



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT INFORMATIQUE

Mémoire de fin d'études
De MASTER PROFESSIONNEL

Spécialité :

Réseaux, Mobilité et Systèmes Embarqués
Ingénierie des Systèmes d'Information.

2019-2020

Simulation d'un protocole LEACH

Réalisé par :

AMZIANE Razika.

MAHMOUDI Djedjiga.

Encadré par:

M^{me} : BOUSNINA Lila.

Remerciements

C'est avec un grand plaisir que je réserve ces lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

C'est avec un grand plaisir que, nous adressons nos sincères remerciements à l'égard de notre encadreur, Madame BOUSNINA Lila pour ses conseils, ses remarques, ses aides.

Je tiens à remercier chaleureusement les membres de jury qui ont bien accepté de juger ce travail malgré les charges qu'ils les préoccupent.

Je ne trouverais sans doute pas les mots pour remercier à leur juste valeur les personnes qui me sont les plus chères : les membres de ma famille. Pour leur soutien sans faille, leur patience, et tout ce qu'ils ont pu m'apporter comme bonheur. Qu'ils sachent à travers ces quelques mots, l'expression de mes remerciements pour leur patience et leur soutien inestimable.

À vous tous, merci !



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé.

Mes sœurs et frères pour leur aide, conseils et encouragements.

Tous mes amis pour leur compagnie.

Ma binôme Razika et sa famille.

Enfin à tous ceux qui me sont cher et qui m'ont aidé de près ou de loin.

Djedjiga



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé.

Mes sœurs surtout ma grande sœur Fatma, ma jumelle et mes frères pour leurs aide,
conseils et encouragements.

Ma chère grand-mère pour m'avoir accompagné.

Mon cher oncle Said pour ses encouragements.

Tous mes amis pour leur compagnie.

Ma binôme Djedjiga et sa famille.

Enfin à tous ceux qui me sont cher et qui m'ont aidé de près ou de loin.

Razika

Résumé

Dans ce mémoire, nous présentons une étude des problèmes de l'énergie dans les RCSFs.

L'objectif de ce travail de recherche est de proposer puis d'étudier une méthodologie de routage hiérarchique, basée sur un mécanisme de classification du réseau en un ensemble de clusters constitués de nœuds capteurs représentés par des Cluster-Heads. Ces derniers sont sélectionnés selon un processus sélectif basé sur une optimisation des ressources.

Nous avons implémenté une fonction de performance minimisant à la fois l'énergie résiduelle et la distance. Pour tester l'efficacité et montrer les performances et les améliorations de l'approche proposée, nous avons réalisé une étude comparative avec le protocole de routage standard (LEACH). La simulation a été réalisée avec le simulateur OMNET++.

Mots-clés : RCSF, Optimisation des ressources, Routage hiérarchique, OMNET.

Table des matières

<i>Table des matières</i>	v
<i>Liste des figures</i>	viii
<i>Liste des tableaux</i>	ix
<i>Liste des graphes</i>	ix
<i>Liste des abréviations</i>	ix
I Généralité sur les réseaux de capteurs sans fil	4
I.1 Introduction :	4
I.2 Les réseaux sans fil (Wireless network) :	4
I.2.1 Les réseaux cellulaires :	4
I.2.2 Un réseau sans fil ad hoc ou WANET (Wireless Ad Hoc Network) ou MANET :	5
I.2.3 Les Réseaux de capteurs sans fil :	6
I.3 Comparaison entre les réseaux de capteurs et réseaux ad-hoc:	6
I.4 Présentation d'un nœud capteur :	7
I.4.1 Définition d'un capteur :	7
I.4.2 Caractéristiques d'un capteur:	8
I.4.3 Zone de couverture :	8
I.5 Les Modes de communication de RCSF :	9
Il existe différents types sont :	9
I.6 Facteurs de conception dans un réseau de capteurs sans fil :	10
I.6.1 Consommation d'énergie:	10
I.6.2 Tolérance aux pannes:	10
I.6.3 Topologie de réseau :	11
I.6.4 L'extensibilité (passage à l'échelle ou la Scalabilité) :	12
I.6.5 Sécurité limitée :	12
I.6.6 Les médias de transmission :	12
I.7 Anatomie d'un capteur :	12
Un capteur est composé de deux parties:	12
I.7.1 Contraintes hardwares :	12

1.7.2	Contraintes software :.....	15
1.8	Les domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil :.....	15
1.8.1	Applications militaires :.....	16
1.8.2	Applications environnementales :.....	16
1.8.3	Applications médicales :.....	17
1.8.4	Applications domestiques :.....	17
1.9	Conclusion :.....	18
II	Les protocoles de Routage pour la consommation d'énergie dans les RCSF.....	19
II.1	Introduction :.....	19
II.2	Architecture de communication (pile protocolaire) :.....	19
II.2.1	Couche application:.....	20
II.2.2	Couche transport:.....	20
II.2.3	Couche réseau:.....	20
II.2.4	Couche liaison de données.....	20
II.2.5	Couche physique:.....	21
II.2.6	Plan de gestion d'énergie:.....	21
II.2.7	Plan de gestion de la mobilité:.....	21
II.2.8	Plan de gestion des tâches:.....	21
II.3	Paradigmes de communication :.....	21
II.3.1	Centré-nœuds :.....	22
II.3.2	Centré-données :.....	22
II.3.3	Basé-localisation :.....	22
II.4	Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie :.....	22
II.4.1	Technologie de communication :.....	22
II.4.2	Etat du module radio :.....	22
II.4.3	Accès au medium de transmission :.....	23
II.4.4	Modèle de propagation radio :.....	24
II.5	Classification des protocoles de routages pour les RCSF :.....	24
II.5.1	Classification selon la méthode d'établissement des routes :.....	24
II.5.2	Classification selon le mode de fonctionnement de protocole :.....	28
II.5.3	Classification selon la topologie de réseau :.....	30
II.6	La conservation d'énergie avec cycle d'activité (Duty_Cycle):.....	32
II.6.1	Protocoles Veille/ Réveil (Sleep/Wakeup):.....	32
II.6.2	Protocoles du niveau MAC (Medium Access Control) :.....	33

II.7	Conclusion :	36
III	Proposition d'une amélioration du protocole LEACH pour la conservation d'énergie	37
III.1	Introduction :	37
III.2	Principaux composants d'une architecture en cluster:	37
III.2.1	Nœud capteur:	37
III.2.2	Cluster :	38
III.2.3	Cluster-heads (leaders- chefs de groupes) :	38
III.2.4	La station de base :	38
III.2.5	Utilisateur final :	38
III.3	Algorithme de LEACH standard :	39
III.3.1	La phase de formation de clusters (la phase Set-up):	39
III.3.2	La phase de transfert de données (La phase steady-state) :	40
III.4	Concept de base de protocole proposé :	40
III.5	Les étapes de protocole amélioré :	42
III.5.1	Nouvelle formule de sélection avec introduction de l'énergie :	42
III.5.2	Introduction de la distance entre le nœud et la station de base:	42
III.5.3	Introduction de l'énergie et de la distance :	43
III.5.4	Ordonnancement des tâches :	44
III.6	Le diagramme qui représente les étapes de protocole proposé :	44
III.7	L'algorithme de routage pour la nouvelle approche :	46
III.8	Le modèle d'énergie utilisé dans la nouvelle proche :	47
III.8.1	Le modèle de propagation en espace libre :	48
III.8.2	Le modèle de canal à évanouissement à trajets multiples :	48
III.9	Conclusion :	50
IV	Implémentation et évaluation de protocole amélioré	51
IV.1	Introduction :	51
IV.2	La simulation :	51
IV.2.1	Définition :	51
IV.2.2	La réalisation d'une simulation :	52
IV.2.3	Objectifs de simulation :	53
IV.2.4	Les Simulateurs de Réseaux de Capteurs Sans Fil :	53
IV.3	Paramètre de simulation de protocole proposé:	56
IV.4	Passage à l'échelle :	60
IV.4.1	L'énergie consommée :	60

IV.4.2	Energie résiduelle: (Energie totale restante) :.....	61
IV.4.3	Durée de vie de notre protocole :	62
IV.5	Conclusion :	64
	Bibliographie:	66

Liste des figures

Figure I-1	Exemple d'un réseau cellulaire	5
Figure I-2	L'exemple d'un réseau ad hoc	5
Figure I-3	La différence entre l'échange en mode infrastructure et en mode ad-hoc.....	6
Figure I-4	Réseaux de capteurs sans fil.....	6
Figure I-5	Les différents capteurs	7
Figure I-6	Rayon de communication CR et de sensation d'un capteur SR	8
Figure I-7	Notion de k-couverture.....	9
Figure I-8	Quelques modes de communication.....	10
Figure I-9	Composants de base d'un capteur	13
Figure I-10	La transformation d'une grandeur physique au signal numérique	13
Figure I-11	Interaction entre un responsable militaire et ses soldats.....	16
Figure I-12	L'application de RCSF en domaine surveillance environnement.....	16
Figure I-13	Ensemble de capteurs dans un corps humain	17
Figure I-14	Les Smart Parking	18
Figure II-1	Pile protocolaire dans les RCSFs.....	19
Figure II-2	La surécoute dans une transmission Surcharge (<i>overhead</i>)	24
Figure II-3	Classification des protocoles de routages pour les RCSF	25
Figure II-4	Exemple d'échange DSDV	27
Figure II-5	Les deux requêtes RREQ et RREP en AODV.....	28
Figure II-6	Routage plat	31
Figure II-7	Architecture du routage hiérarchique	32
Figure II-8	Approches de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil	33
Figure II-9	Schéma de la méthode « Sleep-Wakeup » avec deux antennes.....	34
Figure II-10	Trame dans un protocole MAC à base de TDMA	35
Figure II-11	Scénario du terminal caché	36
Figure II-12	Scénario RTS/CTS pour éviter les collisions.....	37
Figure III-1	Principaux composants d'une architecture en cluster	40
Figure III-2	Répartition du temps et différentes phases pour chaque round	45
Figure III-3	Consommation d'énergie en acquisition, traitement, et communication	48
Figure III-4	Modèle de consommation d'énergie pour la communication	51
Figure IV-1	Les étapes de simulation	53
Figure IV-2	Le lancement du simulateur OMNET++	55
Figure IV-3	Les Connexions des modules sous CASTALIA	55
Figure IV-4	Les principaux composants d'un Nœud sous CASTALIA	56
Figure IV-5	Le lancement du simulateur MATLAB.....	57

Liste des tableaux

Tableau I-1 Comparaison entre RSCF et A-hoc.....	7
Tableau II-1 Les numéros de séquence après des mises à jour dans DSDV	27
Tableau IV-1 Paramètre de simulation.....	58
Tableau IV-2 Représente les rounds pendant T=100 s.....	58
Tableau IV-3 Représente la moyenne de l'énergie restante.....	59
Tableau IV-4 Représente le nombre de nœud mort pour chaque protocole	61
Tableau IV-5 Tableau comparatif pour la moyenne de l'énergie dépensée.....	62
Tableau IV-6 Tableau comparatif pour la moyenne de l'énergie restante des nœuds.....	63
Tableau IV-7 Tableau comparatif pour la moyenne de la durée de vie du réseau	64

Liste des graphes

Graphe IV-1 La moyenne de l'énergie restante pendant un temps T	60
Graphe IV-2 Le pourcentage de nœuds morts pendant un temps T.....	61
Graphe IV-3La moyenne de l'énergie dépensée par rapport à la topologie.....	62
Graphe IV-4La moyenne de l'énergie restante par rapport à la topologie.....	63
Graphe IV-5La moyenne de la durée de vie du réseau par rapport à la topologie	64

Liste des abréviations

RCSF :Réseau de Capteurs Sans Fil.

WSN:Wireless Sensor Networks.

WANET: Wireless Ad Hoc Network.

RC:Zone de communication.

RS:Zone de perception.

OS: Operating System.

RF: Radio-fréquence.

TinyOS: Tiny Operating System.

OSI:Open Systems Interconnection.

LEACH: Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy.

SPIN: Sensor Protocol for Information via Négociation.

IP: Internet Protocol.



RTS: *Request to Send.*

CTS: *Clear to send.*

DSDV : *Destination Sequence Distance Vector.*

SN: *Sequence Number.*

OLSR: *Optimized Link State Routing Protocol.*

MPR:*Multi-Protocol Router.*

AODV: *Ad hoc On-demand Distance Vector.*

RREQ:*Route Request.*

RREP:*Route Reply.*

DD:*Directed Diffusion.*

EAR: *Energy-aware routing.*

QoS: *Quality of Service.*

SAR: *Sensor Aggregates Routing.*

CH: *Cluster-Head.*

MAC: *Medium Access Control.*

TDMA: *Time Division Multiple Acces.*

CSMA: *Carrier Sense Multiple Access.*

DIFS: *Distributed Inter Frame Spacep.*

SIFS: *Short Inter Frame Space.*

ACK: *ACKnowledgegment.*

NAV: *Network Allocation Vector.*

Z-MAC: *Zebra MAC.*

LCL: *LowContention Level.*

HCL: *High Contention Level.*



ECN: *Explicit Contention Notification.*

Wi-Fi: *Wireless Fidelity.*

Introduction générale :

La convergence de la micro-électronique et des technologies de communication sans-fil permis la création d'une combinaison entre les systèmes embarqués et les systèmes distribués ayant engendré les Réseaux de Capteurs Sans-fil ou RCSFs (Wireless Sensor Networks) qui nécessitent de prendre en compte l'environnement pour mesurer les phénomènes physiques afin de prendre les décisions nécessaires(1).

L'utilisation de solutions basées sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) augmentera rapidement pour interagir avec l'environnement physique qui nous entoure et révolutionner notre façon de vivre(2).

Un réseau sans fil (Wireless network) est un réseau Ad-hoc sans infrastructure multi saut à grande échelle dans lequel les équipements communiquent sans avoir besoin de fil pour les réseaux classiques, il est composé de plusieurs appareils distribués dans un espace pour former une communication à l'aide des ondes électromagnétiques (perturbations électriques se propageant dans le vide).

Les RCSF (Réseaux de Capteurs Sans Fil) sont constitués d'un ensemble de nœuds capteurs intelligents de petites tailles, à faible coût(3), de puissance limitée et multifonctionnels qui sont généralement alimentés par des batteries ayant une capacité de stockage limitée ainsi qu'une manipulation difficile à assurer manuellement, déployés à travers une zone de capture ayant un accès difficile pour mesurer des grandeurs physiques telles que la température, la pression, la vibration, etc. Chaque capteur sans fil est un petit dispositif électronique effectuant la tâche de rassembler les données de son environnement. Lorsqu'un événement précis se produit, les capteurs concernés transmettent aussitôt les données vers la station de base (puits, sink). Cette dernière collecte et traite les données pour les utiliser dans une application spécifiée au préalable ou les communiquer aux réseaux auxquels il est relié via internet ou satellite pour renseigner l'utilisateur sur plusieurs données.

Aujourd'hui, l'optimisation pour la conservation d'énergie est l'un des principaux axes de recherche dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF).

Problématique

La plupart des dispositifs sont caractérisés par la limitation des capacités de traitement, de stockage et surtout d'énergie car ils sont alimentés par des batteries avec une durée de vie limitée, et le remplacement des batteries sur des milliers de ces dispositifs est impossible surtout dans les réseaux de capteurs sans fil déployés dans une zone dure et difficile d'accès.

Objectifs de recherche

Notre objectif est de traiter le problème de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs avec l'utilisation des mécanismes de gestion optimisés au niveau des nœuds capteurs pour améliorer les performances du réseau, notamment la maximisation de sa durée de vie.

Pour cela, nous avons proposé une solution de routage qui est basée sur la conservation d'énergie pour assurer une optimisation de la durée de vie du réseau.

Ce manuscrit est structuré en quatre chapitres suivis d'une conclusion générale, dans le premier chapitre on décrit les généralités sur les réseaux ad hoc et notions de base sur les réseaux de capteurs comme l'architecture, ses caractéristiques. En fin, nous passons en revue les principaux domaines d'applications.

Le second chapitre aborde la problématique de la consommation d'énergie au niveau des RCSF en exposant les différentes techniques d'économie d'énergie utilisées.

Dans le troisième chapitre nous présentons notre solution qui consiste à maximiser l'économie d'énergie par la prise en charge de la distance et de l'énergie résiduelle. Nous présentons les formules existantes dans le protocole LEACH puis nous proposons nos améliorations apportées à ce protocole

Dans le quatrième chapitre nous parlons de l'implémentation de notre protocole LEACH amélioré. Par la suite nous évaluons les performances de nos propositions par le simulateur OMNET++, nous schématisons les résultats obtenus à l'aide des graphes en utilisant MATLAB, nous comparons les performances des deux protocoles LEACH et notre protocole amélioré, en prenant en compte la métrique d'énergie et la durée de vie du réseau.

Enfin, on termine notre travail par une conclusion générale et les perspectives de recherche ouvertes par ce travail.

I Généralité sur les réseaux de capteurs sans fil.

I.1 Introduction :

La technologie des réseaux de capteurs sans fil développe des capteurs déployés dans une zone généralement hostile capables de capter des données, calculer des informations à l'aide de ces données collectés et de les communiquer à travers un réseau vers la station de base et acheminées par cette dernière vers l'utilisateur final via un autre réseau.

Dans ce chapitre, nous décrivons les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures, leurs caractéristiques et leurs domaines d'application.

I.2 Les réseaux sans fil (Wirelessnetwork) :

Est un réseau informatique qui permet de connecter des systèmes via des ondes radio pour réaliser des interconnexions à distance entre les nœuds sans avoir à installer de câblage, il existe deux types de réseau sans fil (le réseau cellulaire et le réseau adhoc).

I.2.1 Les réseaux cellulaires :

- **Définition :**

Est un système de télécommunication qui doit répondre aux contraintes de la mobilité de l'abonné par l'étendu du réseau via des ondes radio qui lui sont allouées.

- **Caractéristiques d'un réseau cellulaire :**

Le handover : est la capacité pour un terminal de changer de cellule de manière tout à fait transparente sans coupure de communication.

Roaming : permet à un abonné de téléphoner même dans un pays étranger à l'autre sans changer son terminal, ni son abonnement, et cela peut se faire avec accords entre les opérateurs de tous ces pays pour fournir les services voulus (zone roaming).



Figure I-1 Exemple d'un réseau cellulaire

I.2.2 Un réseau sans fil ad hoc ou WANET (Wireless Ad Hoc Network) ou MANET (4) :

Est un type de réseau sans fil est formé par un ensemble d'hôtes qui s'organisent seuls de manière décentralisée (n'a pas de point unique de contrôle, chacun avec un certain degré de contrôle et travailleront habituellement ensemble pour le bénéfice de l'ensemble du réseau)(5) communiquent directement entre eux, par exemple si l'ordinateur portable veut envoyer un message au Tablet PC, il ne va pas devoir contacter systématiquement un point d'accès, mais grâce à un protocole de routage il va déterminer une route valide.

Il est sans infrastructure, il ne possède pas des routeurs comme les réseaux filaires ou des points d'accès comme les réseaux cellulaires, le choix du nœud qui va transmettre les données est désigné dynamiquement ainsi que les nœuds sont libres de se déplacer.

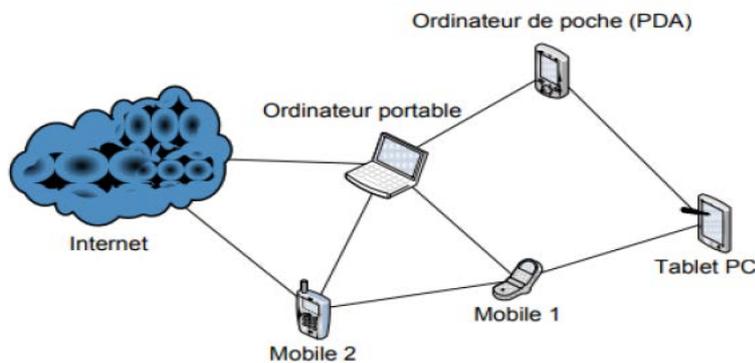


Figure I-2 L'exemple d'un réseau ad hoc

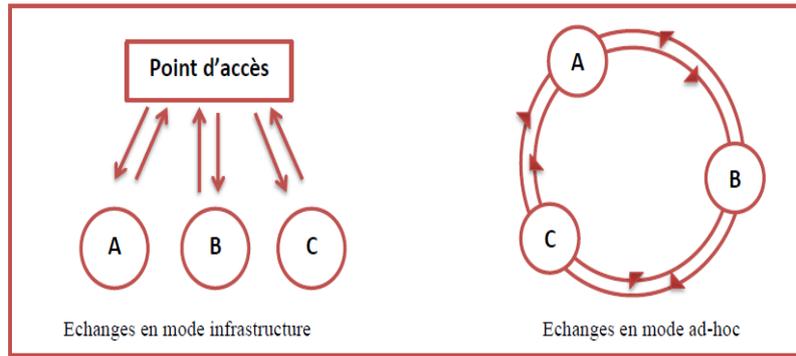


Figure I-3 La différence entre l'échange en mode infrastructure et en mode ad-hoc

I.2.3 Les Réseaux de capteurs sans fil :

- *Definition:*

Les réseaux de senseurs ou Wireless Sensor Network (WSNs) est un type spécial de réseau ad-hoc(4), défini par un nombre important de nœuds capteurs (6) déployés à l'intérieur (ou tout près) du phénomène à observer appelée zone d'intérêt, pour récolter des données(7). Les capteurs utilisent une communication sans fil grâce aux ondes radio (Wifi ou Zig Bee) avec d'autres capteurs proches, puis acheminer les données captées vers la station de base (sink)(8).

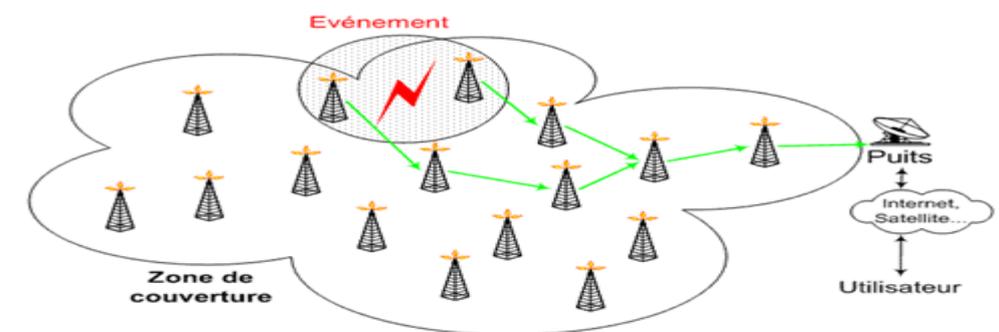


Figure I-4 Réseaux de capteurs sans fil

I.3 Comparaison entre les réseaux de capteurs et réseaux ad-hoc (9)(10):

Réseaux de capteurs sans fil	Réseaux Ad-hoc
Objectif bien ciblé	Objectif général en communication
Nœuds en collaboration	Chaque nœud a son propre objectif
Très grand nombre de nœuds	Peu de nœuds
Energie comme facteur déterminant	Débit majeur
Communication broadcast « one to many »	Communication point à point«any to any»
Les nœuds capteurs n'ayant pas tous un identificateur ID à cause du très grand nombre de senseurs.	Chaque nœud a son propre ID
Les nœuds interagissent avec l'environnement.	Les nœuds interagissent directement avec l'utilisateur.

Tableau I-1 Comparaison entre RSCF et A-hoc

I.4 Présentation d'un nœud capteur :

I.4.1 Définition d'un capteur :

Un capteur est un petit dispositif physique doté d'une batterie limitée qui permet de collecter les données physiques(6) (température, lumière, pression, humidité, ...etc.) sur l'état de l'environnement ensuite calculer des informations à l'aide des valeurs collectées pour les acheminer ensuite vers d'autres capteurs pour effectuer les communications sans fils par ondes radio jusqu'à l'arriver au sink puis vers l'utilisateur final.

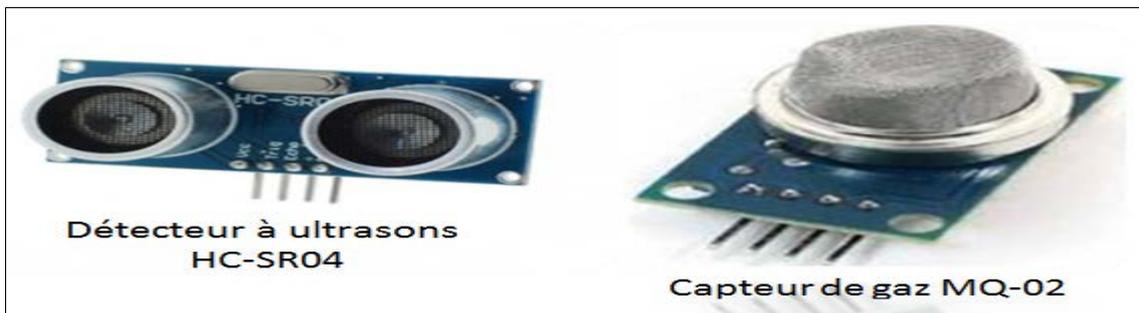


Figure I-5 Les différents capteurs

I.4.2 Caractéristiques d'un capteur (11):

- **Sensibilité:** Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.
- **Précision:** Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie
- **Rapidité:** le temps de réaction d'un capteur, elle est liée à la bande passante.
- **Résolution:** Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur.
- **Etendue de mesure:** Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur.

I.4.3 Zone de couverture :

Les capteurs fonctionnent avec un modèle à seuil, c'est à dire qu'un capteur possède deux zones: une zone de perception (sensation ou captage) (SR) et une zone de communication (CR)(9). On considère que ces zones sont représentées par deux cercles qui ont pour centre le capteur comme montrer par la figure ci-après :

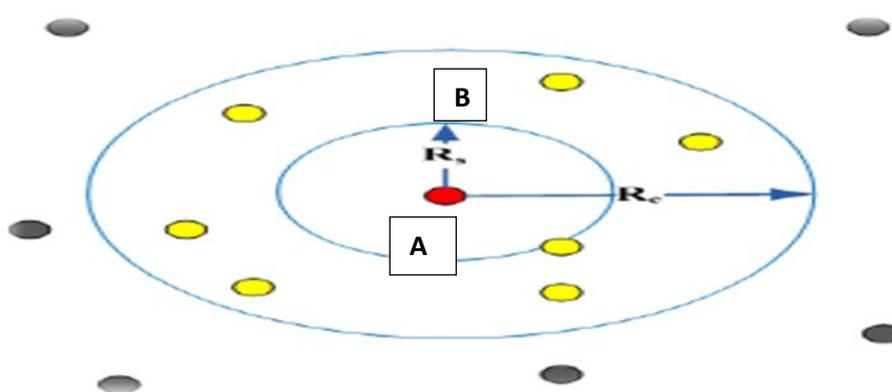


Figure I-6 Rayon de communication CR et de sensation d'un capteur SR(9)

La figure 1-6 montre les zones définies par les deux rayons pour le capteur A. La zone de communication est la zone où le capteur A peut communiquer avec les autres capteurs (le capteur B). D'autre part, la zone de sensation est la zone où le capteur (le capteur A) peut capter l'événement.

En influant sur le rapport entre le rayon du SR et le rayon du CR, on va modifier les contraintes pour ne pas gaspiller l'énergie, les capteurs actifs qui fonctionnent inutilement vont se mettre en veille. Ce mécanisme va permettre d'augmenter la durée de vie du réseau.

Les zones CR et SR représentent la zone de couverture d'un capteur. Pour qu'une zone soit complètement couverte, il faut que la densité de capteurs soit suffisante, donc $CR \geq 2SR$.

Ainsi, une meilleure couverture est nécessaire dans les systèmes robustes pour couvrir une zone ou un cible, pour ça il existe le concept de k-couverture, si une zone est couverte par un capteur, alors le RCSF offre 1-couverture. Si chaque point de la zone est couvert par au moins k capteurs, donc le RCSF assurent k-couverture.

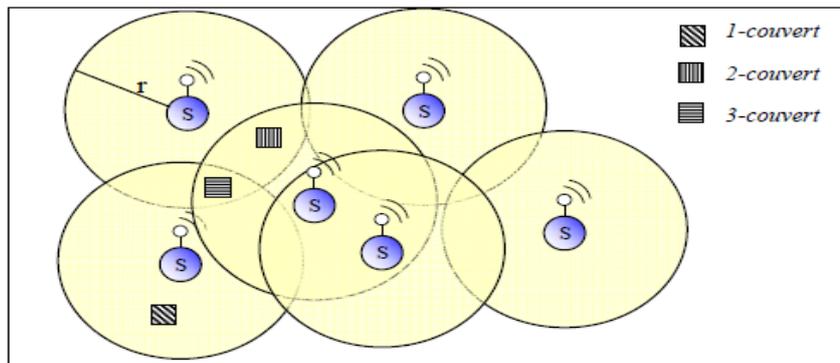


Figure I-7 Notion de k-couverture

I.5 Les Modes de communication de RCSF :

Il existe différents typessont :

- **Unicast** : Ce type de communication est utilisé pour échanger des informations entre deux nœuds sur le réseau c'est-à-dire point à point.

- **Broadcast**: ou diffusion, la station de base ou « puits » transmet des informations vers tous les nœuds du réseau. Ces informations peuvent être des requêtes de données, des mises à jour de programmes ou des paquets de contrôle, le message envoyé atteindra tous les nœuds du réseau.
- **Multicast** : Ou multipoints 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 », le nœud appelé « Cluster-head » s'intéresse à communiquer avec un groupe de capteurs.

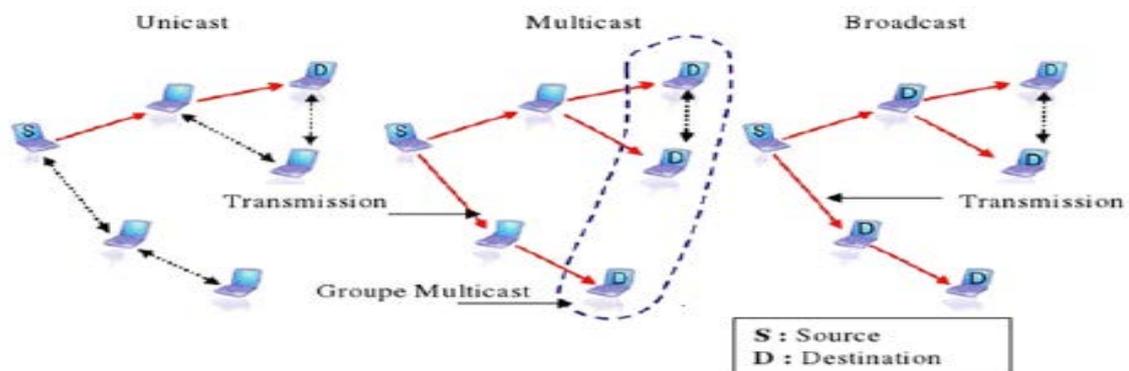


Figure I-8 Quelques modes de communication

I.6 Facteurs de conception dans un réseau de capteurs sans fil :

Sont des facteurs qui influencent sur la conception et la mise en place des RCSFs, utilisés comme guide à la conception d'un protocole ou d'algorithmes pour les réseaux de capteurs(12), parmi lesquels:

I.6.1 Consommation d'énergie:

Le nœud capteur nécessite de l'énergie qui est consommée par ces différentes unités(13) afin de réaliser les tâches de captage, traitement de données et communication pour la réorganisation du réseau ainsi que le changement de topologie, donc il faut l'économiser parce que la recharge des batteries est souvent difficile surtout lorsque la zone de captage est hostile (14)(15).

I.6.2 Tolérance aux pannes:

Quelques nœuds capteurs peuvent tomber en panne à cause de l'absence d'énergie, ou ont subi un dommage physique ou la présence d'obstacles dans les

environnements hostiles. La tolérance aux fautes est la possibilité de soutenir les fonctionnalités du réseau de senseurs sans interruption malgré la présence des nœuds senseurs défaillants(16).

I.6.3 Topologie de réseau :

Le déploiement d'un grand nombre de nœuds nécessite une mise à jour de la topologie. Cette mise à jour consiste en trois phases(16) :

- **Pré-déploiement et déploiement :**

Les nœuds capteurs peuvent être soit dispersés en mode déterministe ou bien en mode auto-organisé :

-Dans le déploiement déterministe, les nœuds sont placés manuellement d'une manière prédéterminée.

-Quand le déploiement du réseau est auto-organisé, les nœuds sont dispersés aléatoirement dans la région du phénomène à surveiller.

- **post-déploiement :**(les capteurs peuvent bouger, ne plus fonctionner,...).

C'est la phase après le déploiement, la topologie du réseau doit parfois être changée après le déploiement de capteurs.

Certains nœuds capteurs peuvent être bloqués ou tomber en panne à cause :

-**Manque d'énergie:** l'épuisement de la batterie cause l'arrêt du capteur.

-**Sécurité physique:** la destruction physique accidentelle ou intentionnelle par un ennemi peut être une cause de panne(17).

-**Communications radios:** la nature vulnérable de transmission radio, la présence d'obstacles dans les environnements hostiles ainsi que les interférences électriques peuvent être la source d'une panne lors du transfert des données.

- **Redéploiement de nœuds additionnels :**

C'est l'ajout des nœuds supplémentaires afin de remplacer les nœuds qui tombent en pannes.

I.6.4 L'extensibilité (passage à l'échelle ou la Scalabilité) :

Le nombre des nœuds déployés dans un réseau de capteurs peut être de l'ordre de centaine ou de milliers(18) selon l'application. Un protocole de routage doit fonctionner efficacement malgré le nombre important de nœuds capteurs déployés, les protocoles de routage ne devraient pas souffrir d'une dégradation de performances dans le cas d'endommagement de quelques nœuds et garantir que la station de base soit équipée de suffisamment de mémoire pour stocker les informations reçues de ce nombre de capteurs élevé(14).

I.6.5 Sécurité limitée :

Les réseaux WSNs sont plus vulnérables aux attaques que les réseaux filaires classiques. Car Les données sont transmises dans l'air, l'attaquant peut écouter les messages échangés(19) , aussi l'application d'un bruit sur le canal peut rendre les capteurs incapables de transmettre les messages.

La sécurisation de ce type de réseau reste un problème difficile due à des contraintes comme les ressources limitées où l'utilisation des algorithmes de sécurité nécessite des ressources de mémoires pour la mémorisation du code et des données, des ressources en énergie et en calcul.

I.6.6 Les médias de transmission :

Dans les RCSFs, les nœuds sont reliés par une architecture sans fil, on utilise le plus souvent l'infrarouge, Bluetooth et les communications radio Zig Bee (20) grâce à leur faible coût qui ne demandent pas beaucoup d'énergie parce que les RCSFs sont caractérisés par leurs bandes passantes limitées qui nécessitent un débit faible de quelques dizaines de Kb/s(9).

I.7 Anatomie d'un capteur :

Un capteur est composé de deux parties(7):

I.7.1 Contraintes hardware :

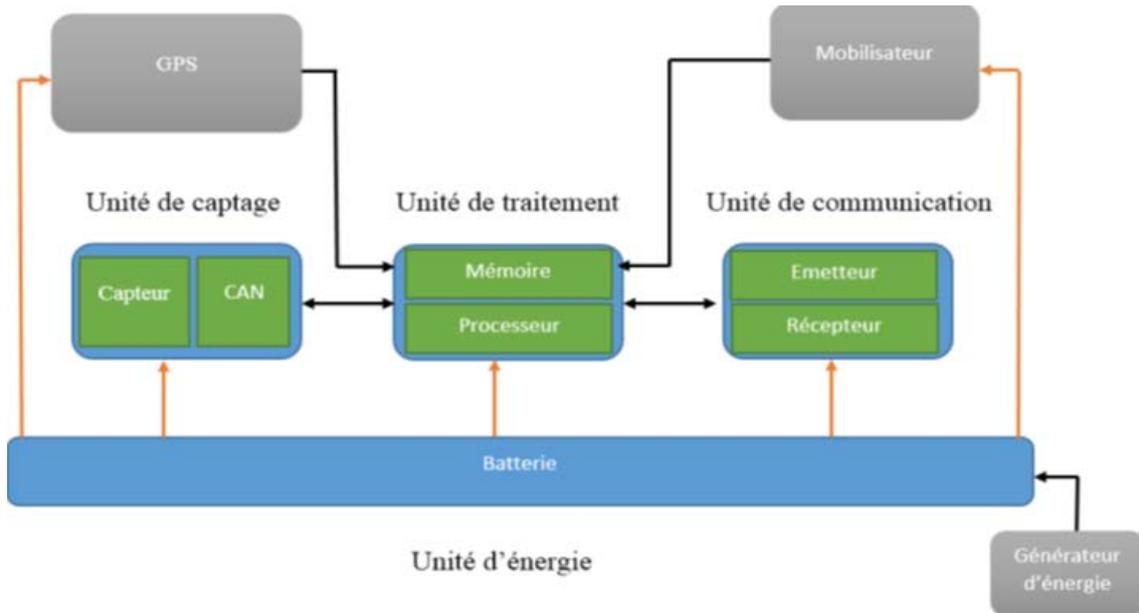


Figure I-9 Composants de base d'un capteur

- *L'unité de captage (Sensing unit):*

La fonction principale de l'unité de captage est de capturer ou mesurer les données physiques. Elle est composée de deux [02] sous unités :

- Une sous unité de détection (capteur): permet de prendre des mesures physique basés sur le phénomène observé (pression, température, pollution, son, radiation...) sous formes des signaux analogiques.

- Une sous unité ADC (Analog Digital Converter): un convertisseur analogique numérique qui transforme le signal analogique en données numériques et les transmet à l'unité de traitement.

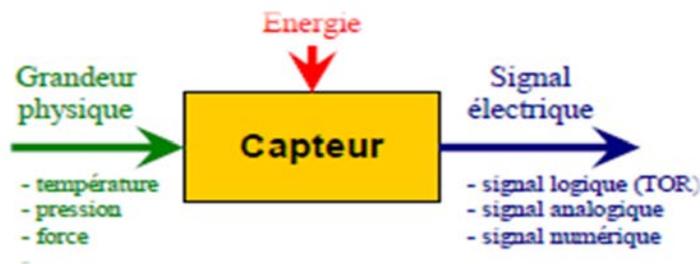


Figure I-10 La transformation d'une grandeur physique au signal numérique

- **Unité de traitement (Processing Unit):**

Elle possède deux interfaces l'une avec l'unité de détection et l'autre avec l'unité de communication, lorsque l'information arrive de l'unité de détection elle effectue une analyse sur ces données (si nécessaire) puis il l'envoi à l'unité de communication, elle est composée de deux sous unités :

-**Processeur embarqué** :Le rôle du processeur est d'ordonnancer les tâches, traiter les données et contrôler les autres composants de senseurs(6).

-**Unité de stockage (la mémoire)** : inclut la mémoire de programme ou travail (dont les instructions sont exécutées par le processeur) et la mémoire de données (réservée aux données pour conserver les données fournies par l'unité de captage et d'autres données locales). La taille de cette mémoire est souvent limitée(6).

- **L'unité de communication (Transceiver Unit):**

Elle est composée d'un émetteur/ récepteur responsable de l'échange de données entre les nœuds via un support de communication sans fil pour relier le nœud au réseau en utilisant la radiofréquence(RF), le laser et l'infrarouge. Sa consommation d'énergie augmentera rapidement lors de la transmission ou de réception(21).

- **Unité d'énergie(batterie) (Power Unit):**

-Permet d'alimenter le reste des composants et partager l'énergie pour minimiser les dépenses énergétiques (par la mise en veille des composants inutiles, par exemple).

-Elle est souvent interchangeable.

-Elle effectue des opérations de contrôle de l'énergie restante et mesure la durée de vie du capteur.

On peut également avoir d'autres unités selon l'application: une unité de localisation, un générateur d'énergie et une unité assurant la mobilité.

- **Unité de localisation:**

La plupart des techniques de routage des réseaux de senseurs nécessitent la connaissance de la localisation avec une grande précision [GPS]Ex: la poursuite d'une cible.

- **L'unité assurant la mobilité :**

Il est nécessaire pour déplacer le nœud senseur assigné à une tâche (poursuite d'une cible par exemple).

- **Générateur d'énergie :**

Cette unité permet de recharger l'unité d'énergie à partir de l'environnement observé telles que les cellules solaires(16), afin d'étendre la durée de vie totale du réseau.

1.7.2 Contraintes software :

-constitue le système d'exploitation et les applications embarquées sur le capteur.

-Le SE le plus utilisée est TinyOs(18) sa conception est faite en NesC.

TinyOS (Tiny Operating System):

Est un système d'exploitation open-source, il a été développé par des chercheurs à l'université de Berkeley, il est principalement dédié aux systèmes embarqués et les systèmes à faibles ressources tels que les capteurs sans fil (9).

Dans la bibliothèque de TinyOS on retrouve des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données spécifiques pour l'application à laquelle il sera destiné par exemple la température l'humidité, etc. Il est aussi un OS le plus adéquat pour les applications où l'optimisation de la consommation d'énergie est très nécessaire.

1.8 Les domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil :

La variation des domaines d'application des RCSFs(1)et les ressources limitées permet de développer un protocole de routage dépend de l'architecture et des

fonctionnalités du système adéquat pour chaque applications, parmi elles nous citons :

I.8.1 Applications militaires :

Les dispositifs capteurs peuvent être déployés dans un champ de bataille(22), dans une zone de surveillance de l'ennemi ou détecter la présence d'armes nucléaires(3) etc.

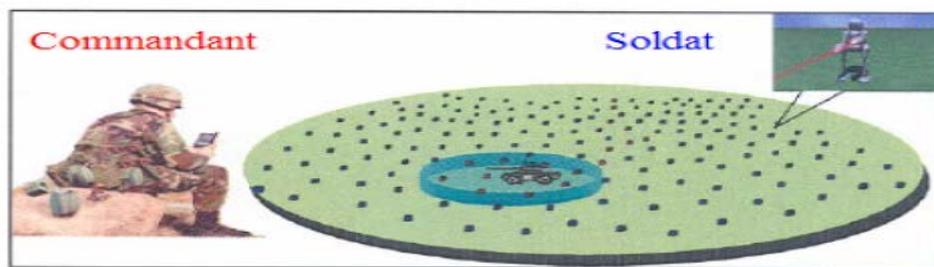


Figure I-11 Interaction entre un responsable militaire et ses soldats

I.8.2 Applications environnementales :

Des micro-capteurs peuvent être dispersés dans la nature, zone à accès difficile afin de détecter des catastrophes naturelles (inondations, séismes, etc.)(18), détecter des incendies dans les forêts, surveiller la qualité d'air ou d'eau, aussi sur les sites industriels, les centrales nucléaires ou dans les pétroliers, des capteurs peuvent être déployés pour détecter des fuites de produits toxiques (gaz, produits chimiques, pétrole, etc.) afin de prendre les mesures nécessaires.



Figure I-12 L'application de RCSF en domaine surveillance environnement

I.8.3 Applications médicales :

Le champ de contrôle de santé (Health monitoring) représente un grand marché pour les réseaux de capteurs sans fil qui a tendance à croître très rapidement(23).

L'existence des micro-caméras pour transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain avec une autonomie de 24 heures, aussi des micro-capteurs vidéo peuvent être implantés dans le corps humain pour contrôler les problèmes médicaux (le cancer, fréquences cardiaques,...etc.), surveiller les patients et l'avancement de leurs états au sein de l'établissement ou même ailleurs(24).

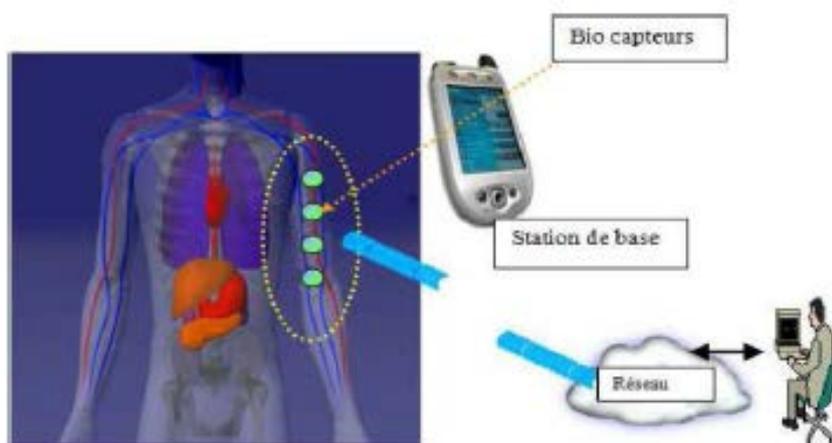


Figure I-13 Ensemble de capteurs dans un corps humain

I.8.4 Applications domestiques :

Avec le développement technologique, les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils électroménagers (25)(les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs, les téléviseurs, etc.). Ces capteurs embarqués peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe via Internet pour permettre à un utilisateur de contrôler les appareils domestiques localement ou à distance(8).

On place les capteurs au plafond ou dans le mur pour économiser de l'énergie en gérant l'éclairage ou le chauffage en fonction de la localisation des personnes par exemple. Il existe plusieurs projets comme Smart Parking, Smart cities pour améliorer la qualité de vie(21).

**Figure I-14** Les Smart Parking**I.9 Conclusion :**

Nous avons essayé à travers ce chapitre de décrire et également définir un réseau ad-hoc mais aussi les réseaux de capteurs sans fil en particulier et leurs caractéristiques ainsi que leurs facteurs de conception et leurs principaux domaines d'application, Cette mise au point nous a permis de déduire que les protocoles de routage jouent un rôle déterminant et crucial dans la conception des RCSFs. Dans la suite, nous présenterons plusieurs protocoles de routage utilisés dans les RCSF.

II Les protocoles de Routage pour la consommation d'énergie dans les RCSF

II.1 Introduction :

L'objectif d'un RCSF n'est pas seulement la communication elle-même, mais il est soumis à des fortes contraintes énergétiques, donc ici le routage est une méthode d'acheminement des informations vers une destination donnée à travers un réseau de connexion donné suivant une taxonomie des protocoles.

Le problème de routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau, suivant certains critères de performances spécifiques aux RCSFs.

Dans ce chapitre, nous allons déterminer la manière dont les nœuds sont interrogés, on décrit les métriques pour la consommation d'énergie, ainsi que la classification des protocoles de routage pour les RCSFs ensuite nous présentons les différentes méthodes d'établissement de routes.

II.2 Architecture de communication (pile protocolaire) :

Comme tous les types de réseaux, les RCSFs utilisent une architecture de communication en couches, ce sont les cinq couches du modèle OSI. Chaque couche a son propre rôle et ses propres protocoles pour atteindre son objectif.

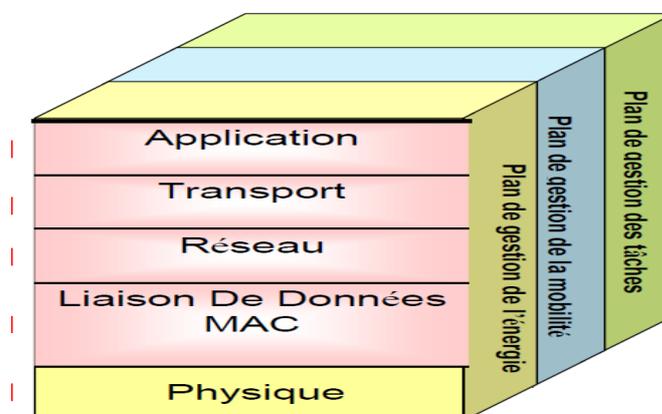


Figure II-1 Pile protocolaire dans les RCSFs

Ces plans de gestion d'énergie, de mobilité et de tâches aident les nœuds capteurs à coordonner les tâches et minimiser la consommation d'énergie.

II.2.1 Couche application:

Elle fournit des mécanismes pour permettre à l'utilisateur d'interagir avec le réseau à travers des interfaces, par l'intermédiaire d'un réseau étendu (Internet), pour la création et la diffusion des requêtes et un moyen d'interpréter les réponses reçues.

II.2.2 Couche transport:

Elle est responsable de l'acheminement des données, leur découpage en paquets, contrôle de flux, et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission. Cette couche est nécessaire pour que le système accède à l'internet ou à d'autres réseaux externes.

II.2.3 Couche réseau:

Elle s'occupe du routage des données fournies par la couche transport.

Elle établit les routes entre les nœuds capteurs et le nœud puits et sélectionne le meilleur chemin en termes d'énergie, délai de transmission, débit, etc.

Parmi les protocoles conçus au niveau de cette couche: LEACH (LowEnergyAdaptative ClusteringHierarchy), SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation), etc.

II.2.4 Couche liaison de données

Spécifie comment les données sont expédiées entre deux nœuds dans une distance d'un saut. Elle est responsable du multiplexage des données, du contrôle d'erreurs ; elle assure la liaison point à point et multipoints dans un réseau de communication.

II.2.5 Couche physique:

Cette couche est responsable: du canal de transmission, de la sélection de fréquences, de la génération des ondes porteuses, de la détection du signal, de la modulation/démodulation des informations.

II.2.6 Plan de gestion d'énergie:

Le senseur met son Emetteur/Récepteur en mode Off après avoir reçu un message d'un de ses voisins; cela permet d'éviter de recevoir des messages dupliqués.

Quand le niveau d'énergie d'un nœud senseur est bas, le senseur informe ses voisins par un broadcast que son niveau d'énergie est bas et donc il ne peut pas participer aux routages. Le reste de l'énergie est réservé pour la détection.

II.2.7 Plan de gestion de la mobilité:

Un tel système doit être capable de détecter et enregistrer tous les mouvements des nœuds capteurs afin de maintenir des informations sur leurs localisations et d'entretenir continuellement une route vers l'utilisateur final.

II.2.8 Plan de gestion des tâches:

Garantie un travail coopératif et efficace des nœuds capteurs en termes de la consommation énergétique, ordonnance les événements captés, et les tâches détectées dans une zone de capture spécifique.

Par conséquent, les nœuds capteurs qui appartiennent à la même zone de capture ne sont pas obligés d'effectuer les tâches de capture en même temps ; quelques nœuds capteurs peuvent exécuter des tâches plus que les autres en fonction de leurs niveaux d'énergie(26).

II.3 Paradigmes de communication :

Détermine la manière dont les nœuds sont interrogés.

II.3.1 Centré-nœuds :

Ce modèle est utilisé dans les réseaux où il est important de connaître les nœuds communicants; les communications se basent sur l'identification des nœuds participants, qui se fait à l'aide d'adresses IP.

II.3.2 Centré-données :

Les communicants sont identifiés par leurs données, et donc tout le système (routage, requête . . .) doit être régi par cette propriété, le système peut être vu comme une base de données distribuée où les nœuds forment des tables, alimentées par les données captées.

II.3.3 Basé-localisation :

Dans cette approche, les positions des nœuds représentent le moyen principal d'adressage et de routage. Dans certaines applications, il est plus intéressant d'interroger le système en utilisant les positions des nœuds, que leurs adresses IP. Dans ce cas, le routage s'effectue grâce à des techniques géométriques afin d'acheminer l'information d'une zone géographique vers une autre.

II.4 Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie :

La consommation d'énergie dépend de plusieurs facteurs sont :

II.4.1 Technologie de communication :

Il existe plusieurs types de technologie pour les communications sans fil avec un coût d'énergie différent, par exemple Wi-Fi (802.11), Bluetooth (802.15.1), ZigBee (802.15.4).

II.4.2 Etat du module radio :

Le module radio est le composant de communication du nœud capteur qui consomme plus d'énergie.

- Etat actif: le module radio est allumé mais n'est pas utilisé, il provoque une perte d'énergie qui suit l'écoute de canal radio de transmission.

- Etat sommeil : cet état est appliqué sur le canal radio pour éviter les pertes d'énergie.
- Etat transmission: la radio transmet un paquet.
- Etat réception: la radio reçoit un paquet.

II.4.3 Accès au medium de transmission :

Les différentes causes de la perte d'énergie au niveau de la couche MAC sont :

- **Retransmission :**

Les nœuds capteurs partagent un seul canal radio de transmission qui cause des collisions et bien sûr une perte d'information qui provoque la retransmission de données, ensuite une perte d'énergie(6).

- **Ecoute active (idle listening) :**

Cet état est utilisé pour une réception qui n'est pas reçue à cause de l'absence de donnée qui n'est pas destinée pour le nœud(18), cette écoute engendre aussi une perte d'énergie(27).

- **Surécoute (overhearing) :**

Cet état se produit lorsqu'un nœud vient de recevoir un paquet qui n'appartient pas à lui(27), qui conduit à une perte additionnelle d'énergie à cause de l'implication des autres capteurs dans la réception des données(6).

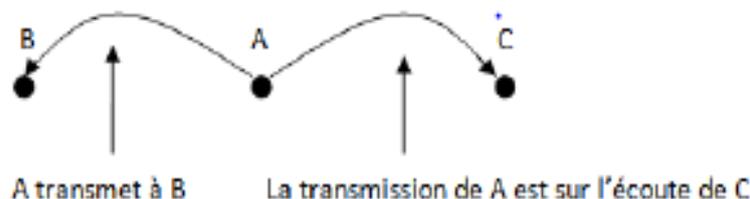


Figure II-2 La surécoute dans une transmission Surcharge (overhead)

Dans cet état le nœud perd pas mal d'énergie due aux messages de contrôle(27)(6) comme RTS/CTS (Request to Send/Clear to send).

- **Surémission (overemitting) :**

Ce phénomène consomme inutilement de l'énergie, car le nœud envoie une donnée vers un autre nœud qui ne peut pas la recevoir(6).

II.4.4 Modèle de propagation radio :

Ce modèle radio représente la puissance moyenne reçue du signal radio à une distance donnée d'un émetteur, généralement elle rencontre plusieurs obstacles comme la dispersion par divers objets.

II.5 Classification des protocoles de routages pour les RCSF :

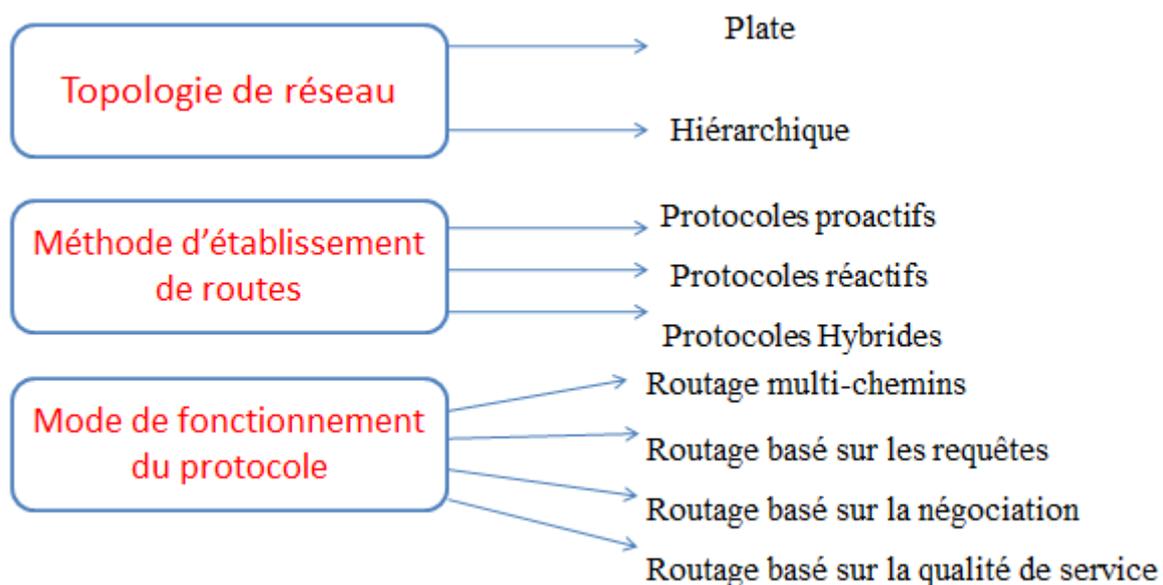


Figure II-3 Classification des protocoles de routages pour les RCSF

II.5.1 Classification selon la méthode d'établissement des routes :

Dans les réseaux de capteurs chaque nœud qui capte une donnée doit envoyer cette information au nœud puits le plus vite possible avec une faible consommation d'énergie, c'est pour ça qu'il est nécessaire de faire passer les données par d'autres nœuds voisins qui se chargeront de les acheminer à la destination.

- **Protocole proactif:**

Sont des protocoles de routage ad hoc non hiérarchiques adaptés aux RCSF.

L'établissement des routes se fait à l'avance; en se basant sur l'échange périodique des tables de routage.

Chaque nœud met à jour régulièrement les données de routage de manière à obtenir le plus court chemin vers tous les nœuds du réseau (28).

Les deux principales méthodes utilisées dans cette classe sont:

- La méthode Etat de Lien ("Link State") :Les nœuds ne s'échangent pas les routes mais leurs liens et leurs états (actif, inactif, bande passante, ...etc).
- La méthode du Vecteur de Distance ("Distance Vector") :Les nœuds s'échangent régulièrement leurs informations concernant les routes qu'ils connaissent.

Parmi les protocoles de routage proactifs les plus connus on citera le DSDV, OLSR.

Le protocole de routage DSDV (Destination Sequence Distance Vector) :

Est un protocole proactif unicast mobile qui est basé sur La méthode du Vecteur de Distance, l'algorithme utilisé est Bellman-Ford(29). Dans les tables de routage de DSDV pour chaque nœud on trouve :

- Toutes les destinations possibles.
- Le nombre de nœuds (ou de sauts) nécessaire pour atteindre la destination.
- Le numéro de séquences (SN : sequencenumber) qui correspond à un nœud destinataire.

Les numéros de séquence sont utilisés dans DSDV pour distinguer les anciennes et les nouvelles routes et pour éviter la formation de boucles de parcours(30) après un changement dans la topologie du réseau. Chaque nœud transmet périodiquement des mises à jour à ses voisins(31).

Deux types de paquets de mise à jour sont utilisés : les "*fulls dump*", contenant toutes les informations, et des paquets plus petits, ne contenant que les informations ayant changé depuis le dernier full dump(28).

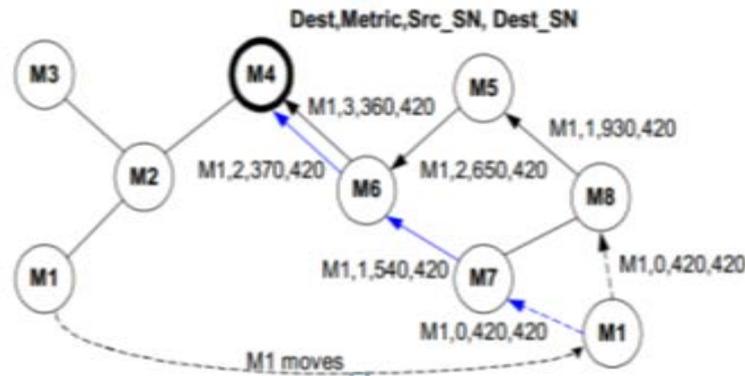


Figure II-4 Exemple d'échange DSDV

Table de routage de M4

Avant déplacement de M1 :

Destination	NextHop	Metric	Dest_Sn
M1	M2	2	410
M2	M2	1	780
M3	M2	2	250

Après déplacement de M1 :

Destination	NextHop	Metric	Dest_Sn
M1	M6	3	420
M2	M2	1	780
M3	M2	2	250

Tableau II-1 Les numéros de séquence après des mises à jour dans DSDV

L'avantage de ces protocoles réside dans la disponibilité des informations de routage pour router un paquet vers n'importe quelle destination.

L'inconvénient majeur est le coût de maintenance des connaissances sur la topologie et de routage dû à l'envoi périodique des messages. Ceci génère une consommation continue de la bande passante.

- *Protocoles réactifs :*

La découverte de route se fait à la demande, lorsqu'un nœud veut transmettre des données vers un ou plusieurs nœuds, il est obligé d'initier un processus appelé « processus de découverte de la route ».

Le plus connu de ces protocoles est AODV(28).

Le protocole de routage AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) :

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(32).

Quand un nœud de transit envoie la requête à un voisin, il sauvegarde aussi l'identificateur du nœud dans la table de routage pour atteindre la source qui aenvoyé RREQ(**route request**). Une fois que le message atteint la destination, elle génère une réponse de type Route Reply (RREP)(29) comme le montre la figure suivante.

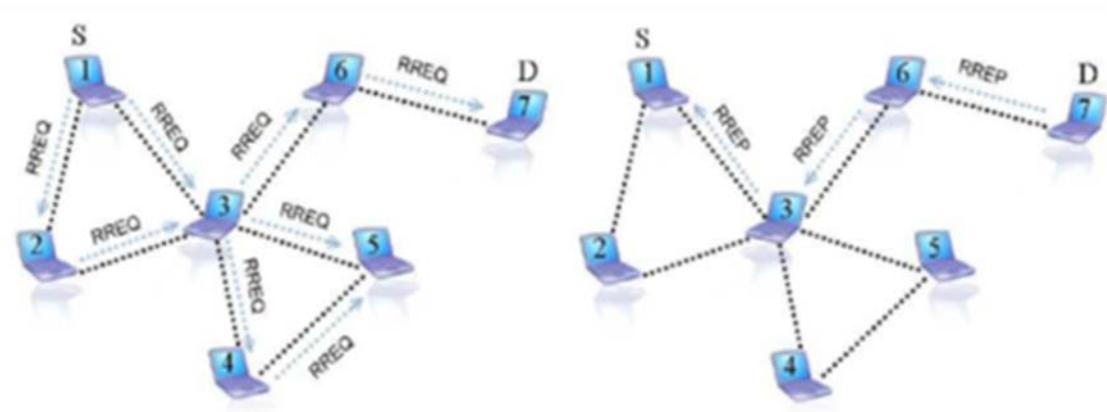


Figure II-5 Les deux requêtes RREQ et RREP en AODV

L'avantage de ce type de protocole : Les nœuds ne conservent pratiquement aucune information sur la topologie globale du réseau : seules les informations sur les routes actives sont stockées, pour gagner l'espace mémoire.

L'inconvénient majeur :

La recherche des chemins peut dégrader les performances des applications interactives par exemple en termes de délai d'établissement de la route.

Protocole hybride :

Ces protocoles exploitent les avantages des deux modes évoqués précédemment.

Ils fonctionnent selon le mode proactif pour garder la connaissance locale de la topologie et le mode réactif pour les nœuds lointains.

Il réduit considérablement la taille des tables de routage ainsi que les délais d'établissement de routes.

II.5.2 Classification selon le mode de fonctionnement de protocole :

- ***Routage multi-chemins (Multi-path based routing):***

Cette technique de routage garantit l'existence de plusieurs chemins fiables pour la transmission des données entre les capteurs et le sink quand le premier chemin est défaillant(33), il augmente la tolérance aux fautes en fournissant des chemins alternatifs ce qui offre une reprise rapide du transfert de données suite à une panne(18).

Parmi les protocoles basés sur le routage multi chemins les plus connus on citera DD, EAR.

Avantage :

L'existence de plusieurs routes entre la source et la destination.

Inconvénient :

La perte d'énergie, due à l'envoi des messages périodiques pour maintenir les chemins alternatifs.

- ***Routage basé sur les requêtes (Request based routing):***

Le nœud puits génère une requête de données propagée à travers le réseau afin d'interroger les nœuds capteurs. Le nœud qui détient les données requises doit répondre au nœud demandeur, en envoyant la donnée à travers le chemin inverse de la requête.

Avantage :

Réduire la charge du réseau car le chemin de la donnée est le même quand le chemin de la requête en sens inverse.

Inconvénient :

Le problème peut apparaître quand le chemin inverse où la donnée circule est occupé pour le moment.

- ***Routage basé sur la négociation (Negociationbasedrouting) :***

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.

Avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient entre eux leurs données en utilisant des messages de négociation afin d'éliminer la transmission des données redondantes. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises ce qui élimine la redondance des données et économise l'énergie(18).

Ce mécanisme de négociation entre les nœuds produit des retards non tolérables pour délivrer les données au nœud puits. D'autre part, les messages de contrôle échangés entre les nœuds causent une charge supplémentaire dans le réseau.

Le protocole suivant : SPIN est l'exemple de protocole Routage basé sur la négociation.

Avantage :

- La négociation entre les nœuds permet à eux de prendre des décisions adéquates suivant leurs ressources énergétiques disponibles.

Inconvénient :

- L'échange de messages de contrôle entre les nœuds cause la congestion du réseau ainsi qu'une perte additionnelle d'énergie.

- ***Routage basé sur la qualité de service(Quality of Service) :***

Les protocoles de routage basés-QoS dans les réseaux de capteurs essaient de répondre à quelques exigences de qualité de service (délai de transmission ou niveau de fiabilité(34)) pendant le routage des données(29), par exemple SAR.

Avantage :

- La prise en compte des délais de transmissions rend le protocole très recommandés à des applications de surveillance (centres nucléaires, monitoring médical, applications militaires, etc.)
- Augmentation du taux d'arrivée des paquets au nœud puits.
- Répartition du trafic, d'une part, en équilibrant la charge en énergie, et d'autre part, en évitant les liens défaillants.

Inconvénient :

- L'approche doit prendre en considération la contrainte d'énergie en parallèle avec les critères de la QOS.
- Pas de prise en compte de la sécurité qui est l'un des critères de la QOS.

II.5.3 Classification selon la topologie de réseau :

- **Protocole plat :**

Tous les nœuds sont identiques en termes de batterie et de complexité du matériel et jouent le même rôle et sont basés sur le principe "centré donnée", excepté le nœud puits qui joue le rôle d'une passerelle.

Une fois que le nombre de nœuds est important, cette topologie devient dure à contrôler.

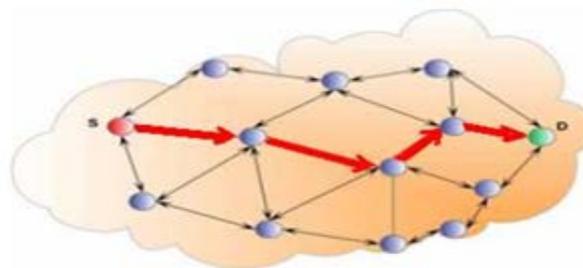


Figure II-6 Routage plat

- **Protocole hiérarchique (Hierarchical routing):**

Afin d'augmenter le passage à l'échelle du système, les topologies hiérarchiques ont été introduites en divisant les nœuds en plusieurs niveaux de responsabilité.

La division du réseau en clusters a été poursuivie dans certaines approches de routage qui utilisent le clustering.

Le clustering est un processus qui permet d'organiser virtuellement les nœuds d'un réseau en plusieurs groupes dits clusters. Chaque cluster est composé d'un nœud chef dit Cluster-Head (CH), ainsi plusieurs nœuds appelés : nœuds membres. Ces nœuds membres d'un cluster transmettent leurs données au cluster-head approprié, qui est principalement responsable de leur envoi à la station de base.

Le protocole LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarch) est un exemple de protocole hiérarchique implémenté dans notre projet.

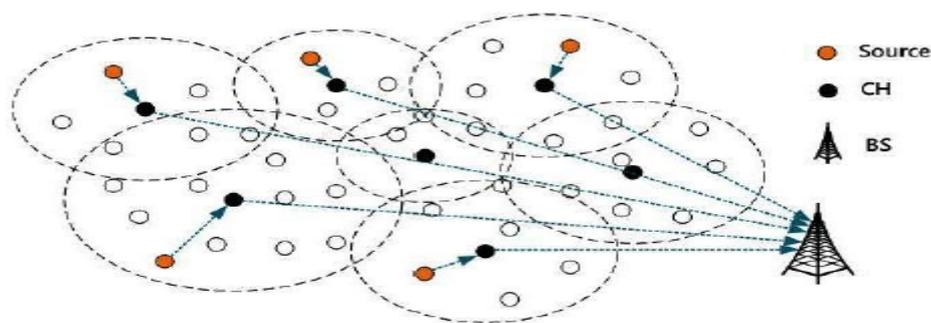


Figure II-7 Architecture du routage hiérarchique

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarch):

LEACH est l'une des premières approches de routage hiérarchiques pour les réseaux de capteurs sans fil basé sur un cluster ou grappe, il est proposé par Heinzelman et al (35).

L'idée est de former des groupes de nœuds capteurs par l'élection des cluster-heads, les transmissions ne seront faites que par des CHs cela suivant un algorithme pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds de réseau, et pour but de réduire la quantité d'informations transmises à la station de base.

II.6 La conservation d'énergie avec cycle d'activité (Duty_Cycle):

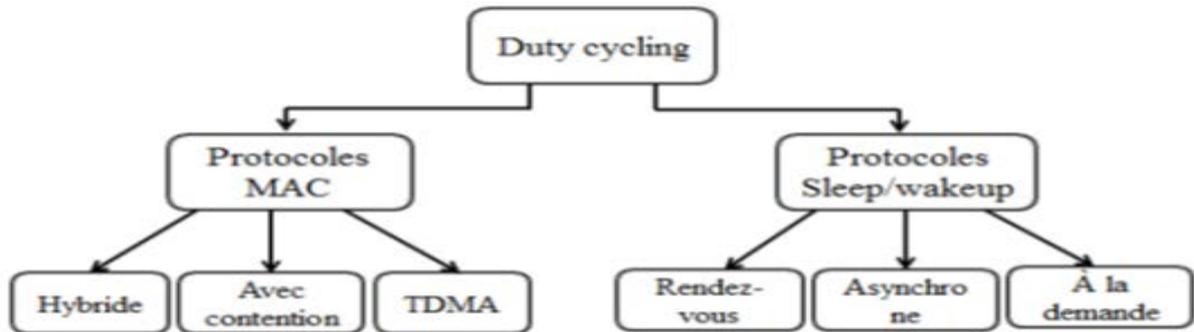


Figure II-8 Approches de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Dans les RCSFs les nœuds coopèrent ensemble pour effectuer les différentes tâches donc Duty-cycle est un algorithme distribué et développé pour organiser les dates de sommeil ou éveil des nœuds voisins(35).

II.6.1 Protocoles Veille/ Réveil (Sleep/Wakeup):

Est un protocole de la couche réseau ou de la couche application, il est défini pour gérer le module radio du nœud, il définit des intervalles de temps pour mettre la radio en mode veille ou réveil, cette technique réduit la consommation d'énergie(13), il est divisé en trois classes.

- *Approches à la demande :*

Le principe est qu'un nœud devrait se réveiller seulement quand un autre nœud veut communiquer avec lui pour éviter de laisser la radio de nœud active sans besoin, ce qui permet d'augmenter la durée de vie du réseau. Ces systèmes utilisent deux radios, une radio à faible débit et à faible consommation pour informer juste le nœud qu'il doit allumer la radio parce que son voisin entraîne d'envoyer un message, et une radio à haut débit et à plus forte consommation, et c'est ici que la communication de données commence la transmission et/ou la réception.

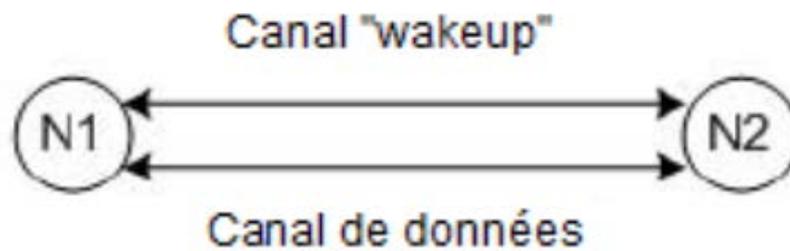


Figure II-9 Schéma de la méthode « Sleep-Wakeup » avec deux antennes

- *Approche de rendez-vous :*

Les nœuds voisins dans ce protocole doivent se réveiller à la fois pour communiquer. Ensuite ils passent à l'état sommeil lorsque le transfert de données est terminé.

Cependant, le rendez-vous des nœuds est difficile à réaliser et coûteuse en termes d'énergie. De plus il engendre des collisions dû au échange de messages entre les nœuds au même temps.

- *Approche asynchrone :*

Dans ce protocole chaque nœud peut mettre la radio en mode actif lorsqu'il veut communiquer avec un autre nœud voisin dans le réseau(36), lorsque le nœud passe de veille au réveil ou vice-versa il n'a pas besoin d'effectuer le transfert des messages avec les autres, mais lorsqu'un nœud capteur reçoit un paquet alors qu'il se trouve en état de veille donc cette situation oblige l'émetteur à effectuer de nouvelles retransmissions pour réussir sa communication.

II.6.2 Protocoles du niveau MAC (Medium Access Control) :

La couche MAC qui partage le support de transmission entre les différents émetteurs désirant accéder au canal. La minimisation de l'énergie dépensée côté MAC peut être atteinte en réduisant le nombre d'émission et/ou réception des messages(6). Le but est de maximiser l'utilisation du canal avec un minimum d'interférences et de collisions(37). Nous distinguons trois catégories.

- *Protocoles MAC reposant sur TDMA :*

Dans ces protocoles le canal est divisé en intervalles de temps, ensuite sont regroupés en trames et chaque trame est composée de slots de temps(38). Il existe des algorithmes d'ordonnancement qui attribuent à chaque nœud un ou plusieurs slots de temps pour effectuer l'émission/réception des données.

TDMA sont efficaces en énergie, puisque chaque nœud sait qu'il doit allumer la radio à un moment égale à ces propre slots pour limiter les problèmes de collisions.

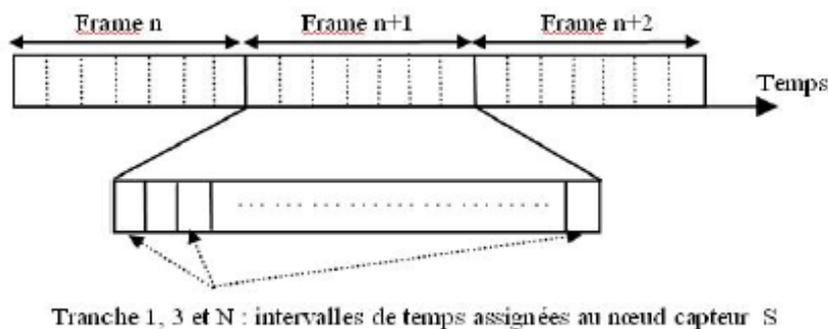


Figure II-10 Trame dans un protocole MAC à base de TDMA (39)

- *Protocoles MAC avec contention (contention-based-protocol) :*

Les protocoles basés sur la contention permettent aux nœuds d'utiliser le canal simultanément avec l'utilisation des structures pour réduire les collisions(18).

Les protocoles basés sur la contention nécessitent un laps de temps réduit mais la dissipation d'énergie est plus grande que les protocoles fondés sur TDMA à cause de la contention et des collisions, par exemple si un récepteur attend une donnée sur sa portée radio mais il existe deux émetteurs transmettant simultanément, donc le récepteur ne réussira à recevoir aucun paquet, la collision provoque des retransmissions, qui sont aussi le résultat d'un terminal caché.

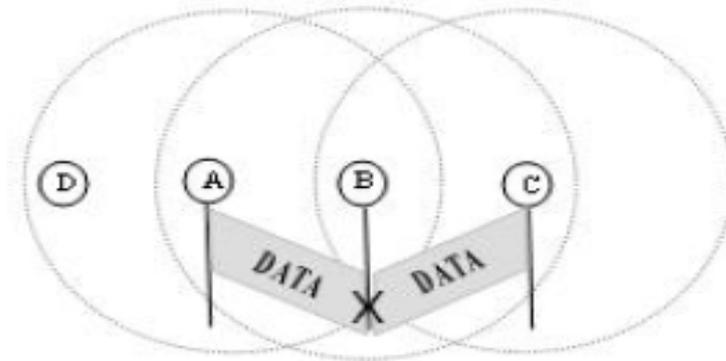


Figure II-11 Scénario du terminal caché

A et B peuvent communiquer entre eux, par contre A et C ne peuvent pas, les paquets transmis par A et C se croisent au niveau du récepteur B. Pour pallier au problème on utilise un mécanisme de porteuse basé sur RTS (Request-To-Send)/CTS (Clear-To-Send).

Un nœud A veut transmettre un paquet donc il envoie un paquet de contrôle RTS après un temps DIFS (Distributed Inter Frame Space). Le récepteur (B) attend un laps de temps SIF (Short Inter Frame Space) pour répondre par un paquet de contrôle CTS qui informe les voisins de B d'un transfert qui va se produire dans très peu de temps pour pouvoir utiliser le canal avant les autres (39).

Le transfert commence par A après une période SIFS, et le récepteur B attend aussi une période SIFS pour envoyer un acquittement ACK (ACKnowledgement) de ce paquet.

Les paquets RTS/CTS ajoutent dans leurs entêtes la durée d'une séquence DATA/ACK, pour que les voisins mettent à jour leurs NAV (Network Allocation Vector) et assurent de ne pas utiliser le canal dans cette période. Parmi ces protocoles S-MAC.

III Proposition d'une amélioration du protocole LEACH pour la conservation d'énergie

III.1 Introduction :

Prolonger la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF) est un défi fondamental dans leur conception, du fait qu'ils ont une alimentation limitée et irremplaçable. L'approche hiérarchique est l'une des techniques utilisées pour économiser l'énergie dépensée et maximiser la durée de vie du réseau.

Dans ce chapitre nous allons expliquer une version d'un protocole hiérarchique LEACH (LowEnergy Adaptive ClusteringHierarch) basé sur le clustering. Ce protocole standard est considéré parmi les meilleurs protocoles de routage utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), qui sont performants en termes d'énergie.

LEACH a été une source d'inspiration pour implémenter une version modifiée pour mieux atteindre notre objectif qui est de prolonger la durée de vie du réseau (lifetime) en préservant l'énergie restante.

III.2 Principaux composants d'une architecture en cluster:

Les architectures en clusters sont largement utilisées dans les RCSF pour leur capacité de passage à l'échelle. Cette structuration doit permettre une utilisation plus efficace des ressources rares du réseau telles que l'énergie et la bande passante, pour bien comprendre l'avantage des protocoles hiérarchique basé sur le clustering on doit d'abord présenter ces composants.

III.2.1 Nœud capteur:

Composant noyau d'un RCSF, il peut assurer des rôles multiples : acquisition, stockage, routage et traitement des données dans une zone de surveillance.

III.2.2 Cluster :

Groupe de nœuds capteurs qui forme l'unité organisationnelle du réseau. La nature dense des RCSFs exige de les répartir en groupes afin de simplifier les tâches de communication et répondre aux différentes contraintes.

III.2.3 Cluster-heads (leaders- chefs de groupes) :

Sont les représentants des clusters, ils sont souvent requis pour l'organisation des activités dans les clusters.

La tâche d'un cluster-head ne se limite pas à l'acheminement des données, mais elle peut être accompagnée par un traitement, agrégation/fusion des données venant des autres capteurs afin de simplifier la gestion du réseau et en particulier optimiser l'exploitation des différentes ressources.

Les nœuds peuvent être ordinaires ou dotés de plus d'énergie.

III.2.4 La station de base :

C'est un point de collecte appelé puits ou sink en anglais, c'est un nœud particulier doté d'une puissance de calcul supérieure et d'une quantité d'énergie potentiellement infinie. Ce puits peut être connecté à Internet ou possède un lien radio qui lui permet d'envoyer des données ou des alertes à un centre de contrôle pour l'utilisateur final.

III.2.5 Utilisateur final :

Les données dans un réseau de capteurs peuvent être utilisées par une variété d'applications. Par conséquent, une application particulière peut utiliser les données du réseau via internet, un PDA ou même un ordinateur bureau.

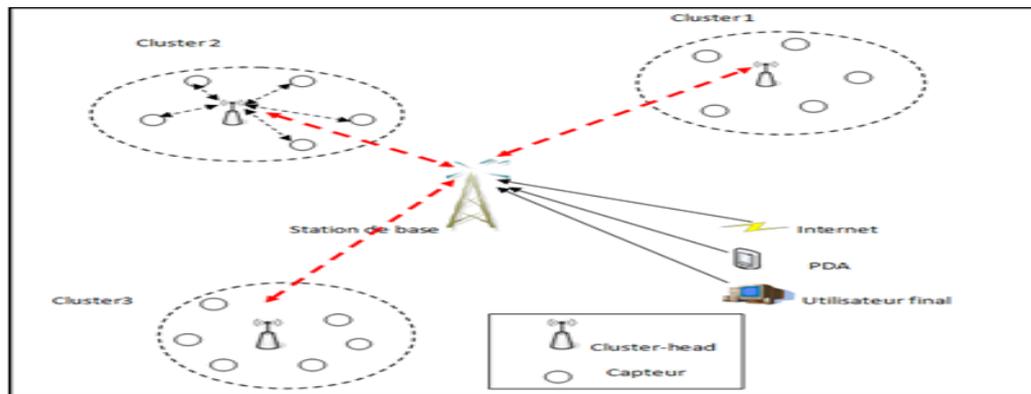


Figure III-1 Principaux composants d'une architecture en cluster

III.3 Algorithme de LEACH standard :

L'algorithme de LEACH est divisé en rounds. Chaque round commence par une phase set up lorsque les grappes sont organisées, suivie de la phase steady-state durant laquelle les données sont transférées à partir des nœuds cluster-heads à la SB(41).

III.3.1 La phase de formation de clusters (la phase Set-up):

Elle est divisée en deux phases (41):

- **La phase d'annonce :**

Cette phase commence par l'annonce du nouveau round par le nœud puits pour sélectionner les CHs, chaque nœud génère une valeur aléatoire entre 0 et 1, si cette valeur est inférieure un à seuil calculé selon l'équation $P_i(t)$, le nœud se déclare CH pour le courant Round(42).

Donc la probabilité de devenir CH pour chaque nœud i est fixé comme suit (42):

$$P_i(t) = \frac{\text{Nombre de CH}}{\text{Le nombre de noeuds qui n'ont pas été élus CH durant les } r \text{ rounds précédents}}$$

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * (r \bmod \frac{N}{P})} & \text{si } (n \in G) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

P : représente le pourcentage désiré de CHs [5% à 15%].

N : est le nombre total de nœuds dans le réseau.

r: le numéro du round courant.

G : est l'ensemble des nœuds qui ne sont pas des cluster-heads dans le dernier $1/P$ round.

n : une valeur aléatoire comprise dans l'intervalle $[0,1]$ attribuée à un nœud. Si cette dernière est inférieure à un seuil $P_i(t)$, le nœud se déclare CH.

En utilisant cette technique pour les nœuds qui ne sont pas des cluster-heads durant le $1/P$ round ($1/P$ round = 1 cycle).

- ***La phase de création de groupes :***

Dans cette phase le cluster-head diffuse un message d'avertissement (ADV) contenant son identificateur à tous les nœuds non-CH dans le réseau, puis chaque nœud décide à son tour quel cluster rejoindre. La décision est basée sur l'amplitude du signal reçu, le CH ayant le signal le plus fort (le plus proche) sera choisi.

III.3.2 La phase de transfert de données (La phase steady-state) :

A partir de cette deuxième phase que le nœud de chaque cluster collecte l'information sur l'état de l'environnement ensuite chaque nœud route ces données à son cluster-head. Lorsque les données arrivent au CH, lui à son tour transmet ces informations directement vers la station de base.

III.4 Concept de base de protocole proposé :

Les objectifs essentiels des réseaux de capteurs sans fil sont l'économie d'énergie pour prolonger la durée de vie du réseau, nous détaillerons l'amélioration que nous proposons.

Dans cette partie nous proposons une nouvelle formule de sélection des chefs de groupe (Cluster-Heads : CHs). Il vise à exploiter plus équitablement l'énergie des nœuds sélectionnés CHs et à économiser l'énergie dissipée lors de l'acheminement des données capturées à la Station de Base (SB). Nous

allons évaluer les performances du protocole LEACH avec la nouvelle approche dans le chapitre suivant.

Le but est de favoriser les nœuds qui ont plus d'énergie et proche à la station de base SB à devenir des CHs. Ce nœud CH effectue dans notre amélioration la fusion et l'agrégation pour compresser la quantité de données, ce qui réduit la dissipation d'énergie pour améliorer la durée de vie du système.

Il existe plusieurs techniques d'agrégation par exemple l'agrégation des trames, ou des paquets, mais dans notre travail nous avons utilisé celle qui réduit les données.

L'agrégation de données (data aggregation) vise à réduire la quantité de données applicatives pour optimiser la consommation d'énergie. Elle est utilisée en particulier dans les réseaux de capteurs sans fil pour lesquels elle permet d'augmenter la durée de vie des équipements ce qui la rend très intéressante(43).

Dans de tels réseaux, la plupart des informations mesurées par les capteurs sont redondantes et corrélées et si le réseau est important, la quantité de données à traiter par la destination est énorme. Il est donc nécessaire d'utiliser des méthodes d'agrégation de ces données par exemple on prend la moyenne ou le total des données collectées selon le besoin pour réduire le nombre de paquets transmis à la destination (souvent nommée puits)(11).

Ainsi, on utilise un protocole MAC TDMA au niveau de cluster-Head lors de transmission d'un message d'avertissement contenant son identifiant en tant que CH pour éviter les collisions et faciliter l'accès au médium de transmission.

Et cela en garantie que son récepteur est allumé à chaque fois que le nœud de groupe allume sa radio et transmet une donnée vers lui.

III.5 Les étapes de protocole amélioré :

III.5.1 Nouvelle formule de sélection avec introduction de l'énergie :

L'objectif est de favoriser les nœuds qui ont plus d'énergie à devenir CHs. Pour réaliser notre objectif on utilise la formule qui permet de calculer le rapport

d'énergie présenté dans le nœud E_{act} sur l'énergie initiale E_{ini} , et l'introduire dans la formule de départ.

Le nouveau seuil considérant l'énergie est tirée d'une formule existante(44) que nous avons modifiée pour correspondre à l'objectif souhaité.

Il est calculé selon la fonction suivante :

$$P_{i_1}(t) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * \left(r \bmod \frac{N}{P}\right)} * \left(\frac{E_{act}}{E_{ini}}\right)^m & \text{si } (n \in G) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

E_{act} : L'énergie actuelle du nœud.

E_{ini} : L'énergie initiale du nœud.

m : c'est un entier affecté pour la puissance, après certains tests de m nous avons abouti au meilleure résultats avec $m=3$.

Il existe différents caractéristiques dans les réseaux de capteurs à savoir la limitation en capacité de calcul et de mémoire ainsi qu'en ressources énergétiques. Pour régler ces contraintes on a utilisé cette formule avec une forte probabilité d'avoir des nœuds CHs dans notre réseau qui permet de diminuer la charge supplémentaire et éviter les collisions au niveau de CH.

Si on prend deux nœuds n_1 et n_2 qui ont respectivement des énergies $E_{act 1} < E_{act 2}$

On aura $P_{i_1}(t)(n_1) < P_{i_1}(t)(n_2)$

III.5.2 Introduction de la distance entre le nœud et la station de base:

$$P_{i_2}(t) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * \left(r \bmod \frac{N}{P}\right)} * \frac{d_{max}}{d} & \text{si } (n \in G) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

d_{max} : C'est la distance maximale entre la station de base et un nœud.

d : c'est la distance entre le nœud et la station de base.

Notre but est de favoriser plus les nœuds qui sont proches de la station de base et de les sélectionner pour qu'ils deviennent des cluster-heads(44), puisque à chaque fois que la distance est réduite on gagne de l'énergie lors de l'envoi de données à la station de base (à partir de modèle d'énergie, lorsque la distance entre la source et la destination est grande donc l'énergie dissipée augmente aussi).

Si on prend deux nœuds n_1 et n_2 qui ont respectivement des distances $d_1 < d_2$

On aura $Pi_2(t)(n_1) > Pi_2(t)(n_2)$.

III.5.3 Introduction de l'énergie et de la distance :

Nous souhaitons améliorer le processus d'élection dans le protocole LEACH qui consiste à considérer la sélection aléatoire des cluster-heads (CHs). Pour cela nous combinons les deux métriques précédentes.

Dans cette version, nous proposons une fonction(44) améliorée qui permet de déterminer la propriété de chaque nœud. Chaque nœud va calculer sa propriété en combinant son énergie résiduelle et la distance par rapport à la station de base.

Le nœud ayant la valeur maximale va s'auto-déclarer comme CH.

Le nouveau seuil considérant l'énergie et la distance est calculé selon la fonction suivante :

$$Pi_3(t) = \alpha * Pi_1(t) + \beta * Pi_2(t)$$

Avec :

α, β sont des constantes de pondération.

$\alpha + \beta = 1$. Avec $\alpha = 0.15$ et $\beta = 0.85$.

Cette formule permet de sélectionner les nœuds ayant plus d'énergie et moins de distance par rapport à la station de base comme CHs, l'idée de cette amélioration c'est de faire une combinaison entre les deux formules $Pi_1(t)$ et $Pi_2(t)$, puis on

attribue des valeurs pour α et β , après certains changements de α et β nous avons abouti aux meilleurs résultats qui donne plus de performances au protocole pour prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil.

III.5.4 Ordonnancement des tâches :

Ici les clusters sont choisis, et chaque cluster-Head utilise un protocole MAC TDMA pour ordonnancer les tâches des nœuds de son groupe et assigne un intervalle de temps prédéfinie pour router les informations au cluster-Head(45).

L'ensemble de ces intervalles de temps constituent un frame, puis la radio de ce nœud peut être éteinte. Par contre le cluster-head doit garder son récepteur allumé pour communiquer soit avec l'ensemble des nœuds appartenant à leur cluster soit il échange des données avec la SB(46).

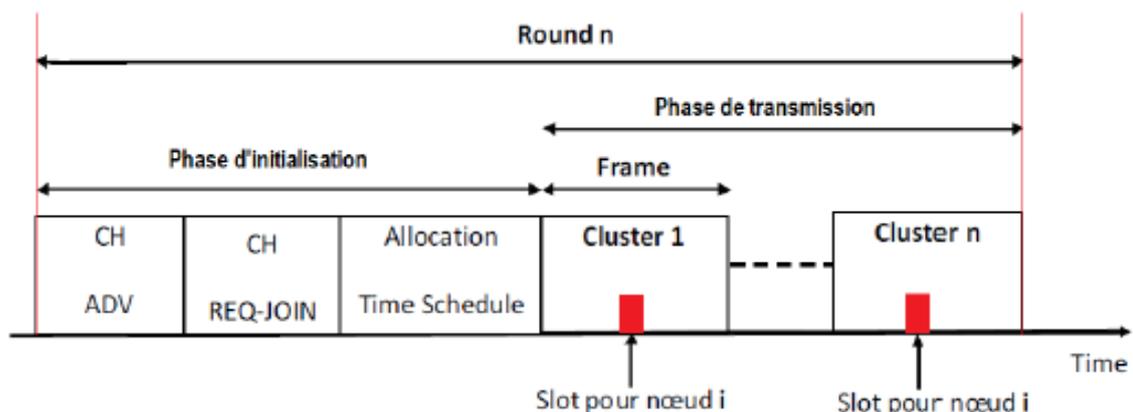


Figure III-2 Répartition du temps et différentes phases pour chaque round

III.6 Le diagramme qui représente les étapes de protocole proposé :

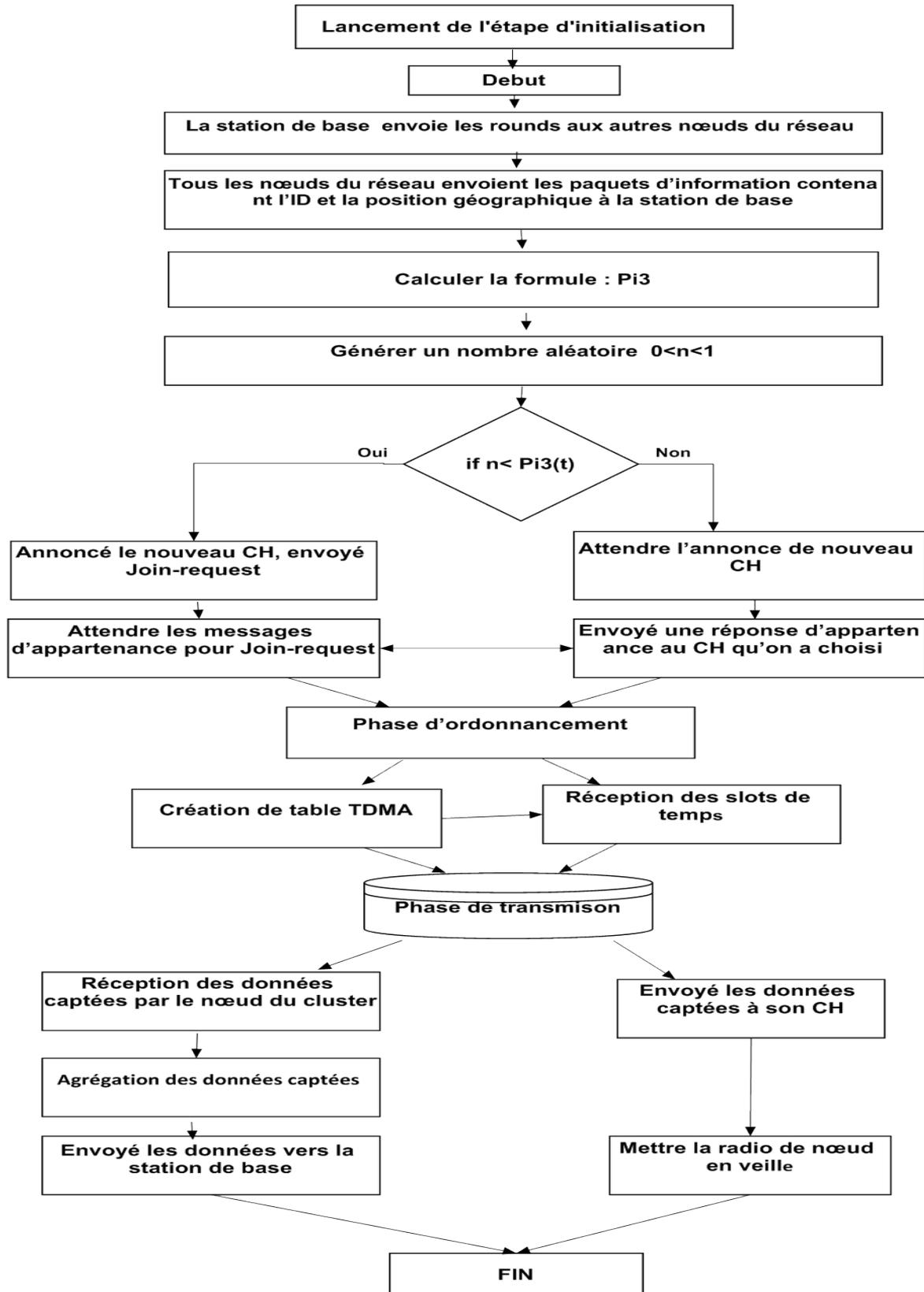


Diagramme qui représente les étapes de protocole proposé

III.7 L'algorithme de routage pour la nouvelle approche :

```

1 N:nombre total des capteurs dans le réseau
2 E_act:énergie résiduel
3 E_ini:énergie initial dans le réseau
4 T(n):le seuil
5 n:nombre aléatoire
6 ch:cluster_head
7 Ca_i:noeud capteur
8 ID:identifiant de ch
9 id:identifiant de Cai
10 Join_req:requete d'appartenance
11 p:pourcentage de chs dans la topologie
12 T:tableau contenu des neuds du clusters
13 sb:station de base
14 d_max:distance max entre le noeud et la station de base
15 d:distance entre le noeud et la station de base
16  $\alpha, \beta$ :constante entre [0-1]
17 nb_ch:nombre de chs dans la topologie
18 myslote:le slote de chaque noeud dans le cluster
19 i:indice
20
21
22

```

```

22
23 Phase d'initialisation
24
25 Debut
26 nb_ch=0
27 pour Ca_i allant de 1 jusqu'a N faire
28 n=randomnumber(0-1)
29 E[Ca_i]=E_act
30 distance(Ca_i)=d
31  $T(n) = \alpha * [P / (N - P * (r \text{ mod } N/P))] * (E_{act} / E_{ini})^3 + \beta * [P / (N - P * (r \text{ mod } N/P))] * (d_{max} / d)$ 
32 si  $n \leq T(n)$  alors
33 ID[ch]=id[Ca_i]
34 nb_ch=nb_ch+1
35 Adv=ID[ch]
36 envoyer(Join_req)
37 si decision[Ca_i]=vrai alors
38 ADV=ID[ch]+id[Ca_i]
39 renvoyer(Join_req)
40 sinon
41 supprimer(Join_req)
42 finsi
43 T[i]=ID[Ca_i]
44 finpour
45
46
47

```

```

46
47 Phase d'ordonnement
48
49 Debut
50
51 pour ch allant de 1 jusqu'a N faire
52 créer la table TDMA
53 slote(ch)=myslote
54 transmission TDMA
55
56 finpour
57
58
59

```

III.8 Le modèle d'énergie utilisé dans la nouvelle proche :

La communication entre les capteurs du réseau est la partie la plus sensible dans les RCSFs, voir que dans l'anatomie d'un capteur cette unité est composée d'un émetteur/ récepteur qui consomme de l'énergie par rapport aux autres unités de système puisqu'elle est reliée à plusieurs facteurs comme la quantité des données à communiquer, la distance de transmission, les propriétés physiques du module radio et la puissance. Quand la puissance d'émission est élevée, la portée du signal est grande et l'énergie consommée est aussi plus élevée.

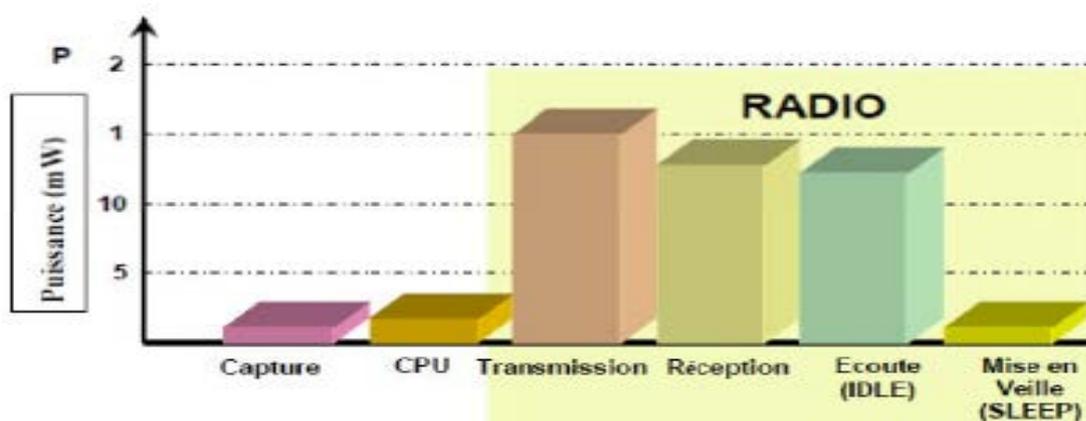


Figure III-3 Consommation d'énergie en acquisition, traitement, et communication

Pour évaluer l'énergie consommée par un capteur durant la phase de communication on utilise un modèle destiné pour le domaine de la radio à faible

consommation énergétique proposé par Heinzelman et al(33), pour but de gérer les émissions et les réceptions des nœuds pour optimiser les ressources.

L'algorithme basé sur le modèle radio utilise deux termes différents : Le modèle d'espace libre et le modèle de canal d'évanouissement à trajets multiples.

III.8.1 Le modèle de propagation en espace libre :

Le modèle de propagation en espace libre (Free Space) est utilisé pour prédire la puissance d'un signal reçu lorsque l'émetteur et le récepteur ont un trajet de propagation à visibilité directe entre eux (line-of-sight)(47).

III.8.2 Le modèle de canal à évanouissement à trajets multiples :

À cause des obstacles qui entourent l'émetteur et le récepteur on utilise le modèle à trajets multiples. Dans ce cas, plusieurs répliques du signal émis arrivent au récepteur à travers plusieurs trajets qui possèdent différents états d'atténuation, de déphasage et des retards (dus à la longueur du trajet). Mais les trajets multiples dans un canal radio créent des effets d'évanouissement (47).

Quand la distance entre l'émetteur et le récepteur est inférieure à la valeur de seuil $d_{\text{crossover}}$, l'algorithme adopte le modèle d'espace libre (d^2 perte de puissance). Sinon l'algorithme adopte le multi-chemin modèle de canal d'évanouissement (d^4 perte de puissance). Donc si l'émetteur envoie un message de 1 bit au récepteur jusqu'à une distance de d , la consommation d'énergie de l'émetteur et de récepteur peut être calculée par les équations suivantes:

$$ET_X(k, d) = ET_X(k) + ET_{X_amp}(k, d).$$

$$ET_X(k, d) = \begin{cases} k * E_{elec}(k, d) + k * \epsilon_{amp} * d^2 & \text{si } d < d_{\text{crossover}} \quad (1) \\ k * E_{elec}(k, d) + k * \epsilon_{m_ch} * d^4 & \text{sinon} \quad (2) \end{cases}$$

Avec :

$$d_{\text{crossover}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{amp}}{\epsilon_{m_ch}}}$$

Le message arrive vers la destination, le récepteur de nœud dépense également une partie d'énergie de la batterie, peut être calculée suivant cette formule :

$$ER_X(K) = ER_{X_elec}(k)$$

$$ER_X(K) = k * E_{elec}$$

Avec:

ET_X : Est la consommation d'énergie de l'émetteur qui envoie un message de kbits au récepteur.

ER_X : Est la consommée d'énergie du récepteur qui reçoit un k-message de bit.

E_{elec} : est la consommation d'énergie du circuit d'émission-réception sans fil.

k : Taille de message qui contient le nombre de bits envoyés.

d : La distance mesurée entre la source et la destination.

d_{crossover} : La distance limite pour laquelle les facteurs de transmission changent de valeur.

ε_{amp} : Facteur d'amplification dans l'espace libre.

ε_{m_ch} : Facteur d'amplification dans l'espace multi-chemins.

ET_{X_amp} : L'énergie d'amplification.

Dans notre travail nous avons utilisé uniquement la première formule de modèle d'énergie pour l'espace libre (1), étant donné que notre travail nécessite précisément cette fonctionnalité, dans notre topologie les nœuds communiquent directement avec leur CH, et ces derniers communiquent avec la station de base.

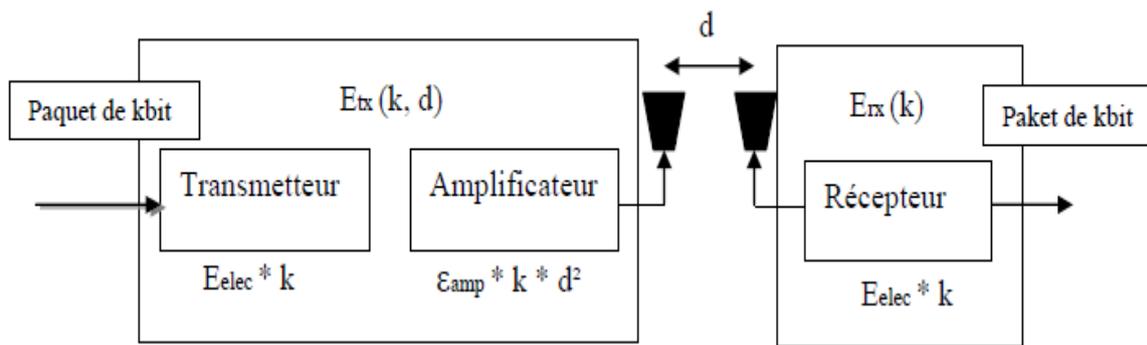


Figure III-4 Modèle de consommation d'énergie pour la communication(48)

III.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre protocole proposé qui vise la conservation d'énergie. Notre solution est inspirée de protocole LEACH qui organise le réseau en clusters, nous avons présenté les fonctions de sélections des chefs des groupes pour choisir les nœuds ayant une énergie maximale et une distance minimale par rapport à la station de base.

Pour évaluer les performances de notre solution, nous présentons, dans le chapitre suivant les résultats des simulations de notre protocole dans l'environnement OMNET++.

IV Implémentation et évaluation de protocole amélioré

IV.1 Introduction :

Nous allons présenter dans ce chapitre l'implémentation de notre protocole, afin d'évaluer ses performances, des simulations sont réalisées à l'aide de simulateur OMNET++ et ce, dans le but de montrer l'apport de l'approche proposée par rapport à l'approche déjà existante à travers une comparaison de notre proposition avec le protocole LEACH standard. Nous prenons ainsi en compte plusieurs métriques pour l'évaluation des performances de notre contribution.

Nous schématisons les résultats obtenus à l'aide des graphes que nous exposons et interprétons.

Nous avons pu montrer à travers les résultats de simulation obtenus que les objectifs de notre protocole aient été atteints.

IV.2 La simulation :

IV.2.1 Définition :

La simulation est un processus virtuel de modélisation et l'évaluation de performances des réseaux de communication pour éviter le déploiement réel(49) qui nécessite des essais réels coûteux en termes de coût, et de temps.

La simulation est utilisée lorsqu'aucune modélisation mathématique n'est possible vu la complexité et la grandeur du système à étudié, aussi pour pouvoir répondre à certaines questions de type « (What if) ? ».

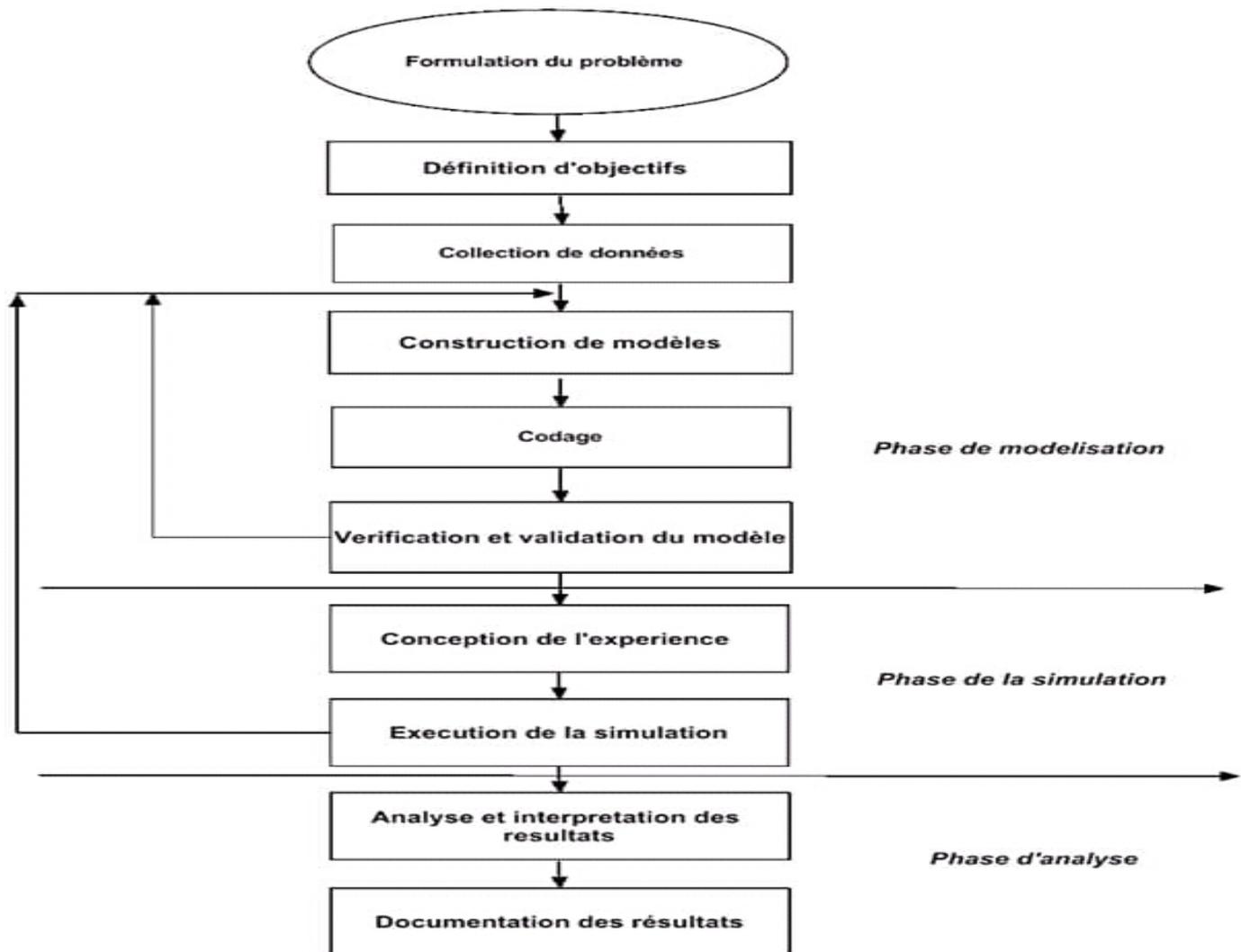


Figure IV-1 Les étapes de simulation

IV.2.2 La réalisation d'une simulation :

Les étapes suivantes résument le processus de réalisation d'une simulation :

1. Définition du problème.
2. Définition des différentes variables du système.
3. Construction du modèle de simulation : Le modèle est une représentation simplifiée du système qu'on veut simuler, un modèle peut se limiter à la représentation d'une partie ou d'une fonctionnalité du système. Un bon modèle est un bon compromis entre le réalisme et la simplicité.
4. Implémentation du modèle en utilisant des outils de simulations.

5. Validation du modèle : La validation d'un modèle est la partie la plus importante dans une modélisation, elle se fait généralement en effectuant des simulations sous des conditions connues et en comparant par la suite les résultats de système réels.

IV.2.3 Objectifs de simulation :

La simulation possède plusieurs objectifs :

- L'évaluation: pour déterminer les performances d'un système.
- La comparaison: pour comparer plusieurs systèmes ou plusieurs configurations d'un même système.
- La prédiction : pour prédire les performances d'un système sous certaines conditions.
- Optimisation : pour améliorer le fonctionnement d'un système.

IV.2.4 Les Simulateurs de Réseaux de Capteurs Sans Fil :

Il existe une large gamme de simulateurs de réseau comme OMNET++ qui peuvent être utilisés pour simuler un RSCF.

- **OMNET++ :**

OMNET ++ est une bibliothèque du noyau de simulation et un cadre de simulation C ++ extensibles, modulaires (permettant l'intégration de nouveau modèle) et basés sur des composants qui sont programmés en C ++(50), puis assemblés en composants et modèles plus volumineux à l'aide d'un langage de description de topologie de haut niveau (NED). Il est utilisé principalement pour la construction de simulateurs de réseau avec ou sans fil. Il est aussi un simulateur à événements discrets c.à.d. il permet d'évaluer le comportement d'un système durant le temps grâce à la génération d'événements pour construire un modèle proche de la réalité(51). Ce simulateur est composé aussi de l'IDE de simulation basé sur la plateforme Eclipse, interface graphique d'exécution de simulation interactive (QtEnv) et d'interface de ligne de commande pour l'exécution de la simulation (CmdEnv)(52).

Le simulateur OMNET++ n'est pas spécialisé pour les réseaux de capteurs sans fils. Pour cela, il existe plusieurs extensions, plateforme et simulateur pour OMNET++ qui essayant d'introduire ce manque comme: «CASTALIA».

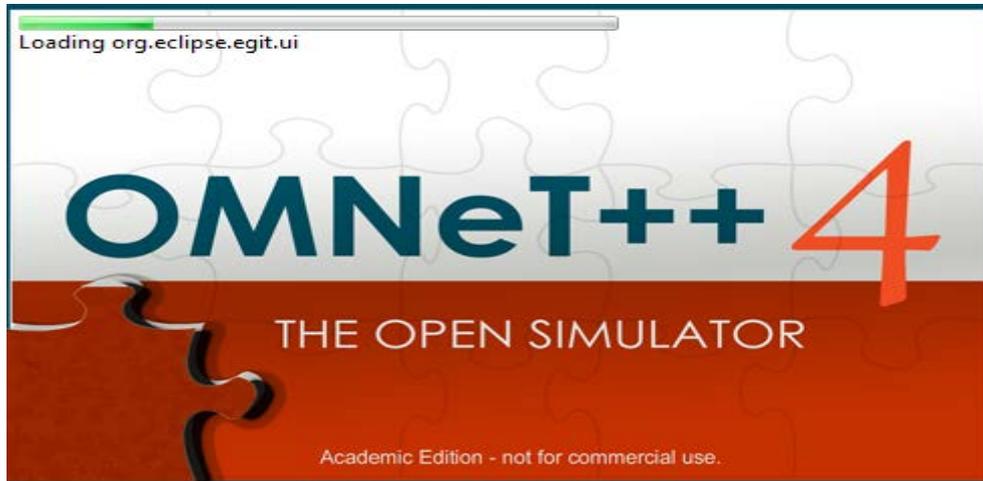


Figure IV-2 Le lancement du simulateur Omnet++

- **CASTALIA:**

Est un simulateur pour les réseaux de capteurs sans fil, il est basé sur la plateforme OMNET++, il offre la possibilité de manipuler plusieurs couches et le développement d'algorithmes et de protocoles distribués(53).

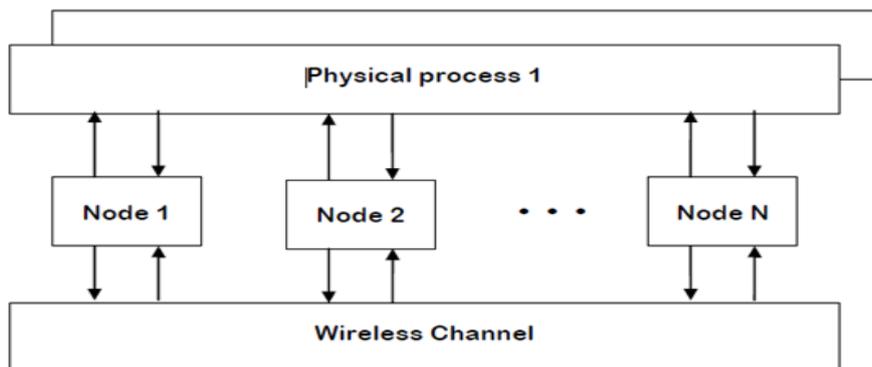


Figure IV-3 Les Connexions des modules sous CASTALIA

Comme il est illustré dans la figure ci-dessus, CASTALIA définit trois modules principaux(53):

- Nœud : représentant les nœuds capteurs et la station de base.

- Processus physique : représentant les processus physiques et/ou les objets cibles à contrôler.
- Canal sans fils : représentant le canal de transmission sans fil.

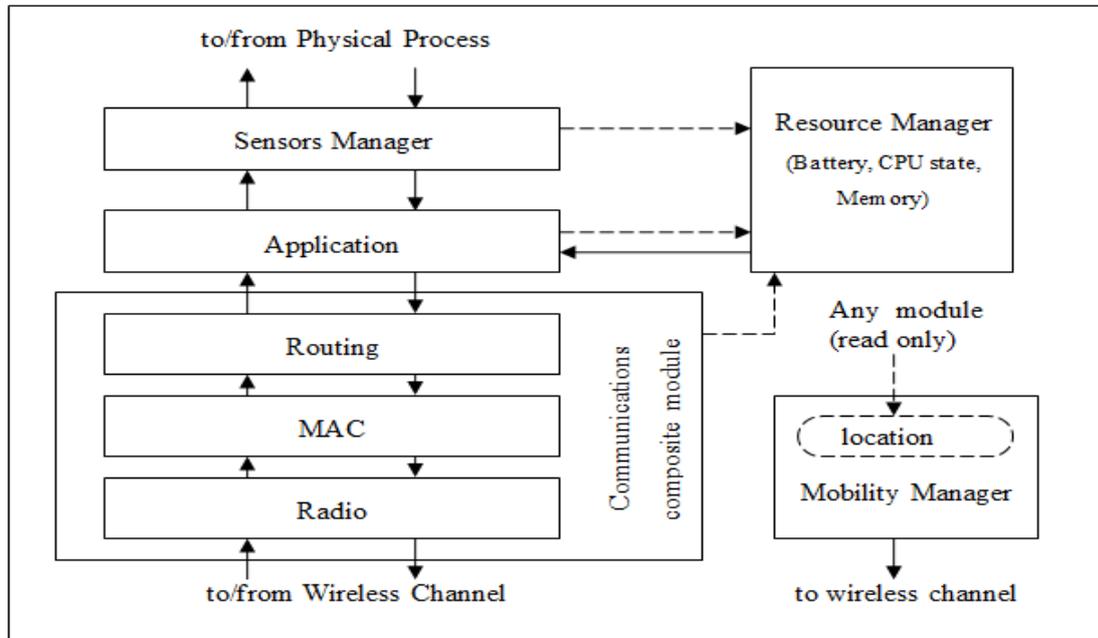


Figure IV-4 Les principaux composants d'un Nœud sous CASTALIA(54)

Cette structure représentée dans les figures ci-dessus montre la structure interne d'un nœud, les flèches pleines signifient le passage de message, les flèches pointillées signifient les appels de fonctions simples. Par exemple, la plupart des modules appellent une fonction du module Ressource Ménager (gestionnaire de ressources) pour signaler que l'énergie a été consommée(54).

- **MATLAB :**

MATLAB est un environnement informatique conçu pour le calcul matriciel produit par MathWorks. Il est disponible sur plusieurs plateformes, il permet la résolution de nombreux problèmes en beaucoup moins de temps qu'il n'en faudrait pour les formuler en C ou en Pascal.

L'importance de ce simulateur dans notre travail est la capacité à réaliser des graphes (55) de qualité représentant clairement nos données(56).

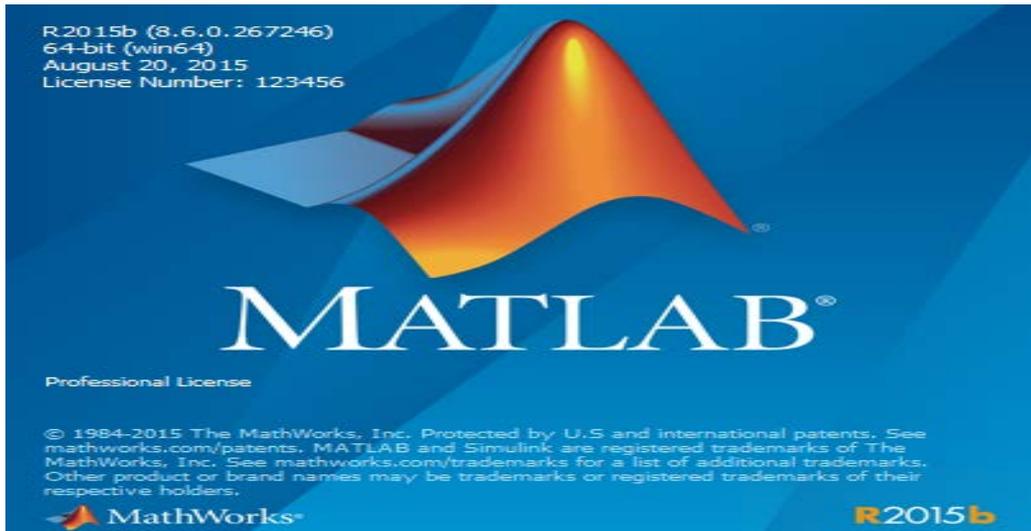


Figure IV-5 Le lancement du simulateur Matlab

IV.3 Paramètre de simulation de protocole proposé:

Les propriétés suivantes sont utilisées pour le réseau de capteurs simulé :

- Les nœuds capteurs et la station de base sont supposés stationnaires une fois qu'ils sont déployés dans l'environnement, on utilise le paradigme de communication basé-localisation avec l'utilisation des positions des nœuds.
- La station de base est située hors de la zone des nœuds capteurs.
- Le réseau de capteurs sans fil comprend des nœuds capteurs homogènes.
- Initialement, tous les nœuds capteurs ont la même quantité d'énergie.
- La station de base n'est pas limitée en termes d'énergie, de mémoire et de puissance de calcul.
- Chaque nœud capteur peut fonctionner soit en mode de détection pour contrôler les paramètres de l'environnement et les transmettre au CH, soit en mode CH pour recueillir les données, les compresser et les transmettre à la station de base.

Description	La valeur
La surface de simulation	20cm*10cm
La localisation de la station de base	(0, 0, 0)

Nombre de nœud dans la topologie	75
Énergie initial des nœuds	1000
Énergie initial de la station de base	2000
Energie d'agrégation	10^{-6}
Le pourcentage de CH dans la topologie	9%
La durée de simulation	100 s
ID de la station de base	0
ID des nœuds	[1-75]
E_{elec}	$5 \cdot 10^{-5}$
E_{amp}	10^8

Tableau IV-1 Paramètre de simulation

Numéro du Round	Cluster Head	Les cordonnées
1	6	(9 ; 30 ; 67)
2	14	(33 ; 16 ; 96)
3	17	(73 ; 31 ; 69)
4	31	(88 ; 16 ; 46)
5	35	(21 ; 3 ; 43)
6	50	(45 ; 4 ; 14)
7	57	(41 ; 6 ; 27)
8	59	(41 ; 51 ; 18)
9	70	(91 ; 60 ; 17)
10	73	(1 ; 1 ; 48)

Tableau IV-2 Représente les rounds pendant T=100 s

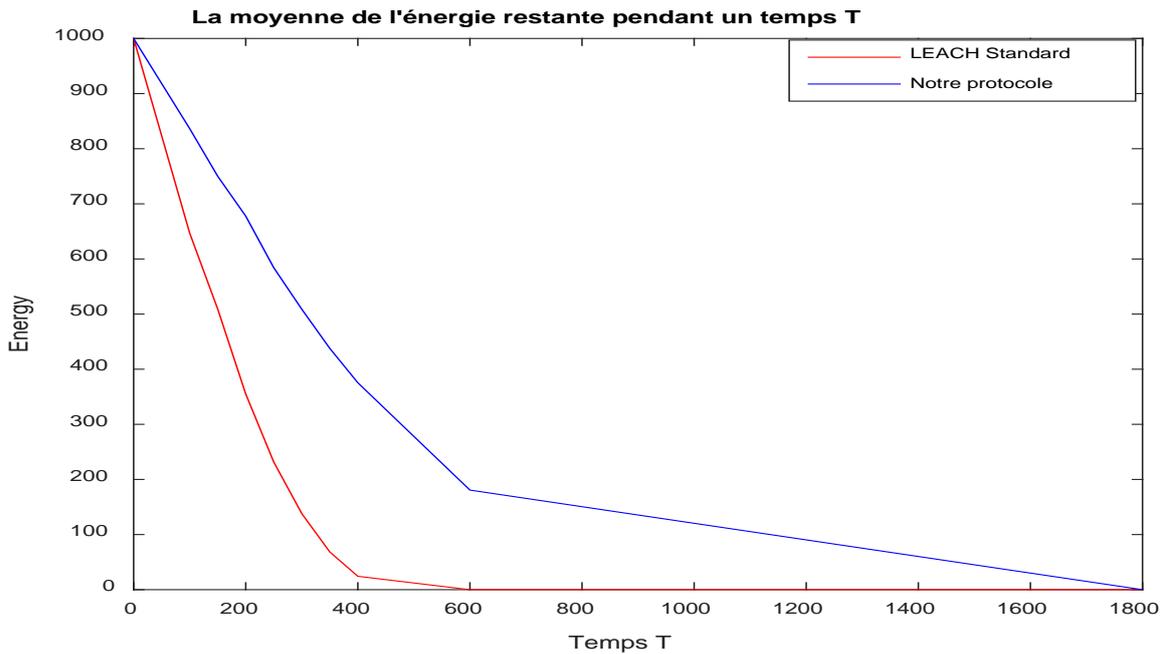
L'énergie moyenne restante :

Vu les limitations en énergie des capteurs, il est primordial de réduire l'énergie consommée à tous les niveaux et ce afin de permettre une plus grande longévité au réseau. Les simulations effectuées montrent que l'énergie moyenne résiduelle

(restante) au niveau du protocole proposé est supérieure à l'énergie moyenne restante au niveau de LEACH, ceci est dû au nombre de messages qui transitent dans le réseau.

La durée de simulation pour la topologie(75)	La moyenne de l'énergie qui reste pour LEACH standard	La moyenne de l'énergie qui reste pour le protocole proposé
0 s	1000	1000
100 s	646.9	836.501
150 s	509.193	750.112
200 s	355.011	677.753
250 s	231.541	584.117
300 s	138.065	508.805
350 s	68.3973	437.715
400 s	24.2994	375.453
600 s	0	180.69
1800 s	0	0

Tableau IV-3 Représente la moyenne de l'énergie restante



Graph IV-1 La moyenne de l'énergie restante pendant un temps T

Les résultats montrent que notre approche fonctionne mieux que LEACH standard.

Les nœuds morts:

$$P_{\text{NoeudMort}} = \frac{n \cdot 100}{N} \%$$

$P_{\text{NoeudMort}}$: est le pourcentage de nœuds morts dans la topologie.

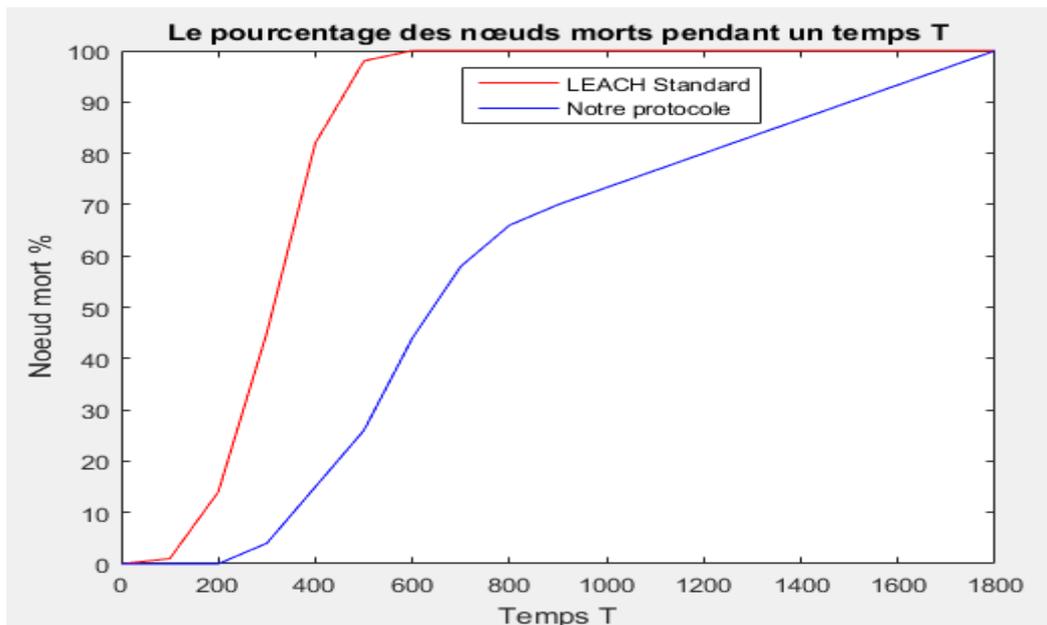
n: est le nombre de nœuds morts dans la topologie à chaque instant T.

N : est le nombre de nœuds dans la topologie.

La durée de simulation T pour la topologie(75)	Le pourcentage de nœuds morts pour LEACH standard	Le pourcentage de nœuds morts pour le protocole proposé
100 s	1%	0 %
200 s	14%	0 %
300 s	45%	4 %
400 s	82%	15 %
500 s	98%	26 %

600 s	100 %	44 %
700 s	100%	58 %
800 s	100 %	66 %
900 s	100 %	70 %
1800 s	100 %	100 %

Tableau IV-4 Représente le nombre de nœud mort pour chaque protocole



Graphique IV-2 Le pourcentage de nœuds morts pendant un temps T

IV.4 Passage à l'échelle :

Afin de tester l'adaptation de notre approche à grande échelle, nous allons simuler le protocole dans des réseaux de tailles différentes.

IV.4.1 L'énergie consommée :

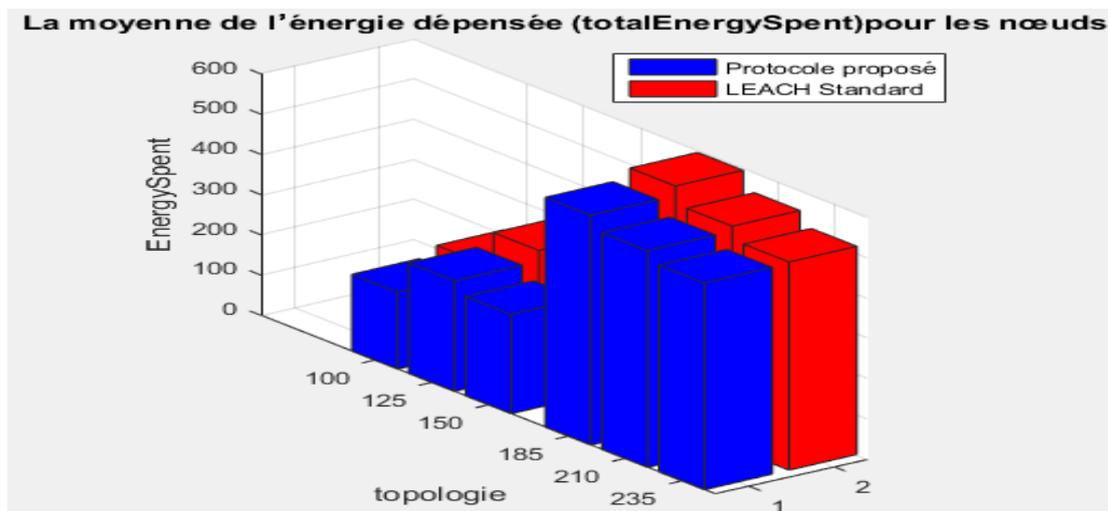
Le graphique IV-3 représente l'énergie dépensée par rapport au nombre de nœuds du réseau, dans le protocole amélioré la sélection de cluster-head est déterminée selon des métriques : énergie résiduelle et la distance entre le nœud et la station de base. Le gain en énergie de notre approche est très avantageux relativement au protocole LEACH. La raison principale de ce résultat est le nombre approprié de cluster-head et la répartition des clusters dans le réseau. Notre protocole utilise

une distribution des cluster-heads sur tout le réseau total avec une sélection très spécifique des cluster-heads selon des formules mathématiques proposées.

Pour T=100 s :

Nombre de nœuds	100	125	150	185	210	235
Leach standard	214.102	301.404	270.467	595.152	550.782	517.466
Protocole Proposé	191.06	274.812	246.915	571.243	538.758	513.953

Tableau IV-5 Tableau comparatif pour la moyenne de l'énergie dépensée



Graphe IV-3 La moyenne de l'énergie dépensée par rapport à la topologie

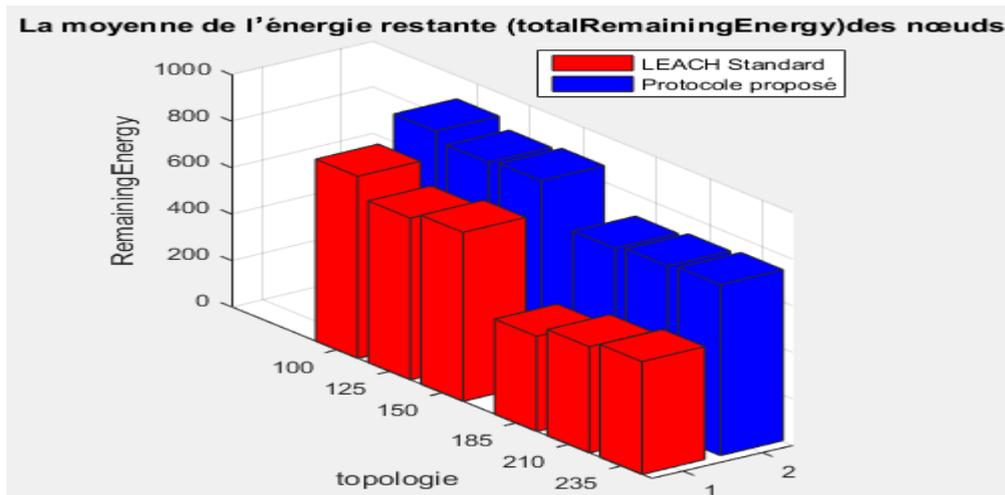
IV.4.2 Energie résiduelle: (Energie totale restante) :

Le protocole proposé améliore considérablement la consommation moyenne d'énergie dans le réseau par rapport au protocole LEACH standard dans toutes les topologies simulées.

Pour T=100 s :

Nombre de nœud	100	125	150	185	210	235
Leach standard	784.66	697.326	728.178	410.412	457.923	486.693
Protocoleproposé	898.476	856.261	870.232	708.336	724.45	736.741

Tableau IV-6 Tableau comparatif pour la moyenne de l'énergie restante des nœuds



Graphique IV-4 La moyenne de l'énergie restante par rapport à la topologie

IV.4.3 Durée de vie de notre protocole :

La durée de la vie du réseau est calculée selon cette formule suivante :

$$\text{Moy}_{\text{vieRes}} = (\sum_{i=1}^N \text{vieNoeud}) / N$$

$\text{Moy}_{\text{vieRes}}$: C'est la moyenne du réseau.

vieNoeud : c'est la durée de vie de chaque nœud.

N : c'est le nombre de nœud dans le réseau.

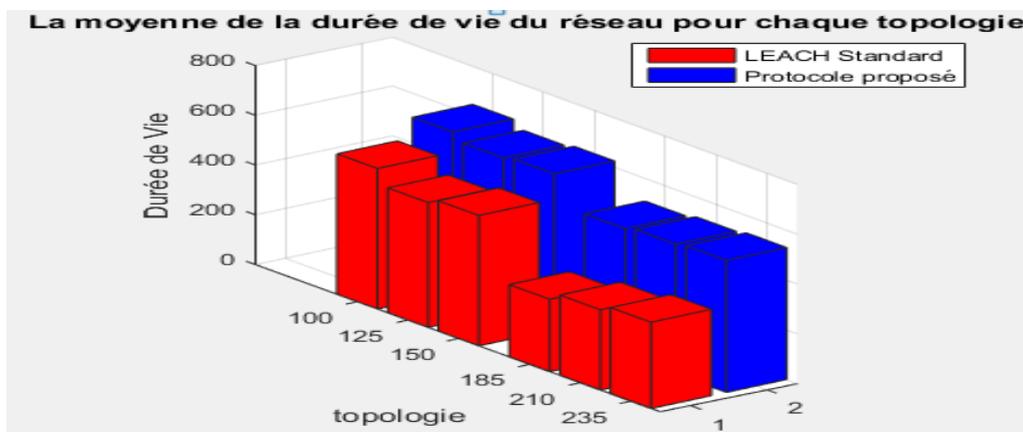
La durée de vie du réseau est définie comme étant le temps qui s'écoule ou le nombre de cycles de captage, depuis le déploiement des nœuds, c'est-à-dire le démarrage de l'activité du réseau jusqu'au moment où le réseau devient non fonctionnel.

Comme illustré dans le grapheIV-5 nous remarquons que la durée de vie de notre approche augmente par rapport à LEACH standard.

Pour $T=100$ s :

Nombre de nœud	100	125	150	185	210	235
Leach standard	564.955	502.075	524.288	291.12	323.112	347.047
Protocole proposé	646.903	616.508	626.567	510.002	521.604	530.454

Tableau IV-7 Tableau comparatif pour la moyenne de la durée de vie du réseau



Graphe IV-6 La moyenne de la durée de vie du réseau par rapport à la topologie

IV.5 Conclusion :

Dans ce dernier chapitre, nous avons exposé les résultats de la simulation de notre protocole, nous avons présenté l'environnement de simulation OMNET++ ainsi que la plateforme de simulation utilisée. Après avoir implémenté notre protocole nous avons implémenté aussi le protocole LEACH standard, afin de

pouvoir les comparer et montrer les performances de notre protocole. L'étude comparative entre les deux protocoles est faite sur différentes métriques (Energie moyenne résiduelle, énergie consommée, la durée de vie du réseau). Les résultats obtenus ont montré que notre protocole est plus performant et améliore considérablement la consommation d'énergie et augmente ainsi leur durée de vie.

Conclusion générale et perspectives

Les réseaux de capteurs sans fil ont plusieurs contraintes et principalement l'économie d'énergie et l'amélioration de la durée de vie des réseaux de capteurs.

Dans ce mémoire nous avons amélioré un protocole de routage hiérarchique et distribué pour les réseaux de capteurs sans fils.

Le regroupement des nœuds capteurs en groupes est basé sur certains attributs dépendant de leurs emplacements et la valeur de l'énergie résiduelle.

Le protocole proposé réalise une bonne répartition des clusters avec un mode de fonctionnement qu'est composé de deux phases. La phase set up durant laquelle les grappes sont organisées avec l'introduction de l'énergie résiduelle et de la distance, suivie de la phase steady- state, lorsque les données sont captées on utilise l'ordonnanceur TDMA pour que les membres émettent leurs données captées pendant leurs propres slots dans le but d'économiser leurs énergie durant les états inactifs. Les résultats sont transférés à partir des nœuds cluster-heads qui appliquent l'agrégation puis les envoient à la SB.

Le protocole proposé est efficace en consommation d'énergie et garanti une meilleure distribution des chefs de groupes dans le réseau.

Comme perspectives envisageables pour améliorer les performances de notre protocole nous proposons de :

- ✓ Introduire la notion de mobilité des nœuds pour faciliter le transfert de données.
- ✓ Implémenter un mécanisme d'évaluation de qualité de service pour but de réduire le délai de transmission.
- ✓ L'introduction d'un mécanisme permettant la détection de la panne des membres par leur cluster-head.

Bibliographie:

1. Dr. Mustapha Reda SENOUCI Enseignant, Chercheur à l'Ecole Militaire Polytechnique. CERISTNEWS Bulletin d'information trimestriel/LE DEPLOIEMENT DES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL. <http://www.cerist.dz/doc/CERISTNEWS16.pdf>. [En ligne] 2014.
2. *Research Article, 'Real-Time Human Motion Capture Driven by a Wireless Sensor Network*. Chen, Peng-zhan. 2015, International Journal of Computer Games Technology, p. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/695874>.
3. *Wireless Sensor Networks, Military Surveillance, Sensor Nodes, Intrusion Detection'*. Ahmad, Ishfaq. Pakistan : Department of computer Science, p. <http://ijesc.org/>.
4. Hounbadji, T. Réseaux ad hoc: système d'adressage et méthodes d'accessibilité aux données (Doctoral dissertation, École Polytechnique de Montréal). 2009. p. <https://publications.polymtl.ca/234/>.
5. SADDIKI, MK. *Réseau adhoc*. 2019.
6. Ben Zid, M. *Emploi de techniques de traitement de signal MIMO pour des applications dédiées réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Grenoble)*. 2012. p. <https://www.theses.fr/2012GRENT017>.
7. Aby, Affoua. *Réseaux de capteurs sans fil étendus dédiés aux collectes de données environnementales, Thérèse Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II*. 2016.
8. ENGOTI, Frank ITOUA. *Réalisation d'une plate-forme pour l'optimisation de réseau de capteurs sans fil appliqués au bâtiment intelligent*. Limoges : s.n., 2018.
9. Amira, Bendjeddou. *Prolongation de la Durée de Vie des Batteries dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF). Doctorat 3ème Cycle LMD*. 2014.
10. Diallo, Chérif. *Techniques d'amélioration du routage et de formation des clusters multi-sauts dans les réseaux de capteurs sans fil. Institut National des Télécommunications. Thèse de l'université de Doctorat délivré conjointement par Télécom & Management SudParis et l'université Pierre et Marie Curie (UPMC)*. 2010.
11. <http://www.univ-bejaia.dz/jspui/bitstream/123456789/9227/1/La%20Gestion%20des%20Donn%C3%A9es%20dans%20Oles%20R%C3%A9seaux%20de%20Capteurs%20sans%20Fil.pdf> page23. [En ligne]
12. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/3814/1/THESE-LABRAOUI-Nabilai.pdf>. [En ligne]
13. Khriji, Sabine. *Energy-efficient techniques in wireless sensor networks*. 2018.

14. DIANE, Ibrahima. *Optimisation de la consommation d'énergie par la prise en compte de la redondance de mesure dans les réseaux de capteurs*. Toulouse : s.n., 2014.
15. <https://oatao.univ-toulouse.fr/7853/>. [En ligne]
16. KACIMI, Rahim. *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*.Thèse de doctorat. Toulouse, France : s.n., 2009.
17. Sen, Jaydip. Security in Wireless Sensor Networks. INDIA.
18. BENZERBADJ, ALI. *Approche inter-couches pour l'économie d'énergie et la fiabilité dans les réseaux de capteurs sans fil dédiés aux Applications Critiques de Surveillance*. Thèse de doctorat. 2018.
19. Maleh, Yassine. *Etude et développement d'un protocole dymétrique pour RCSF*. Maroc : Faculté des Sciences et Techniques de Settat.
20. Zanat, Hanal Abu. *Fairness models to improve the quality of service in ad-hoc wireless networks*. Lille, 2009.
21. Mokrenko, Olesia. *Energy management of a Wireless Sensor Network at application level*. 2015.
22. http://www.composelec.com/reseau_de_capteurs_sans_fil.php. [En ligne]
23. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1959031809000499>.
24. Capteurs pour la télésurveillance médicale. Capteurs, algorithmes et réseaux eHealth sensors. Biomedical sensors, algorithms and sensors networks. 2009. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1959031809000499>.
25. Bahri, Yosra Zguira. Study and development of wireless sensor network architecture tolerant to delays. INSA Lyon, 2018.
26. Y. Sankarasubramaniam I-F. Akyildiz, W. Su and E.Cayirci. "A Survey on Sunsor Networks".*IEEE Communications Magazine*. 2002.
27. DIALLO, Chérif. Techniques d'amélioration du routage et de la formation des clusters multi-sauts dans les réseaux de capteurs sans fil,Doctorat délivré conjointement par Télécom & Management SudParis et L'Université Pierre et Marie Curie (UPMC). 2010.
28. Ayachi, Mohamed Ali. Contributions à la détection des comportements malhonnêtes dans les réseaux. 2011. pp. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00660467/document>.
29. RAMASSAMY, Cédric. Analyse des protocoles des Réseaux de capteurs sans-fil,Thèse de doctorat,UNIVERSITE DES ANTILLES ET DE LA GUYANE. 23 Novembre 2012.
30. Perkins, Pravin Bhagwat Charles E. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers. ACM SIGCOMM Computer Communication Review.

31. Willig, H. Karl and. Protocols and Architecture for Wireless Sensor Networks. 2005.
32. Ahirwar, Dilip Kumar. Enhanced AODV Routing Protocol for Wireless Sensor Network Based on ZigBee. January 2011.
33. H. Balakrishnan W. Heinzelman, A. Chandrakasan. "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Micro Sensor Networks". In *proc of the Hawaii International Conference on Systems Science*. 2000.
34. Katayoun Sohrabi, Jay Gao. Protocols for self-organisation of a wireless sensor network . 2000.
35. Jyoti Saraswat, and Partha Pratim Bhattacharya. EFFECT OF DUTY CYCLE ON ENERGY CONSUMPTION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS. s.l. : International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC), 2013.
36. Rong Zheng, Jennifer C. Hou, and Lui Sha. Asynchronous wakeup for ad hoc networks In Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad Hoc networking & computing (MobiHoc'03). 2003.
37. Aby, Affoua. *Réseaux de capteurs sans fil étendus dédiés aux collectes de données environnementales*, Thèse Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II. 2016.
38. C.Sungrae, K.Kanuri,C.Jin-Woong,L.Jang-yeon,S.D.June. "Dynamic Energy Efficient TDMA-based MAC Protocol for Wireless Sensor Networks",Autonomic and Autonomous Systems and International Conference on Networking and Services (ICAS-ICNS'05). 2005.
39. L.Koen, H.Gertjan. "Energy-Efficient Medium Access Control",The embedded Systems Handbook,Delft University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science Mekelweg 4. The Netherlands : s.n., 2004.
40. Injong Rhee, Ajit Warrier, Mahesh Aia, Jeongki Min, and Mihail L. Sichitiu. Z-MAC :a hybrid MAC for wireless sensor networks. IEEE/ACM Transactions on Networking. 2008.
41. <http://www.univ-bejaia.dz/jspui/bitstream/123456789/1820/1/Conception%20d%E2%80%99un%20protocole%20de%20routage%20hi%C3%A9rarchique%20pour%20les%20r%C3%A9seaux%20de%20capteurs%20sans%20fil.pdf> page 10. [En ligne]
42. Mourad, HADJILA. *PROTOCOLES DE ROUTAGE ECONOMES EN ENERGIE*,page 40. 2014.
43. Breck, Damien. *Evaluation des performances du système d'agrégation implémenté dans les réseaux 802.11n*,page 8. s.l. : Université de Lorraine, 2015.
44. Saida RAFIE, Moulay Lahcen HASNAOUI. *Minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*. Faculté des Sciences Dhar El Mahrez, USMBA.
45. HASSAM Lynda, LAHLOUH Noria. *Proposition d'un protocole distribué pour la répartition logique d'un réseau de capteurs sans fil pour un routage multisauts*,page 23 . 2016.

46. Rajendra Prasad Mahapatra, Rakesh Kumar Yadav. *Descendant of LEACH Based Routing Protocols in Wireless Sensor* page 4.
47. <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/597/1/Chehri%2C%20Hamou.pdf> page 13-14. [En ligne]
48. Eddine, Mr Boubiche Djallel. *Protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil* page 13.
49. <https://theses.univ-oran1.dz/document/TH3828.pdf> page 64. [En ligne]
50. <https://omnetpp.org/intro/>. [En ligne]
51. <https://theses.univ-oran1.dz/document/TH3828.pdf> page 68. [En ligne]
52. https://www.researchgate.net/publication/307582894_Simulation_d%27un_reseau_sans_fil_d%27interieur_et_des_algorithmes_NSGA-II_et_NSGA-III_modifies_pour_la_resolution_de_la_problematique_de_couverture_et_de_localisation_3D page 2. [En ligne]
53. <http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/12700/1/Routage-geographique-multi-chemins-dans-les-reseaux-de-capteurs-sans-fil.pdf> page 34. [En ligne]
54. http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD_T_2011_0010_ZOUINKHI.pdf page 120. [En ligne]
55. <https://matlabpourtous.com/formation/course/les-graphiques/>. [En ligne]
56. <http://www.lkb.upmc.fr/quantumoptics/wp-content/uploads/sites/23/2015/12/Matlab2013.pdf> page 18. [En ligne]
57. <https://theses.univ-oran1.dz/document/TH3828.pdf>. [En ligne]
58. Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2004.
59. Tobagi, Leonard Kleinrock and Fouad. Packet switching in radio channels: Part i-carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics.
60. SARIKA KHATARKAR, RACHANA KAMBLE. *Wireless sensor network mac protocol Smac and tmac*. 2013.
61. Hamady, Faisal. *Enhancement of the S-MAC Protocol for Wireless Sensor Networks*. 2010.
62. Deshpande P.P. Gireesh Hegde B. Chetan, B.M and S Srinivas. *Analysis of dsdv and aodv for disaster management system in coal mines. IEEE Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*. 2011.
63. D.Dewasurendra, A.Mishra. "Design challenges in energy-efficient access control for wireless Sensor networks", In *Handbook of Sensor Network: Compact Wireless and wired Sensing System*. 2004.
64. Clausen, P. Jacquet et T. *Optimized link state routing protocol (olsr). Technical report*. 2009.

65. BAUMGARTNER, Daniel, U., ALIG, Martina et GAILLARD, Gérard. Consommation d'énergie des exploitations agricoles suisses au regard de l'analyse du cycle de vie (ACV), premiers résultats d'enquête. *OALib Journal*. p. <http://www.oalib.com/paper/2694836>.

66.

https://www.researchgate.net/publication/329211315_Wireless_sensor_networks_in_agricultural_applications_Technology_Components_and_System_Design. [En ligne]

67. [http://www.univ-](http://www.univ-bejaia.dz/jspui/bitstream/123456789/9227/1/La%20Gestion%20des%20Donn%C3%A9es%20dans%20les%20R%C3%A9seaux%20de%20Capteurs%20sans%20Fil.pdf)

[bejaia.dz/jspui/bitstream/123456789/9227/1/La%20Gestion%20des%20Donn%C3%A9es%20dans%20les%20R%C3%A9seaux%20de%20Capteurs%20sans%20Fil.pdf](http://www.univ-bejaia.dz/jspui/bitstream/123456789/9227/1/La%20Gestion%20des%20Donn%C3%A9es%20dans%20les%20R%C3%A9seaux%20de%20Capteurs%20sans%20Fil.pdf) page23. [En ligne]