

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE Dr. TAHAR MOULAY SAIDA

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : INFORMATIQUE



MEMOIRE DE MASTER

OPTION : RISR

Thème

**Techniques de conservation d'énergie
pour les réseaux de capteur sans fil**

Présenté par :

Mekki nabil

Mohammedi kada

Encadré par :

DR Mekkaoui kheireddine

Promotion : juin 2018

Remerciements

Nous remercions en premier notre grand Dieu pour nous a donné le courage et la volonté durant les moments difficiles et qui nous a donné la force et la patience pour l'accomplissement de ce travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude et respectueuse reconnaissance à notre cher encadreur :

DR Mekkaoui kheireddine

Pour sa bonne volonté d'accepter de nous encadrer, pour tout le temps qu'il nous a octroyé et pour tous les conseils qu'il nous a prodigué.

Nous adressons également nos remerciements, à tous nos enseignants, pour leurs aides inestimables, qui nous ont donné les bases de la science.

sans oubliant nos chers professeurs membres de jury et tous les enseignants de département de Mathématique et informatique.

Merci à nos camarades de promotion 2017/2018 Master Informatique et nos amis

pour leur compagnie, leur aide, à vous tous merci leur humour, et leur soutien moral aux moments où tout allait mal.

Cette page n'aurait probablement pas pu s'écrire sans l'appui moral des membres de notre famille.

Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont contribué à l'accomplissement de ce modeste travail

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mon père qui ma tellement soutenue durant ma vie et ses sacrifices il est l'espoir de mon existence pour réussir dans mes études.

A ma très chère mère pour le soutien moral et affectif

A

Mes frères..... et..... mes sœurs.

A

Toute ma famille.

A

Tous mes amis.

A tous mes enseignants qui ont fait leurs possibles pour me donner le maximum d'information concernant mes études.

A tous mes collègues de l'université surtout la promotion de l'informatique.

A toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

MOHAMMEDI KADA

Mekki nabil

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil permettent de répondre aux besoins de nombreuses applications de surveillance, en raison de leur faible coût, de leur capacité à communiquer sans fil et de leur facilité de déploiement. Les RCSF sont en plein développement, et deviennent de plus en plus répandus. Actuellement, ils constituent un thème de recherche très dynamique. Néanmoins le routage reste une des plus grandes problématiques de ce type de réseau à cause de leurs caractéristiques tel que le changement de topologie et le manque de ressources.

Dans ce mémoire nous avons défini brièvement les réseaux de capteurs sans fils, ensuite on a détaillé la consommation d'énergie dans les réseaux de capteur sans fils et on a simulé de protocoles de routage LEACH et MTE, enfin on a comparé entre les deux algorithmes et on a déterminé le résultat que LEACH est le plus efficace pour la conservation d'énergie

المخلص

تلبى شبكات المستشعرات اللاسلكية احتياجات العديد من تطبيقات المراقبة بسبب انخفاض تكلفتها وقدرتها على التواصل اللاسلكية وسهولة نشرها. إن CWHN في تطور كامل ، وأصبحت منتشرة أكثر فأكثر. حاليا ، فإنها تشكل موضوع بحث ديناميكي للغاية. ومع ذلك ، يبقى التوجيه أحد أكبر مشاكل هذا النوع من الشبكات بسبب خصائصها مثل تغيير الطوبولوجيا ونقص الموارد.

في هذا الموجز قمنا بتعريف شبكات الاستشعار اللاسلكية لفترة وجيزة ، ثم قمنا بتفصيل استهلاك الطاقة في شبكات الاستشعار اللاسلكية وقمنا بمحاكاة بروتوكولات توجيه LEACH و MTE ، وفي النهاية قمنا بمقارنة بين الخوارزميتين وحددنا النتيجة بأن LEACH أكثر فعالية للحفاظ على الطاقة.

abstract

Wireless sensor networks can meet the needs of many surveillance applications due to their low cost, wireless communication capability and ease of deployment. The CWHN is in full development, and is becoming more and more widespread. Currently, they constitute a very dynamic research theme. Nevertheless, routing remains one of the biggest problems of this type of network because of their characteristics such as the change of topology and the lack of resources.

In this brief we briefly defined the wireless sensor networks, then we detailed the power consumption in the wireless sensor networks and we simulated LEACH and MTE routing protocols, finally we compared between the two algorithms and we determined the result that LEACH is most effective for energy conservation

Table des matières

Liste des figures.....	X
Liste des tableaux :	XII
Liste des abréviations :	XIII
Introduction générale.....	- 1 -
Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil.....	- 2 -
1. Introduction.....	- 3 -
2 .Les réseaux sans fils classiques	- 3 -
3. Les réseaux ad hoc	- 4 -
4. Définition de réseau de capteur.....	- 5 -
4.1. Les capteurs.....	- 5 -
4.2. Le réseau	- 6 -
4.2.1 .Le capteur (Sensor).....	- 6 -
4.2.2. L'agrégateurs (aggregator)	- 6 -
4.2.3. Le puits (sink).....	- 7 -
4.2.4. La passerelle (gateway)	- 7 -
5. Architecteur de réseaux capteur sans fil	- 7 -
5.1. L'unité d'acquisition	- 8 -
5.2. L'unité de traitement.....	- 8 -
5.3. L'unité de transmission	- 8 -
5.4. La source d'énergie.....	- 9 -
6. Modèle de nœud	- 9 -
6.1. Un nœud régulier	- 9 -
6.2. Un nœud capteur ou nœud source	- 10 -
6.3. Un nœud actionneur ou robot	- 10 -
6.4. Un nœud puits.....	- 10 -
6.5. Un nœud passerelle.....	- 10 -
6.6. Nœud Source (NS)	- 11 -
6.7. Nœud Relais (NR)	- 11 -
6.8. Nœud Collecteur (NC) de données.....	- 11 -
7. Pile protocolaire	- 11 -
7.1. La couche physique	- 12 -
7.2. La couche liaison.....	- 12 -

7.3. La couche réseau	- 13 -
7.4. La couche transport.....	- 13 -
7.5. La couche application	- 13 -
7.6. Le niveau de gestion d'énergie.....	- 13 -
7.7. Le niveau de gestion de mobilité.....	- 13 -
7.8. Le niveau de gestion des tâches.....	- 13 -
8. domaines d'Applications et Contraintes	- 14 -
8.1. Le domaine militaire.....	- 14 -
8.2. Applications environnementales.....	- 15 -
8.3. Applications médicales	- 15 -
8.4. Applications dans la sécurité	- 15 -
8.5. Applications agricoles.....	- 15 -
8.6. Applications domestiques	- 16 -
9. Facteurs et contraintes des RCSF	- 17 -
9.1. Durée de vie du réseau	- 17 -
9.2. Ressources limitées	- 17 -
9.3. Bande passante limitée	- 17 -
9.4. Facteur d'échelle	- 17 -
9.5. Topologie dynamique	- 17 -
9.6. Agrégation de donnée	- 18 -
10. Les types de communication de RCSF	- 18 -
10.1. Unicast	- 18 -
10.2. Broadcat	- 18 -
10.3. Local Gossip	- 18 -
10.4. Convergecast	- 18 -
10.5. Multicast	- 19 -
11. Caractéristiques d'un capteur sans fil	- 19 -
11.1. L'énergie	- 19 -
11.2. La portée de transmission	- 19 -
11.3. La puissance de stockage et de traitement	- 20 -
12. Réseaux des capteurs et Défis	- 21 -
13. Conclusion	- 23 -
Chapitre 2 : Consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil	- 24 -
1. Introduction.....	25

2. Consommation d'énergie dans les RCSF	25
2.1 Energie de capture.....	25
2.2 Energie de traitement	26
2.3 Energie de communication	26
3. Modèle de consommation d'énergie	27
4. Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie	28
4.1 Etat du module radio.....	28
4.2 Accès au medium de transmission	28
4.2.1 La retransmission	28
4.2.2 L'écoute active.....	29
4.2.3 La surécoute	29
4.2.4 La surcharge	29
4.2.5 La surémission	30
4.2.6 La taille des paquets.....	30
4.3 Modèle de propagation radio	30
4.4. Routage des données	30
5. Contraintes de conception des RCSF.....	31
6. Sources de consommation d'énergie	32
6.1. La longueur des chemins	32
6.2. La qualité des liens	33
6.3. Le mode de communication.....	33
6.4. Le routage de paquets inutiles	33
6.5. Le choix d'un chemin.....	33
7. Techniques de conservation de la consommation d'énergie.....	33
8. Conclusion	36
Chapitre 3 : le routage dans les RCFS	37
1. Introduction.....	38
2. Définition de routage	38
3. Historique	38
4. Contraintes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil	39
5. Approches d'établissement de routes	39
5.1 Approche basée sur l'état du lien.....	39
5.2 Approche basée sur le vecteur de distance	40
6. Types de routage	40

6.1. Routage plat	40
6.2. Routage hiérarchique	40
6.3. Routage basé sur la localisation	41
6.4. Routage proactif	41
6.5. Routage réactif	42
6.6. Routage hybride (à la fois proactif et réactif)	42
7. Les défis du routage dans les RCSF	42
8. Techniques de minimisation de la consommation d'énergie	44
8.1. Ajustement des puissances de transmission	44
8.2. Distribution des charges	44
8.3. La formation des grappes	44
8.4. La réduction de données	45
8.5. Négociation des échanges de données	45
9. Les critères de performance des protocoles de routage en RCSF	45
10. Classification des protocoles de routage dans les RCSF	46
10.1. Protocole de routage multi-chemin	47
10.2. Protocole de routage basé sur la négociation des données	48
10.3. Protocole de routage basé sur les interrogations	48
10.4. Protocole de routage basé sur la QoS	48
10.5. Les protocoles de routage plat (flat based-routing)	48
10.6. Les protocoles de routage hiérarchique	49
10.7. Les protocoles de routage avec localisation géographique	50
11. LEACH	51
12. Le protocole AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector)	52
12.1. AODV : Avantages et inconvénients	53
13. La diffusion dirigée DD	54
14. Les principaux algorithmes de conservation d'énergie	55
15. Les limites des protocoles de routage dans les RCSF	56
16. Conclusion	56
Chapitre 4 : simulation et résultats	57
1. Introduction	58
2. Outils de développement :	58
2.1. NetBeans IDE	58
2.2 Principaux langages supportés	59

2.3. Langage de programmation (Java)	59
2.4. Environnement Java	60
3. Implémentation de l'application	61
3.1. Interfaces de l'application	61
3.2. Paramètre de simulation	61
4. Routage plat (flat based-routing)	62
4.1. Protocole MTE (minimum transmission énergie).....	62
4.1. Avantages de MTE	63
4.2 Inconvénients de MTE	63
4.3. Simulation de protocole MTE	63
4.4. Résultat de simulation.....	64
5. Routage hiérarchique	66
5.1 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)	66
5.1.1 La durée de vie du réseau	67
5.1.2 Avantages	67
5.1.3 Inconvénients	67
5.2. Simulation de protocole LEACH.....	68
5.3. Résultat de simulation.....	68
6. Comparaison entre protocole LEACH et MTE	70
7. Conclusion	72
Conclusion générale	73
Références bibliographiques	75

Liste des figures

- Figure 1.1** : présentation de réseaux sans fil classique.
- Figure 1.2** : Réseau ad hoc
- Figure 1.3**: Architecture classique d'un réseau de capteurs sans fils.
- Figure 1.4** : architecture d'un réseau de capteur sans file
- Figure 1.5** : les composants d'un nœud capteur.
- Figure 1.6**: La pile protocolaire dans les RCSFs
- Figure 1.7** : Réseau de capteur militaire
- Figure 1.8** : Ensemble de capteurs dans un corps humain
- Figure 1.9**: Domaines d'Applications de réseau de capteur sans capteur.
- Figure 1.10**: Illustration de la zone de communication et de perception d'un capteur.
- Figure 1.11**: La portée d'un capteur.
- Figure 2.1** : La répartition de la consommation d'énergie d'un noeud de MicaZ
- Figure 2.2** : Modèle de consommation d'énergie
- Figure 2.3** : La surécoute dans une transmission.
- Figure 2.4** : Les techniques de conservation d'énergie.
- Figure 3.1** : Protocoles de routage pour les RCSF selon la structure du réseau.
- Figure 3. 2** : Protocoles de routage pour les RCSF selon le type de protocole.
- Figure 3. 3** : Routage plat.
- Figure 3. 4** : Routage hiérarchique.
- Figure 3. 5** : Routage basé sur la localisation
- Figure 3.6** : Fonctionnement du protocole LEACH.

Figure 3.7 : Les deux requêtes RREQ et RREP en AODV

Figure 4.1 : fenêtre de programmation Sur Netbeans

Figure 4.2 : NetBeans IDE Téléchargement des offres groupées

Figure 4.3 : architecture exécutable Code java

Figure 4.4 : Interface d'accueil d'application

Figure 4.5 : Un RCSF de 300 nœuds après l'application de MTE

Figure 4.6 : L'énergie résiduelle du réseau en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produits).

Figure 4.7 : L'évolution de la connectivité du réseau, en termes des nœuds morts, en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produit)

Figure 4.8 : La durée de vie du réseau au niveau de LEACH

Figure 4.9 : Un RCSF de 300 nœuds après l'application de LEACH

Figure 4.10 : L'énergie résiduelle du réseau en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produits) a l'algorithme LEACH

Figure 4.11 : L'évolution de la connectivité du réseau, en termes des nœuds morts, en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produit) a l'algorithme LEACH

Figure 4.12 : L'énergie résiduelle du réseau en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produits) des deux protocoles MTE et LEACH

Figure 4.13 : L'évolution de la connectivité du réseau, en termes des nœuds morts, en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produit) des deux protocoles MTE et LEACH

Liste des tableaux :

Tableau 4.1 :L'énergie résiduelle et nombre des nouds mort (en termes de nombre d'évènement produit) de protocoles MTE

Tableau 4.2 :L'énergie résiduelle et nombre des nouds mort (en termes de nombre d'évènement produit) de protocoles LEACH

Tableau 4.3 :L'énergie résiduelle et nombre des nouds mort (en termes de nombre d'évènement produit) des deux protocoles MTE et LEACH

Liste des abréviations :

RCSF : réseaux de capteurs sans fil.

NS : Nœud Source.

NR: Nœud Relais.

NC : Nœud Collecteur.

PDA : point d'accès.

PC: computer personnel.

ADV : advertise.

AODV: Ad hoc On-demand Distance Vector

DSDV: Destination Sequence Distance Vector

GPS: Global Position System

LEACH: Low Energy Adaptive Clustering Hierarchical

OLSR: Optimized Link State Routing Protocol

QoS: Qualité of Service

RCSF: Réseau de Capteurs sans Fil

RREP: Route Reply

RREQ: Route Request

WSNs: Wireless Sensor Networks

PDR: Paquet Delivery Ratio

CH: Cluster-Head

DD : La diffusion dirigée

Introduction générale

Les capteurs sont des composants très petits. Ils sont utilisés essentiellement pour surveiller un environnement. Plusieurs technologies ont contribué à produire des composants de type capteur plus petits et à un prix faible. En plus, récemment ces composants sont munis d'un système de communication leur permettant de communiquer avec d'autres capteurs, et ainsi les réseaux de capteurs sans fil sont nés. Ces réseaux sont différents des autres réseaux sans fil car ils ont en général les spécificités suivantes : une grande densité, faible débit, faible capacité d'énergie et un environnement inaccessible. Ces deux dernières spécificités ont fait de l'énergie une contrainte très importante puisque les batteries des capteurs ne sont pas généralement rechargeables. Pour prolonger la durée de vie d'un réseau de capteur sans fil tout en assurant les trois tâches principales d'un nœud capteur : capture, traitement et l'envoi des données, il faut bien conserver l'énergie des nœuds capteurs. Parmi ces trois tâches, l'envoi des données ou la communication est la tâche qui consomme la plus grande partie de l'énergie , Dans ce contexte vient de s'inscrire notre projet de fin étude master, notre objectif consiste en l'étude des différentes protocoles des routages Et leur impact sur l'énergie de capteur Réseau sans fil avec plusieurs type de routage comme routage plat, routage hiérarchique et routage basé sur la localisation...etc., et son rôle dans la conservation de l'énergie

A cet effet, notre mémoire est organisé comme suit :

Le chapitre 1 nous présenterons les réseaux de capteurs sans fil : leurs architectures de communication et leurs applications. Nous discuterons également les principaux facteurs et contraintes qui influencent la conception des réseaux de capteurs sans fi

Le chapitre 2 nous présentons la consommation d'énergie dans RSCF et les contraintes de RCSF et facteurs intervenants dans la consommation d'énergie

Le chapitre 3 nous présentons quelque des algorithmes de routage (routage plat, routage hiérarchique et routage basé sur localisation)

Le chapitre 4 nous illustrerons les différents résultats de simulation obtenus avec une comparaison des performances des deux protocoles de routage MTE et LEACH

Enfin, notre mémoire se termine avec une conclusion générale et des perspectives que nous voulons réaliser prochainement.

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

1. Introduction :

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont des réseaux ad hoc généralement constitués d'entités autonomes miniaturisées appelés nœuds capteurs pouvant communiquer entre eux par liaison radio. Les RCSF ont suscité beaucoup d'engouement dans la recherche scientifique en raison notamment des nouveaux problèmes de routage sous forte contrainte de durée de vie du réseau et de faibles capacités des nœuds. Malgré la miniaturisation et la réduction du coût de fabrication, ces capteurs sont généralement dotés de ressources limitées en termes de puissance de transmission, de capacité de traitement et de stockage des données et d'énergie.

Ces contraintes matérielles ont influencé une grande partie des problématiques de recherche du domaine. La contrainte de la durée de vie du réseau est ainsi une préoccupation majeure étant donné le caractère souvent inaccessible des zones de surveillance (il est souvent impossible de recharger ou de remplacer les batteries des nœuds après leur épuisement). Il se pose donc une problématique de préservation énergétique, particulièrement si l'application doit fonctionner longtemps. En outre, la limitation de la bande passante, peut engendrer de grandes latences et par la suite un faible niveau de qualité de service (QoS). En effet, plus la charge ou la densité du réseau est grande, moins vite un nœud accèdera au médium pour transmettre ses données. Due à la limitation de mémoire, les paquets peuvent être supprimés avant que le nœud puisse les envoyer à destination. Il se pose donc une problématique de passage à l'échelle mais aussi de connectivité au cours du temps [1]

2 .Les réseaux sans fils classiques

La Figure 1.1 montre le fonctionnement classique des réseaux sans fils. Par exemple lorsque l'ordinateur de poche (PDA) veut communiquer avec le Tablet PC, les paquets envoyés par l'ordinateur portable sont acheminés au point d'accès 1, puis renvoyé au PDA. Pourtant le Tablet PC et le PDA pourraient communiquer directement puisqu'ils sont à portée l'un de l'autre. De même pour deux dispositifs qui ne sont pas à portée. Si l'ordinateur portable veut envoyer un message au Tablet PC, il va devoir contacter son point d'accès (soit le numéro 1), qui va faire suivre les paquets au point d'accès 2 via le réseau filaire, où ils seront enfin envoyés au Tablet PC. Dans tous les cas, tout le trafic doit passer par le point d'accès auquel est connecté le dispositif.[2]

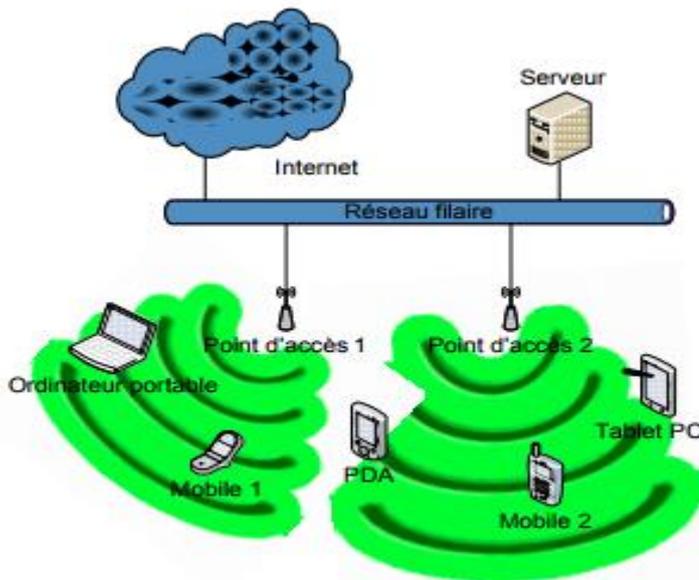


Figure 1.1 : présentation de réseaux sans fil classique.

De plus hormis l'envoi de paquets entre deux nœuds, les réseaux sans fils classiques nécessitent de nombreux autres services, par exemple pour gérer la mobilité des utilisateurs dans le réseau. Si une communication est en cours entre le mobile 1 et le mobile 2, que le mobile 1 se déplace et sort de la zone de couverture du point d'accès 1 (pour entrer dans la zone de couverture du point d'accès 2 par exemple), la communication sera coupée à moins de mettre en place une infrastructure spécifique nécessitant l'intervention d'un serveur. Les réseaux ad hoc eux permettent d'établir des communications directement entre des nœuds du réseau et même d'assurer la mobilité des nœuds sans recourir à ces installations.[2]

3. Les réseaux ad hoc

Dans les réseaux ad hoc, l'ensemble des nœuds communiquent directement entre eux. C'est-à-dire que cette fois-ci, si l'ordinateur portable veut envoyer un message au Tablet PC, il ne va pas devoir contacter systématiquement un point d'accès, mais il va envoyer les paquets directement au destinataire. Pour cela, grâce à un protocole de routage, il va déterminer une route valide à un moment donné, puis envoyer ses paquets en suivant cette route. Dans notre cas une route valide serait : ordinateur portable, mobile 1, Tablet PC. Bien sûr, dans ce cas, toute la difficulté va résider dans le fait de trouver une route

valide. C'est dans ce but que de nombreux protocoles de routage ont été proposés. L'étude de ces protocoles reste d'ailleurs encore aujourd'hui un domaine de recherche très actif. Le but d'un tel protocole va être logiquement de découvrir une route valide et de la maintenir, mais aussi, de s'assurer de ne pas surcharger un nœud par rapport à un autre, ce qui causerait sa défaillance prématurée. La maintenance va inclure l'optimisation de la route en cas de mobilité des nœuds, la découverte d'une nouvelle route en cas de défaillance d'un nœud intermédiaire. [2]

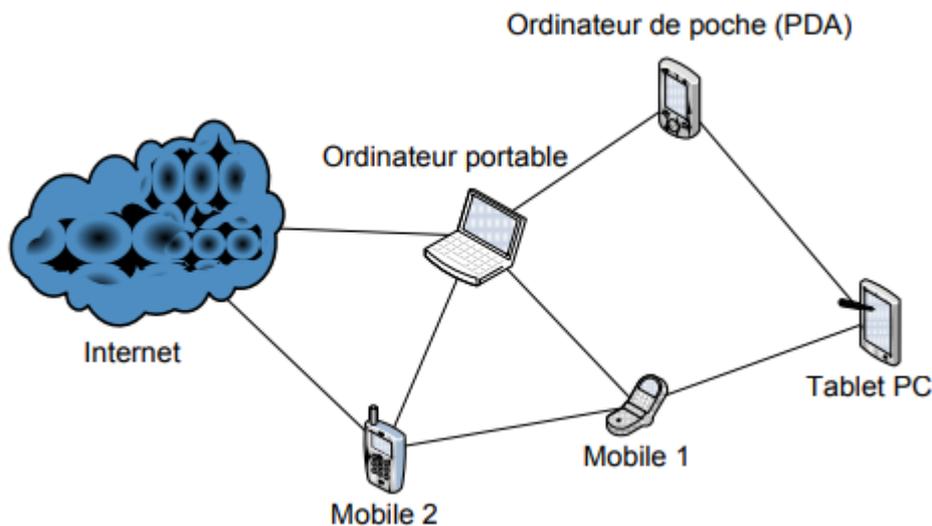


Figure 1.2 : Réseau ad hoc

4. Définition de réseau de capteur

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) est un ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un ou plusieurs points de collecte, à l'aide d'une connexion sans fil [2]

4.1. Les capteurs

Les capteurs sont de simples petits modules électroniques à faible coût qui, grâce au principe d'auto-organisation des réseaux ad hoc, peuvent être déposés, voir même cette largués depuis un avion, sans avoir à se soucier de leur connexion et sans avoir à déployer une infrastructure lourde. Le principal problème de ces capteurs réside dans le fait que pour être produits et utilisés en grande quantité, ils doivent avoir un coût de production faible. Cela implique donc forcément des capacités réduites : capacité de calcul ; capacité

de stockage ; portée radio. Mais aussi, au-delà du problème de coût, le fait que les capteurs fonctionnent sur batterie, implique non seulement les mêmes restrictions sur la capacité, mais impose aussi de tout faire pour maximiser la durée de vie de la pile. Cela peut inclure de mettre en veille le capteur la majeure partie du temps, de limiter le trafic qui circule sur le réseau, etc.[2]

4.2. Le réseau

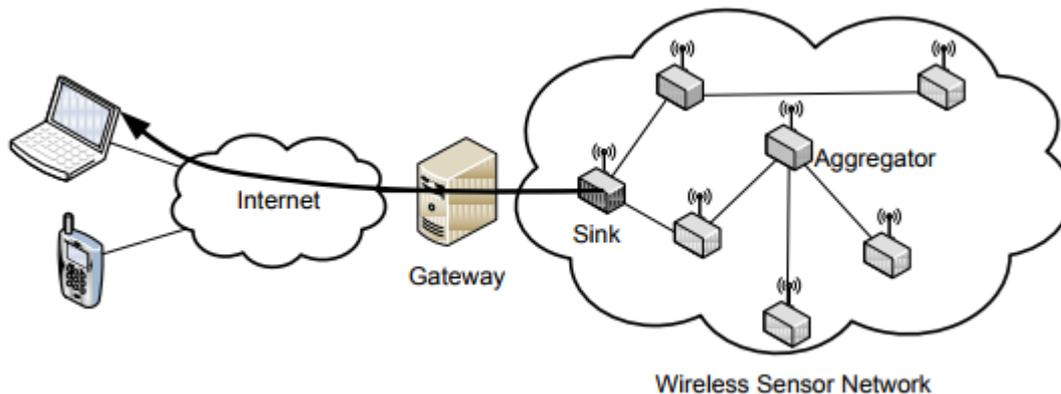


Figure 1.3 : Architecture classique d'un réseau de capteurs sans fils.

La Figure 1.3 représente l'architecture habituelle des réseaux de capteurs sans fils.

Ils sont construits autour des quatre principales entités suivantes :

4.2.1 .Le capteur (Sensor)

Comme le dit bien son nom, il est en charge de mesurer une valeur relative à son environnement (température, pression, luminosité, présence, etc.). Internet Wireless Sensor Network Sink Gateway Aggregator On peut parfois rencontrer des capteurs-actionneurs qui non seulement mesureront mais auront aussi pour rôle d'entreprendre une action en fonction de la valeur mesurée. L'intelligence nécessaire à la prise de décision quant à l'action à entreprendre peut alors être déportée sur un autre nœud du réseau. [2]

4.2.2. L'agrégateurs (aggregator)

Il est en charge d'agrégérer les messages qu'il reçoit de plusieurs capteurs puis de les envoyer en un seul message au puits (sink). Cette opération a pour principal but de limiter le trafic sur le réseau et donc de prolonger la durée de vie globale du réseau de capteur. Il correspond généralement à la tête d'une grappe (cluster head). L'utilisation de grappes offre de nombreux intérêts à tous les niveaux, notamment pour le routage.[2]

4.2.3. Le puits (sink)

Le puits est le nœud final du réseau. C'est à lui qu'est envoyé l'ensemble des valeurs mesurées par le réseau. Il peut arriver qu'il y ait plusieurs puits sur un même réseau de capteurs.[2]

4.2.4. La passerelle (gateway)

La passerelle est un dispositif qui a la particularité d'avoir deux interfaces réseau. Il permet de relier le réseau de capteurs sans fils à un réseau plus traditionnel, typiquement l'internet. En effet, habituellement le réseau de capteurs ne sert qu'à faire remonter les mesures, les applications traitant ces informations étant exécutées sur la machine de l'utilisateur final. Le fonctionnement global de cette architecture consiste donc à ce que les capteurs fassent des mesures qu'ils font remonter au puits via les agrégateurs. L'application finale tournant sur une machine se situant sur un autre réseau a ainsi accès aux valeurs via une passerelle. A noter que les agrégateurs sont facultatifs, et que le puits et la passerelle sont généralement localisés dans un seul dispositif.[2]

5. Architecteur de réseaux capteur sans fil

Un RCSF est composé d'un ensemble de nœuds capteurs. Ces nœuds capteurs organisés en champs « sensorfields ».chacun de ces nœuds a la capacité de collecte des données et des transférer au nœud passerelle (dit « sink »en anglais ou puits) par l'intermédiaire d'une architecture multi-sauts. Le puits transmet en suit ces données par internet ou par satellite a l'ordinateur central pour analyser ces donner et prend des décisions. [3]

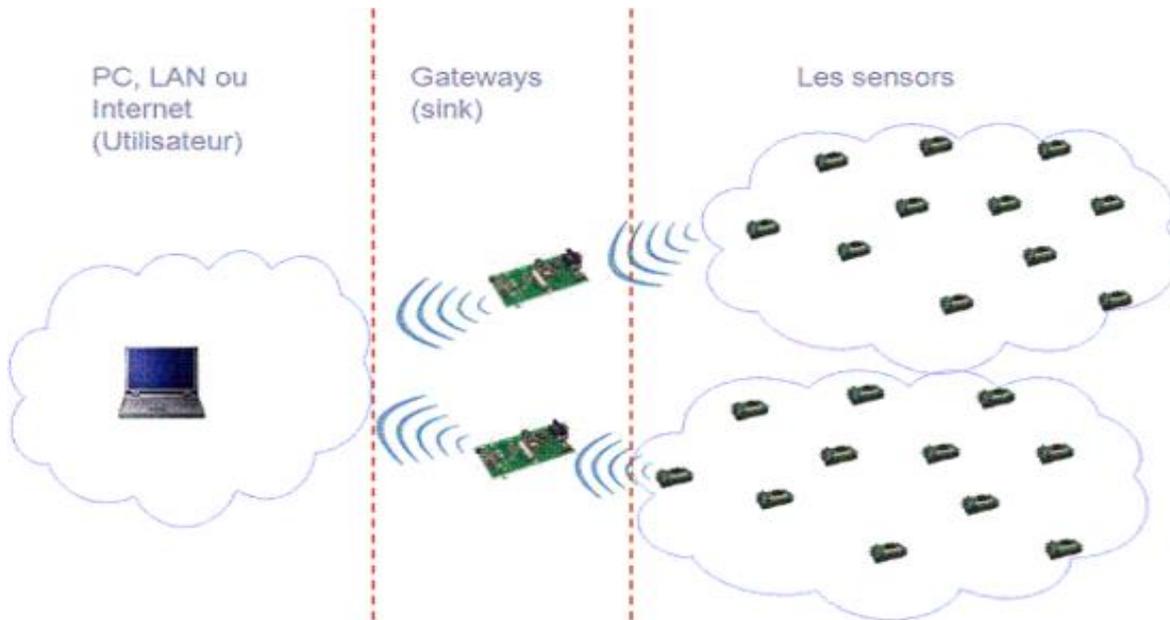


Figure 1.4 : architecture d'un réseau de capteur sans file

Un capteur est composé de 3 unités :

5.1. L'unité d'acquisition

L'unité d'acquisition est composée d'un capteur qui va obtenir des mesures numériques sur les paramètres environnementaux et d'un convertisseur Analogique/Numérique qui va convertir l'information relevée et la transmettre à l'unité de traitement.

5.2. L'unité de traitement

L'unité de traitement est composée de deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une interface pour l'unité de transmission. Cette unité est également composée d'un processeur et d'un système d'exploitation spécifique. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de transmission.

5.3. L'unité de transmission

L'unité de transmission est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication radio.

C'est la batterie qui, n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de conception de protocoles pour les réseaux de capteurs. Les unités d'énergie peuvent être supportées par des photopiles qui permettent de convertir l'énergie lumineuse en courant électrique.

5.4. La source d'énergie

Pour des réseaux de capteurs sans fil autonomes, l'alimentation est une composante cruciale. Il y a essentiellement deux aspects : premièrement, stocker l'énergie et la fournir sous la forme requise ; deuxièmement, tenter de reconstituer l'énergie consommée par un réapprovisionnement grâce à une source externe au nœud-capteur telles les cellules solaires. Le stockage de l'énergie

Se fait traditionnellement en utilisant ses piles. À titre indicatif, ce sera souvent une pile AA normale d'environ 2.2 – 2.5 Ah fonctionnant à 1.5 V

Ces trois unités sont alimentées par une batterie comme la montre la figure ci-dessous :

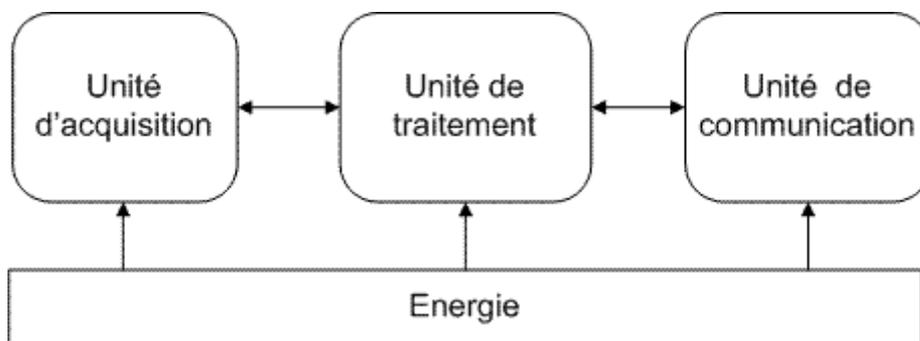


Figure 1.5: les composants d'un nœud capteur.

6. Modèle de nœud

Un RCSF peut contenir différents types de nœuds.

6.1. Un nœud régulier

Est un nœud doté d'une unité de transmission et d'une unité de traitement de données. L'unité de transmission de données est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication sans fil pouvant être de type optique (comme dans les nœuds Smart Dust) ou de type radiofréquence (comme dans les nœuds Stargate). [1]

L'unité de traitement de données est composée d'une mémoire, d'un microcontrôleur et d'un système d'exploitation spécifique (comme TinyOS, développé à l'université de Berkeley et actuellement utilisé par plus de 500 universités et centres de recherches à travers le monde). Elle est responsable du traitement des données en provenance ou au

départ de l'unité de Les nœuds et leur communication 25 transmission. Ces deux unités sont alimentées par une batterie embarquée.

Selon le domaine d'application, un nœud peut être équipé d'unités supplémentaires ou optionnelles comme un système de localisation (Global Positioning System ou GPS, etc.) pour déterminer sa position, ou bien un système générateur d'énergie (cellule photovoltaïque, etc.), ou encore un système mobile pour lui permettre de changer sa position ou sa configuration en cas de nécessité.[1]

6.2. Un nœud capteur ou nœud source

Est un nœud régulier équipé d'une unité d'acquisition ou de détection. L'unité d'acquisition est généralement dotée d'un capteur ou plusieurs capteurs qui obtiennent des mesures analogiques (physiques et physiologiques) et d'un convertisseur Analogique/Numérique qui convertit l'information relevée en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement. [1]

6.3. Un nœud actionneur ou robot

Est un nœud régulier doté d'une unité lui permettant d'exécuter certaines tâches spécifiques comme des tâches mécaniques (se déplacer, combattre un incendie, piloter un automate, etc.) [1]

6.4. Un nœud puits

Est un nœud régulier doté d'un convertisseur série connecté à une seconde unité de communication (GPRS, Wifi, Wi Max, etc.). La seconde unité de communication fournit une retransmission transparente des données provenant de nœuds capteurs à un utilisateur final ou d'autres réseaux comme internet. [1]

6.5. Un nœud passerelle

Est un nœud régulier permettant de relayer le trafic dans le réseau sur le même canal de communication.

Pour optimiser certains paramètres comme la durée de vie du réseau ou le délai de livraison des données, certains travaux se sont focalisés sur l'architecture (plat, hiérarchique, multi niveaux) des RCSF. Ces architectures définissent le plus souvent les rôles joués par les nœuds dans un RCSF. [1]

6.6. Nœud Source (NS)

Dont le rôle principal est de détecter les phénomènes physiques ou physiologiques se produisant dans son environnement immédiat afin de les transmettre, directement ou via multiples sauts, à un utilisateur final. C'est en fait un nœud capteur. [1]

6.7. Nœud Relais (NR)

ils ont pour rôle d'agréger et de retransmettre les mesures provenant des NS afin que celles-ci parviennent à un utilisateur final. Dans une architecture à plat, quelques travaux considèrent généralement un NS comme un NR. Dans une architecture à 2 niveaux, un nœud passerelle joue le rôle de NR pour un ou plusieurs nœuds sources. Dans une telle configuration réseau, la capacité de transmission du NR est supposée généralement plus grande que celle du NS.

6.8. Nœud Collecteur (NC) de données

Ils ont pour rôle de collecter les mesures provenant des nœuds sources et éventuellement de les agréger. Généralement, un " Cluster-Head " ou chef de cluster est utilisé comme NC dans une architecture hiérarchique où les NS sont partitionnés en plusieurs groupes.[1]

7. Pile protocolaire

Le rôle de cette pile consiste à standardiser la communication entre les nœuds participants afin que différents constructeurs puissent mettre au point des produits compatibles. Ce modèle comprend cinq couches : la couche application, la couche transport, la couche réseau, la couche liaison de données et la couche physique. Les couches ont les mêmes fonctions que celles de modèle OSI (*Open Systems Interconnection*) [7].

De plus, cette pile possède trois plans (*niveaux*) de gestion : le plan de gestion des tâches qui permet de bien affecter les tâches aux nœuds capteurs, le plan de gestion de mobilité qui permet de garder une image sur la localisation des nœuds pendant la phase de routage, et le plan de gestion d'énergie qui permet de conserver le maximum d'énergie. Dans le but d'un établissement d'un RCSF, une architecture en couche est adoptée afin d'améliorer la robustesse du réseau. Une pile protocolaire est donc utilisée par les nœuds de réseau. Comme le montre la figure suivante :

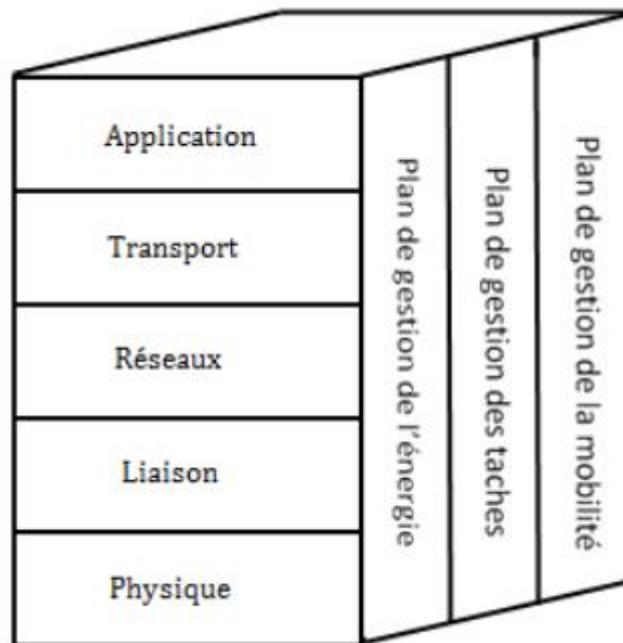


Figure 1.6: La pile protocolaire dans les RCSFs

7.1. 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 [7].

7.2. La couche liaison

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 média, 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 Logiciel Link Control*) qui fournit une interface entre la couche liaison et la couche réseau en encapsulant les segments des messages de la couche réseau avec des informations d'entête additionnelles, et la couche de contrôle d'accès au médium (*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 de liaison de données doit garantir une faible consommation d'énergie et minimiser les collisions entre les données diffusées par les nœuds voisins [7].

7.3. La couche réseau

La couche réseau s'occupe de l'acheminement des données fournies par la couche transport : routage, relayage, etc. Le protocole de routage est le principal acteur dans cette couche, il permet de trouver une route et une transmission performante des données. Plusieurs nouveaux algorithmes de routage ont été conçus pour les problèmes de routage dans les réseaux capteurs (optimisation de l'utilisation de l'énergie des capteurs, gestion des trafics, etc).

7.4. 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 [7].

7.5. La couche application

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

7.6. Le niveau 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 ne pas participer aux tâches de routage, et conserver l'énergie restante aux fonctionnalités de capture [7].

7.7. Le niveau de gestion de mobilité

Ce niveau détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds capteurs, de manière à leurs 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.

7.8. Le niveau 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 [7].

8. domaines d'Applications et Contraintes

La miniaturisation des capteurs, le coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs de se développer dans plusieurs domaines d'application. Ils permettent aussi d'étendre les applications existantes. Les réseaux de capteurs peuvent se révéler très utiles dans de nombreuses applications lorsqu'il s'agit de collecter et de traiter des informations provenant de l'environnement. Parmi les domaines où ces réseaux peuvent offrir les meilleures contributions, nous citons les domaines militaire, surveillance, environnemental, médical, domestique, commercial, etc...

8.1. Le domaine militaire

Les RCSFs permettent la détection des mouvements ennemis sur un champ de bataille ou bien de tracer leurs mouvements. De façon analogue, ils peuvent permettre la détection d'intrusion ou de cambriolage dans le domaine de la sécurité civile.



Figure 1.7 : Réseau de capteur militaire

8.2. Applications environnementales

la surveillance de l'environnement est un domaine où les réseaux de capteurs sans fil sont largement utilisés. L'application classique est la détection des désastres tels que les feux de forêts. Dans une telle application, plusieurs capteurs sont déployés afin d'alerter les secours, d'évaluer les risques et de prendre les mesures nécessaires. Des capteurs peuvent également être déployés sur un terrain à des fins agricoles ou pour la surveillance des environnements hostiles tels que les volcans ou les régions toxiques.

8.3. Applications médicales

Les RCSFs permettent par exemple la surveillance de l'état de santé des patients qu'ils soient au sein de l'établissement ou même ailleurs, et ce en permanence.

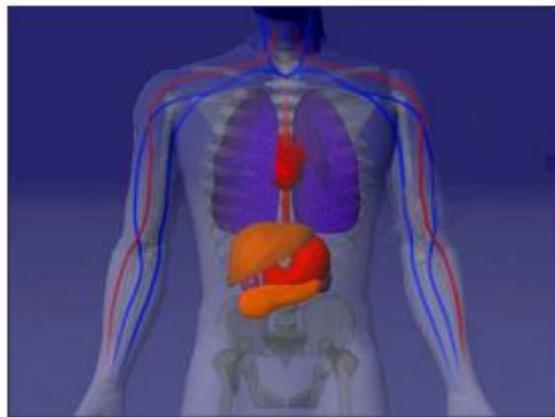


Figure 1.8 : Ensemble de capteurs dans un corps humain

8.4. Applications dans la sécurité

L'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter des fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou un vieillissement de la structure. Avec une activation périodique de ces capteurs, le système peut fonctionner durant des années, voir des décennies.

8.5. Applications agricoles

Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole.

8.6. Applications domestiques

En plaçant, sur le plafond ou dans le mur, des capteurs, on peut économiser l'énergie en gérant l'éclairage ou le chauffage en fonction de la localisation des personnes.

On plus de sa on a autre applications comme :

- **Le bâtiment** : lors de tremblements de terre, pour aider les secouristes à retrouver les victimes (capteurs emprisonnés dans le béton à la construction qui détectent le niveau de bruit)
- **Le domaine de l'industrie** : gestion des stocks
- **Le domaine des transports** : gestion du trafic
- **Le domaine médical** : pour contrôler le rythme cardiaque des patients [4].



Figure 1.9 : Domaines d'Applications de réseau de capteur sans capteur.

9. Facteurs et contraintes des RCSF

La conception et la réalisation des réseaux de capteurs sans fil sont influencées par plusieurs paramètres. Ces facteurs servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les RCSF.

9.1. Durée de vie du réseau :

C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où l'énergie du premier nœud s'épuise. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années.

9.2. Ressources limitées :

En plus de l'énergie, les nœuds capteurs ont aussi une capacité de traitement et de mémoire limitée. En effet, les industriels veulent mettre en œuvre des capteurs simples, petits et peu coûteux qui peuvent être achetés en masse.

9.3. Bande passante limitée :

Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s. Un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes.

9.4. Facteur d'échelle :

Le nombre de nœuds déployés pour une application peut atteindre des milliers. Dans ce cas, le réseau doit fonctionner avec des densités de capteurs très grandes. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que la station de base soit équipée de mémoire suffisante pour stocker les informations reçues.

9.5 .Topologie dynamique :

La topologie des réseaux de capteurs peut changer au cours du temps pour les raisons suivantes :

- Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles (champ de bataille par exemple), la défaillance d'un nœud capteur est, donc très probable.
- Un nœud capteur peut devenir non opérationnel à cause de l'expiration de son énergie.

- Dans certaines applications, les nœuds capteurs et les stations de base sont mobiles.

9.6. Agrégation de donnée :

Dans les réseaux de capteurs, les données produites par les nœuds capteurs voisins sont très corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer la réception par la station de base d'informations redondantes. Réduire la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau et ainsi d'améliorer sa durée de vie. L'une des techniques utilisée pour réduire la transmission d'informations redondantes est l'agrégation des données. Avec cette technique, les nœuds intermédiaires agrègent l'information reçue de plusieurs sources. Cette technique est connue aussi sous le nom de fusion de données.

10. Les types de communication de RCSF :

Il existe différents types de communication utilisée dans les RCSFs :

10.1. Unicast :

Ce type de communication est utilisé pour échanger des informations entre deux nœuds sur le réseau.

10.2. Broadcast :

La station de base ou « puit » transmet des informations vers tous les nœuds du réseau. Ces informations peuvent être des requêtes de données bien précises, des mises à jour de programmes ou des paquets de contrôle.

10.3. Local Gossip :

Ce type de communication est utilisé par des nœuds situés dans une région bien déterminée qui collaborent ensemble afin d'avoir une meilleure estimation de l'évènement observé et d'éviter l'émission du même message vers le point de collecte ce qui contribue à consommer moins d'énergie.

10.4. Convergecast :

Il est utilisé dans les communications entre un groupe de capteurs et un nœud bien spécifique (qui peut être le point de collecte). L'avantage de ce type de communication est

la diminution de contrôle d'entête des paquets (« control overhead ») ce qui économise l'énergie au niveau du nœud 14 récepteur.

10.5. Multicast :

Il permet une communication entre un nœud et un groupe de nœuds. Ce type de communication est utilisé dans les protocoles qui incluent le « clustering » dans les quels, le nœud appelé « Clusterhead » s'intéresse à communiquer avec un groupe de capteurs.[6]

11. Caractéristiques d'un capteur sans fil :

Présentent des caractéristiques propres au niveau des capteurs du réseau comme par exemple l'énergie, la portée de transmission, ainsi que de la puissance de stockage et au niveau du réseau qui est formé par ces nœuds comme par exemple la bande passante, le déploiement sur une surface précise, et la topologie du réseau.

Les capteurs peuvent recueillir et transmettre des données captées dans l'environnement où ils sont déployés. Les données recueillies peuvent être un indice sur la pression, la vibration, la température, la vitesse etc. Certaines caractéristiques sont prises en compte pour la transmission des données vers d'autres nœuds composant le réseau, tel que [5]

11.1. L'énergie :

L'énergie est considérée comme la principale et fondamentale contrainte dans les réseaux de capteurs sans fil. Chaque nœud fonctionne grâce à une batterie ayant une capacité limitée dû à sa petite taille mais également non rechargeable. L'utilisation de ces capteurs se fera, dans la plupart des cas, dans des environnements hostiles ou difficiles d'accès, ce qui ne permettra pas la récupération de celles-ci. Nous pouvons donc dire que toute utilisation de la technologie du réseau de capteur sans fil doit prendre en compte principalement de la problématique « consommation énergétique ». [5]

11.2. La portée de transmission :

La capacité de transmission des capteurs est liée au rayonnement des antennes utilisées. La transmission d'information ne peut avoir lieu que si la distance entre les nœuds ne dépasse pas un certain seuil. Bien évidemment la consommation d'énergie est proportionnelle à la distance qui sépare les nœuds. Plus celles-ci sont éloignés et plus la consommation sera importante. La topologie de la zone géographique peut également

jouer un rôle car des obstacles peuvent s'ajouter aux contraintes de la transmission des données entre les capteurs. Une zone de perception et une zone de communication peuvent être définies pour un capteur. La zone de perception permet au capteur de détecter des données physiques sur l'environnement qui l'entoure. Dès lors, la zone de communication permet à chaque entité du réseau d'avoir un aperçu des nœuds voisins pour de futures communications et de transmission de données. [5]

La zone de communication est la zone où le capteur A peut communiquer avec les autres nœuds (le capteur B). D'autre part, la zone de perception est la zone où le capteur A peut capter l'événement qui s'y produit. En effet, pour qu'un capteur ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant. Cependant, l'énergie consommée serait importante. Comme les capteurs sont généralement disposés sur la zone à couvrir de façon aléatoire, il est nécessaire de disposer d'une densité importante de nœuds. Mais si la densité de capteurs est trop importante et que la zone que l'on veut surveiller est « trop » couverte, alors des capteurs vont fonctionner inutilement. [5]

11.3. La puissance de stockage et de traitement :

La puissance de stockage ainsi que la puissance de traitement des données pour un capteur reste relativement faible. Par exemple, les nœuds capteurs de type « Tmote Sky » sont composés d'un microcontrôleur cadencé à 8MHz, 48Ko de mémoire et d'une radio de débit environ 250 kbps avec une fréquence pouvant aller à 2,4 GHz, la portée de transmission de ce type de capteur peut atteindre 50mètres en lieu clos et de 150200mètres à l'extérieur. Cela reste vrai même pour les nœuds de moyenne gamme, comme les « UCLA/ROCKWELL'S WINS », qui ont un processeur Strong ARM 1100 avec une mémoire flash de 1Mo, une mémoire RAM de 128Ko et une radio dont le débit est 100Kbps [1.5]

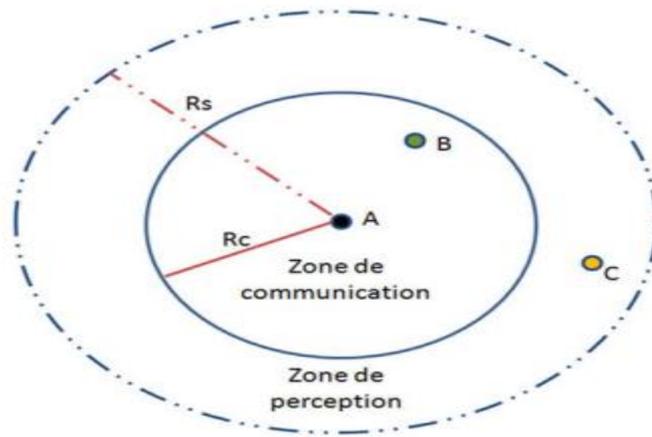


Figure 1.10: Illustration de la zone de communication et de perception d'un capteur.

12. Réseaux des capteurs et Défis

[06] Notre travail entre dans le cadre d'émerger une structure à partir des informations internes avec la prise en compte de consommation d'énergie possible, tel que l'objectif final est de résoudre le problème de routage dans les réseaux de capteurs sans fils. Le problème de routage au sein des WSN est très compliqué, cela est dû essentiellement à l'absence d'infrastructure fixe (forêt, mer, . . .), de toute administration centralisée et à d'autres défis qui doivent être vérifiés qui sont les suivants :

Consommation d'énergie sans perte d'efficacité: Les capteurs utilisent leur réserve d'énergie à des fins de calcul et de transmission de données. La durée de vie d'un capteur dépend essentiellement de celle de sa batterie. Dans un WSN, chaque nœud joue le rôle d'émetteur et de routeur. Une défaillance énergétique d'un capteur peut changer significativement la topologie du réseau et imposer une réorganisation coûteuse de ce dernier

Tolérance aux pannes: Certains nœuds peuvent être défaillants à cause d'un manque d'énergie, d'un dommage physique ou d'une interférence. Ceci ne doit pas affecter la globalité de la tâche du réseau de capteurs. En cas de défaillance, de nouveaux liens et routes doivent être établis pour assurer la collecte des données. La redondance peut également être utilisée, tout en veillant à conserver une faible consommation d'énergie.

Couverture: Dans les WSN, chaque nœud perçoit une vue locale de son environnement, limitée par sa portée et sa précision. La couverture d'un vaste espace

déterminé est donc composée de l'union de nombreuses couvertures de petite taille. La figure 1.11 présente la portée d'un capteur et ses voisins.

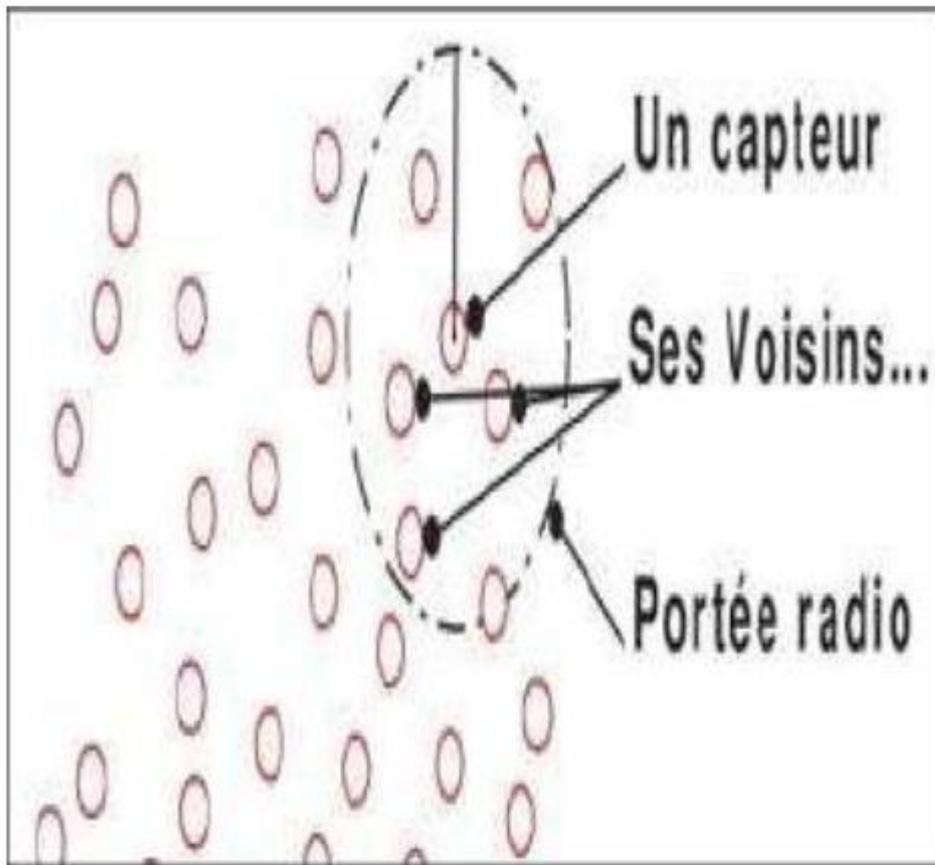


Figure 1.11: La portée d'un capteur.

Déploiement de nœuds: C'est un facteur dépendant de l'application qui affecte grandement les protocoles de routage. Le déploiement peut être déterministe ou aléatoire. Dans la première stratégie, les capteurs sont placés manuellement et les données peuvent donc être acheminées via des chemins prédéterminés. En revanche, avec une approche aléatoire, les capteurs sont éparpillés (lâchés d'un avion). Dans le cas d'une répartition non uniforme, une stratégie de groupement (clustering) peut s'avérer nécessaire.

Modèle de couverture des données: La capture d'information et la couverture des données requises dépendent essentiellement de l'application. Elles peuvent être classifiées selon différents modèles : en fonction du temps (surveillance périodique), des événements (réaction à l'occurrence d'un événement particulier), des requêtes (réponse à une demande d'une station de base) ou de manière hybride (combinaisons des précédentes approches)[6].

Hétérogénéité des nœuds /connections: Dans de nombreuses études, tous les capteurs d'une application sont considérés homogènes (i.e. même capacité de calcul, de communication et d'énergie). Néanmoins, en fonction de l'application, certains capteurs peuvent avoir des rôles différents, générant une architecture hétérogène. Par exemple, dans un WSN hiérarchique, certains capteurs sont déclarés « chef » de leur groupe. Le routage vers les stations de base est alors traité par ces derniers.

Agrégation de donnée: De nombreux capteurs peuvent générer de la redondance. L'agrégation de paquets similaires en provenance de différents nœuds permet de réduire le nombre de transmissions ou un traitement du signal peut également être effectué, par fusion de données (conformation de faisceaux).

Qualité de service: Dans diverses applications, la donnée doit être transmise dans une certaine plage de temps, après quoi, elle n'aura aucune importance. Pourtant, dans la plupart des applications, la durée de vie du réseau est favorisée au détriment de la qualité d'émission des données. Les protocoles de routage assurant une qualité de service et prenant en compte la gestion de l'énergie, représentent un défi nouveau et stimulant.

13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini et décrit brièvement ce qu'est un réseau Ad-hoc et ses classification ainsi qu'un réseau de capteurs sans fil qui est un type particulier de réseau Ad-hoc. Nous avons décrit le capteur, son architecture et cité les caractéristiques d'un réseau de capteurs avec une présentation de quelques applications.

Chapitre 2 : Consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

1. Introduction

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 étant donnée la diversité de ces applications : santé, environnement, industrie et même dans le domaine sportif.

Contrairement aux réseaux traditionnels qui se préoccupent de garantir une bonne qualité de service, les réseaux de capteurs doivent, en plus, prendre en compte la conservation d'énergie. Ils doivent intégrer des mécanismes qui permettent aux utilisateurs de prolonger la durée de vie du réseau en entier, car chaque nœud est alimenté par une source d'énergie limitée et généralement irremplaçable. Dans un nœud capteur, l'énergie est consommée en assurant les fonctions suivantes : la capture, le calcul (traitement) et la communication. Cette dernière représente une grande portion de l'énergie totale consommée. De ce fait, la communauté de recherche est en train de développer et de raffiner plusieurs techniques de conservation d'énergie.

2. Consommation d'énergie dans les RCSF

La première étape dans la conception de système énergétique de capteurs consiste à analyser les caractéristiques de consommation d'énergie d'un nœud de capteur sans fil. Cette analyse systématique de l'énergie d'un nœud capteur est extrêmement importante pour identifier les problèmes dans le système énergétique pour permettre une optimisation efficace. L'énergie consommée par un capteur est principalement dû aux opérations suivantes : la détection, le traitement et la communication [8].

2.1 Energie de capture

Un capteur peut être équipé par multiples senseurs (humidité, la chaleur, les mouvements, la position, ...). De ce fait les sources de consommation d'énergie pour les opérations de détection ou de capture sont : l'échantillonnage, la conversion analogique-numérique, le traitement de signal et l'activation de la sonde de capture [9].

2.2 Energie de traitement

L'énergie de traitement est composée de deux sortes d'énergie: 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.

2.3 Energie de communication

L'énergie de communication se décline en trois parties : l'énergie de réception, l'énergie de l'émission et l'énergie en état de veille. 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.

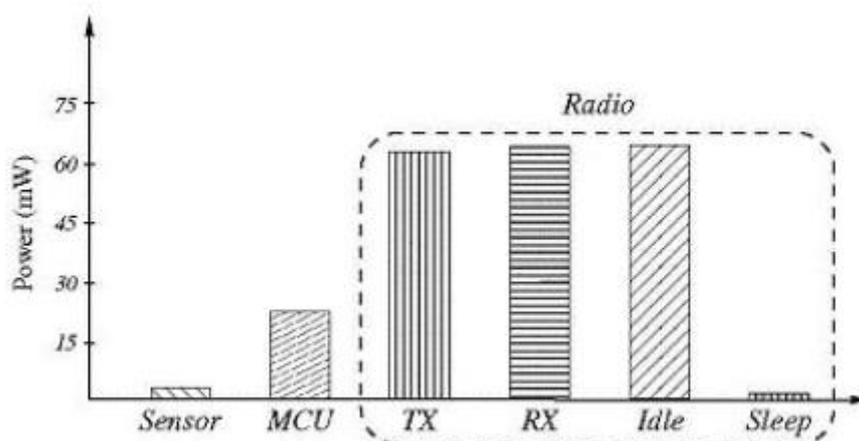


Figure 2.1 : La répartition de la consommation d'énergie d'un nœud de MicaZ

3. Modèle de consommation d'énergie

Heinzelman et al proposent un modèle radio de consommation d'énergie [10]. Ainsi, les énergies nécessaires pour émettre $ETx(s; d)$ et recevoir $ERx(s)$ des messages sont données par :

- Pour émettre un message de s bits vers un récepteur loin de d mètres, l'émetteur consomme :

$$ETx(s; d) = ETx_{elec}(s) + ETx_{amp}(s; d) \quad (2.1)$$

$$ETx_{elec}(s) = e_{tx} * s$$

$$ETx(s; d) = (E_{elec} * s) + (E_{amp} * s * d^2) \quad (2.2)$$

Où

S: le nombre de bits

D: la distance

ET

- Pour recevoir un message de s bits, le récepteur consomme :

$$ERx(s) = ERx_{elec}(s) \quad (2.3)$$

$$ERx(s) = E_{elec} * s \quad (2.4)$$

E_{elec} et E_{amp} représentent respectivement l'énergie de transmission électronique et d'amplification (Voir figure 2.1).

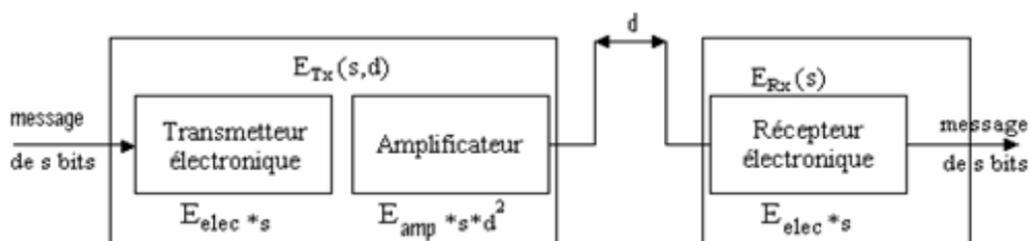


Figure 2.1 : Modèle de consommation d'énergie

4. Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie

La consommation d'énergie dépend de plusieurs facteurs qui sont expliqués ci-dessous.

4.1 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 [11].

- 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.

Il est aussi à noter que 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. Ceci 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.

4.2 Accès au medium de transmission

La couche MAC joue un rôle important pour la coordination entre les nœuds et la minimisation de la consommation d'énergie. Dans cette section, nous allons analyser les principales causes de consommation d'énergie au niveau de la couche MAC [12].

4.2.1 La retransmission

Les nœuds capteurs possèdent en général une seule antenne radio et partagent le même canal de transmission. Par ailleurs, la transmission simultanée des données

provenant de plusieurs capteurs peut produire des collisions et ainsi une perte de l'information transmise.

La retransmission des paquets perdus peut engendrer une perte significative de l'énergie.

4.2.2 L'écoute active

L'écoute active (*idle listening*) du canal pour une éventuelle réception de paquet qui ne sera pas reçu peut engendrer une perte importante de la capacité des nœuds en énergie.

Pour éviter ce problème, il faut basculer les nœuds dans le mode sommeil le plus longtemps possible.

4.2.3 La surécoute

Le phénomène de surécoute (*overhearing*) se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés (figure 2.3). La surécoute conduit à une perte d'énergie additionnelle à cause de l'implication des autres capteurs dans la réception des données.

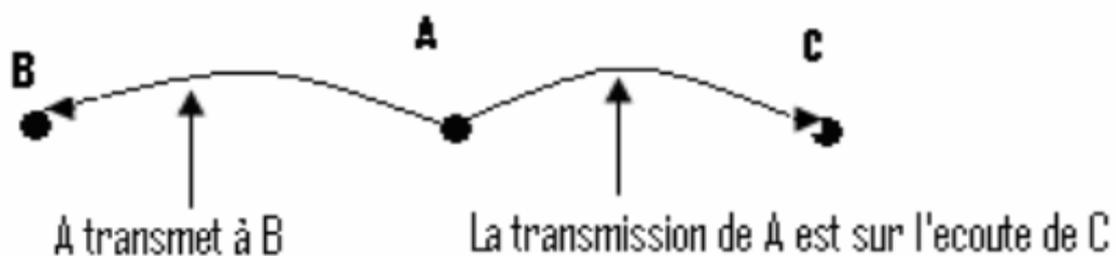


Figure 2.3 La surécoute dans une transmission.

4.2.4 La surcharge

Plusieurs protocoles de la couche MAC fonctionnent par échange de messages de contrôle (*overhead*) pour assurer différentes fonctionnalités : signalisation,

connectivité, établissement de plan d'accès et évitement de collisions. Tous ces messages nécessitent une énergie additionnelle.

4.2.5 La surémission

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

4.2.6 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 élevée ni trop faible. En effet, si elle est petite, le nombre de paquets de contrôle (acquittement) générés augmente l'*overhead*. Dans le cas contraire, une grande puissance de transmission est nécessaire pour des paquets de grande taille.

4.3 Modèle de propagation radio

Le modèle de propagation représente une estimation de la puissance moyenne reçue du signal radio à une distance donnée d'un émetteur. La propagation du signal radio est généralement soumise à différents phénomènes : la réflexion, la diffraction et la dispersion par divers objets. Généralement, la puissance du signal reçue est de l'ordre de $1/d^n$, où d est la distance entre l'émetteur et le récepteur, n un exposant de perte d'un chemin (Exemple : $n=2$ dans le vide, de 4 à 6 dans un immeuble) [13].

4.4. Routage des données

Le routage dans les RCSF est 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 de l'énergie soit pour transmettre ces données soit pour relayer les données des autres nœuds. Dans ce contexte, une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau.

5. Contraintes de conception des RCSF

Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit [14]:

- **La tolérance aux fautes** [15, 16] : la tolérance aux fautes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau en présence de fautes. La fiabilité des réseaux de capteurs sans fil est affectée par des défauts qui se produisent à cause de diverses raisons telles que le mauvais fonctionnement du matériel ou à cause d'un manque d'énergie. Ces problèmes n'affectent pas le reste du réseau.
- **Le facteur d'échelle** (Scalability) [17]: le nombre de nœuds de capteurs augmente sur un réseau sans fil et ce nombre peut atteindre le million. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions entre les nœuds et peut imposer des difficultés pour le transfert de données.
- **Le coût de production** [18]: souvent les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre de nœuds. Le prix d'un nœud est critique afin de pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel.
- **L'environnement** : les capteurs sont souvent déployés en masse dans des endroits tels que des champs de bataille, à l'intérieur de grandes machines, au fond d'un océan, dans des champs biologiquement ou chimiquement souillés [19],... Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiques éloignées.
- **La topologie de réseau** [20]: le déploiement d'un grand nombre de nœuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phases : déploiement, post-déploiement (les capteurs peuvent bouger, ne plus fonctionner,..) et redéploiement de nœuds additionnels.

- **Les contraintes matérielles** [21]: la principale contrainte matérielle est la taille du capteur. Les autres contraintes sont la consommation d'énergie qui doit être moindre pour que le réseau survive le plus longtemps possible, qu'il s'adapte aux différents environnements (fortes chaleurs, eau,..), qu'il soit autonome et très résistant vu qu'il est souvent déployé dans des environnements hostiles.
- **Les médias de transmission** : dans un réseau de capteurs, les nœuds sont reliés par une architecture sans fil. Pour permettre des opérations sur ces réseaux dans le monde entier, le média de transmission doit être standardisé. On utilise le plus souvent l'infrarouge, le Bluetooth [18] et les communications radio Zig Bee [22].

La consommation d'énergie [23]: un capteur, a cause de sa taille, est équipé par de petite batterie ce qui le rend limité en énergie ($<1.2V$). Dans la plupart des cas le remplacement et le chargement de la batterie est impossible. Ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de la batterie. Dans un réseau de capteurs (multi-sauts) chaque nœuds collecte des données et envoie/transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de quelques nœuds nécessite un changement de la topologie du réseau et un ré-routage des paquets. Toutes ces opérations sont gourmandes en énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens de réduire cette consommation [24]

6. Sources de consommation d'énergie

Les sources de consommation d'énergie au niveau de la couche réseau sont diverses

6.1. La longueur des chemins

Les paquets de données suivent des chemins en un certain nombre de sauts. Le coût d'un saut en termes d'énergie est mesuré par la distance qui sépare les deux nœuds concernés par la communication, et le coût global du routage est la somme

des énergies consommées à tous les sauts. Les chemins les plus longs sont les plus gourmands en énergie.

6.2. La qualité des liens

La retransmission des données suite à l'interruption du cheminement entre la source et la destination est une opération qui engendre un coût énergétique supplémentaire.

6.3. Le mode de communication

Le routage point-à-point est inefficace pour les RcSF du fait qu'il consomme beaucoup d'énergie au niveau des nœuds capteurs. Par ailleurs, les modes de communication adéquats sont en effet le mode « one-to-many » et le mode « many-to-one ».

6.4. Le routage de paquets inutiles

Certains paquets de données deviennent inutiles si on ne respecte pas les échéances temporelles des transmissions, fixées soit par l'émetteur ou par le récepteur. Router des données dont l'échéance est expirée engendre une consommation d'énergie inutile.

6.5. Le choix d'un chemin

La non-prise en compte de l'énergie du nœud lors du processus d'établissement de chemins peut provoquer l'épuisement des capacités énergétiques de certain nœud.

7. Techniques de conservation de la consommation d'énergie

Après avoir fait une description des principales causes de consommation d'énergie dans les RCSF, nous allons présenter dans cette section (figure 2.4) une vue globale de différentes techniques utilisées pour minimiser cette consommation.

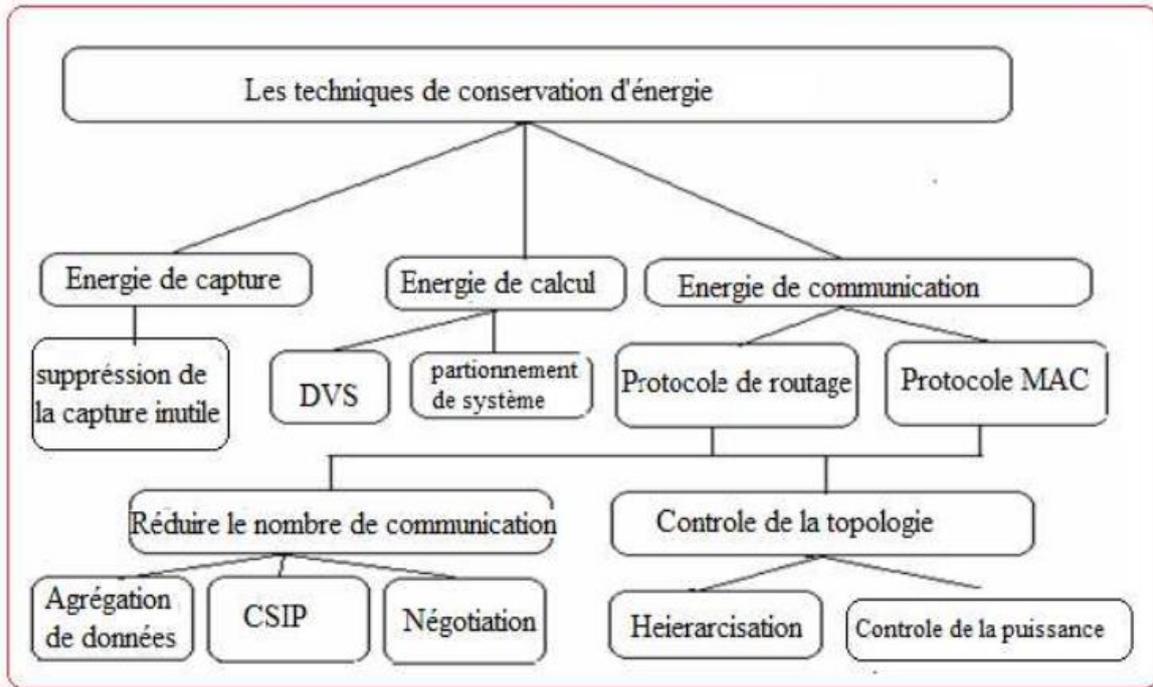


Figure 2.4 Les techniques de conservation d'énergie.

L'énergie de capteur peut être économisée soit au **(a)** niveau de capture, **(b)** niveau de traitement ou au **(c)** niveau de communication.

a- La seule solution apportée pour la minimisation de la consommation d'énergie au niveau de la capture consiste à réduire les durées de captures.

b- L'énergie de calcul peut être optimisée en utilisant deux techniques :

- L'approche DVS (*Dynamique Voltage Scaling*) [25], qui consiste à ajuster de manière adaptative la tension d'alimentation et la fréquence de microprocesseur pour économiser la puissance de calcul sans dégradation des performances.
- L'approche de partitionnement de système, qui consiste à transférer un calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul [26]

c- La minimisation de la consommation d'énergie pendant la communication est étroitement liée aux protocoles développés pour la couche réseau et la couche MAC. Ces protocoles se basent sur plusieurs techniques : agrégation de données, négociation et CSIP (*Collaborative Signal and Information Processing*). Cette

dernière technique est une discipline qui combine plusieurs domaines [27] : la communication et le calcul à basse puissance, traitement de signal, algorithmes distribués et tolérance aux fautes, Systèmes adaptatifs et théorie de fusion des capteurs et des décisions. Ces techniques ont pour but de réduire le nombre d'émission/ réception des messages.

Par contre, le contrôle de la topologie [26] permet l'ajustement de la puissance de transmission et le regroupement des nœuds capteurs (hiérarchisation).

- Le contrôle de la puissance de transmission n'a pas seulement un effet sur la durée de vie de la batterie d'un nœud capteur, mais aussi sur la capacité de charge du trafic qui est caractérisée par le nombre de paquets transmis avec succès vers une destination. En outre, il influe sur la connectivité et la gestion de la densité (le nombre de nœuds voisins). Ainsi, il peut conserver l'énergie à deux niveaux : explicitement par l'application de puissances faibles d'émissions et implicitement en réduisant la contention avec d'autres nœuds transmetteurs. Le module de contrôle de la puissance est souvent intégré dans les protocoles soit de la couche réseau soit de la couche MAC [28].
- La hiérarchisation consiste à organiser le réseau en structure à plusieurs niveaux. C'est le cas, par exemple, des algorithmes de groupement (*clustering*), qui organisent le réseau en groupes (*clusters*) avec des chefs de groupe (*cluster head*) et des nœuds membres [14].
- Une autre technique a été proposée dans [29]. Cette technique profite de la densité élevée des capteurs déployés pour se permettre d'endormir certains d'entre eux, afin que tous les capteurs ne soient pas actifs en même temps.

Une panoplie de protocoles a été proposée dans la littérature. La grande partie de ces protocoles est destinée à la couche réseau et MAC.

Les protocoles de la couche réseau dans les RCSF peuvent être divisés selon la structure du réseau en routage linéaire, routage hiérarchique et routage basé sur la localisation. Dans le routage linéaire, tous les nœuds ont typiquement les mêmes rôles ou fonctionnalités. Cependant, dans le routage hiérarchique, les nœuds joueront différents rôles dans le réseau. Dans le routage basé sur la localisation, les

positions des nœuds capteurs sont exploitées pour router les données dans le réseau. En outre, ces protocoles peuvent être classés selon leurs fonctionnements, en techniques de routage multi-trajectoires, basées sur les questions, par cohérence, par négociation ou basées sur la qualité de service [30].

De même, il existe plusieurs protocoles de la couche MAC qui sont développés pour les RCSF.

Plusieurs classifications de ces protocoles ont été proposées dans la littérature. Les auteurs de [31] classifient ces protocoles MAC en deux classes : les protocoles à accès centralisé et les protocoles à accès aléatoire. Dans le chapitre suivant, nous examinerons en détail les protocoles de cette couche.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous allons discuter également les principaux facteurs et contraintes qui influencent la conception des réseaux de capteurs sans fil. Par la suite, nous décrirons la problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Finalement, nous présenterons une vue globale des solutions proposées dans la littérature pour la gestion de la consommation de l'énergie.

Chapitre 3 : le routage dans les RCFS

1. Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil ont été développés pour interagir avec l'environnement externe et d'acheminer cette interaction à un utilisateur ou une station de base. Cette spécificité permet de classer ce genre de réseaux parmi les réseaux centralisés qui sont gérés par un coordinateur du réseau. Certaines applications modernes nécessitent du réseau d'être décentralisé, d'être capable de se déployer dans des environnements inconnus et de s'auto-organiser pour les opérations de routage sans recourir à une station de base. Ces réseaux sont appelés les réseaux ad hoc. Plusieurs protocoles de routage des réseaux ad hoc ont été adaptés aux RCSF qui se caractérisent par des ressources limitées en termes de mémoire et d'énergie [44].

2. Définition de routage

Le routage est un processus qui permet de sélectionner des chemins dans un réseau pour transmettre des données depuis un expéditeur jusqu'à un ou plusieurs destinataires. On parle de routage dans différentes domaines : réseaux téléphoniques, réseaux électroniques (comme Internet), réseaux de transports...[37] Le routage est le mécanisme par lequel des chemins sont sélectionnés dans un réseau pour acheminer les données d'un expéditeur jusqu'à un ou plusieurs destinataires. Le routage est une tâche exécutée dans de nombreux réseaux, tels que le réseau téléphonique, les réseaux de données électroniques comme l'Internet, et les réseaux de transports. Sa performance est importante dans les réseaux décentralisés, c'est-à-dire où l'information n'est pas distribuée par une seule source, mais échangée entre des agents indépendants [38]

Le terme routage désigne l'ensemble des mécanismes mis en œuvre dans un réseau pour déterminer les routes qui vont acheminer les paquets d'un terminal émetteur à un terminal récepteur [39]. On distingue généralement deux entités : L'algorithme de routage et le protocole de routage.

3. Historique

Les réseaux informatiques ont mis beaucoup de temps à déployer le routage dans toute sa dimension en raison des monopoles dans les télécommunications. Dans les années 1970 aux États-Unis, lors de la digitalisation du réseau d'AT&T (voir Réseau

téléphonique commuté), IBM et DEC créent les architectures SNA et DECnet, encore très centralisées et peu ouvertes. En France, le réseau Cyclades, poussé par la CII et sa Distribue System Architecture, est plus ouvert et permet de partager les ressources informatiques des centres universitaires et de grandes entreprises en forte croissance comme EDF ou le Commissariat à l'énergie atomique, mais freiné par les prétentions du Réseau Transpac, imposé par les PTT et orienté vers la commutation de circuits plutôt que le routage. La Distribue System Architecture a cependant été reconnue par la création du Modèle OSI, encourageant l'étape suivante, avec les protocoles TCP/IP [38].

4. Contraintes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Le routage dans les réseaux de capteurs diffère de celui des réseaux Ad Hoc dans les points suivants [32] :

- ✓ Il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global pour le grand nombre de nœud.
- ✓ Les applications des réseaux de capteurs exigent l'écoulement de données mesurées depuis des sources multiples vers la destination finale « *Sink* ».
- ✓ Les différents capteurs peuvent générer produire les mêmes données à proximité d'un phénomène (problème de la redondance des données).
- ✓ Les nœuds capteurs exigent ainsi une gestion soigneuse des ressources.

5. Approches d'établissement de routes

5.1 Approche basée sur l'état du lien

Chaque nœud de réseau maintient une vue globale de la topologie du réseau qui lui permet de calculer les chemins vers toutes les destinations [36]s. Les nœuds diffusent périodiquement (par inondation) l'état des liens avec leurs voisins à tous les nœuds du réseau. La diffusion peut aussi être produite lorsqu'un des nœuds détecte un nouveau lien vers un de ses voisins corrompus ou lorsqu'une mise à jour de sa table de topologie est faite. Le problème de cette approche, les messages de contrôle surchargent le réseau et surtout quand il s'agit d'un réseau avec un grand nombre de nœuds [37].

5.2 Approche basée sur le vecteur de distance

Dans cette approche, chaque nœud transmet à ses voisins la distance en termes de nombre de sauts qui le sépare de chaque destination dans le réseau et le nœud voisin utilisé pour atteindre cette destination. Donc, un nœud établit les routes vers les autres destinations en se basant sur les informations reçues depuis tous ses voisins. Ce dernier calcule le chemin le plus court vers n'importe quelle destination dans le réseau. Si la distance séparant deux nœuds change on répète le processus de calcul.

L'approche du vecteur des distances évite l'inondation, mais elle est moins précise que l'approche basée sur l'état du lien puisqu'il est aussi difficile de trouver des routes alternatives en cas de coupure de routes.

6. Types de routage

Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil se classe généralement en[40]:

6.1. Routage plat

Appelé également routage centré données (data centric) où tous les nœuds ont les mêmes tâches à accomplir. C'est la première approche utilisée dans l'acheminement des données dans les RCSF. Elle se base sur la collaboration de tous les nœuds du réseau. Les propriétés des données sont spécifiées par un système de dénomination par attribut (attribut, valeur) en raison de la difficulté d'affecter un identificateur global à chaque nœud vu leur nombre important. Parmi leurs avantages, la simplicité d'où la possibilité d'établir des communications sans surcoût où chaque nœud n'aura besoin que des informations de ses voisins directs. L'inconvénient est l'épuisement des ressources en énergie des nœuds proches de la station de base car tout le trafic vers cette dernière passe obligatoirement par eux.

6.2. Routage hiérarchique

Cette approche est basée sur la formation de clusters (zones communes). Le principe est de router les données récoltées par chaque nœud du cluster à son chef de zone (Cluster Head), qui et après des traitements sur leurs parties communes, les transmettra à la prochaine destination (Si le CH ne pourra pas atteindre directement la station de base, les informations seront routées vers le prochain chef de zone).

L'avantage est la réduction des coûts en communication et en énergie en minimisant le nombre de messages circulant sur le réseau, étant donné que les CHs appliquent des fonctions d'agrégat sur les données du cluster ce qui permet de les combiner. L'inconvénient concerne la taille du réseau. En outre, quand la taille du réseau augmente, le processus d'élection du Cluster Head devient critique et gourmand en ressources.

6.3. Routage basé sur la localisation

L'identification des emplacements géographiques des nœuds capteurs sur la zone de captage est d'une importance capitale pour les mécanismes de routage de données dans les RCSF. Ces informations de localisation permettent le calcul des positions des capteurs et les distances qui les séparent afin de construire les chemins les plus courts entre un nœud source et sa destination. Cette approche de routage est plus économe en énergie car elle dispense les nœuds capteurs d'employer les méthodes aléatoires ou probabilistes pour rechercher les routes. De plus, la localisation des nœuds (et par conséquent de leurs régions) permet de diffuser des requêtes uniquement à ces régions et éviter leur diffusion en mode broadcast (diffusion globale à tous les nœuds) et ainsi réduire le nombre de transmissions d'une manière significative. L'inconvénient est la nécessité d'équiper les nœuds capteurs avec un système de localisation par satellite comme le GPS qui consomme énormément d'énergie.

6.4. Routage proactif

Le calcul de routes se fait à priori ce qui facilite l'acheminement des données. Les informations des chemins à suivre par chaque donnée source vers une destination sur le réseau sont stockées dans une table de routage. Les tables de routage doivent être mises à jour régulièrement afin de corriger certains chemins coupés en raison du changement de topologie dus aux défaillances ou à la mobilité de certains nœuds capteurs. Cette mise à jour est assurée par la diffusion périodique des paquets de contrôle sur le réseau, ce qui n'est pas évident pour des réseaux de grande taille comme les réseaux de capteurs sans fil.

L'établissement de routes se fait indépendamment des besoins réels de l'application et un bon nombre de ces routes est sauvegardé pour ne jamais être utilisées. Une

autre limite concerne la taille des tables de routage, notamment pour des réseaux de grande taille, qui pourrait dépasser les capacités de stockage des nœuds capteurs.

6.5. Routage réactif

Egalement appelé routage à la demande, le routage réactif permet de créer les routes selon les besoins de l'application. Lorsqu'une requête est diffusée sur le réseau, la procédure de découverte de routes est lancée [35] par les nœuds concernés par cette requête, et les réponses sont acheminées sur les routes créées. Cette procédure est lancée également pour des applications event-driven (applications orientées événements) pour chaque événement intéressant détecté. L'avantage d'établir des routes à la demande est la conservation d'énergie par rapport au routage proactif. La recherche de routes peut causer des lenteurs pour l'acheminement des données ce qui n'est pas approprié aux applications interactives et temps-réel.

6.6. Routage hybride (à la fois proactif et réactif)

C'est une combinaison des deux concepts de routage proactif et réactif. Des tables de routage sont stockées sur les nœuds capteurs de façon à établir des routes sur leur voisinage proche (généralement en deux sauts maximums). Au-delà de leur voisinage, le routage devient réactif et des procédures de recherche de routes sont lancées. Cette approche combine les avantages des deux autres approches proactive et réactive et réduit considérablement la taille des tables de routage ainsi que les délais d'établissement de routes.

7. Les défis du routage dans les RCSF

Cinq volets définissent les challenges du routage dans les RCSF [4] :

✓ **La consommation d'énergie:** du fait des ressources énergétiques limitées dans les capteurs sans fil, la gestion de la consommation de l'énergie est le défi principal des protocoles de routage. La consommation d'énergie dans le cadre du routage peut être l'effet d'une recherche de voisinage ou d'un traitement de paquet ou de sa transmission.

✓ **Extensibilité:** dans les réseaux à grande densité de nœuds, l'information sur la position de chaque nœud peut être difficile à accéder. Par conséquent, il est

nécessaire de développer des protocoles de routage où l'information sur la topologie n'est plus nécessaire. Les nœuds doivent donc supporter des informations de la part d'un grand nombre de nœuds sans entrave à la consommation énergétique.

✓ **Adressage:** les mécanismes d'adressage facilitent la communication entre les voisins. Cependant, lorsque le nombre de nœuds est important, l'information nécessite une communication multi hop (plusieurs intermédiaires). Ceci provoque un phénomène de saturation dû à la juxtaposition des adresses des intermédiaires. Les protocoles de routage doivent donc supporter des mécanismes de prévention contre la saturation (*Overhead*) où l'adresse de chaque nœud n'est pas requise.

✓ **Robustesse:** Au cours du routage, un nœud peut subir une panne et empêcher le déroulement de ce processus. Les protocoles de routage doivent supporter des mécanismes de gestion de ce genre d'imprévus qui sont dus au canal ou aux composants du capteur, et ainsi de ne pas affecter l'efficacité du routage lors d'une perte de paquet.

✓ **Topologie:** le déploiement des capteurs peut se faire de façon prédéfinie ou, plus souvent de façon complètement aléatoire. Généralement, les capteurs ne connaissent pas la topologie et donc la position de leurs voisins, ce qui affecte directement les performances du routage. Les protocoles de routage doivent donc supporter des méthodes de découverte de voisinage et de son entretien afin de fournir à chaque nœud une connaissance de la topologie qui l'entoure; surtout s'il existe des nœuds mobiles, ce qui est le cas pour certains réseaux sans fil.

✓ **Application:** le type de la couche d'application influence directement le choix du protocole de routage. Dans les applications de contrôle d'un processus quelconque, les capteurs transmettent des informations à la destination de façon périodique, ce qui nécessite généralement des routes statiques. Dans les applications basées sur les événements, le capteur est souvent en mode veille. À l'arrivée du premier événement, une route doit être établie pour délivrer l'information.

8. Techniques de minimisation de la consommation d'énergie

Parmi les techniques et les métriques les plus économes en énergie utilisées par les protocoles de routage, on cite [40] :

8.1. Ajustement des puissances de transmission

L'énergie de transmission consommée par le nœud émetteur lors de l'envoi d'un message dépend directement de la puissance de transmission. Certains protocoles de routage prennent en compte les distances entre les nœuds afin d'optimiser le choix sur la puissance de transmission minimale à utiliser et de réduire la consommation d'énergie. Distances entre les nœuds afin d'optimiser le choix sur la puissance de transmission minimale à utiliser et de réduire la consommation d'énergie.

8.2. Distribution des charges

La solution de distribution des charges entre les nœuds participants au routage de données est très efficace aux problèmes de congestion de charges où les paquets émis empruntent toujours les mêmes nœuds, ce qui provoque l'épuisement rapide de leur énergie. En effet, les protocoles de routage calculent le coût énergétique de tous les chemins entre la source et sa destination et choisissent le chemin le moins coûteux en termes d'énergie. Le calcul du coût énergétique se fait par le nœud source sur la base des puissances de transmission.

8.3. La formation des grappes

La technique de partitionnement du réseau, notamment ceux ayant une densité importante de nœud, pour la formation de grappes permet une meilleure gestion du routage sur plusieurs niveaux. Chaque sous ensemble (grappe) est constitué d'un certain nombre de nœud possédant des propriétés ou des tâches communes, regroupés autour d'un nœud chef considéré comme le nœud collecteur de la grappe. Par ailleurs, le nœud collecteur coordonne et ordonnance les activités des nœud membres du groupe en autorisant certains nœud à se mettre en veille, ou bien en ajustant les puissances de transmissions ou alors en organisant les instances de transmission afin d'éviter les collisions et par conséquent les retransmissions. Le risque d'épuisement de l'énergie des nœuds chef est pris en charge par la station de

base qui procède à leur remplacement par d'autres nœuds à chaque intervalle de temps ou à chaque diminution critique de leur capacité énergétique.

8.4. La réduction de données

La réduction de données consiste à empêcher deux ou plusieurs nœud qui couvrent une même zone de captage de transmettre des données décrivant le même événement, en éliminant les données redondantes par des nœuds dits agrégateurs, ce qui réduit le nombre de transmissions et par conséquent la quantité d'énergie dissipée.

8.5. Négociation des échanges de données

Les nœuds du réseau entament une négociation sur les données à transmettre en diffusant un message contenant une métadonnée décrivant les données à transmettre. Les nœuds intéressés par ces données manifestent leur intérêt et les reçoivent en entier. La sélection des nœuds destinataires par l'intérêt réduit la bande passante et la consommation d'énergie du réseau.

9. Les critères de performance des protocoles de routage en RCSF

La performance des réseaux de capteurs sans fil est fondée sur les facteurs suivants [34] :

- **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.
- **L'énergie** : chaque nœud utilise peu d'énergie pour des activités telles que la détection, le traitement, le stockage et 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.

- **Le 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 des données ou le stockage de données, la transmission ou la réception sur le réseau.
- **Le schéma de transmission:** la transmission de données par les nœuds de capteurs vers la destination ou la station de base se fait par un schéma de routage à un seul saut ou à multi saut.
- **La 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 de 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.

10. Classification des protocoles de routage dans les RCSF

Les protocoles de routage au sein des RCSF sont influencés par un facteur déterminant à savoir : la minimisation d'énergie sans une perte considérable de l'efficacité. Pour cela de nombreuses stratégies de routage ont été créés pour les réseaux de capteurs. Certaines sont des adaptations de stratégies qui existaient pour d'autres types de réseaux (réseaux sans fil au sens le plus large) tandis que d'autres ont été conçues spécialement pour les réseaux de capteurs sans fil [42]. Les protocoles de routage dans les réseaux peuvent être classés selon deux concepts [32] :

- ✓ La structure de réseau.
- ✓ Le type de protocole.

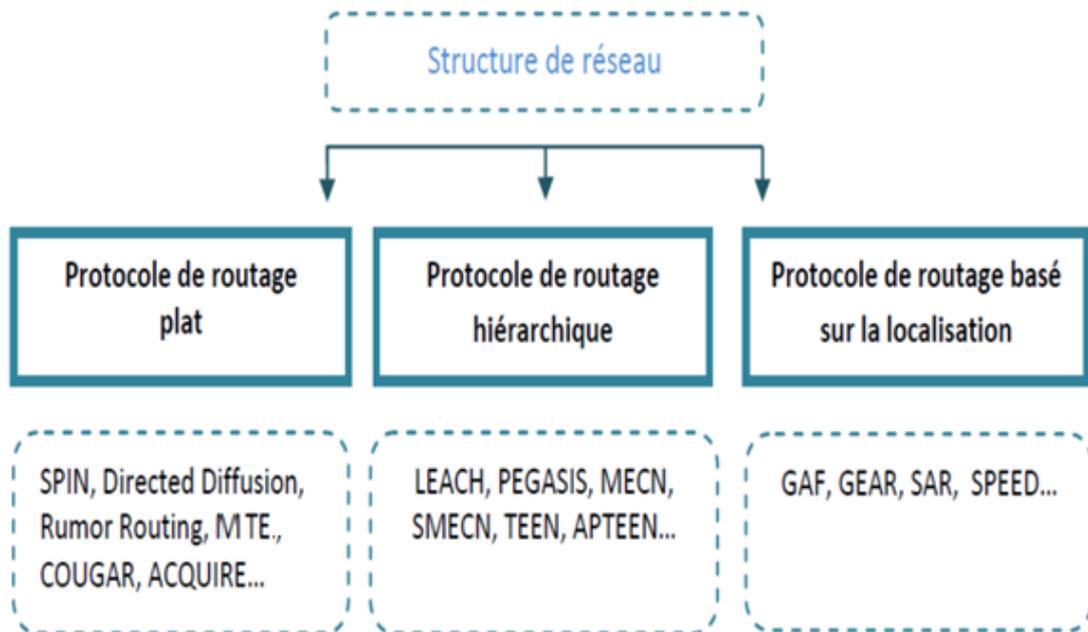


Figure 3.1 : Protocoles de routage pour les RCSF selon la structure du réseau.

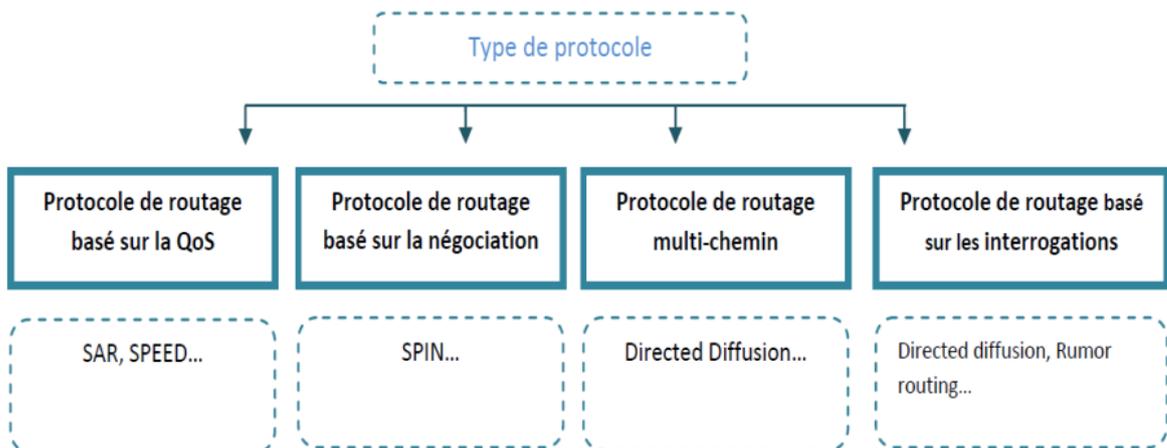


Figure 3. 2 : Protocoles de routage pour les RCSF selon le type de protocole.

10.1. Protocole de routage multi-chemin

Il se base sur l'adoption de plus qu'un chemin menant vers la destination, et ce, pour avoir des chemins de secours si jamais le chemin principal serait rompu[32].

10.2. Protocole de routage basé sur la négociation des données

En détectant le même phénomène, les nœuds capteurs inondent le réseau par les mêmes paquets de données. Ce problème de redondance peut être résolu en employant des protocoles de routage basés sur la négociation. En effet, avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient entre eux leurs données en échangeant des paquets de signalisation spéciales, appelés *META-DATA*. Ces paquets permettent de vérifier si les nœuds voisins disposent des mêmes données à transmettre. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises et élimine la redondance des données [32].

10.3. Protocole de routage basé sur les interrogations

La collecte des informations sur l'état de l'environnement est initiée par des interrogations envoyées par le nœuds « *Sink* »[32].

10.4. Protocole de routage basé sur la QoS

Ce type de protocoles tend à satisfaire certaines métriques, pendant la transmission des données vers la destination finale. Parmi ces métriques, nous citons : le délai de bout en bout, la gigue, PDR (*Paquet Delivery Ratio*), énergie consommée.

10.5. Les protocoles de routage plat (flat based-routing)

Ces protocoles considèrent que tous les nœuds sont identiques, c'est à dire ont les mêmes fonctions à exécuter sauf le nœud de contrôle (*sink*) qui est chargé de collecter toutes les informations issues des différents nœuds capteurs pour les transmettre vers l'utilisateur final. La décision d'un nœud de router des paquets vers un autre dépendra de sa position et pourra être remise en cause au cours du temps [41].

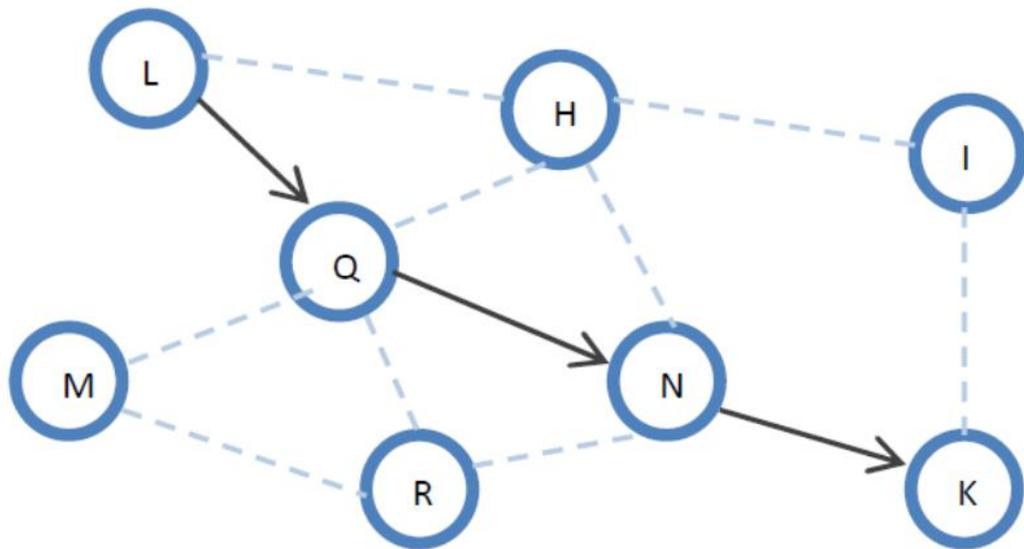


Figure 3. 3 : Routage plat.

10.6. Les protocoles de routage hiérarchique

Ces protocoles fonctionnent en confiant des rôles différents aux nœuds du réseau.

Certains nœuds sont sélectionnés pour exécuter des fonctions particulières. Un nœud peut être, par exemple, une passerelle pour un ensemble de nœud. Dans ce cas, le routage devient plus simple, puisqu'il s'agit de passer par les passerelles pour atteindre le nœud destination qui lui est directement attaché.

Un exemple est donné par la figure 3.4 : Pour que les paquets générés par le nœud F atteignent le nœud L, ils doivent passer par les passerelles P, S et R [41].

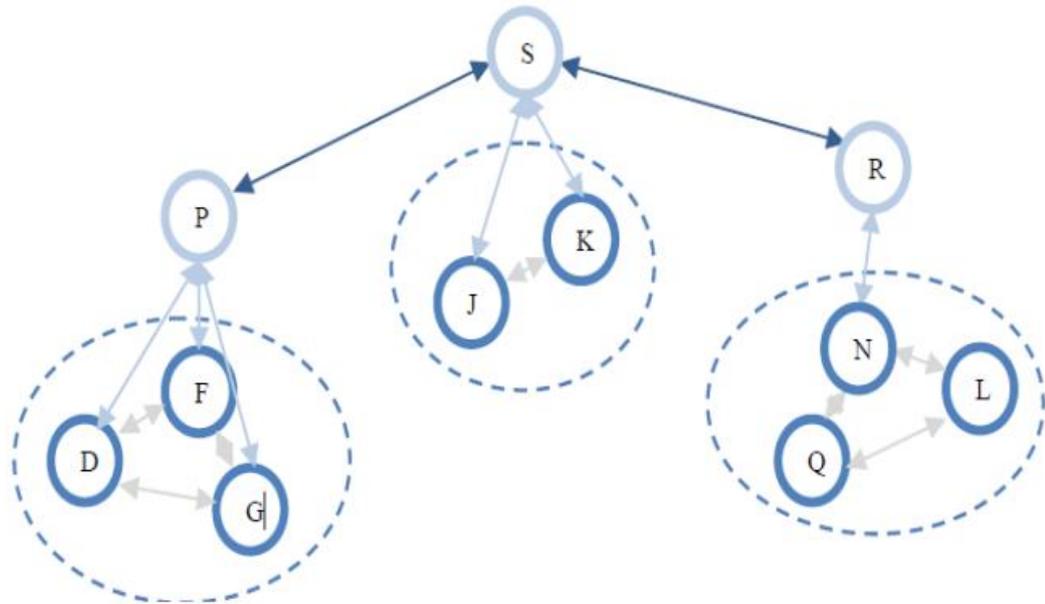


Figure 3. 4 : Routage hiérarchique.

Le principe des protocoles de routage hiérarchique est basé essentiellement sur les nœuds passerelles. En fait, les nœuds ordinaires savent que si le destinataire n'est pas dans leur voisinage direct, il suffit d'envoyer la requête à la passerelle qui la prendra en charge. À son tour, elle transmettra cette requête vers le nœud ciblé. Ce type de routage présente de nombreux avantages pour les réseaux dont leurs nœuds sont sédentaires et disposent de suffisamment d'énergie.

10.7. Les protocoles de routage avec localisation géographique

Un routage est dit géographique lorsque les décisions de routage sont basées sur la position des nœuds. Les pré-requis pour effectuer un routage géographique dans un réseau ad hoc sont [32] :

- Tous les nœuds possèdent un moyen de localisation, soit un système natif comme le GPS (*Global Position System*), soit un système logiciel comme un protocole de localisation.
- Un nœud source connaît toujours la position du nœud destinataire. Pour ce faire, soit tous les nœuds connaissent les positions initiales de tous les nœuds Soit un service de localisation doit être utilisé.

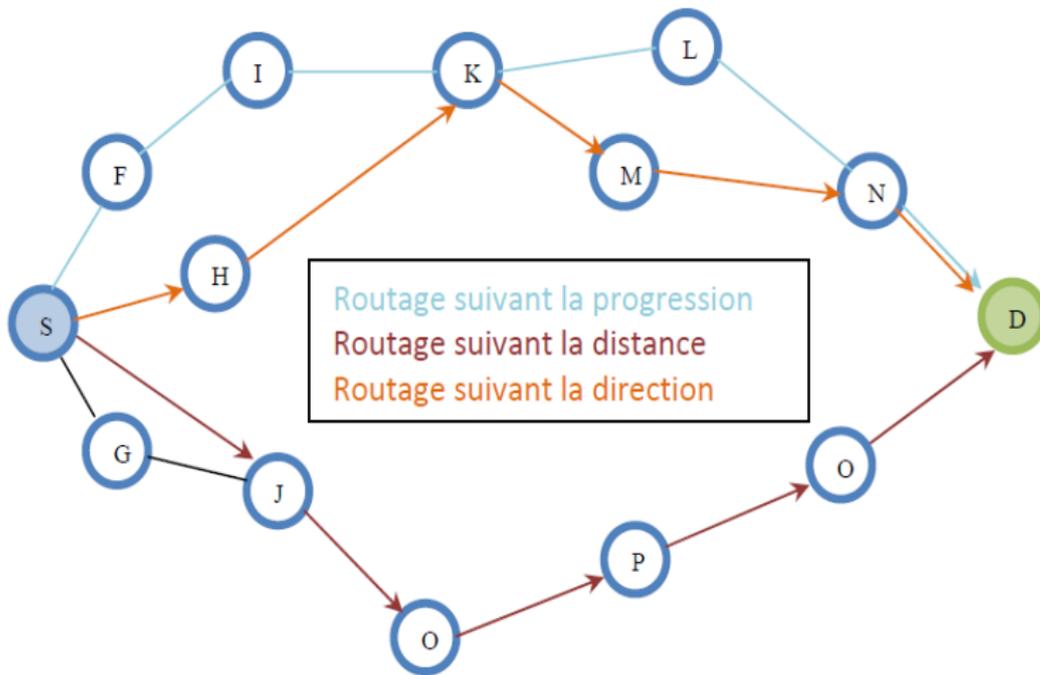


Figure 3. 5 : Routage basé sur la localisation

11. LEACH

LEACH est l'un des algorithmes de routage hiérarchique le plus populaire pour les réseaux de capteurs. L'idée est de former des clusters de nœuds de capteurs basés sur les zones où il y a un fort signal reçu, puis utiliser des clusters-Head locaux comme passerelle pour atteindre la destination. Cela permet d'économiser de l'énergie car les transmissions ne sont effectuées que par les cluster-Head plutôt que par tous les nœuds de capteurs [34].

LEACH suppose que chaque nœud du réseau peut communiquer directement avec le puits, alors que, les nœuds non-Cluster Head ne peuvent communiquer qu'avec leurs Cluster Head choisi, en utilisant la technique TDMA instaurée par ce dernier. Cette technique permet de minimiser les collisions en allouant à chaque nœud un temps privé pour transmettre ses données vers son CH. LEACH préconise, également, une agrégation de données au niveau des CHs pour plus de conservation d'énergie [36].

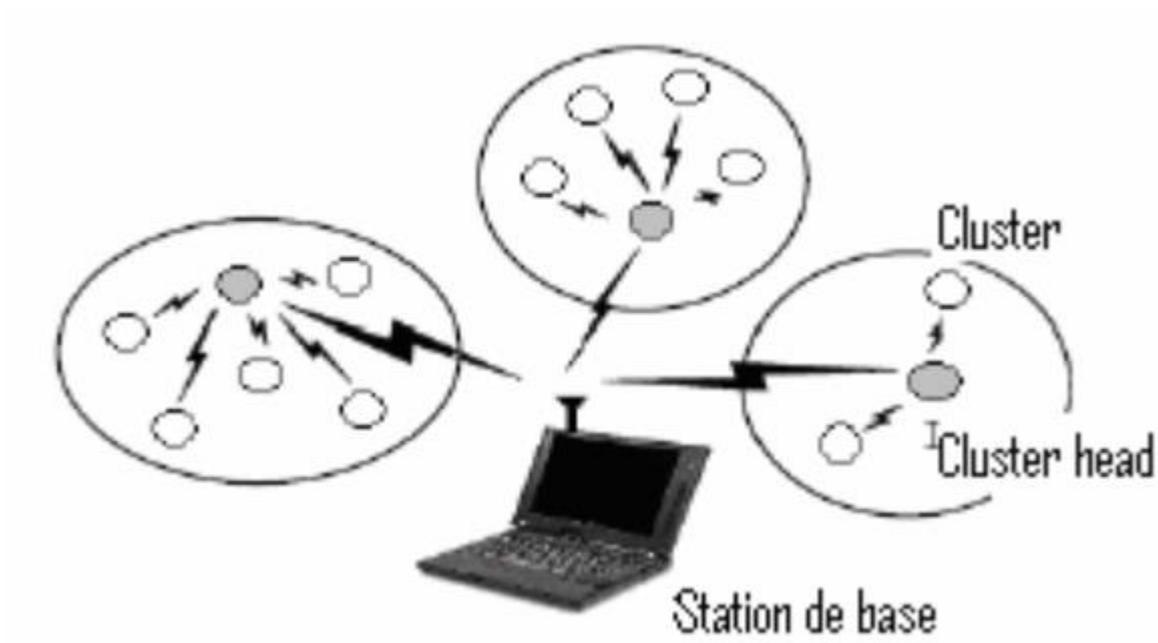


Figure 3.6 Fonctionnement du protocole LEACH.

12. Le protocole AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector)

Le protocole AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) [53] représente essentiellement une amélioration de l'algorithme DSDV dans le contexte réactif. Il est spécialement conçu pour les réseaux mobiles pour créer et découvrir les liaisons entre la source et la destination [51, 52]. Il est utilisé pour des routages unicast et multicast en utilisant des requêtes de type (**route request / route reply**). Avec AODV, chaque nœud a une table de routage qui donne des informations sur ses voisins, la table joue un rôle dans le choix d'un voisin qui va transmettre les paquets de la source vers la destination. Lorsque la source a des données à envoyer vers une destination, elle diffuse une requête de type Route Request (RREQ). Lorsque le nœud reçoit RREQ, il met à jour ses informations pour le nœud source et il ajoute une nouvelle route valide à sa table de routage pour atteindre la source qui a envoyé RREQ. Lorsque RREQ arrive à la destination, celle-ci génère une réponse de type Route Reply (RREP). RREP est renvoyé vers la source comme le montre la figure 3.7 Chaque nœud possède un numéro de séquence qui permet de choisir la route la plus récente et de maintenir la consistance des informations de routage [53].

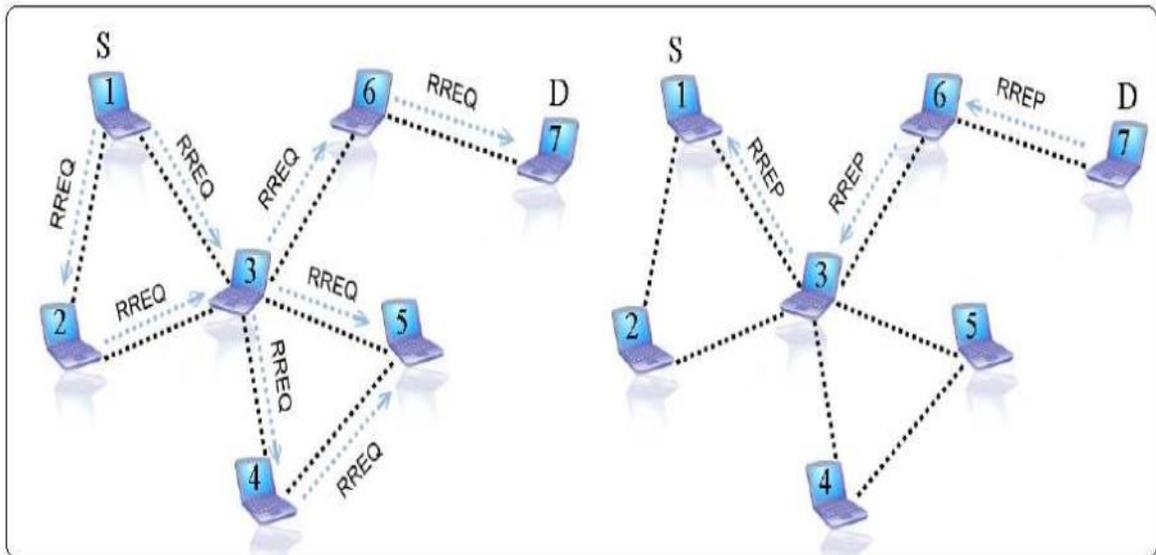


Figure 3.7 Les deux requêtes RREQ et RREP en AODV

Avec AODV, s'il existe plusieurs routes possibles de la source vers la destination, AODV choisit la route la plus courte (la route où il y a un minimum de sauts). Si un tour de routage échoue, la source relance un nouveau RREQ avec un temps T plus important. Si plusieurs séries de Route Request échouent, alors aucune route ne peut être trouvée [54, 55].

12.1. AODV : Avantages et inconvénients

Des études comparatives montrent que certains protocoles sont plus performants que d'autres selon les caractéristiques du réseau. Ces études ont montré que le protocole AODV semble convenir à des réseaux à forte mobilité et semble performant dans les réseaux de faible densité [20].

Parmi les inconvénients du protocole de routage AODV, est le fait qu'il n'assure pas l'utilisation du meilleur chemin existant entre la source et la destination. Cependant, des évaluations de performances récentes ont montré qu'il n'y a pas de grandes différences (en terme d'optimisation) entre les chemins utilisés par le protocole AODV et ceux utilisés par les protocoles basés sur les algorithmes de recherche des plus courts chemins.

L'avantage de ce protocole est qu'il ne présente pas de boucle de routage et évite le problème du "comptage à l'infini" de Bellman Ford. En effet, ce dernier ne possède pas de mécanisme précis qui peut déterminer quand est ce que le réseau doit arrêter l'incréméntation de la distance qui correspond à une destination donnée, ce qui offre une convergence rapide quand la topologie du réseau ad hoc change. Un autre avantage de ce protocole est sa simplicité, à titre d'exemple, le draft de DSR mesure, le RFC de OLSR fait, alors que celui d'AODV a une taille de. Ensuite son ancienneté et sa maturité, AODV existe depuis longtemps et beaucoup de travaux ont déjà été réalisés à son propos et il a fait l'objet de simulations comparatives détaillées. Ce sont des critères assez subjectifs qui conduisent au choix d'AODV.

13. La diffusion dirigée DD

La diffusion dirigée [45, 46] est un protocole important dans le routage data-centric des réseaux de capteurs. L'idée vise à diffuser des données aux nœuds en utilisant un schéma de nommage pour les données. La raison principale derrière l'utilisation d'un tel système est de se débarrasser des opérations inutiles de routage de couche réseau afin d'économiser l'énergie.

La diffusion dirigée suggère l'utilisation de paires attribut-valeur pour les données et les requêtes des capteurs. Afin de créer une requête, un nœud est défini à l'aide d'une liste de paires attribut-valeur comme le nom des objets, l'intervalle, la durée, la zone géographique, etc. Un paquet est diffusé par ce nœud vers la destination à travers ses voisins. Chaque nœud qui reçoit les paquets peut les stocker pour une utilisation ultérieure. Les paquets stockés sont ensuite utilisés pour comparer les données reçues. La requête contient aussi plusieurs champs de gradient. Un gradient est un lien réponse avec un voisin dont le paquet a été reçu et qui est caractérisé par le débit, la durée et la date d'expiration de données. Ainsi, en utilisant les intérêts et les gradients, les routes sont établies entre la destination et les sources. Plusieurs routes peuvent être établies de telle sorte que l'une d'elle est choisie par renforcement. La destination renvoie le message d'intérêt initial à travers la route choisie. Un intervalle plus petit renforce donc le nœud source sur ce chemin pour envoyer des données plus fréquemment [44].

14. Les principaux algorithmes de conservation d'énergie

De nombreux algorithmes de routage ont été spécifiquement conçus pour les réseaux de capteurs où la consommation d'énergie est un facteur essentiel. Ce facteur a posé de nombreux défis à la conception et à la gestion des réseaux de capteurs. Ces défis nécessitent une gestion efficace de l'énergie pour toutes les couches de la pile de protocole réseau. Les problèmes liés aux couches liaison et physique sont généralement communs pour les différents types d'applications de capteurs. Pour la couche réseau, l'objectif principal est de trouver des moyens pour une mise en œuvre efficace de l'énergie et pour une diffusion fiable des données de la source vers la destination de sorte que la durée de vie du réseau soit maximisée.

Quelques algorithmes ont été développés pour prendre soin du contrôle de la capacité. Certains se concentrent sur l'utilisation effective du temps d'activation des nœuds des capteurs [46]. L'auteur de [49] a développé un algorithme de diffusion efficace de l'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil qui porte sur les techniques conservatrices pour diffuser des messages afin que les économies d'énergie puissent être réalisées. Il a souligné également que la technique de routage pour une énergie efficace pourrait améliorer l'efficacité du réseau [50]. Plusieurs paramètres tels que la distance de transmission, le nombre de sauts et le retard ont été pris en compte pour les économies d'énergie dans les réseaux de capteurs.

La recherche dans le domaine des protocoles d'énergie efficaces dans les réseaux de capteurs sans fil est relativement nouvelle. L'objectif principal de tous ces protocoles et algorithmes est de trouver les routes qui sont économes en énergie et donc de maximiser la durée de vie du réseau. Pour atteindre cet objectif, de nombreux protocoles ont été développés. Ces protocoles utilisent des stratégies différentes pour obtenir leurs routes. Certains de ces protocoles utilisent le clustering, des fonctions, des équations, des arbres de routage optimal, des recherches multi-paths ou un mécanisme efficace pour détourner les trous. Par exemple, le protocole LEACH utilise les clusters-head comme des routeurs pour assurer une communication avec une énergie efficace. Ainsi, l'énergie sera préservée car la communication sera effectuée uniquement entre les clusters-head.

15. Les limites des protocoles de routage dans les RCSF

a plupart des protocoles de routage proposés pour les réseaux sans fil en particulier pour les RCSF, ont été conçus pour des réseaux de taille modeste. Cependant, lorsque le nombre de nœuds augmente les performances de ces protocoles commencent à se dégrader et on parle de la contrainte de passage à l'échelle.

Le passage à l'échelle est le faite de mettre en place un grand nombre de nœuds dans une zone de couverture. Or, quand le nombre de nœuds augmente cela pourra avoir une influence sur les performances du réseau en termes de latence, etc. En outre, la majorité des protocoles de routage ont été développés pour des réseaux de taille modeste et nous avons remarqué que lorsque le nombre de nœuds augmente les performances de ces protocoles se dégradent grandement.

Dans les applications orientées événements (Event-Driven), le temps nécessaire pour remonter une information au centre de contrôle doit être réduit pour que l'équipe d'intervention arrive à temps et minimise l'occurrence d'une catastrophe. Cependant, nous avons remarqué que lorsque le nombre de nœuds augmente dans certains protocoles le temps pour envoyer l'information à la station de base devient assez grand et par suite l'intervention dans certains cas devient utile. De ce fait, les protocoles doivent garantir un temps réduit pour alerter le centre de contrôle. Pour se faire, nous avons proposé d'utiliser des heuristiques pour réduire ce temps dans les réseaux denses [36].

16. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis l'accent sur les principaux protocoles de routage dans les réseaux ad hoc et de capteurs. Nous avons résumé les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs et classé les approches en trois catégories principales : les protocoles hiérarchiques, les protocoles basés sur la localisation et les protocoles data-centric. Enfin, Nous nous sommes concentrés sur les protocoles de routage qui s'intéressent à la consommation d'énergie.

Chapitre 4 : simulation et résultats

1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter deux types des protocoles de routage, protocole de routage plat (flat based-routing) l'algorithme MTE (minimum transmission énergie) et le Protocoles de routage hiérarchique LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy), en suite on va simuler les deux algorithmes avec des réseaux différents et on comparer les résultats de simulation.

2. Outils de développement :

2.1. NetBeans IDE :

NetBeans IDE est un environnement de développement intégré (EDI), permet également de supporter différents autres langages, comme java, C, C++, JavaScript, XML, Groovy, PHP et HTML de façon native ainsi que bien d'autres (comme Python ou Ruby) par l'ajout de greffons. Il comprend toutes les caractéristiques d'un IDE moderne (éditeur en couleur, projets multi-langage, refactorant, éditeur graphique d'interfaces et de pages Web).

NetBeans constitue par ailleurs une plate-forme qui permet le développement d'applications spécifiques (bibliothèque Swing (Java)). L'IDE NetBeans s'appuie sur cette plate-forme. [57]

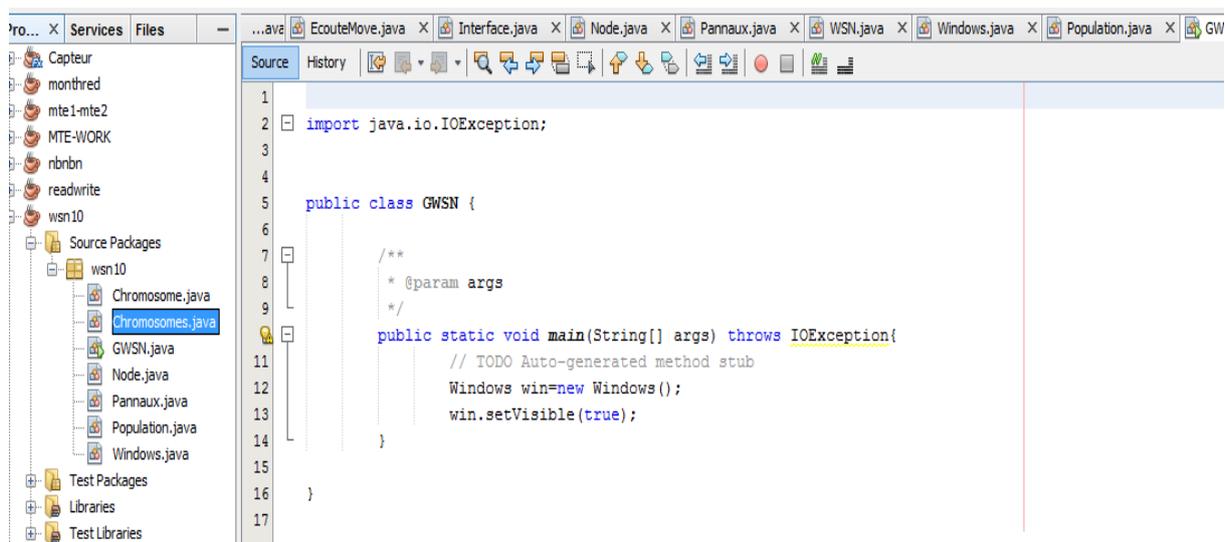


Figure 4.1 : fenêtre de programmation Sur Netbeans

2.2 Principaux langages supportés :

Supported technologies *	NetBeans IDE Download Bundles					
	Java SE	Java EE	HTML5/JavaScript	PHP	C/C++	All
NetBeans Platform SDK	•	•				•
Java SE	•	•				•
Java FX	•	•				•
Java EE		•				•
Java ME						•
HTML5/JavaScript		•	•	•		•
PHP			•	•		•
C/C++					•	•
Groovy						•
Java Card™ 3 Connected						•
Bundled servers						
GlassFish Server Open Source Edition 4.1.1		•				•
Apache Tomcat 8.0.27		•				•

Figure 4.2 : NetBeans IDE Téléchargement des offres groupées

2.3. Langage de programmation (Java) :

Java est un langage de programmation et une plate-forme informatique qui ont été créés par Sun Microsystems en 1995. Beaucoup d'applications et de sites Web ne fonctionnent pas si Java n'est pas installé et leur nombre ne cesse de croître chaque jour. Java est rapide, sécurisé et fiable. Des ordinateurs portables aux centres de données, des consoles de jeux aux superordinateurs scientifiques, des téléphones portables à Internet, la technologie Java est présente sur tous les fronts. [58]

C'est un langage de programmation à usage général, évolué et orienté objet dont la syntaxe est proche du C.

Ses caractéristiques ainsi que la richesse de son écosystème et de sa communauté lui ont permis d'être très largement utilisé pour le développement d'applications de types très disparates. Java est notamment largement utilisée pour le développement d'applications d'entreprises et mobiles. [58]

2.4. Environnement Java :

Java est un langage interprété, ce qui signifie qu'un programme compilé n'est pas directement exécutable par le système d'exploitation mais il doit être interprété par un autre programme, qu'on appelle interpréteur.

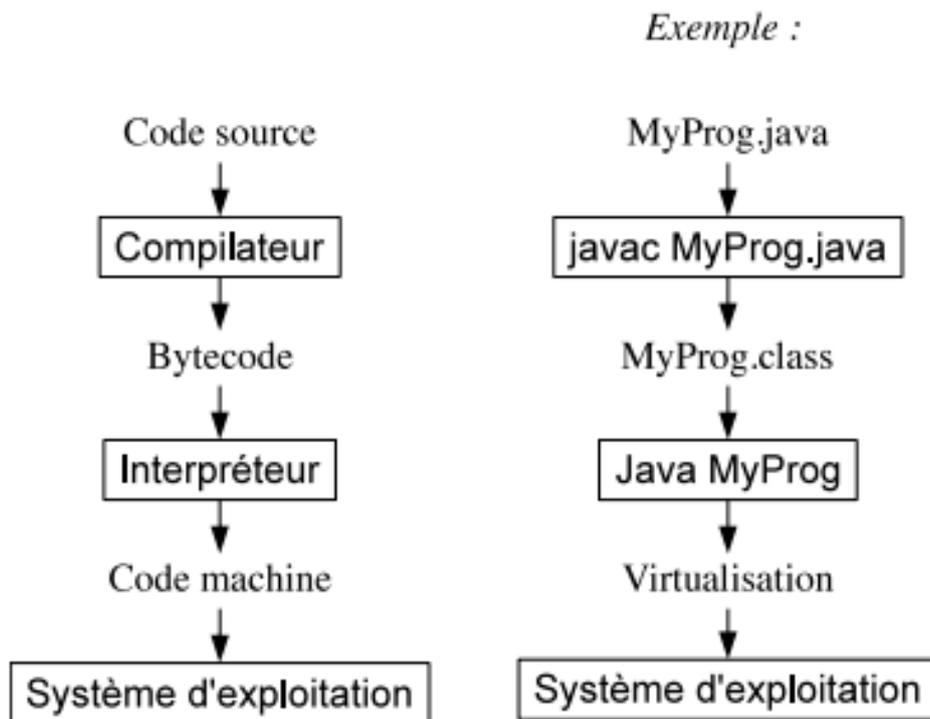


Figure 4.3 : architecture exécutable Code java

3. Implémentation de l'application :

3.1. Interfaces de l'application :

Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques interfaces de notre application

➤ **Interface d'accueil**

Cette page offre un aperçu de l'application

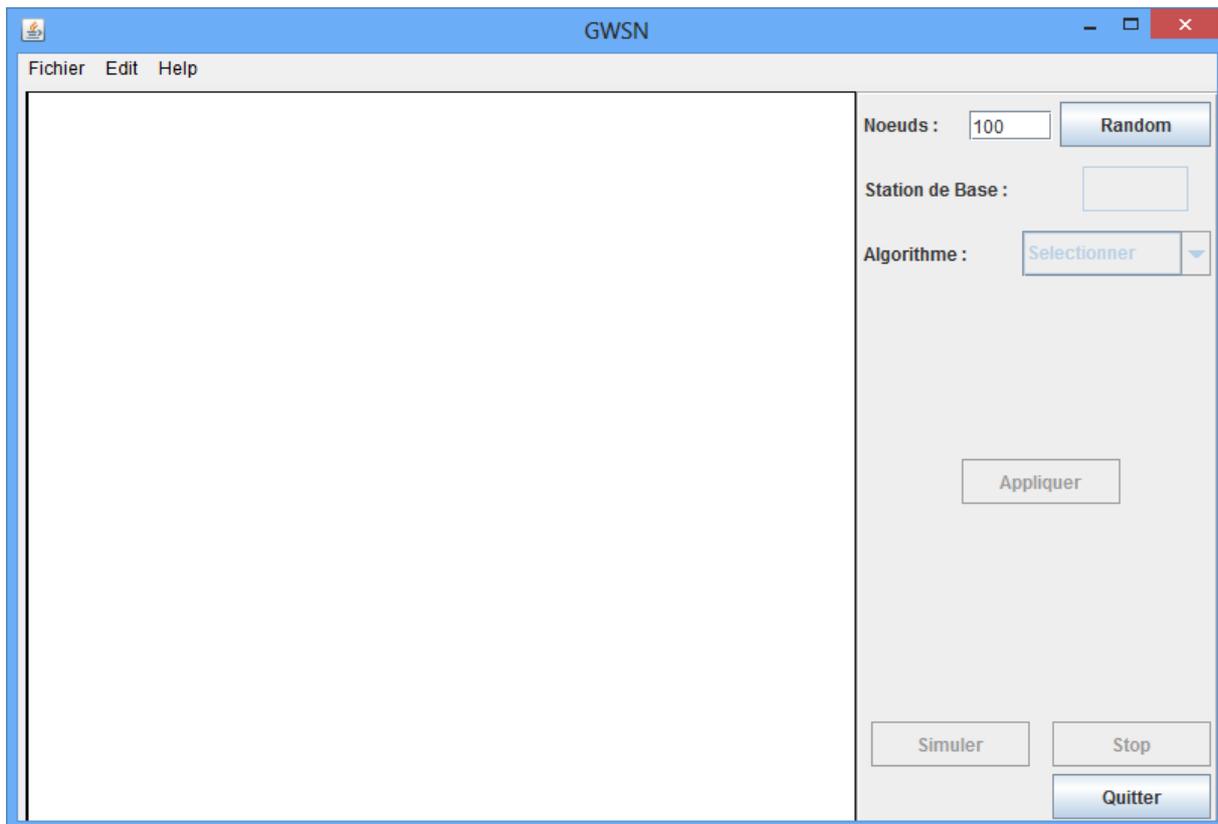


Figure 4.4 : Interface d'accueil d'application

3.2. Paramètre de simulation :

- ✓ La station de base est fixe, elle n'a pas de contrainte d'énergie, et elle a une capacité de calcul élevée.
- ✓ Tous les nœuds déployés ont une énergie et une puissance limitée et sont homogène.
- ✓ La puissance de traitement des données est très faible par rapport à la puissance nécessaire pour transmettre et recevoir des données.

✓ Nous supposons que tous les nœuds ont des batteries avec une énergie initiale égale à 0,25 J, dispersés au hasard dans $100m^2 \times 100m^2$. La dimension des messages à transmettre est fixé à 500 bits, plus 50 bits paquet de contrôle.

✓ Nous supposons que $E_{elec} = 50$ nJ/bit dans la transmission et la réception ; et $E_{amp} = 100$ pJ/bit/m² dans l'amplificateur de l'émetteur. Considérant que les communications se font dans espace libre, afin de transmettre un message de K bits sur une distance d (dimension m) un nœud consomme la quantité d'énergie suivante :

$$ET x (k; d) = E_{elec} \times k + E_{amp} \times k \times d^2: \quad (4.1)$$

Et en recevant un message de k -bit, un nœud consomme la quantité suivante

:

$$ERx(k) = E_{elec} \times k: \quad (4.2)$$

- ✓ Simulé jusqu'à 5×10^4 évènements
- ✓ Nous supposons que des événements aléatoires (par exemple, la détection de mouvement).

4. Routage plat (flat based-routing)

Le routage à plat [19] est le modèle le plus simple où chaque nœud dans le réseau transmet ces paquets de données à la station de base. Dans cette technique de routage, tous les capteurs sont égaux et jouent les mêmes rôles, tels que la collecte de données et la communication avec sink, c'est à dire toutes les données recueillies dans la région éloignée peuvent être identiques ou dupliquées sur tous les nœuds de capteurs fonctionnent de la même manière.

4.1. Protocole MTE (minimum transmission énergie)

Protocole MTE prend en considération la distance entre les nœuds, cet protocole choisit le nœud le plus proche pour router ses données à la station de base, son objectif principal est de minimiser la distance entre les nœuds (Nœud Père et Nœud Fils) c.-à-d. choisir la route qui consomme le minimum d'énergie pour transmettre un paquet entre le nœud capteur et le nœud puits, Ce protocole a une approche

déterministe qui utilise Prim qui est un algorithme itératif pour l'établissement des plus courts chemins entre les nœuds.

MTE utilise la distance euclidienne pour détecter les voisins proches

$$AB = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}$$

4.1. Avantages de MTE

- Scalabilité : MTE est scalable de fait car chaque nœud participe et puisque les nœuds ont besoin seulement des informations sur leurs voisins directs.
- La simplicité : MTE est très simple dans son fonctionnement. Cette dernière, est généralement formée uniquement dans des régions où il y a des données à transmettre.
- L'agrégation de données : MTE offre la possibilité d'agrégation des données. Cette opération s'effectue par les nœuds capteurs qui se trouvent sur le chemin de routage vers la destination, où les données des autres nœuds voisins sont accumulées avec une élimination de redondance.

4.2 Inconvénients de MTE

- Selon l'architecture plate du réseau, les nœuds proches de la station de base vont participer plus que les autres, et donc vont épuiser leurs énergies
- beaucoup plus rapidement que les autres nœuds capteurs. Ce phénomène est connu sous le nom de points chauds (Hot-Spots).
- MTE exige que tous les nœuds opèrent de la même façon et d'une manière distribuée, ce qui nécessite un grand nombre de messages de contrôle pour le bon fonctionnement des protocoles et la maintenance de la topologie.

4.3. Simulation de protocole MTE

On va simuler le protocole MTE au réseau de 300 nœuds et on va consulter le résultat qui contient la consommation d'énergie et les nœuds morts.

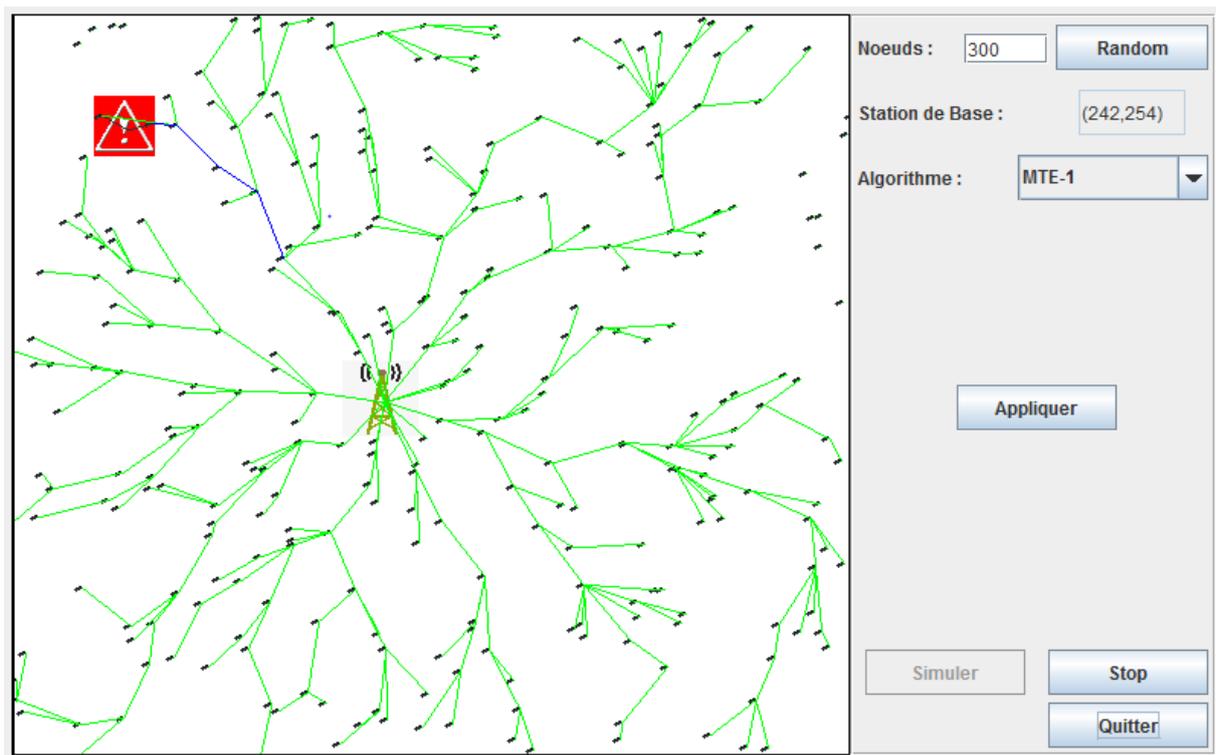


Figure 4.5 : Un RCSF de 300 nœuds après l'application de MTE

4.4. Résultat de simulation

- Le tableau suivant présente L'énergie résiduelle du réseau en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produits) et L'évolution de la connectivité du réseau, en termes de nœuds morts, en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produit)

Nbr d'évènement	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000
L'énergie résiduelle	0.22	0.19	0.17	0.15	0.12	0.1	0.08	0.06	0.03	0.01
Nbr des nœuds morts	3	13	24	38	46	54	57	58	62	63

Tableau 4.1 :L'énergie résiduelle et nombre des nouds mort (en termes de nombre d'évènement produit) de protocoles MTE

- La figure 4.6 présente L'énergie résiduelle du réseau en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produits).

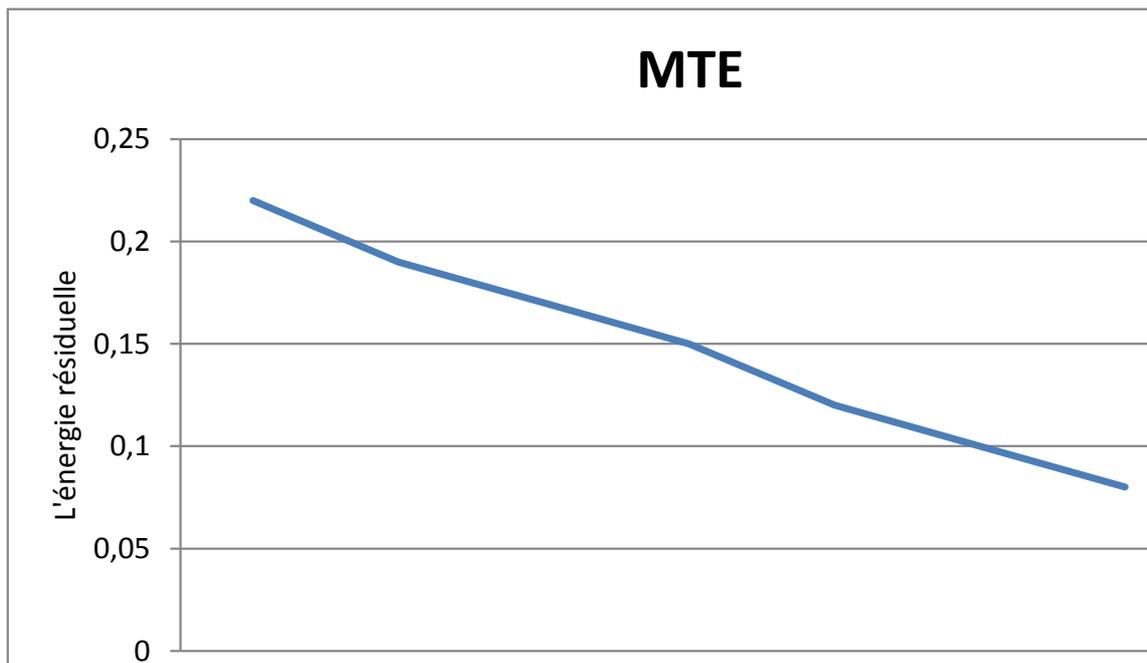


Figure 4.6 : L'énergie résiduelle du réseau en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produits).

- La figure 4.7 présente et L'évolution de la connectivité du réseau, en termes des nœuds morts, en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produit)

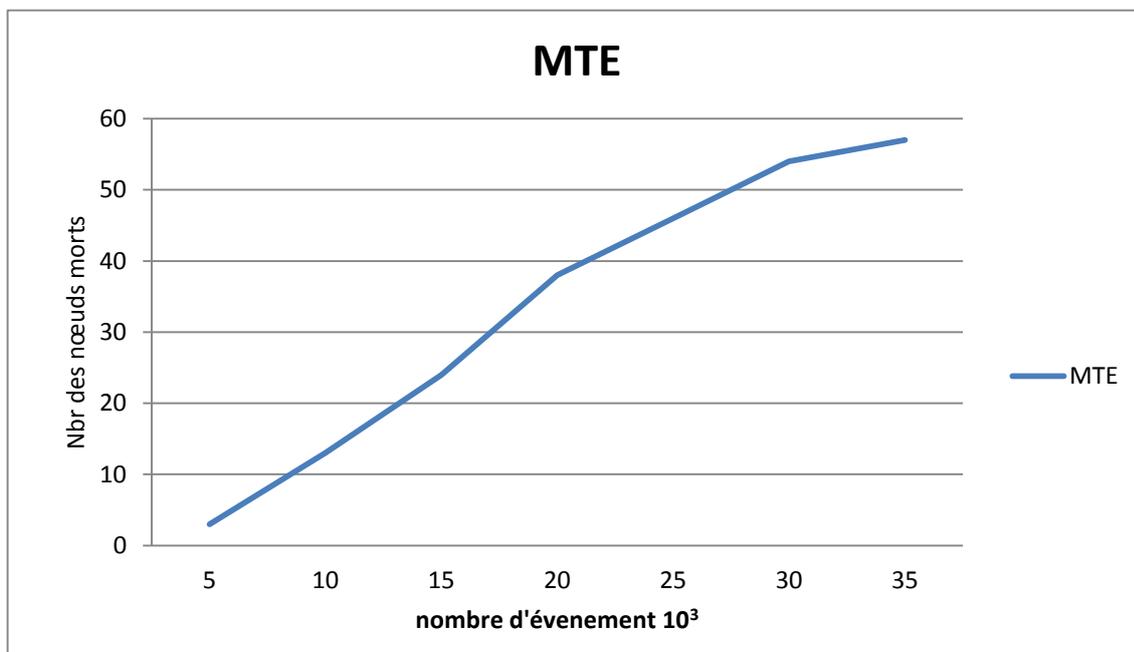


Figure 4.7 : L'évolution de la connectivité du réseau, en termes des nœuds morts, en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produit)

5. Routage hiérarchique

Le routage hiérarchique [20] est considéré comme étant l'approche la plus favorable en termes d'efficacité énergétique. Il se base sur le concept (*nœud standard* - *nœud maître*) où les nœuds standards acheminent leurs messages à leurs maîtres, lequel les achemine ensuite dans le réseau tout entier via d'autres nœuds maîtres jusqu'à la station de base (*sink*).

5.1 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

C'est l'un des protocoles hiérarchiques les plus populaires pour les réseaux de capteurs. L'idée est de former des clusters de nœuds capteurs en se basant sur la puissance du signal reçu et prendre comme routeur vers le puits, le cluster-head local. Cela économisera de l'énergie puisque seul les cluster-head effectueront une transmission vers le puits. Le nombre optimal de cluster-head dans un réseau de capteurs est de 5% par rapport au nombre total de nœuds. Tous les processus de données tel que la fusion et l'agrégation sont locaux au cluster. Le cluster-head est élu périodiquement en fonction de son niveau d'énergie pour équilibrer la consommation d'énergie des nœuds. Le cluster-head est élu durant une période de temps appelé round. Les nœuds choisissent un nombre réel entre 0 et 1. Le nœud devient le cluster-head dans ce round si le nombre est inférieur au seuil suivant :

$$T(n) = \begin{cases} P/(1 - P * (r \bmod 1/p)) & \text{si } n \text{ n'appartient pas à } G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Où P est le pourcentage désiré de cluster-head.

r : est le round en cour.

n : est l'ensemble des nœud qui n'ont pas était cluster-head dans les derniers $(1/P)$ rounds.

G : est l'ensemble des nœuds du cluster.

Le clustering dynamique augmente la durée de vie du réseau. LEACH est totalement distribué et n'a besoin d'aucune connaissance globale du réseau. Cependant LEACH utilise un routage à saut unique où chaque nœud peut transmettre directement au cluster-head et au puits. Mais il n'est pas applicable aux réseaux qui sont déployés sur une grande surface. De plus, le clustering dynamique ajoute une grande

surcharge comme le changement des cluster-head ce qui peut diminuer le gain en énergie.

5.1.1 La durée de vie du réseau

Au niveau du protocole LEACH, la durée de vie du réseau est faible, parce que dans LEACH, les nœuds s'épuisent plus rapidement vue la distance entre les CHs et leurs membres d'un côté et la distance entre les CHs et la station de base comme dans la figure 4.8 En effet, les phases d'initialisation c'est-à-dire les phases de formation de clusters qui induisent un nombre important de messages de contrôle vont se faire à chaque nouveau round impliquant une consommation d'énergie supplémentaire.

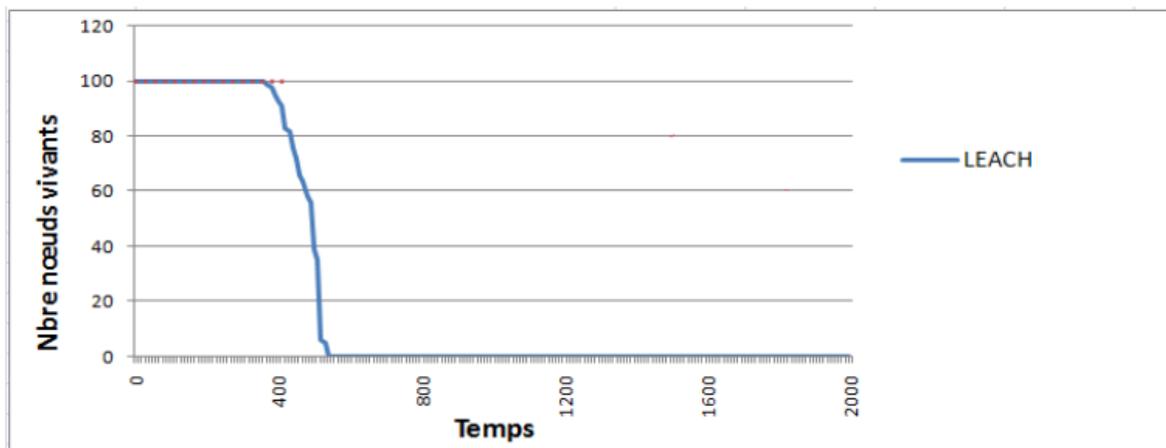


Figure 4.8 : La durée de vie du réseau au niveau de LEACH

5.1.2 Avantages

- Puisque chaque nœud transmet des données dans son slot, le taux de collision est diminué.
- Lorsqu'un nœud n'est pas dans son slot, il éteint sa radio pour conserver son énergie.

5.1.3 Inconvénients

- LEACH nécessite une radio complexe qui augmente la consommation d'énergie ainsi que le coût d'un nœud capteur.
- L'organisation et la restructuration des clusters peuvent prendre assez de temps durant lequel les nœuds capteurs consomment de l'énergie donc ne peuvent plus effectuer d'autres tâches utiles.

- LEACH suppose que chaque nœud communique directement avec la station de base ce qui cause une large consommation d'énergie pour la transmission des messages.
- Les CHs sont les maillons les plus faibles car l'agrégation de données est centrée à leur niveau.
- La rotation du rôle de CHs permet d'équilibrer la consommation d'énergie mais ça nécessite des phases d'initialisation.
- La distribution des CHs n'est pas homogène.

5.2. Simulation de protocole LEACH

On va simuler le protocole LEACH au réseau de 300 nœuds et on va consulter le résultat qui contient la consommation d'énergie et les nœuds morts.

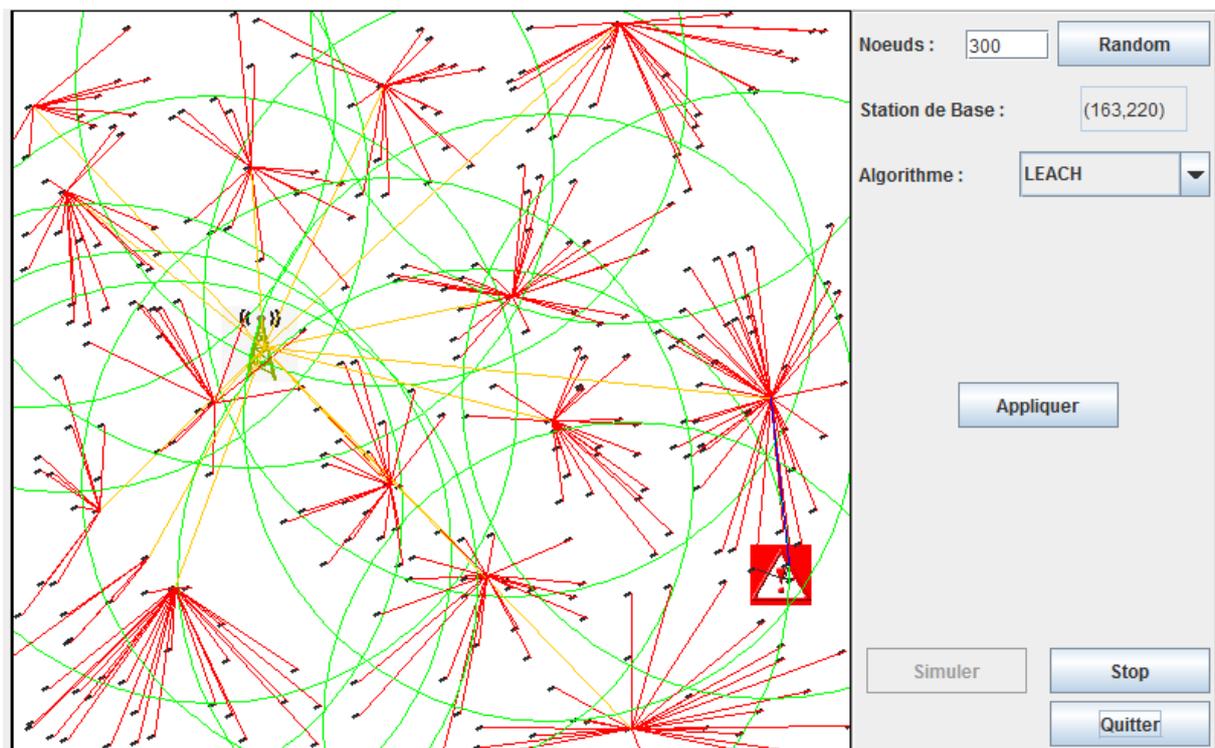


Figure 4.9 : Un RCSF de 300 nœuds après l'application de LEACH

5.3. Résultat de simulation

Le tableau suivant présente L'énergie résiduelle du réseau en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produits) et L'évolution de la connectivité du réseau, en termes de nœuds morts, en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produit)

Nbr d'évènement	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000
L'énergie résiduelle	0.245	0.24	0.22	0.20	0.17	0.15	0.13	0.1	0.08	0.07
Nbr des nœuds morts	0	1	3	5	10	12	17	23	27	31

Tableau 4.2 : L'énergie résiduelle et nombre des nœuds mort (en termes de nombre d'évènement produit) de protocoles LEACH

La figure 4.10 présente L'énergie résiduelle du réseau en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produits).

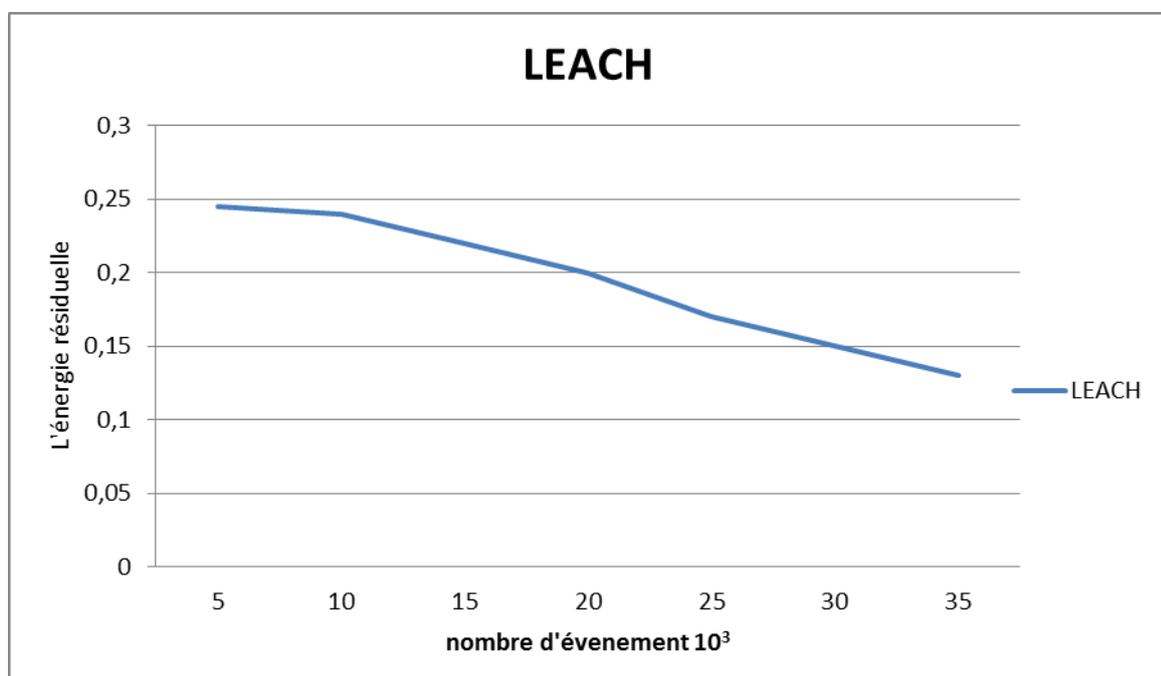


Figure 4.10 : L'énergie résiduelle du réseau en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produits) a l'algorithme LEACH

La figure 4.11 présente et L'évolution de la connectivité du réseau, en termes des nœuds morts, en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produit)

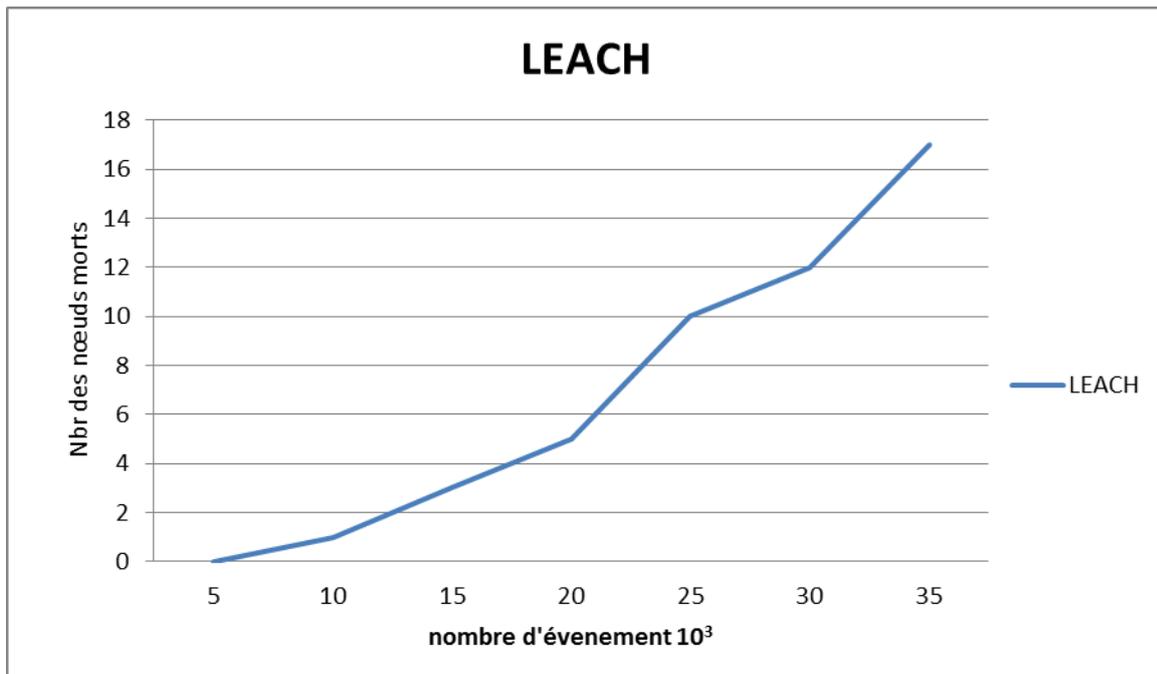


Figure 4.11 : L'évolution de la connectivité du réseau, en termes des nœuds morts, en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produit) a l'algorithme LEACH

6. Comparaison entre protocole LEACH et MTE

On va simuler avec paramètre Lesquels ont été mentionnés les deux protocoles au même réseau qui contient 500 nœuds et comparé résultat.

Le tableau suivant montre les résultats de L'énergie résiduelle du réseau en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produits) et L'évolution de la connectivité du réseau, en termes de nœuds morts, en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produit) de simulation des deux protocoles.

Nbr d'évènement(10 ³)		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
L'énergie résiduelle	MTE	0.22	0.2	0.18	0.15	0.13	0.11	0.09	0.07	0.05	0.03
	LEACH	0.245	0.24	0.22	0.2	0.17	0.15	0.113	0.11	0.09	0.07
Nbr des nœuds morts	MTE	7	22	38	55	63	76	94	99	114	119
	LEACH	1	3	5	9	11	13	16	21	27	29

Tableau 4.3 : L'énergie résiduelle et nombre des nœuds mort (en termes de nombre d'évènement produit) des deux protocoles MTE et LEACH

La figure 4.12 présente L'énergie résiduelle du réseau en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produits) des deux protocoles MTE et LEACH

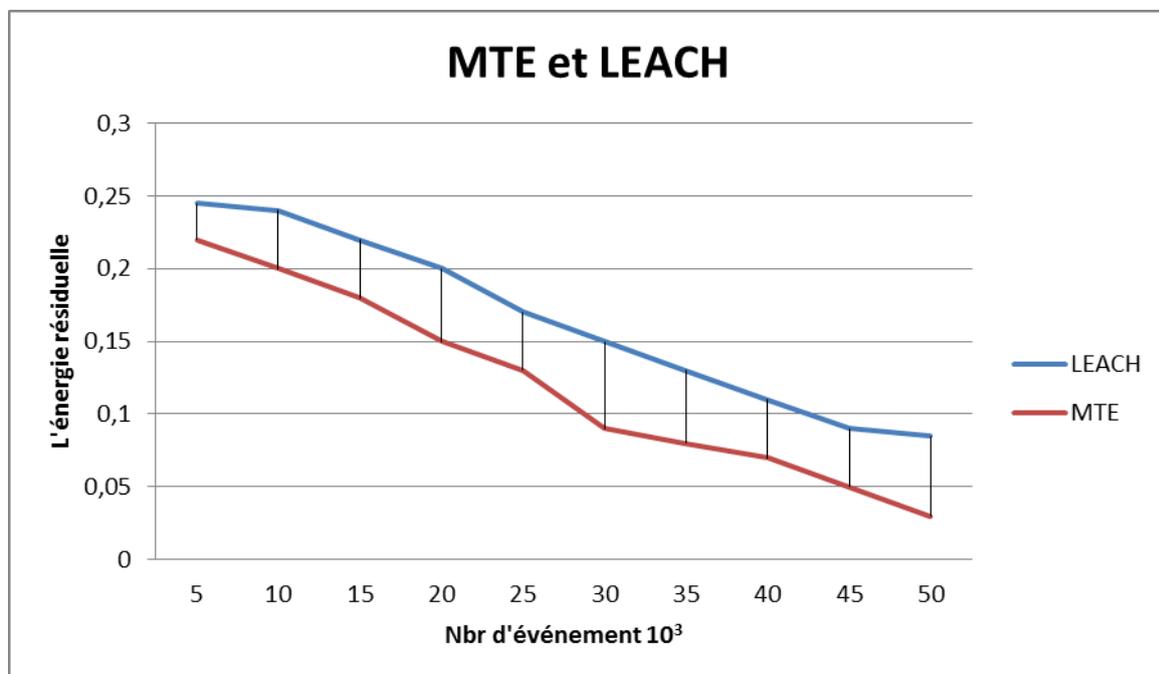


Figure 4.12 : L'énergie résiduelle du réseau en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produits) des deux protocoles MTE et LEACH

La figure 4.13 présente et L'évolution de la connectivité du réseau, en termes des nœuds morts, en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produit) des deux protocoles MTE et LEACH

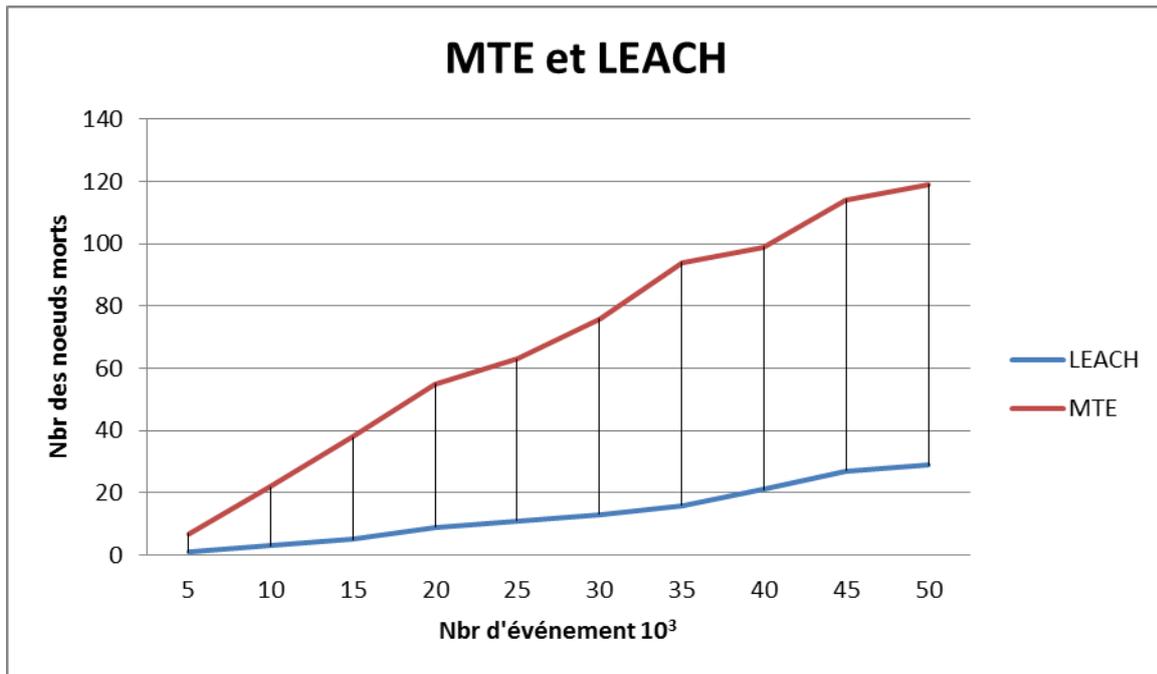


Figure 4.13 : L'évolution de la connectivité du réseau, en termes des nœuds morts, en fonction du temps de simulation (en termes de nombre d'évènement produit) des deux protocoles MTE et LEACH

- En comparant les résultats de la figure 4.13, la figure 4.14 et du tableau, nous pouvons conclure que la consommation d'énergie du protocole de Leach est plus faible que l'énergie consommée par MTE et que le nombre de nœud morts dans Lush est inférieur que le nombre de membres morts dans MTE
- De cette façon, nous proposons à Leach qu'il est le meilleur protocole que le protocole MTE

7. Conclusion

Après la comparaison entre les deux algorithmes on a trouvé que l'algorithme LEACH est le plus efficace par rapport l'algorithme MTE parce que LEACH conserve l'énergie avec une grande durée de vie et minimum des nœuds morts.

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous sommes dans un âge où les réseaux de capteurs sans fil ont envahi tous les domaines. Le point sensible pour le nœud capteur est sa source d'énergie limitée, et puisque son rechargement est une tâche très difficile, la plupart des chercheurs dans le domaine des RCSF cherche à trouver des nouvelles solutions pour atteindre l'objectif d'économiser l'énergie des nœuds capteurs, pour prolonger la durée de vie de réseau. Dans ce mémoire, nous sommes intéressés au problème de l'énergie et du routage dans les réseaux de capteurs sans fil.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

[1] Cheick-Tidjane Kone. Conception de l'*architecture d'un réseau de capteurs* sans fil de grande dimension. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université Henri Poincaré - Nancy I, 2011. Français. <tel-00650839>. HAL Id: tel-00650839
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00650839>.

[2] REY David COLLECTE DES DONNÉES D'UN RÉSEAU DE CAPTEURS SANS FILS EN UTILISANT UNE SURCOUCHE RÉSEAU PAIR À PAIR ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL(mémoire fin d'étude AVRIL 2010)

[3] architecteur d'un réseau capteur sans file module
utc(https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_33.html)

[4] <http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2006/Bunel/Presentation.html>

[5] Mehdi Bouallegue. Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université du Maine, 2016. Français. j NNT : 2016LEMA1011

[6] LAOUID Abdelkader, L'auto-structuration dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil, Mémoire de Magistère en Informatique, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, 2008-2009.

[7] F. Akyildiz, Weilian Su, Sankarasubramaniam, E. Cayirci. «*A survey on sensor networks*». IEEE Communications, 2002.

[8] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, and M. B. Srivastava, "Energy-aware wireless microsensor networks". IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 19, No. 2, March 2002, pp.40-50.

[9] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks ". In the Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences, Hawaii, January 2000.

[10] Mohammed Abdelkrim CHAREF and Mohammed Abdelmounaim Chérif GHEMBAZA. Evaluation des deux approches des données agrégées sécurisées dans les réseaux de capteurs sans l. PhD thesis, 2016.

- [11] M. Younis and T. Nadeem. "Energy efficient MAC protocols for wireless sensor networks", *Technical report, university of Maryland baltimre County, USA*, 2004.
- [12] M. Ilyas and I. Mahmoud. "Handbook of sensor networks Compact wireless and wired Sensing Systems", ISBN 08493196864. CRC PRESS LLS, USA, 2005.
- [13] H. Namgoog, D. Lee, and D. Nam. "Energy efficient topology for wireless microsensor networks". *ACM, PE-WASUN*, October 2005.
- [14] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci , "A Survey on Sensor Networks". *IEEE Communications Magazine*, August 2002.
- [15] F. Koushanfar, M. Potkonjak, and A. Sangiovanni-Vincentelli, "Fault Tolerance in Wireless Ad hoc Sensor Networks". *Proceedings of IEEE Sensors 2002*, June 2002.
- [16] L. Paradis and Q. Han, "A Survey of Fault Management in Wireless Sensor Networks". *Plenum Press New York, NY, USA*, 2007.
- [17] F. Nekoogar, F. Dowla, and A. Spiridon, "Self organization of wireless sensor networks using ultra-wideband radios". *Atlanta, GA, United States*, September 2004.
- [18] V. Handziski, A. Kopke, H. Karl, and A. Wolisz, "A common wireless sensor network architecture". *Technische Universität Berlin*, July 2003, pp.10-17.
- [19] C.Y. Chong and S.P. Kumar, "Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges". *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, n.8, 2003, pp. 1247-1256.
- [20] T. Zhao, W. D. Cai, and Y. J. Li, "A Sensor Network Topology Inference Algorithm, omputational Intelligence and Security". *2007 International Conference on*. January 2008.
- [21] V. Handziski, J. Polastre, J. H. Hauer, C. Sharp, A. Wolisz, and D. Cullery, "Flexible Hardware Abstraction for Wireless Sensor Networks". In *Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN '05)*, February 2005.
- [22] *Practel, Inc. ZigBee*, "Technology for Wireless Sensor Networks". April 2006.

- [23] I. Teixeira, J. F. de Rezende, A. de Castro, and A. C. P. Pedroza, "Wireless Sensor Network: Improving the Network Energy Consumption". in XXI Symposium Brazilian Telecommunications, SBT'04, Belem, Brazil, September 2004.
- [24] E. Souto, R. Gomes, D. Sadok and J. Kelner, "Sampling Energy Consumption in Wireless Sensor Networks". IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing -Vol 1 (SUTC'06), June 2006.
- [25] S. Zhuang and C. G. Cassandras. "Optimal dynamic voltage scaling for wireless sensor networks with real-time constraints". *Conf. on Intelligent Systems in Design and Manufacturing VI*, October 2005.
- [26] Paolo Santi. "Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks", *Hardcover*, July 2005.
- [27] S. Kumar, D. Shepherd, and F. Zhao. "Collaborative signal and information processing in micro-sensor networks". *IEEE Signal Processing Magazine*, March 2002.
- [28] S.Narayanaswamy, V. Kawadia, R.S. Sreenivas, and P.R. Kumar. "Power control in ad-hoc networks : Theory, architecture, algorithm and implementation of the Compowprotocol", *European Wireless Conference*, 2006.
- [29] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks". pp 1567-1576, June 2002
- [30] I. Akyildiz, W. Su, E. Cayirci, Y. Sankarasubramaniam. "A survey on sensor networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA. Août 2002.
- [31] Karl H. and Willig A. "Protocols and architectures for wireless sensor networks". *John Wiley and Sons, Ltd*, 2005.
- [32] Mr SAHRAOUI belkheyr, Etude d'un protocole de routage basé sur les colonies de Fourmis dans les réseaux de capteurs sans fil, Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2012-2013.

[34] Yasser Yousef, Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, Thèse de Doctorat Spécialité informatique, université de haute alsace, 2010.

[35] YUCEF ZIANI, Etude comparative de méthodes de routage dans les Réseaux de capteurs sans fil pour le domaine Résidentiel, mémoire présenté à l'université du Québec à trois-rivières, juin 2013.

[36] ABDESSELAM Abdelhalim, BELOUATEK Mohammed Conception d'un algorithme de routage basé sur l'heuristique du recuit simulé pour les réseaux de capteurs à grande échelle, Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique ,Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, 2012- 2013.

[37]http://www.futura-sciences.com/magazines/high-tech/infos/dico/d/high_techroutage-1305/ .

[38] Routage — Wikipédia.html.

[39] Houari M AOUCHE, Routage avec Qualité de Service dans AODV, mémoire Présenté pour obtenir le titre d'ingénieur d'état, Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou, 2008-2009.

[40] 2013.

[41] YASINE RAMDANI MOHAMED, Problèmes de sécurité dans les Réseaux de capteurs avec prise en charge de l'énergie, mémoire de magister, université de saad dahlab de Blida, Novembre YOUNES, Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs, mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tiz ousou, 26-09-2012.

[42] Leila Imane NIAR, Analyse Graphique pour la surveillance dans un réseau de capteurs sans fils (RCSF Simulateur : OMNET++), Mémoire Magister : Informatique, option : Analyse, Commande et Surveillance des Systèmes, Juillet 2012.

[44] Abdelali Boushaba, Mohammed Oumsis, and Rachid Benabbou. Evaluation des performances des protocoles de routage ad hoc. In JDIR, 2010

[45] C. Intanagonwiwat, R. Govindan and D. Estrin, "Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks". In the Proceedings of the

6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00), Boston, MA, August 2000.

[46] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and Satish Kumar, "Next century challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks". In the Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99), Seattle, WA, August 1999.

[47] B. Krishnamachari, D. Estrin, and S. Wicker, "Modeling Data Centric Routing in Wireless Sensor Networks". In the Proceedings of IEEE INFOCOM, New York, NY, June 2002.

[48] M. Kubisch, H. Karl, A. Wolisz, L. C. Zhong and J. Rabaey, "Distributed Algorithms for Transmission Power Control in Wireless Sensor Networks". In Proc. IEEE INFOCOM, 2003. pp.558-563.

[49] N. Li and J. C. Hou, "BLMST: a decentralized, power-efficient broadcast algorithm for wireless sensor networks". Accepted for publication in ACM Baltzer Wireless Networks (WINET), 2005.

[50] M. Younis, M. Youssef, and K. Arisha, "Energy-Aware Routing in Cluster-Based Sensor Networks". In Proceedings of the 10th IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS2002), (Forth Worth, TX), 2002.

[51] M. Abolhasan, T. Wysocki, and E. Dutkiewicz, "A review of routing protocols for mobile ad hoc networks". Ad Hoc Networks, Elsevier, Vol. 2, Issue 1, 2004, pp. 1-22.

[52] Z. Qiang and Z. Hongbo, "An Optimized AODV Protocol in Mobile Ad Hoc Network". In IEEE Wireless Communications and Networking and Mobile Computing, October 2008, pp. 1-4.

[53] I. D. Chakeres and E. M. Belding-Royer, "AODV routing protocol implementation design". In IEEE Distributed Computing Systems Workshops. 23-24 March 2004, pp. 698-703.

[54] M. Macedo, A. Grilo, and M. Nunes, "Distributed Latency-Energy Minimization and interference avoidance in TDMA Wireless Sensor Networks". Computer

Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications
Networking, 2009, pp. 569- 582

[55] M. Nunes, A. Grilo, M. Macedo, "Interference-free TDMA slot allocation in Wireless Sensor Networks". In: Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks (IEEE LCN'2007), Dublin, Ireland, October 2007.

[56] C. E. Perkins, E. M. Royer, S. R. Das, "Ad hoc on demand distance vector (aodv) routing". In IETF, Internet Draft, draft-ietf-manet-aodv-05.txt. [En ligne] 2000.

[57] <https://xml.netbeans.org/specs/dtd2xsd/>

[58] <https://www.w3.org/>