.

### II.5.2- Métriques de mesure d'efficacité d'un protocole de routage :

Les métriques de routage sont des valeurs généralement appelées *coûts* ou *poids* calculées Selon un ou plusieurs paramètres tels que le nombre de sauts, le taux de perte d'énergie, la bande passante etc. Généralement plus la métrique est petite, plus le lien/route est de bonne qualité. La métrique d'une route est le cumul (addition, multiplication, moyenne etc.) des métriques des liens qui composent cette route.

Une métrique doit pouvoir quantifier de manière précise l'état du réseau pour que le protocole de routage puisse choisir les routes les plus adéquates à tout moment.

La récupération de ces informations peut se faire avec différentes méthodes, Il existe principalement trois méthodes:

- Les méthodes dites *actives* consistent à injecter périodiquement des paquets de contrôle dans le réseau et récupérer ces informations, l'avantage est que les mesures sont relativement précises, l'inconvénient est que les paquets de contrôle engendrent un trafic sur le réseau.
- Les méthodes dites *passives* utilisent le trafic courant (paquets de données) pour effectuer ces mesures. Cette méthode évite la surcharge inutile du réseau.
- Les méthodes dites *hybrides* utilisent en même temps les méthodes passives et actives.

Dans un réseau plusieurs paramètres peuvent influencer sur le routage. Il est donc important de prendre en considération le maximum de métriques possible.

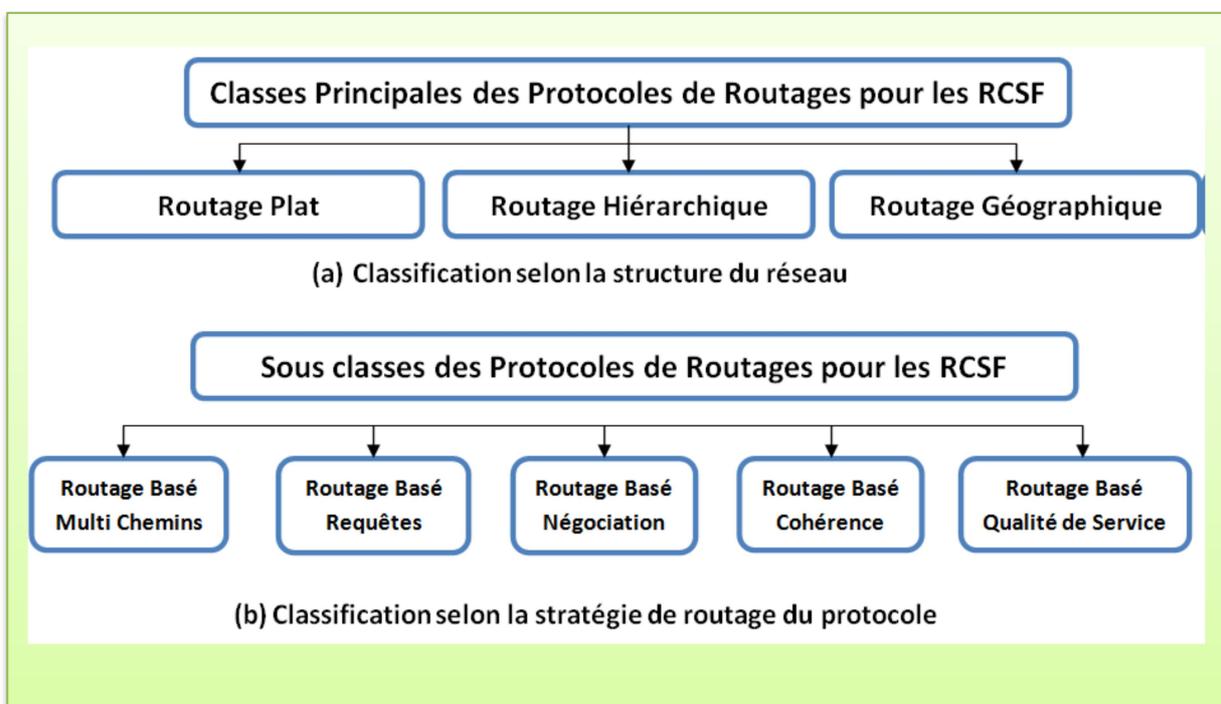
Dans le cadre des réseaux de capteurs les métriques les plus utilisés sont les suivantes:

- ✓ Nombre de sauts.
- ✓ Temps de traverser d'un saut.
- ✓ La quantité d'énergie consommée par les nœuds.
- ✓ Temps du premier nœud à mourir.
- ✓ Temps du dernier nœud à mourir.
- ✓ La bande passante.

### II.6- Classification des protocoles de routage pour les RCSFs :

Les protocoles de routage dédiés aux RCSF sont nombreux, mais ils sont, dans la plupart des cas, conditionnés par le type de l'application visée. Les auteurs dans [20] distinguent deux classes de protocoles de routage. La première classe regroupe les protocoles basés sur la structure du réseau tandis que la deuxième classe englobe les protocoles basés sur le fonctionnement intrinsèque du protocole.

Selon cette classification, un protocole de la deuxième classe peut aussi se retrouver dans la première classe. Par conséquent, ils ont proposés une classification plus cohérente en trois classes principales et cinq sous-classes (FigureII.03). La première classe principale est formée de protocoles considérant un réseau plat, la deuxième classe englobe les protocoles hiérarchiques et la dernière classe regroupe les protocoles géographiques (FigureII.03 (a)). Chacune des classes principales peut être décomposée en cinq sous-classes, ceci en fonction de la stratégie de routage utilisée par le protocole. Cette stratégie peut être basée à la fois sur les chemins multiples, les requêtes, la négociation, la cohérence des données, ou encore la qualité de service (FigureII.03 (b)).



**Figure II.03 :** Classification des protocoles de routages pour les RCSFs [30]

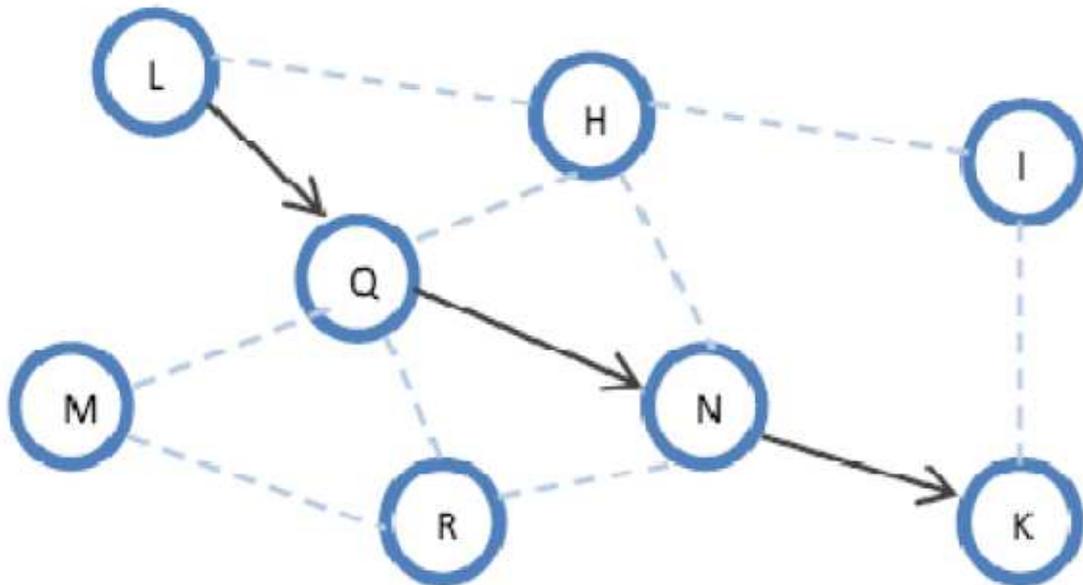
### II.6.1-Selon la topologie du réseau :

La topologie détermine l'organisation des capteurs dans le réseau. Globalement, il existe deux topologies dans les RCSFs : la topologie plate et la topologie hiérarchique

#### 1. Topologie plate :

Dans la topologie plate, tous les nœuds capteurs possèdent le même rôle et collaborent entre eux pour accomplir la tâche de routage. Les réseaux plats sont caractérisés par :

la simplicité des protocoles de routage, un cout de maintien réduit, une grande tolérance aux pannes ainsi qu'une habilité à construire de nouveaux chemins suite aux changements de topologie. Cependant, les nœuds proches du puits participent plus que les autres aux tâches de routage. de plus, ces réseaux présentent une faible scalabilité du au fonctionnement identique des nœuds et d'une manière distribuée nécessitant ainsi un grand nombre de messages de contrôle. la figure suivante illustre l'organisation des capteurs dans une topologie plate.



**Figure II.04:**Topologie plate

## 2 .La topologie hiérarchique :

Dans une topologie hiérarchique, les nœuds ont des différents rôles. En effet, certains nœuds sont sélectionnés pour exécuter des fonctions particulières. Une des méthodes les plus utilisées dans cette topologie est le clustering. Il consiste en un partitionnement du réseau en groupes appelés clusters. Un cluster est constitué d'un chef (clusterhead) et de ses membres. Suivant l'application, les membres peuvent être des voisins directs du chef au pas.

Cette topologie présente beaucoup d'avantages tels que l'agrégation des données collectées ainsi qu'une grande scalabilité. Son inconvénient majeur est la surcharge des clusteheads qui induit un déséquilibre de la consommation d'énergie dans le réseau. Pour remédier à ce problème, les clusterheads peuvent être des capteurs spécifiques avec plus de ressources énergétiques et plus de capacité de traitement ou bien ils peuvent être élus dynamiquement et

ainsi garantir un équilibre de la consommation d'énergie et augmenter la tolérance aux pannes. Un exemple de cette topologie est donné dans la figure II.05 ci-dessous pour que les paquets générés par le nœud F atteignent le nœud L, ils doivent passer par les passerelles P, S et R.

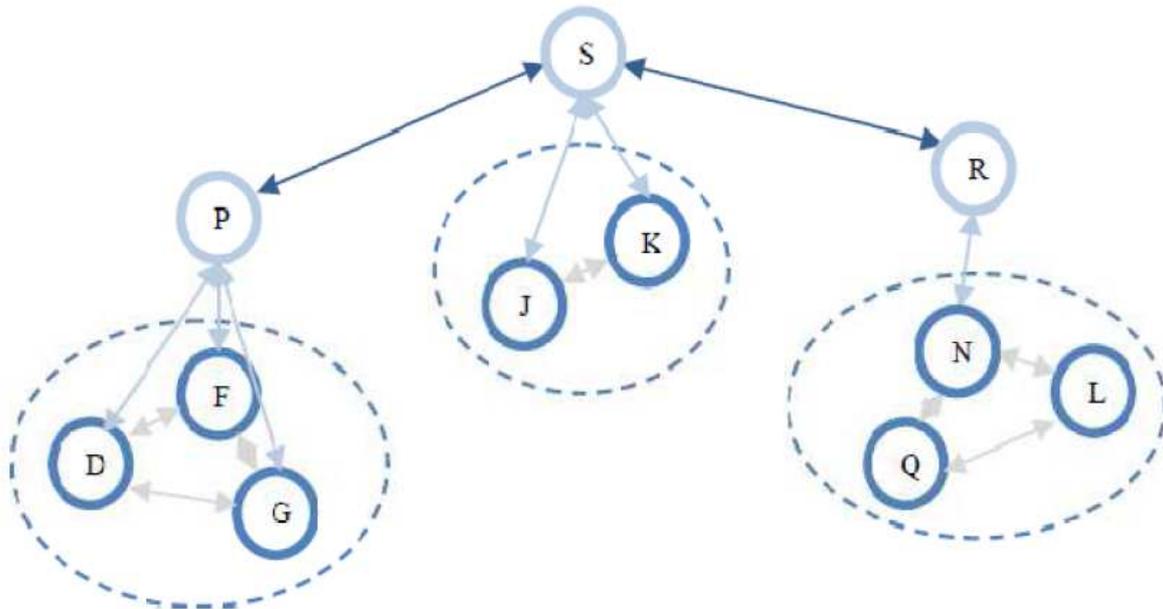


Figure II.05: Routage hiérarchique

## II.6.2- Sous-classes des protocoles de routage :

Chaque classe principale de protocoles (Figure II.03 (a)) peut à son tour donner naissance à cinq sous-classes, selon la stratégie de routage du protocole : routage basé sur les chemins multiples, routage basé sur les requêtes, routage basé sur la négociation entre les nœuds, routage basé sur la cohérence des données, ou routage avec qualité de service. Ces sous-classes, sont données dans la figure II.03 (b).

### Routage basé sur les chemins multiples

Les protocoles de cette sous-classe utilisent des chemins de routage multiples au lieu d'un chemin unique entre une source et une destination. La tolérance aux fautes d'un protocole est mesurée par la vraisemblance qu'un chemin alternatif existant entre une source et une destination lorsque le chemin principal échoue. Cette tolérance peut être renforcée en découvrant des chemins multiples entre la source et la destination aux dépens d'une consommation énergétique et d'un trafic de contrôle supplémentaires. Ces chemins alternatifs sont maintenus en veille par la source en envoyant des messages périodiques. Par conséquent,

la fiabilité du réseau peut être augmentée tout en accusant une surcharge de contrôle supplémentaire pour garantir la validité des chemins alternatifs.

### **Routage basé sur les requêtes**

Dans le routage basé sur les requêtes, les nœuds propagent de voisin en voisin une requête et les données correspondant à cette requête seront envoyées au nœud qui a initié la requête.

Généralement, ces requêtes sont décrites dans un langage naturel ou des langages d'interrogation de niveau élevé. Par exemple, dans une application de type militaire, le client C1 peut soumettre une requête au nœud N1 et demander : Y a-t-il des véhicules en mouvement dans la région 1 du champ de bataille ? Tous les nœuds disposent des tables de requêtes reçues pour des tâches de capture, et envoient les données associées aux tâches une fois obtenues. La diffusion dirigée est un exemple de ce type de routage, où le nœud station de base envoie des messages d'intérêt aux nœuds capteurs [20].

Pendant que le paquet d'intérêt est propagé dans tout le réseau, les gradients de la source à la station de base sont de nouveau installés. Lorsque la source a des données pour l'intérêt, elle les envoie le long du chemin du gradient d'intérêt. Pour diminuer la consommation énergétique, l'agrégation de données est exécutée sur la route.

### **Routage basé sur la négociation entre les nœuds**

Ces protocoles emploient des descripteurs de données à un niveau élevé afin d'éliminer la transmission des données redondantes sur la base de la négociation.

Des décisions de communication sont également prises sur la base des ressources disponibles au niveau des nœuds capteurs. SPIN [22, 23] est un exemple de protocoles de routage via la négociation. La motivation principale réside dans le fait que l'utilisation de l'inondation pour dissémination produira la duplication des données envoyées, ainsi les nœuds recevront les copies doubles des mêmes données. Cette opération consomme un surplus d'énergie et de traitement en envoyant les mêmes données par différents capteurs. SPIN est conçu pour disséminer les données d'un nœud à tous les autres nœuds, en supposant que ces capteurs sont de potentielles stations de base. Donc, l'idée principale du routage via la négociation est de supprimer l'information double et d'empêcher l'envoi des données redondantes au prochain capteur ou à la station de base, en échangeant une série de messages de négociation avant même la transmission effective des données.

**Routage basé sur la cohérence des données**

Le traitement de la cohérence des données est une phase importante dans le fonctionnement des RCSFs. Par conséquent, des algorithmes de routage utilisent différentes techniques pour traiter la cohérence (ou la non cohérence) des données circulant dans le réseau. En général, les nœuds capteurs coopèrent entre eux afin de réaliser ce traitement. Dans le routage basé sur la non cohérence des données, ces dernières sont envoyées aux nœuds agrégateurs du réseau après avoir reçu le traitement minimum qui inclut la suppression des doublures [16]. Pour exécuter un routage efficace en énergie, le traitement de la cohérence des données est normalement choisi par le concepteur du protocole.

**Routage basé sur la qualité de services**

Dans les protocoles de routage basés sur QoS, le réseau doit satisfaire certaines métriques de QoS, par exemple, retard, énergie, largeur de bande passante, etc. Les protocoles de cette classe sont très recommandés pour les applications de surveillance (centrales nucléaire, application militaire etc.).

**Objectifs du routage avec QoS :**

La fonction basique du routage avec qualité de service est de chercher un chemin faisable qui satisfait les contraintes QoS de flux de données. De plus, l'optimisation d'utilisation des ressources de réseaux est un autre objectif important du routage avec QoS. Le problème d'optimisation, l'exigence de QoS d'une connexion est donnée comme un ensemble de contraintes qui peuvent être soit les contraintes de lien, soit les contraintes de chemin.

**Problèmes du routage avec QoS :**

Le routage peut être divisé en deux classes : le routage unicast et le routage multicast. Le routage unicast est de chercher un chemin faisable qui satisfait des contraintes de QoS d'une connexion entre deux utilisateurs. Le routage multicast est de chercher un arbre multicast, la racine est un expéditeur, qui couvre tous les récepteurs. Chaque chemin de l'expéditeur à un récepteur satisfait des contraintes de QoS [8].

**II.7-Conclusion :**

Le routage dans les réseaux RCSFs forme un axe de recherche intéressant. Les protocoles de routage proposés pour les réseaux de capteurs sont donc nombreux, mais ils ont tous un objectif commun : assurer l'acheminement des données collectées par les nœuds capteurs tout en essayant d'étendre la durée de vie du réseau. Cela nécessite la prise en compte des caractéristiques des RCSFs et des exigences des applications pour lesquelles ces réseaux sont destinés.

# Chapitre III.

---

## Etude expérimentale

### III.1 Introduction :

Les réseaux de capteurs sans fil ont des ressources énergétiques limitées, par conséquent l'utilisation de protocole de routage économe en énergie est important pour ces réseaux. Il existe plusieurs protocoles de routage dans la littérature, l'étude de quelques un d'entre eux est la cible principale du travail présenté dans ce mémoire.

La plupart des algorithmes de routage pour les réseaux de capteurs se concentrent sur l'efficacité énergétique, afin de prolonger la durée de vie du réseau. L'épuisement de l'énergie des capteurs sur les chemins efficaces rend le réseau incapable de surveiller des régions entières et les capteurs qui s'y trouvent deviennent non fonctionnelles. Ainsi, dans la conception des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs, le bilan énergétique est une considération importante pour éviter l'épuisement précoce des capteurs.

On va s'intéresser aux protocoles DC et MTE, qui sont des protocoles de routage pour les réseaux ad-hoc et applicables aux réseaux de capteurs sans fil, DC est un protocole directement connecter alors que MTE est un protocole multi sauts. Et LEACH est le plus célèbre des protocoles de routage hiérarchiques destinés aux WSNs. La comparaison entre ces protocoles va nous permettre de voir qui du routage plat ou hiérarchique est plus adapté pour les WSNs.

### III.2- Motivation

Dans de nombreuses applications de réseaux de capteurs, les événements pourraient se produire de façon aléatoire sur la zone cible, ou de façon répétée à une partie spécifique de cette zone. Par exemple, dans le cas de la génération d'événements répétés, seuls les capteurs au sein d'une région R sont sollicités. Avec DC ou MTE, les capteurs de la région R perdent leurs énergies rapidement, tandis que d'autres capteurs ont une capacité énergétique importante.

Pour éviter cette situation, un algorithme de routage hiérarchique doit être en mesure de distribuer le trafic des données et d'équilibrer l'énergie du réseau.

Pour être efficace un algorithme de routage pour les réseaux de capteurs devrait considérer la quantité d'énergie restante dans chaque capteur, mais aussi de distribuer le trafic sur l'ensemble du réseau, et d'éviter le non fonctionnement des capteurs due à leurs épuisement précoce.

Ce travail examine quelques protocoles de routage pour comparer les protocoles de routages plat directement connecté et multi sauts au protocole de routages hiérarchiques.

### III.3- Les protocoles de routage retenus :

Les protocoles de routage utilisés dans les réseaux de capteurs dépendent de la topologie du réseau et des paramètres de la radio utilisés, dans ce chapitre, trois protocoles de routage existants, à savoir DC, MTE et LEACH avaient été analysés sur la base de la consommation énergétique.

Il est supposé que la station de base est fixe, et que tous les nœuds du réseau sont homogènes et possèdent la même quantité d'énergie initiale.

#### III.3.1- DC (*Direct Communication*) :

Le protocole de routage DC [26] à une topologie très simple, on considère que tous les nœuds sont directement connectés à la station de base (voir la figureV.01), chaque capteur envoie ses données directement à la station de base, la réception des données se fait seulement au niveau de la station de base.

Si la station de base est loin d'un nœud capteur, DC exigera une grande quantité d'énergie à l'émission au niveau du nœud, ce qui réduit considérablement le niveau des batteries des nœuds, et par conséquent la durée de vie du réseau.

Si la station de base est à proximité des nœuds capteurs, ou l'énergie requise pour recevoir les données est importante, DC peut être une solution acceptable (voir même optimale) pour router les données.

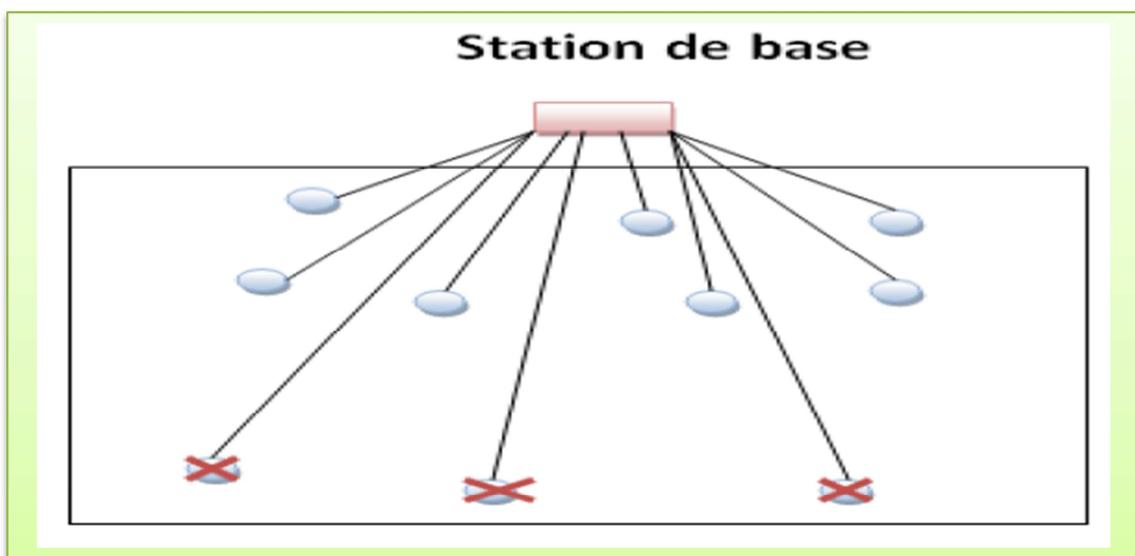


Figure III.01: Direct Communication

### III.3.2 MTE (*Minimum Transmission Energy*) :

MTE [26] est un protocole de routage à topologie plate, les nœuds capteurs routent les données à destination de la station de base à travers des nœuds intermédiaires, dans ce protocole tous les nœuds du réseau agissent comme des routeurs, les nœuds intermédiaires sont choisis de telle sorte que l'énergie de l'émission du paquet soit minimisée.

Pour router les données, un nœud choisit le prochain saut parmi ses voisins, en choisissant le plus proche de la station de base, de cette manière des routes seront construites. Quand un nœud reçoit des données de l'un de ses voisins en amont, il transmet ces données vers le voisin du saut suivant. Cela continue jusqu'à ce que les données atteignent la station de base. Quand un nœud meurt, les voisins qui lui ont envoyés des données vont envoyer directement au prochain saut, de cette manière de nouvelles routes seront créés.

Les nœuds ajustent leurs puissances d'émission au minimum nécessaire pour atteindre le prochain saut. Ceci réduit les interférences avec d'autres transmissions et réduit la perte d'énergie au niveau du nœud, et quand des collisions se produisent, les données seront supprimées. Si le message envoyé traverse  $n$  nœuds pour arriver à la station de base, alors l'énergie totale consommée par ce message sera égale à  $n$  fois l'énergie à l'émission, plus  $n$  fois l'énergie à la réception.

Les nœuds qui sont proches de la station de base vont acheminer un grand nombre de paquets, ainsi ces nœuds vont s'éteindre rapidement, en d'autres termes plus le nœud est proche de la station de base plus il va mourir plus rapidement.

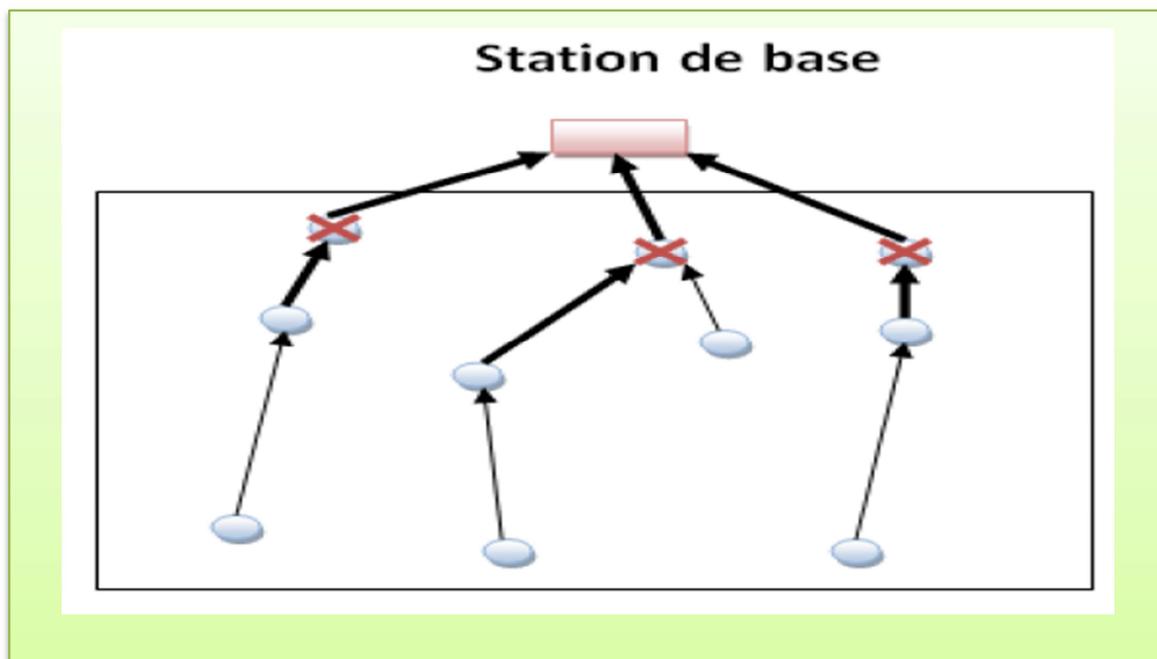


Figure III.02: Minimum Transmission Energy

### III.3.3 LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*):

LEACH [27] est un protocole de routage hiérarchique qui utilise le clustering afin de diviser le réseau en deux parties : les cluster-heads (chefs de zones) et les nœuds membres. Ce protocole se décompose en deux phases qui se succèdent plusieurs fois: la construction et la communication.

- **Phase de construction**

Dans cette phase, on construit les différents clusters et on choisit leurs chefs. Chaque nœud du réseau choisit aléatoirement un nombre et si ce nombre est inférieur à une valeur, le nœud devient cluster-head. Ces chefs de zone sont élus en fonction de la force du signal reçu.

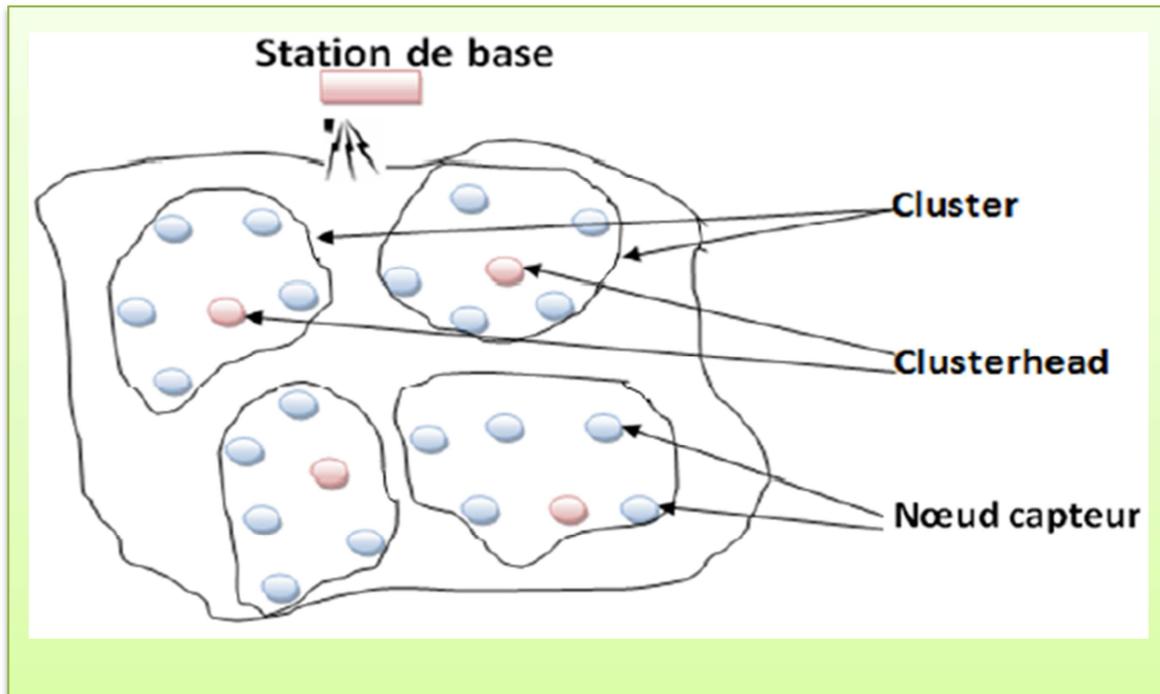
- **Phase de communication**

Les communications à l'intérieur d'un cluster sont effectuées avec la méthode TDMA (*Time Division Multiple Access*) (mode permettant de transmettre plusieurs signaux sur un seul canal) : chaque chef établit un *schedule TDMA* pour les membres de son cluster en indiquant pour chaque nœud son slot d'émission. Les membres émettent donc les données captées pendant ce slot d'émission. Ce mécanisme permet aux différents capteurs d'éteindre leur interface de communication en dehors de leurs slots d'émission, ce qui a pour effet d'économiser leurs énergies.

- **Principe de fonctionnement**

Nous avons retenu les travaux de Heinzelman et al, qui présentent aujourd'hui d'excellents résultats en termes d'économie d'énergie. Ces derniers ont proposé le protocole LEACH et une version centralisée de ce protocole, appelé LEACH-C. Tous deux s'appuient sur le clustering (Figure III.02), qui consiste, à partitionner le réseau en groupes (clusters). Les nœuds transmettent leurs données vers des représentants de groupes dits cluster-heads (CHs), qui à leur tour envoient ces données vers la destination désirée ou la station de base.

Dans certaines applications les cluster-heads font des traitements simples (agrégations par exemple) sur les données reçues avant de les retransmettre à la station de base. Cette approche permet d'économiser la bande passante. Elle offre aussi une meilleure allocation de ressources et aide à améliorer le contrôle de l'énergie dans le réseau.



**Figure III.03:** Le clustering dans les réseaux de capteurs

Avec le protocole LEACH les agrégations, les compressions ainsi que le routage des données minimisent la consommation d'énergie en réduisant le flux des données et ainsi les communications globales. Les noeuds d'un réseau sont homogènes et ont les mêmes contraintes d'énergie. Le clustering permet aux noeuds d'effectuer des communications sur de petites distances avec leurs CHs, ces derniers ayant pour tâche de communiquer les résultats de leurs calculs à la station de base. Ce protocole présente d'excellents résultats comparés à d'autres algorithmes de clustering.

Dans LEACH, les noeuds s'auto élisent pour être des CHs. Ils se basent sur le pourcentage désiré de CHs et le nombre d'itérations au cours duquel un noeud a pris le rôle de CH. Ainsi, un noeud  $n$  prend une valeur aléatoire entre 0 et 1. Si cette valeur est inférieure au seuil  $T(n)$ , le noeud se déclare CH. Les CHs informent leur voisinage de leur élection. Chaque noeud restant décide de choisir le CH le plus proche.

Après la formation des clusters, chaque CH programme les noeuds appartenant à son cluster en leur envoyant les codes et les fréquences de communication. Chaque noeud, autre qu'un CH, éteint son antenne lorsqu'il ne communique pas ses données.  $T(n)$  est calculé selon la formule suivante :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - p * (r \bmod \frac{1}{p})} & \text{si } (n \text{ appartient à } G) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Avec :  $P$  : pourcentage désiré de CHs.

$r$  : itération actuelle.

$G$  : ensemble des noeuds qui ont été sélectionnés comme CH durant les dernières  $(1/P)$  itérations.

Le système fixe le nombre optimal de clusters en fonction de quelques paramètres comme la topologie du réseau, le coût des opérations de communication et de calcul. (Généralement les CHs représentent 5% des noeuds du réseau).

Les CHs reçoivent les réponses des noeuds simples. Ils créent des tables TDMA en se basant sur le nombre de noeuds constituant le cluster.

Chaque noeud transmet ses données vers le CH de son cluster en fonction des intervalles de temps spécifiés dans les tables TDMA. Les noeuds éteignent leurs antennes en attendant leurs temps de parole.

Cette technique permet ainsi de minimiser la dissipation de l'énergie. Par contre, les CHs leurs récepteurs en état de marche pour recevoir toutes les données des noeuds appartenant à leur cluster. Une fois que toutes les données sont reçues, elles sont compressées par les CHs et transmises à la station de base.

Chaque CH choisit aléatoirement un code dans une liste de codes de propagation CDMA (*Code Division Multiple Access*), il le transmet aux noeuds appartenant à son cluster afin de l'utiliser pour leurs transmissions, ceci afin de minimiser les interférences entre les messages des CHs les plus proches.

### **III.4-Comparaison de la durée de vie des noeuds avec MTE, DC et LEACH :**

Les noeuds capteurs peuvent envoyer leurs données à la station de base en utilisant le protocole DC, MTE ou LEACH. Avec DC les noeuds capteurs qui sont loin de la station de

base, épuisent rapidement leurs énergies parce qu'ils envoient leurs données à la station de base directement, avec MTE les noeuds capteurs ne transmettent pas seulement leurs propres données, mais ils servent aussi de routeurs pour les autres noeuds capteurs, par conséquent, l'énergie des noeuds capteurs qui sont à proximité de la station de base est rapidement consommée. Avec LEACH les cluster-heads s'épuisent plus rapidement si on élit pas de nouveaux cluster-heads périodiquement, il faut bien choisir la période car une période très grande épuisera les cluster-heads avant la fin de la période, et une période très petite fera perdre du temps et de l'énergie durant le processus de réélection des cluster-heads.

Dans ce qui suit on va essayer de simuler ces trois protocoles, pour les comparer en termes de leur consommation énergétique.

### **III.5- Environnement de simulation :**

L'apparition des réseaux de capteurs sans fil a ouvert de nombreux aspects pour les concepteurs des réseaux. Traditionnellement, les trois principales techniques pour analyser la performance des réseaux filaires ou sans fil sont les méthodes d'analyse, les simulations informatiques et les mesures physiques. Toutefois, en raison de nombreuses contraintes imposées par les réseaux de capteurs, comme la limitation d'énergie, la collaboration décentralisée, et la tolérance aux pannes, les algorithmes de réseaux de capteurs ont tendance à être plus complexes et souvent défient pour les méthodes d'analyse qui ont été révélées être assez efficaces pour les réseaux traditionnels.

Il semble que la simulation soit la seule approche possible pour l'analyse quantitative dans les réseaux de capteurs. Un environnement de simulation qui teste les protocoles avec une bonne précision serait très bénéfique en termes de temps et de coût.

Avant sa mise en place, un réseau de capteurs nécessite une phase de simulation afin de s'assurer de son bon fonctionnement.

La simulation est la méthode d'évaluation de performances la plus prédominante dans le domaine des réseaux de capteurs. Elle est largement utilisée pour évaluer les nouvelles architectures et protocoles de communication, car elle permet de tester ces nouveaux protocoles et d'anticiper les problèmes qui pourront surgir durant leur implémentation réelle.

Pour le faire, elle construit un modèle du système réel en représentant toutes ses entités, leurs comportements et leurs interactions pour mener en suite des expériences sur ce modèle avec

une simple modification des paramètres de simulation dont les résultats seront facilement analysables et interprétables.

Pour simuler les réseaux de capteurs, deux types de simulateurs sont utilisés: les simulateurs dédiés et les simulateurs de réseaux généraux. Les simulateurs dédiés sont conçus particulièrement pour les réseaux de capteurs. Or que, les plus généraux ont été conçus pour modéliser et simuler les réseaux classiques: les réseaux filaires et les réseaux ad hoc. Ces simulateurs ont été adaptés pour pouvoir prendre en charge les particularités des réseaux de capteurs. Les simulateurs les plus utilisés sont NS-2, TOSSIM, OMNET ++, GlomoSim et JSim.

Les outils que nous avons utilisés pour la simulation et l'évaluation sont :

Nous commençons tout d'abord par :

-**TinyOS** ; le système d'exploitation conçu pour les RCSFs.

-**NesC** ; avec lequel nous avons programmé les codes des protocoles.

-**TOSSIM** ; le simulateur qui offre deux mécanismes permettant de simuler le réseau ; l'interface graphique **TinyViz** pour visualiser le déroulement de la simulation, et le simulateur **PowerTOSSIM** pour simuler et évaluer la consommation d'énergie.

### **Architecture de TinyOS :**

Le fonctionnement de **TinyOS** repose entièrement sur l'utilisation de modules qui communiquent entre eux par le biais de messages. Ces modules sont organisés hiérarchiquement. Les modules de base sont appelés les modules simples.

## **III.6-Simulation et évaluation des performances :**

Pour évaluer les performances des trois protocoles de routages DC, MTE et LEACH, nous avons effectué des simulations avec le même scénario de simulation et les mêmes critères d'évaluation de performances pour les trois protocoles.

### **III.6.1- Scénario de simulation :**

Pour que l'évaluation des performances des trois protocoles par simulation soit efficace, il fallait qu'on prenne en considération les spécificités des réseaux de capteurs pour qu'elle soit réalisable dans des conditions qui se rapprochent de la réalité. Pour cela, certains paramètres

ont été pris en compte lors de la simulation. Ces paramètres sont sélectionnés en se basant sur des travaux antérieurs pour des applications similaires ainsi que sur la capacité du simulateur.

Le tableau ci-dessous résume quelques paramètres utilisés :

Paramètre	Valeur
Nombre de noeuds du réseau	100, 200, 300, 400, 500, 600
Durée de simulation (seconde)	500
Protocoles de routages	DC, MTE et LEACH
Taux de paquet de données généré par un noeud	10/s
Simulateur	TOSSIM
Langage de programmation	NesC
Surface de simulation (m m )	150 * 150
Placement des noeuds	Aléatoire
Nombre de stations de base	1
Portée de transmission (m)	Dépend du protocole utilisé

**Table III.01:** Paramètres de simulation

Les capteurs utilisés dans la simulation sont considérés comme homogènes: possédant la même quantité d'énergie initiale, capacités de calcul et mémoire, et équipés par les mêmes interfaces de communication. De plus, l'énergie de la station de base est considérée comme illimitée. La position des noeuds dans les topologies générées est réalisée d'une manière aléatoire.

### III.6.2 Critères de performance :

Pour quantifier les performances des trois protocoles DC, MTE et LEACH, deux métriques sont choisies: moyenne d'énergie consommée, et la durée de vie du réseau. Ces métriques sont affectées par des facteurs comme le nombre de noeuds utilisés dans les scénarios de simulation, le temps de simulation...etc.

### ***Moyenne d'énergie consommée (MEC)***

L'un des principaux critères de performance pour un capteur est la durée d'utilisation efficace de son énergie embarquée avant de l'épuiser. Parce qu'une fois qu'elle sera épuisée, il n'y a pas d'autres moyens de recharger à nouveau sa batterie, s'il été déployé à des endroits inaccessibles et n'utilisant pas de cellules solaires.

Ainsi, l'Énergie Consommée (MEC) mesure en moyenne la quantité d'énergie consommée par un capteur. Et la quantité d'énergie consommée par un capteur est obtenue par la formule mathématique suivante :

$$MEC = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n}$$

Où :

**E<sub>i</sub>** : l'énergie consommée pour un capteur i. Elle présente la différence entre l'énergie initiale et son énergie résiduelle.

**n** : le nombre de capteurs dans le réseau.

### **Durée de vie du réseau :**

Pour mesurer la durée de vie du réseau, nous avons choisi de suivre l'évolution du nombre de noeuds en vie au cours du temps. En effet, cette métrique nous donne un aperçu sur la façon et la fréquence de la mort des noeuds. Elle peut être utilisée pour déterminer la durée de vie du réseau selon le temps qui s'écoule avant que le dernier noeud en vie dans le réseau épuise son niveau d'énergie.

Il est à noter que l'énergie initiale utilisée dans les scénarios de simulation pour la durée de vie du réseau est faible pour les noeuds capteurs. Ceci est pour optimiser le temps de simulation et le processus de convergence car avec une quantité d'énergie initiale élevée le temps de simulation s'étend à l'ordre de jours.

### **III.6.3-Discussion des résultats :**

Dans ce qui suit, nous allons présenter et analyser les résultats de simulation obtenus suivant les métriques de performances discutées précédemment. Dans tous les scénarios de simulations générés le protocole hiérarchique LEACH est comparé avec les deux protocoles de routages plat DC et MTE, afin de différencier leurs performances.

Afin d'examiner l'influence de la densité du réseau sur les performances des trois protocoles, nous avons mené des simulations en variant le nombre de noeuds déployés dans le réseau (de 100 à 600 noeuds par un pas de 100 noeuds) augmentant ainsi la densité du réseau.

### Moyenne d'énergie consommée (MEC)

Sur la figure III.04, on peut voir que le protocole LEACH est plus performant que les protocoles MTE et DC, en marquant moins de moyenne d'énergie consommée (pour 600 noeuds par exemple) par rapport aux deux autres protocoles. Ce gain en énergie est dû à l'équilibrage dans la distribution de la charge qu'a présenté LEACH entre les différents noeuds.

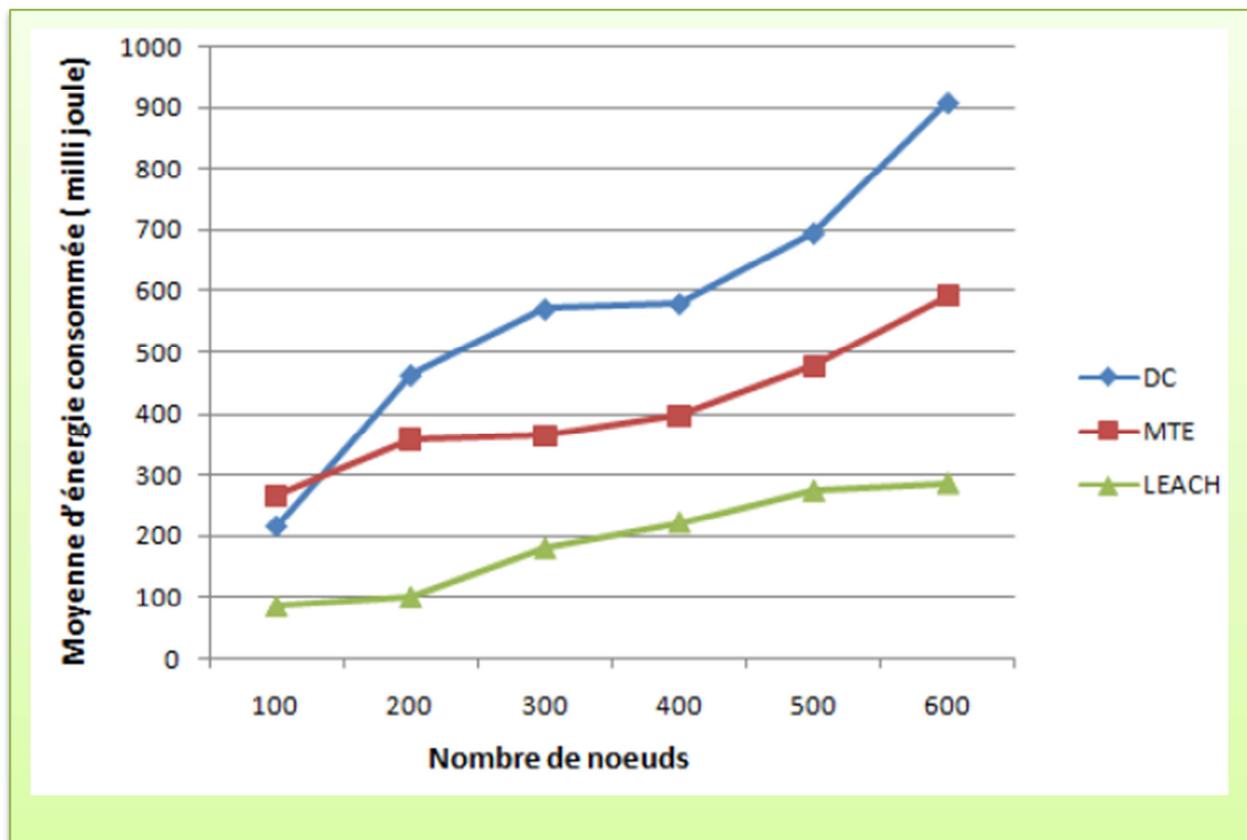


Figure III.0 4 : Moyenne d'énergie consommée

Egalement, on peut remarquer que l'accroissement du nombre de noeuds déployés dans le réseau induit à une augmentation dans la consommation d'énergie dans les trois protocoles.

Ceci est attendu car le fonctionnement de ces trois protocoles est strictement basé sur des interactions locales entre les noeuds voisins. Par conséquent, l'augmentation du nombre de capteurs dans le réseau augmente le nombre de voisins pour chaque noeud, ce qui provoque plus de messages échangés entre ces noeuds et consomme ainsi plus d'énergie dans la communication.

### **Durée de vie du réseau**

Pour pouvoir étudier la durée de vie du réseau en fonction du nombre de noeuds déployés nous avons suivi l'évolution de 100 et 200 noeuds dans le temps.

Les figure III.05, III.06 présentent l'effet de la densité sur la durée de vie du réseau afin d'examiner l'efficacité des trois protocoles à maximiser la durée de vie des noeuds capteurs et, par conséquent, celle du réseau en entier.

Il est clair, sur ces deux figures ci-dessous, que la durée de vie du réseau offerte par le protocole LEACH est plus performant que celle des protocoles DC et MTE, et ce dans les deux configurations testées. L'explication sera la même que celle donnée pour commenter les résultats du test de la moyenne d'énergie consommée.

Ce que l'on peut également constater c'est que la durée de vie du réseau (liée à l'épuisement de l'énergie du dernier noeud capteur en vie) diminue proportionnellement avec la densification du réseau. Ces résultats s'expliquent par l'augmentation des interférences entre les noeuds voisins avec l'augmentation du nombre de noeuds déployés dans le réseau. Par conséquent, la charge sur le canal de transmission sans fil devient de plus en plus forte dans les trois protocoles ce qui cause plus de consommation d'énergie dans la communication et l'échange des messages, avec comme résultat une dégradation dans la durée de vie du réseau.

Mais malgré cela, les résultats montrent clairement que le protocole hiérarchique apporte une amélioration importante à la durée de vie du réseau, par rapport aux deux protocoles plats et ce dans les trois topologies testées.

Pour 100 nœuds :

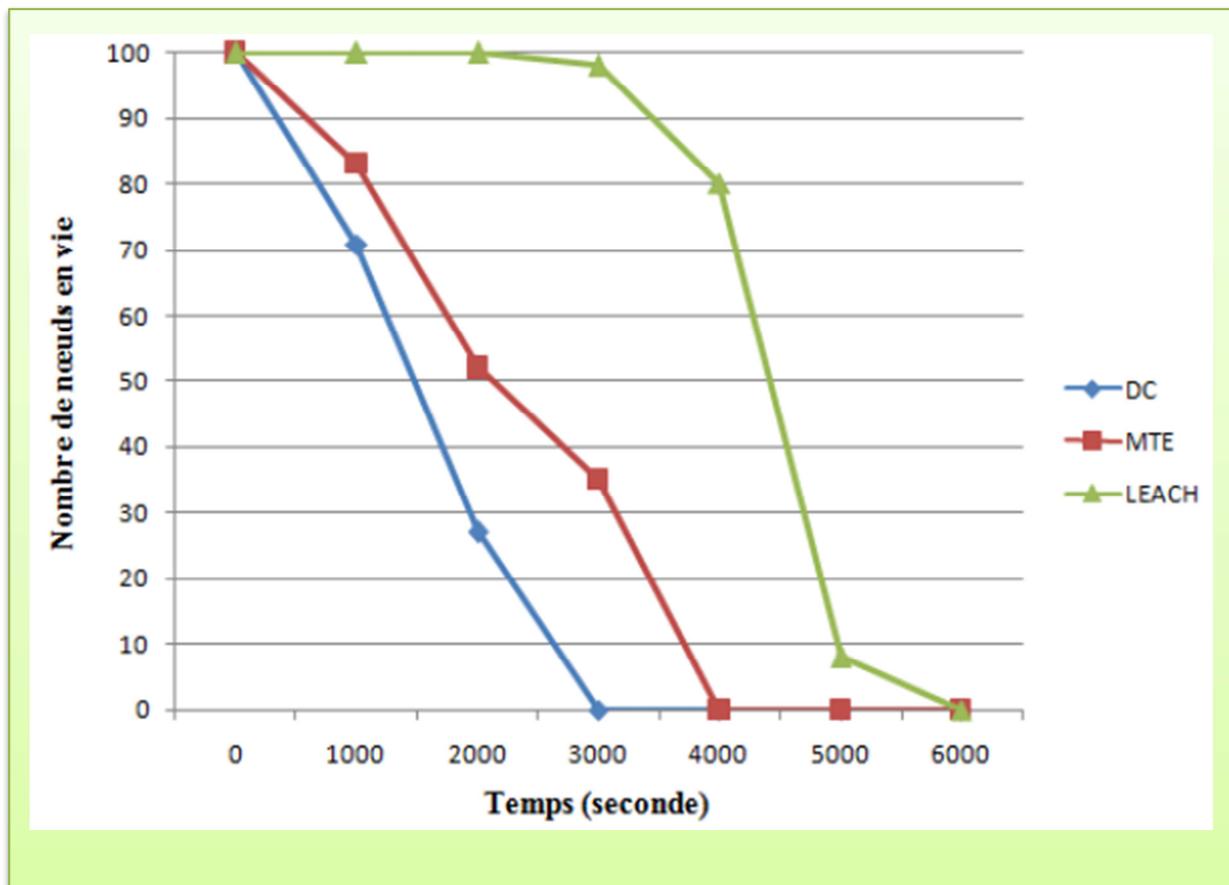


Figure III.05 : Durée de vie du réseau pour 100 nœuds

Pour 200 noeuds :

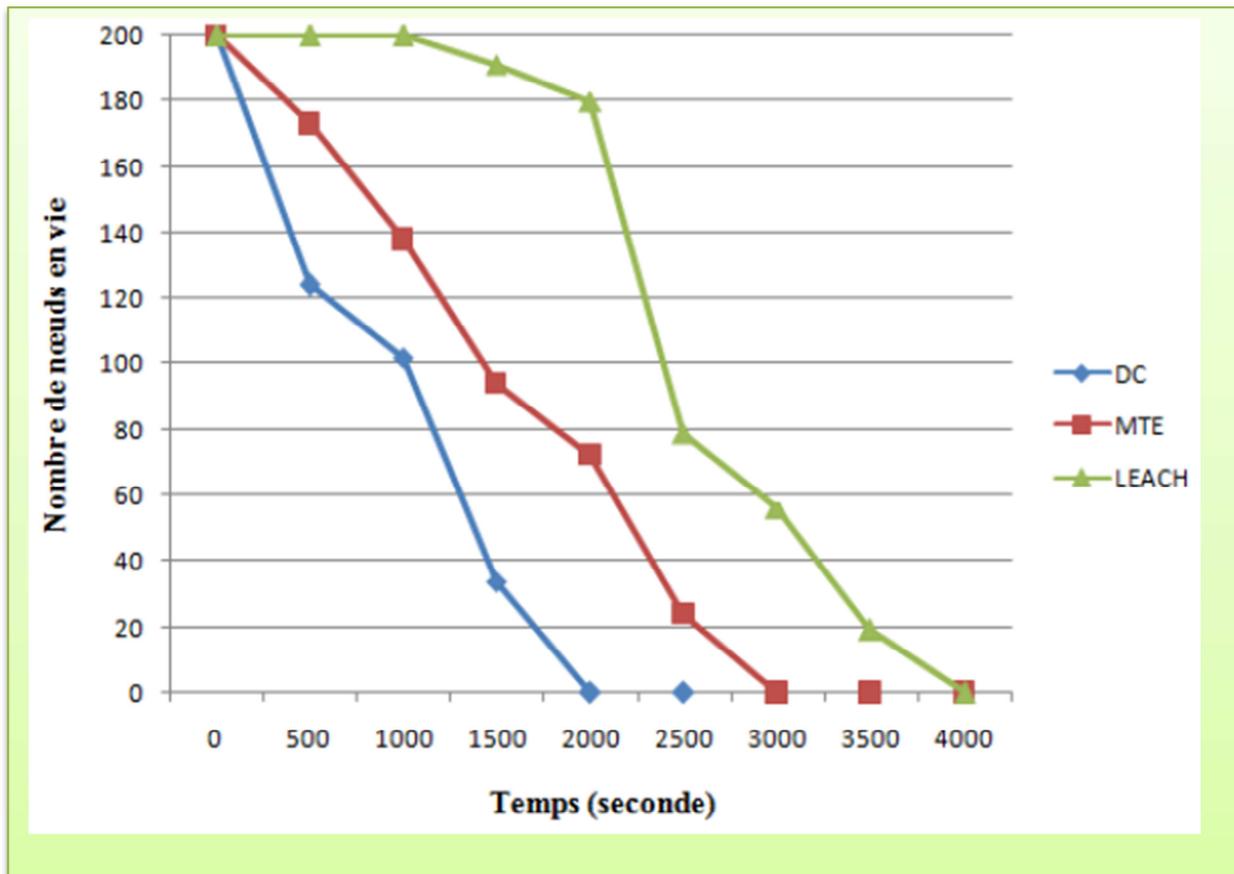


Figure III.06: Durée de vie du réseau pour 200 noeuds

Le processus de clustering a permis au protocole LEACH d'économiser la moyenne d'énergie consommée au niveau des noeuds, et par conséquent de prolonger la durée de vie du réseau, surtout quand le nombre de noeuds est élevé.

Pour conclure nous dirons que les protocoles de routage plats sont plus adaptés aux petits réseaux qui s'étendent sur de petite surface et avec une densité faible, comme les réseaux de domotique. Et que les protocoles hiérarchiques permettent de couvrir efficacement des surfaces plus grandes, avec un nombre de noeuds élevé et une forte densité comme les réseaux de contrôle de pollution déployés dans des grandes forêts.

### III.7 Conclusion :

Le protocole de routage hiérarchique LEACH qui répond aux besoins d'un réseau étendu, suit à une approche basée sur des groupes. Cette approche a montré son efficacité, comparée à la topologie plate, en termes de consommation d'énergie prolongeant ainsi la durée de vie du réseau.

***CONCLUSION***  
***GENERALE***

## Conclusion générale et perspectives :

---

### Conclusion générale et perspectives :

Pour conclure, nous dirons que l'étude qui a fait l'objet de ce mémoire nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine des réseaux de capteurs qui est une des technologies clefs de l'avenir et ce en raison de l'incroyable potentiel applicatif qu'elle renferme. Cependant, en raison de la jeunesse de cette technologie, le domaine de réseaux de capteurs soulève d'importantes problématiques de recherche en termes d'organisation, de communication, de gestion, d'exploitation des données récoltées, etc.

L'utilisation des batteries par les capteurs est une contrainte critique, la deuxième contrainte est environnementale: les capteurs sont parfois déployés sans surveillance et en grand nombre, de sorte qu'il est difficile de changer ou de recharger leurs batteries. Pour cela, les algorithmes et les protocoles de communication pour les réseaux de capteurs doivent minimiser la consommation d'énergie qui reste très variable selon les protocoles utilisés.

Ce mémoire a débuté par une étude générale sur les réseaux de capteurs, en mettant la lumière sur différents concepts, et en regardons les différentes facettes des réseaux de capteurs ainsi que leurs caractéristiques intrinsèques (limitation en énergie, topologie dynamique, mobilité, etc.). En effet, avec la grande diversité des applications liées à ce type de réseaux, il est très difficile de trouver des solutions

(Protocoles, algorithmes, etc.) générique. Nous nous sommes intéressés au problème de l'énergie et du routage dans les réseaux de capteurs sans file. L'objectif fixé était de comparer entre le routage plat et le routage hiérarchique avec une étude comparative de trois protocoles de routages (DC, MTE et LEACH). Ces études ont été validées à l'aide du simulateur de réseaux TOSSIM. Les résultats des simulations ont bien illustré, pour les trois protocoles proposés leurs billons énergétiques.

Au terme de ce travail on a appris que le routage plat présente des limites quand le réseau s'étend sur une large surface, couverte avec un grand nombre de capteurs, dans cette optique, le routage hiérarchique s'est présenté comme étant une solution prometteuse pour conserver l'énergie des noeuds, et faciliter la transmission des données capturées dans le réseau vers la station de base. L'obtention de meilleures performances pour les réseaux de capteurs avec l'approche de clustering résulte d'une organisation efficace de ses capteurs en clusters.

## Conclusion générale et perspectives :

---

Les réseaux de capteurs constituent un domaine de recherche très vaste. Ils ont de nombreuses perspectives d'application dans des domaines très variés. Il reste encore de nombreux problèmes à résoudre dans ce domaine afin de pouvoir les utiliser dans des conditions réelles.

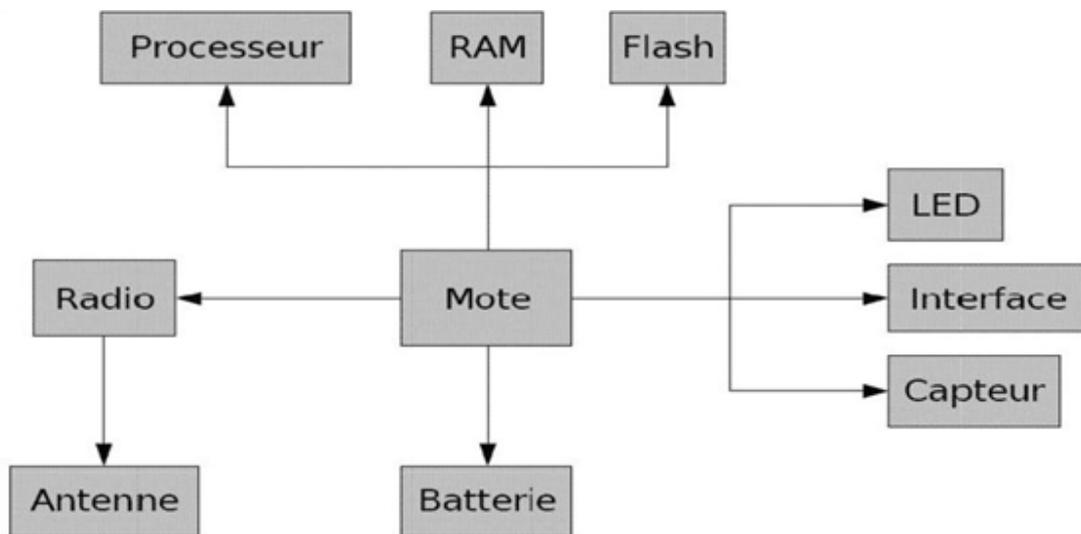
Afin d'être adaptés à un environnement réel, les protocoles étudiés peuvent être toujours améliorés en introduisant la mobilité des noeuds et en tenant compte de la qualité de service, voir même développer de nouveaux protocoles de routages pour les réseaux de capteurs sans fil.

# *ANNEXE*

## IV.1-Introduction :

Dans la vie courante, l'utilisation des capteurs sans fil est de plus en plus demandée dans plusieurs domaines. Un réseau de capteurs sans fil (Wireless Sensor network) est un réseau informatique dont les éléments (ou nœuds, ou encore motes) sont constitués au minimum d'un microprocesseur (éventuellement très simple), de mémoire vive, d'une interface radio (pour communiquer avec ses voisins), et de micro-capteurs capables de collecter et de traiter des informations provenant de l'environnement, et d'une source d'énergie (éventuellement finie). Enfin, le réseau possède en général un nœud particulier, la base (ou sink), connectée au reste du monde par un réseau filaire. Les réseaux de capteurs sans fil ont de nombreuses applications. Parmi les domaines où ces réseaux peuvent offrir les meilleures contributions, nous citons les domaines : militaire, environnemental, domestique, santé, sécurité, etc.

Tous ces types de réseaux peuvent nécessiter l'utilisation d'un très grand nombre de capteurs. Pour diminuer le coût total du réseau, il est très important que l'architecture de chaque nœud reste la plus simple possible, voir la figure ci-dessous.



**Figure IV.01:**Composition d'un mote

Le nœud est composé d'un microcontrôleur, un capteur, une radio et une batterie pour alimenter le tout. Cette conception limite leur performance et impose des contraintes. Parmi les limites des réseaux de capteurs nous nous concentrerons sur les contraintes liées aux ressources d'énergie. En effet, il est souvent difficile d'intervenir pour changer la batterie. En pratique, il est donc indispensable que tous les composants intervenant dans un réseau de

# Annexe

---

capteurs (qu'il s'agisse de composants logiciels ou matériels) soient « optimisés » pour diminuer la consommation énergétique globale et augmenter ainsi la durée de vie du réseau.

Nous ordonnons ci-dessous (par ordre décroissant) les principaux composants d'un nœud qui consomment le plus de l'énergie :

- radio (communication) ;
- CPU (calculs, agrégation) ;
- Capteur (acquisition) ;

La radio est donc l'élément qui en consomme le plus d'énergie. Par suite, de très nombreux travaux ont été proposés pour tenter de diminuer la consommation énergétique nécessaire aux communications : soit en améliorant la manière dont l'information est propagée dans le réseau (algorithme de routage), soit en essayant de diminuer la durée pendant laquelle il est nécessaire de laisser la radio allumée lors d'une communication (algorithme d'accès au canal radio, ou Medium Accès Contention).

## VI.2-TinyOS :

Les capteurs fonctionnent à basse tension et ceci est géré par un système d'exploitation spécialisé : **TinyOS**.

Ce système est actuellement le plus utilisé dans les applications nécessitant des capteurs. Enfin, pour le développement des applications légères, il n'existe actuellement qu'un langage de programmation capable d'interagir avec le système d'exploitation TinyOS : **NesC**. Ce langage dédié est proche du C traditionnel mais il est orienté composants.

### VI.2.1- Présentation :

TinyOS est un système principalement développé et soutenu par l'université américaine de Berkeley, qui le propose en téléchargement sous la licence BSD (Berkeley Software Distribution License) et en assure le suivi. Ainsi, l'ensemble des sources sont disponibles pour de nombreuses cibles matérielles.

TinyOS est un système d'exploitation open-source spécialement conçu pour les réseaux de capteurs sans fil. Il respecte une architecture basée sur une association de composants, réduisant la taille du code nécessaire à sa mise en place. Cela s'inscrit dans le respect des contraintes de mémoires qu'observent les réseaux de capteurs.

Pour autant, la bibliothèque de composants de TinyOS est particulièrement complète puisqu'on y retrouve des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition

## Annexe

---

de données. L'ensemble de ces composants peuvent être utilisés tels quels, ils peuvent aussi être adaptés à une application précise.

TinyOS a été créé pour répondre aux caractéristiques et aux nécessités des réseaux de capteurs, telles que :

- Une taille de mémoire réduite.
- Une basse consommation d'énergie.
- Des opérations d'assistance intensive.
- Des opérations robustes.
- Il est optimisé en termes d'usage de mémoire et d'énergie.

### VI.2.2-Propriétés du TinyOS :

TinyOS a été conçu pour la programmation des réseaux de capteurs et il est caractérisé par :

Propriété	Valeur pour TinyOS
Type	Event-driven
Disponibilité	Open-source
Langage	NesC
Préemptif	Non
Temps réel	Non
Sources	Fournies

#### VI.2.2.1-Disponibilité et sources :

TinyOS est un système principalement développé et soutenu par l'université américaine de Berkeley, qui le propose en téléchargement sous la licence BSD et en assure le suivi. Ainsi, l'ensemble des sources sont disponibles pour de nombreuses cibles matérielles.

#### VI.2.2.2- Event-driven :

Le fonctionnement d'un système basé sur TinyOS s'appuie sur la gestion des événements se produisant. Ainsi, l'activation de tâches, leurs interruptions ou encore la mise en veille de capteurs s'effectue à l'apparition d'événements. Ce fonctionnement événementiel (event-driven) s'oppose au fonctionnement dit temporel (time-driven) où les actions du système sont gérées par une horloge donnée.

## **VI.2.2.3- Langage :**

Comme nous l'avons évoqué plus haut, TinyOS a été programmé en langage NesC. Il est donc possible de créer une application par un assemblage de composants nécessaires à l'application. Chaque composant correspond à un élément matériel (LEDs, timer, ADC ) peut être réutilisé dans différentes applications.

Un composant est constitué alors de trois parties essentielles : interfaces, modules et configurations.

- Les interfaces permettent de spécifier des fonctions : des commandes ou des événements. Ces fonctions sont alors implémentées par le fournisseur ou l'utilisateur de l'interface, afin de distinguer les fonctions concernant les commandes de celles concernant les événements, les fonctions sont précédées de `command`.
- Les modules sont eux les éléments de base de la programmation. Ils permettent d'implémenter les composants et sont stockés dans un fichier.
- Enfin, les configurations permettent de décrire l'architecture. Une configuration est donc constituée de modules et/ou d'interfaces ainsi que de la description des liaisons entre ces composants.

## **VI.2.2.4-Préemptif :**

Le caractère préemptif d'un système d'exploitation précise si celui-ci permet l'interruption d'une tâche en cours. TinyOS ne gère pas ce mécanisme de préemption entre les tâches mais donne la priorité aux interruptions matérielles. Ainsi, les tâches entre-elles ne s'interrompent pas mais une interruption peut stopper l'exécution d'une tâche.

## **VI.2.2.5-Temps réel :**

Lorsqu'un système est dit « temps réel » celui-ci gère des niveaux de priorité dans ses tâches permettant de respecter des échéances données par son environnement. Dans le cas d'un système strict, aucune échéance ne tolère de dépassement contrairement à un système temps réel mou. TinyOS se situe au-delà de ce second type car il n'est pas prévu pour avoir un fonctionnement temps réel.

## **VI.2.2.6 -Consommation :**

TinyOS a été conçu pour réduire au maximum la consommation en énergie du capteur. Ainsi, lorsqu'aucune tâche n'est pas active, il se met automatiquement en veille.

## **VI.3-Modèle d'exécution de TinyOS :**

TinyOS est basé sur une structure à deux niveaux de planification : les événements (interruptions) et les tâches.

### **VI.3.1- Les événements :**

Dans un système basé sur la programmation par événement, chaque exécution est partagée entre les différentes tâches de traitement. Dans TinyOS, chaque module est désigné, pour fonctionner en attendant continuellement de répondre aux événements inattendus. Quand un événement est signalé, le traitement correspondant est exécuté. Une fois totalement terminé, la main est redonnée au système pour continuer sa tâche antérieure.

En plus de l'efficacité de l'allocation du CPU, la programmation par événement permet d'obtenir des opérations économiques en énergie. Il est très important aussi pour la consommation d'énergie que les applications signalent la fin de leurs événements et l'utilisation du CPU. Dans TinyOS, les tâches associées avec un événement sont exécutées très rapidement après leurs signalisations. Une fois terminé, la CPU entre en veille en attendant une nouvelle réception d'événement.

### **VI.3.2- Les tâches :**

Un des facteurs limitant la programmation par événement est la longue exécution des tâches qui peut interrompre d'autres programmes importants. Si l'exécution d'un événement ne finit jamais, toutes les autres fonctions vont être interrompues. Pour éviter ce problème, TinyOS fournit un mécanisme d'exécution appelé tâche. Une tâche est un bout de programme qui s'exécute jusqu'à la fin sans interférer avec les autres événements. Les tâches sont

- utilisées pour effectuer la plupart des blocs d'instructions d'une application.
- A l'appel d'une tâche, celle-ci va prendre place dans une file d'attente de type FIFO mais elle ne sera exécutée que lorsqu'il n'y a plus d'événements. En plus les tâches peuvent être interrompues à tout moment par des événements.

# Annexe

---

D'autre part, il n'y a pas de mécanisme de préemption entre les tâches et une tâche activée s'exécute en entier. Ce mode de fonctionnement permet de bannir les opérations pouvant bloquer le système (inter blocage, famine, ...). Par ailleurs, lorsque la file d'attente des tâches est vide, le système d'exploitation met en veille le dispositif jusqu'au lancement de la prochaine interruption.

## VI.4- Allocation de la mémoire :

Il est très important d'aborder la façon avec laquelle un système d'exploitation gère la mémoire et plus spécialement quand celui-ci travaille dans un espace restreint. TinyOS ne nécessite pas beaucoup de place mémoire puisqu'il n'a besoin que de 300 à 400 octets dans le cadre d'une distribution minimale. Il est primordial d'avoir 4 Ko de mémoire libre qui se répartissent entre les différents besoins suivants :

- ✓ **La Pile** : Elle sert de mémoire temporaire pour l'empilement et le dépilement des variables locales.
- ✓ **Les variables globales** : Elles réservent un espace mémoire pour stocker des valeurs pouvant être accessibles depuis différentes tâches.
- ✓ **La mémoire libre** : Pour tout le reste du stockage temporaire. La notion d'allocation dynamique de mémoire n'est pas présente dans le système, ce qui simplifie l'implémentation mais, par ailleurs, il n'existe pas de mécanisme de protection de la mémoire, ce qui rend le système plus vulnérable au crash et aux corruptions de mémoire.

## VI.5- Allocation des ressources :

### VI.5.1 L'Ordonnanceur TinyOS :

Le choix d'un Ordonnanceur déterminera le fonctionnement global du système et le dotera de propriétés précises telles que la capacité à fonctionner en temps réel. L'Ordonnanceur TinyOS c'est :

- 2 niveaux de priorité** (bas pour les tâches, haut pour les évènements)
- 1 file d'attente FIFO** (disposant d'une capacité de 7)

Par ailleurs, entre les tâches, un niveau de priorité est défini permettant de classer les tâches, tout en respectant la priorité des interruptions (ou évènements). Lors de l'arrivée d'une

# Annexe

---

nouvelle tâche, celle-ci sera placée dans la file d'attente en fonction de sa priorité (plus elle est grande, plus le placement est proche de la sortie). Dans le cas où la file d'attente est pleine, la tâche dont la priorité est la plus faible est enlevée de la FIFO.

## **VI.5.2- Package TinyOS :**

TinyOS est prévu pour fonctionner sur une multitude de plates-formes, disponible dès l'installation. En effet, TinyOS peut être installé à partir d'un environnement Windows (2000 et XP) ou bien GNU/Linux (Red Hat essentiellement, mais d'autres distributions sont également possibles). Deux principales versions de TinyOS sont disponibles : la version stable et la version actuellement en cours de tests.

## **VI.6- Architecture générale des cibles utilisant TinyOS :**

On appelle généralement Mote la carte physique utilisant TinyOS pour fonctionner. Celle-ci a pour cœur le bloc constitué du processeur et des mémoires RAM et Flash. Cet ensemble est à la base du calcul binaire et du stockage, à la fois temporaire pour les données et définitif pour le système TinyOS.

TinyOS est prévu pour mettre en place des réseaux sans fil, les équipements étudiés sont donc généralement équipés d'une radio ainsi que d'une antenne afin de se connecter à la couche physique que constituent les émissions hertziennes.

TinyOS est prévu pour mettre en place des réseaux de capteurs, on retrouve donc des équipements bardés de différents types de détecteurs et autres entrées.

Comme tout dispositif embarqué, ceux utilisant TinyOS sont pourvus d'une alimentation autonome telle qu'une batterie.

## **VI.7-Les simulateurs de TinyOS :**

### **VI.7.1 -TOSSIM**

TOSSIM est un simulateur discret basé sur la programmation par événement et qui a été conçu et désigné pour simuler les réseaux de capteurs qui utilisent la plateforme TinyOS. Le principal but de TOSSIM est de créer une simulation très proche de ce qui se passe dans ces réseaux dans le monde réel.

TOSSIM simule le comportement des applications de TinyOS à un niveau très bas. Le réseau est simulé au niveau des bits et chaque interruption dans le système est

# Annexe

---

capturée. TOSSIM fourni 2 modèles de radios pour la communication. Le modèle par défaut est celui « simple ». Les paquets sont transmis dans le réseau avec aucune erreur et ils sont reçus par chaque nœud. Avec ce modèle il est ainsi possible que deux nœuds différents peuvent envoyer un paquet en même temps avec la conséquence que ces deux paquets seront alors détruit à cause du chevauchement des signaux. Le deuxième modèle est le modèle « lossy ». Dans ce modèle les nœuds sont placés dans un graphe direct formé d'un couple (a,b) ce qui signifie qu'un paquet envoyé par le nœud a peut-être été reçu par le nœud b.

## **VI.7.2- PowerTossim**

L'outil PowerTossim permet de faire des simulations de la même manière que TOSSIM sauf que celui-ci prend en considération la consommation d'énergie, ainsi le nœud qui ne possède plus d'énergie s'arrête de fonctionner, ce qui nous permet d'exécuter la simulation jusqu'à la mort du réseau.

## **VI.7.3- TinyViz**

TinyViz est une application graphique qui donne un aperçu de notre réseau de capteurs à tout instant, ainsi que des divers messages qu'ils émettent. Il permet de déterminer un délai entre chaque itération des capteurs afin de permettre une analyse pas à pas du bon déroulement des actions, il possède aussi des options afin de pouvoir simuler la consommation d'énergie.

## **VI.8- Conclusion :**

Suite aux différents problèmes vécus par les réseaux de capteurs (problème énergétiques et de mémoire), l'université de Berkeley a développé alors un système d'exploitation minime destiné pour ces réseaux : TinyOS [23] [24]. Il est orienté "composants" afin de faciliter l'implémentation de ces réseaux, tout en minimisant la taille du code afin de respecter les contraintes de mémoire des composants matériels.

Dans ce chapitre, nous avons présenté le système d'exploitation TinyOS ; nous avons étudié son mode d'exécution (programmation par événements et par tâche) et son mode d'ordonnement des différents types d'action qui sont événement, commande et tâche. En finissant nous avons présenté le simulateur TOSSIM (Il permet de simuler le comportement d'un capteur au sein d'un réseau de capteurs), le simulateur PowerTossim (il prend en

## Annexe

---

considération la consommation d'énergie) et TinyViz (une application graphique qui donne un aperçu de notre réseau à tout instant).

***REFERANCES***  
***BIBLIOGRAPHIQUES***

## Références bibliographiques

---

- [1] F. benhamida « **Tolerance aux pannes dans les reseaux de capteurs sans fil** » Ecole Doctorale Ingenierie des Systemes Informatiques oued-smar alger 2009.
- [2] M. Badet, W. bonneau « **Reseaux de capteurs : Mise en place d'une plateforme de test et d'experimentation** » Master Technologie de l'Internet Université de Franche 2005/2006.
- [3] Kaci BADER « **Détection d'intrusions dans les réseaux de capteurs sans fil** » Rapport de stage Master Recherche 2 en Informatique, IFSIC-Rennes 1, 2009/2010.
- [4] Thomas Watteyne « **Proposition et validation formelle d'un protocole MAC temps réel pour reseaux de capteurs lineaires sans fils** » Laboratoire CITI 2004/2005. Rapport de recherche
- [5]. Lindsey, S. Raghavendra, C.S. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems. IEEE Aerospace Conference Proceedings. 2002
- [6]. W.R. Heinzelman, A.P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. "An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks". IEEE Transactions Wireless Communications. October 2002, Vol. 1, 4, pp. 660-670.
- [7] L. khelladi, N. badache « **Les réseaux de capteurs : état de l'art** » rapport LSI- Département Informatique, Faculté Génie Electrique & Informatique, USTHB 2004.
- [8]. Y. Yu, D. Estrin, and R. Govindan, "Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks", UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, May 2001.
- [9] O. Younis, S. Fahmy. Heed: "A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks". IEEE Transactions on Mobile Computing 03 (4). 2004, pp. 366–379.
- [10] LEHSAINI Mohamed « **Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique** » Thèse de Doctorat, Université A.B Tlemcen Faculté des Sciences pour l'Ingénieur && Université de Franche-Comté U.F.R Sciences et Techniques École Doctorale SPIM, Année 2009.

## Références bibliographiques

---

- [11] Samir ATHMANI « **Protocole de sécurité Pour les Réseaux de capteurs Sans Fil** » Mémoire de Magistère en Informatique, Université Hadj Lakhdar Batna, 15/07/2010.
- [12] ZIANE KHODJA Lilia « **La structuration et la sécurisation des réseaux de Capteurs** » Master 2 Recherche Informatique, IFSIC 2001.
- [13] Gérard CHALHOUB « **Les réseaux de capteurs sans fil** » Clermont Université, IUT de Clermont-Ferrand, Dpt R&T, Complexe scientifique des Cézeaux, 63177 Aubière cedex, France.
- [14] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, et E. Cayirci, “A Survey on Sensor Networks”. IEEE Communications Magazine, August 2002.
- [15] Benahmed Khelifa « **Approche Theorie des Graphes pour la Surveillance d'un Reseau de Capteurs sans fil** », Magister en Informatique, Option : Methodes et Modeles pour la securite des S.I, Université d'Oran Es-senia, Faculte des Sciences, Departement d'informatique, Fevrier 2007.
- [16] N.Benaouda, H. Guyennet, A.Hammad, A.H. Benaouda et M. Mostefai « **Modelisation par les groupes d'un reseau sans fil Ad-Hoc** » Laboratoire d'Automatique, Faculte des Sciences de l'Ingenieur, Setif, Algerie, 2004.
- [17] <http://french.bluetooth.com/> dernière consultation : le 28 janvier 2013.
- [18] R.kacimi « **Techniques de conservation d'énergie pour les reseaux de capteurs sans** » l'universite de Toulouse, France 2009.
- [19] P. Misra and P. Enge, “Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance” Book Review, Ganga-Jamuna Press, Lincoln, Massachusetts, 2001.
- [20] M. Younis et T. Nadeem, “Energy efficient mac protocols for wireless sensor networks”, Technical report, University of Maryland Baltimore County, USA, 2004.
- [21] Mohammad Ilyas, Imad Mahgoub, “Handbook Of Sensors Networks : Compact Wireless And Wired Sensing Systems” CRC press , 2005.
- [22] W. Ye, J. Heidemann, et D. Estrin “An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensors Networks”.
-

## Références bibliographiques

---

[23] UC Berkeley, “nesc : A programming language for deeply networked systems.” [Online]. Available : nesc.sourceforge.net

[24] P. Levis, N. Lee, M. Welsh, and D. Culler, “Tossim : accurate and scalable simulation of entire tinyos applications,” in *SenSys’03 : Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*. New York, NY, USA : ACM Press, pp. 126–137.

[25] L. Mounier, L. Samper, and W. Zneidi, “Worst-case lifetime computation of a wireless sensor network by model-checking,” in *Proceedings of PEWASUN 2007 (to appear)*, 2007.

[26] *Proceeding of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists 2010 Vol II, IMECS 2010, Hong Kong, March 17-19, 2010*

[27] M. Ali et S. K. Ravula, “Real-time support and energy efficiency in wireless sensor networks”. Technical report, IDE0805, January 2008.

[28] Yasser Romdhane, « Evaluation des performances des protocoles S-MAC et Directed Diffusion dans les réseaux de capteurs », Projet de fin d’études, Ecole Supérieure des Communications de Tunis (Sup'Com), 2006 / 2007.

[29] K. Baumgartner, « Réseaux de capteurs sans fil », IBCOM, Décembre 2005.

[30] Paolo Santi, “Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks”. Hardcover, july 2005.

[31] Djallel Eddine Boubiche, « Protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil », Mémoire de magistère, Université de l’Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2008.