

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Département d'Informatique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en
informatique

Spécialité : Conduite de projet informatique

Thème :

Routage pour l'économie d'énergie dans
les réseaux de capteurs sans fil

Dirigé par :

Mr RASSOUL I.

Réalisé par :

Mlle DEMRI M.

Promotion 2010/2011

Introduction Générale.....	I
<i>I. Chapitre I : Réseaux de capteurs sans fils</i>	
Introduction.....	1
II. Le capteur sans fil :.....	1
III. La pile protocolaire :.....	3
IV. Quelques domaines d’application des réseaux de capteurs sans fil :	4
IV. Les réseaux de capteurs sans fils.....	5
IV.1.Définition d’un réseau de capteurs sans fils.....	5
IV.2. Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fils.....	6
IV.3. Contraintes de conception des RCSF :.....	7
V. Les Axes de travaux pour les réseaux de capteurs sans fils.....	9
V.1. Architecture hardware des capteurs.....	9
V.2. Système d’exploitation pour les réseaux de capteurs sans fils.....	10
V.3. Déploiement d’un réseau de capteurs.....	11
V.4. Agrégation de données.....	11
V.Conclusion	12
<i>II. Chapitre II : consommation et conservation d’énergie dans les réseaux de capteurs sans fils</i>	
I. Introduction.....	14
II. Notion de durée de vie d’un réseau de capteurs sans fils.....	14
III. consommation d’énergie dans les réseaux de capteurs sans fils.....	16
III.1 Energie de capture	16
III.2 Energie de traitement.....	16
III.3 Energie de communication.....	16

III.4. Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie	17
IV. Techniques de minimisation de la consommation d'énergie	19
V. Conclusion :	21

III. Chapitre III : Protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fils

I. Introduction.....	22
II. Les protocoles de routages	23
II.1. Protocoles de routages pour les réseaux Ad Hoc.....	25
II.2. Protocoles basés sur la structure du réseau.....	26
II.2.1. Routage horizontal (plat).....	26
II.2.2. Le routage hiérarchique.....	29
II.2.3. Routage basé sur la localisation.....	35
II.2.4. Routage adaptatif.....	38
II.2.5. Routage basé sur les opérations du protocole.....	40
II.2.5.1. Routage multi-chemins.....	40
II.2.5.2. Routage basé sur les requêtes.....	41
II.2.5.3. Protocoles basés sur la négociation.....	41
II.2.5.4. protocoles basés sur la qualité de service (QoS)	41
II.2.6. Comparaison entre les protocoles de routages.....	43
III. Conclusion :	44

IV. Chapitre IV : Fonctionnement du protocole LEACH

I. Introduction.....	45
II. Protocoles MAC utilisés par LEACH.....	46
II.1. Accès aléatoire.....	46
II.2 Allocation fixe.....	47
II.2.1 TDMA.....	47
II.2.2 CDMA	47
III. Architecture de communication de LEACH.....	48

IV. Fonctionnement de l'algorithme de LEACH.....	49
IV.1. Phase d'initialisation	49
IV.1.1 Phase d'annonce	50
IV.1.2 Phase d'organisation de groupes.....	52
IV.1.3 Phase d'ordonnancement.....	53
IV.2 Phase de transmission.....	54
V. Avantages et inconvénients de LEACH.....	54
V.1 Avantages.....	54
V.2 Les inconvénients.....	55
IV. Conclusion	57
V. Implémentation du protocole LEACH.....	58
I. Introduction.....	58
II. Environnement de développement	58
II.1. Le système d'exploitation TinyOS	58
II.1.1. Aperçus sur TinyOS	58
II.1.2. Propriétés de TinyOS.....	59
II.1.3. L'ordonnanceur TinyOS.....	59
II.2. Langage de programmation nesC.....	60
II.2.1. sur nesC.....	61
II.3. TOSSIM.....	61
II.3.1. TinyViz	61
II.3.2. PowerTOSSIM	62
III. Implémentation du protocole LEACH.....	62
III.1. Structures de données	62
III.2. Événements et commandes	63
III.3. Déroulement	63
III.3.1. Déclenchement et relai du nouveau round, et, annonce des CH.....	63
III.3.2. Formation de groupes et envoi des températures.....	64
III.3.3. Envoi des résultats d'agrégation des températures au nœud puits	66
IV. Métriques à évaluer	67
IV.1. Consommation énergétique	67

IV.2. Perte de paquets	67
IV.3. Délai de bout-en-bout	67
V. Résultat et interprétations.....	68
V.1. Consommation d'énergie.....	68
VI. Conclusion	69
<i>V. Conclusion générale et perspectives.....</i>	70
<i>Bibliographie.....</i>	71
<i>Liste des figures.....</i>	77

Les avancées technologiques et techniques opérées dans le domaine des réseaux sans fils, de la micro électronique et de l'intégration des microprocesseurs ont fait naître une nouvelle génération de réseaux de capteurs à grande échelle adaptés à une gamme d'applications très variée [Bha 2006].

Imaginons un ensemble de petits appareils électroniques, autonomes, équipés de capteurs et capables de communiquer entre eux sans fils. Ensemble, ils forment un réseau de capteurs sans fils capable de superviser une région ou un phénomène d'intérêt, de fournir des informations utiles par la combinaison des mesures prises par les différents capteurs et de les communiquées ensuite via le support sans fil.

Cette nouvelle technologie promet de révolutionner notre façon de vivre, de travailler et d'interagir avec l'environnement physique qui nous entoure. Des capteurs communicants sans fils et dotés de capacités de calcul facilitent une série d'applications irréalisables ou trop chères il y a quelques années. Aujourd'hui, des capteurs minuscules et bon marché peuvent être littéralement éparpillés sur des routes, des structures, des murs ou des machines, créant ainsi une sorte de seconde peau numérique capable de détecter une variété de phénomènes physiques. De nombreux domaines d'application sont alors envisagés tels que la détection et la surveillance des désastres, le contrôle de l'environnement et la cartographie de la biodiversité, le bâtiment intelligent, l'agriculture de précision, la surveillance et la maintenance préventive des machines, la médecine et la santé, la logistique et les transports intelligents, les applications militaires etc...

Les réseaux de capteurs sans fils sont souvent caractérisés par un déploiement dense et à grande échelle dans des environnements limités en terme de ressources. Les limites imposées sont la limitation des capacités de traitement, de stockage et surtout d'énergie car ils sont généralement alimentés par des batteries. Recharger les batteries dans un réseau de capteurs est quasiment impossible en raison de l'emplacement des nœuds, mais le plus souvent pour la simple raison que cette opération est pratiquement ou économiquement infaisable. Il est donc largement reconnu que la limitation énergétique est une question incontournable dans la conception des réseaux de capteurs sans fils en raison des contraintes strictes qu'elle impose sur l'exploitation du réseau. En fait, la consommation d'énergie des capteurs joue un rôle important dans la durée de vie du réseau qui est devenue le critère de performance prédominant dans ce domaine. Si nous voulons que le réseau fonctionne de manière

satisfaisante aussi longtemps que possible, ces contraintes d'énergie nous obligent à faire des compromis entre différentes activités aussi bien au niveau du nœud qu'au niveau du réseau.

Plusieurs travaux de recherche sont apparus avec un objectif : optimiser la consommation énergétique des nœuds à travers l'utilisation de techniques de conservation innovantes afin d'améliorer les performances du réseau, notamment la maximisation de sa durée de vie. De façon générale, économiser l'énergie revient finalement à trouver le meilleur compromis entre les différentes activités consommatrices d'énergie. La littérature des réseaux de capteurs sans fil reconnaît que la radio est un consommateur d'énergie prééminent [Sch 2002], [Eug 2001].

La communauté des chercheurs a proposé un grand nombre de protocoles à tous les niveaux de la pile protocolaire, de la couche physique jusqu'à la couche application, ils se classent naturellement en deux catégories. La première classe de protocoles émane du domaine des réseaux ad hoc, mais l'application de ces protocoles aux réseaux de capteurs sans fils engendre, sans surprise, une complexité et des coûts énergétiques notoires. La deuxième classe de protocoles est propre aux réseaux de capteurs, ils sont souvent dirigés et élagués pour une application précise. Par conséquent, ils ne peuvent pas être appliqués et déployés de manière appropriée à tout contexte applicatif et nombre d'entre eux ont été largement déployés en raison des inconvénients liés aux problématiques de durabilité du réseau. Afin de prolonger la durée de vie du réseau, des protocoles tenant compte de l'efficacité énergétique sont nécessaires. En revanche, la liberté laissée à l'implantation est forte et impose de concevoir complètement l'infrastructure, les mécanismes et les protocoles en fonction de l'application visée puisque c'est la durabilité de cette dernière qui est en jeu.

Pour mieux cerner les enjeux de notre étude, dans le premier chapitre nous présenterons les réseaux de capteurs sans fils, leurs architectures de communication et leurs applications, nous parlerons également des principaux facteurs et contraintes qui influent la conception des réseaux de capteurs sans fil.

Dans le deuxième chapitre nous décrirons la problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, nous citerons les facteurs intervenant dans la consommation d'énergie et nous donnerons quelques techniques de minimisations de la consommation énergétique.

Dans le troisième chapitre nous parlerons de quelques protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans fils qui se focalise sur la minimisation de la consommation d'énergie.

Dans le quatrième chapitre nous détaillerons le protocole LEACH, nous parlerons de son architecture de communication, son algorithme ainsi que ces caractéristiques.

Dans le cinquième chapitre nous implémentons et évaluons le protocole LEACH par rapport à la métrique de la consommation d'énergie.

Enfin nous clôturons par une conclusion générale et des perspectives.

I. Introduction:

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

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

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

II. Le capteur sans fil :

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, humidité, vibration, etc.), et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base. Chaque capteur assure les trois principales fonctions de base qui sont: l'acquisition de données, les traitements sur ces données et leurs communications et acheminement aux stations de bases.

Le schéma ci-dessous (Figure I.1) fournit une vue globale d'une architecture typique pour un nœud capteur. Un nœud capteur peut être divisé en quatre unités de base: unité de captage, unité de traitement, unité de communication et source d'énergie. Ils peuvent également avoir d'autres composants dépendant de l'application tels qu'un système de localisation, un générateur d'énergie et un mobilisateur.

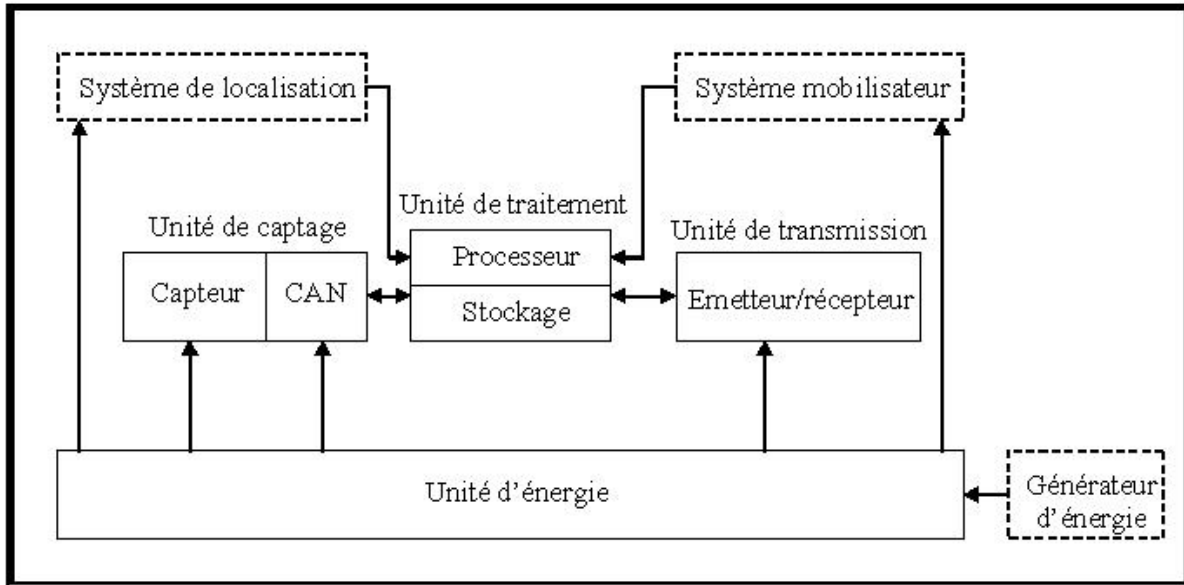


Figure I.1 : Architecture physique d'un capteur.

- **L'unité d'acquisition de données:** composée d'un capteur qui obtient des mesures sur les paramètres environnementaux et d'un convertisseur Analogique/Numérique qui convertit l'information relevée et la transmet à l'unité de traitement.
- **L'unité de traitement de données:** composée d'un processeur et d'une mémoire intégrant un système d'exploitation spécifique. Cette unité possède deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une interface pour l'unité de communication. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de communication. Cette dernière est également chargée d'exécuter les protocoles de communications qui permettent de faire collaborer le capteur avec d'autres capteurs. Elle peut aussi analyser les données captées.
- **L'unité de communication de données:** unité responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication radio.
- **La batterie (source d'énergie):** permet d'alimenter tous ses composants. Cependant, à cause de sa taille réduite, la batterie dont il dispose est limitée et généralement irremplaçable. Pour cela, l'énergie est la ressource la plus précieuse puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des capteurs.

III. La pile protocolaire :

La pile protocolaire [Aky 2002] utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs du réseau est illustrée par la figure I.2. La pile protocolaire comprend la couche application, la couche transport, la couche réseau, la couche liaison de données, la couche physique, le plan de gestion de l'énergie, le plan de gestion de la mobilité et le plan de gestion des tâches.

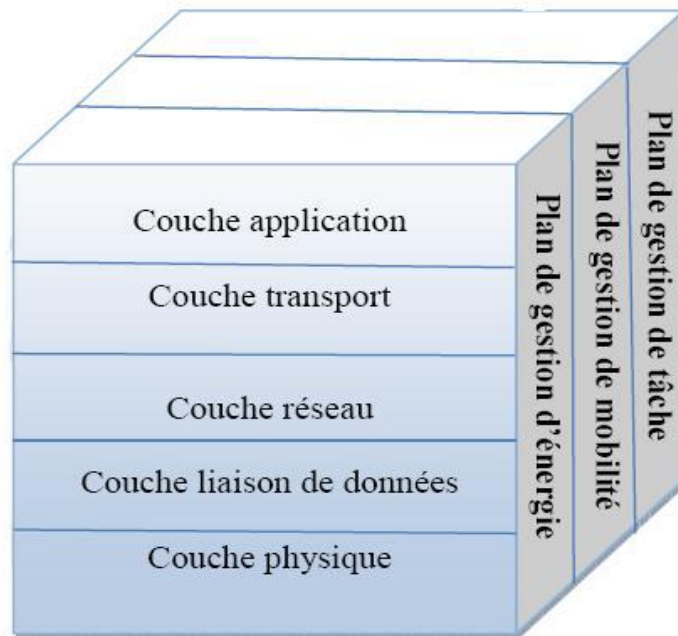


Figure I.2 : La pile protocolaire dans les réseaux de capteurs.

Suivant la fonctionnalité des capteurs, différentes applications peuvent être utilisées et bâties sur la couche application. La couche transport aide à gérer le flux de données si le réseau de capteurs l'exige. Elle permet de diviser les données issues de la couche application en segments pour les délivrer, ainsi elle réordonne et rassemble les segments venus de la couche réseau avant de les envoyer à la couche application. La couche réseau prend soin de router les données fournies par la couche transport. Le protocole MAC (Media Access Control) de la couche liaison assure la gestion de l'accès au support physique. La couche physique assure la transmission et la réception des données au niveau bit.

En outre, les plans de gestion de l'énergie, de la mobilité et des tâches surveillent la puissance, le mouvement et la distribution des tâches, respectivement, entre les nœuds capteurs. Ces plans de gestion sont nécessaires, de sorte que les nœuds capteurs puissent fonctionner ensemble d'une manière efficace pour préserver l'énergie, router des données dans un réseau de capteurs mobile et partager les ressources entre les nœuds capteurs. Du point de vue global, il est plus efficace d'utiliser des nœuds capteurs pouvant collaborer entre eux. La durée de vie du réseau peut être ainsi prolongée. [Moa 2008]

IV. Quelques domaines d'application des réseaux de capteurs sans fils :

La diminution de taille et de coût des micro-capteurs, l'élargissement de la gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations, ...) et l'évolution des supports de communication sans fil ont élargi le champ d'application des réseaux de capteurs. Les RCSF (Réseaux de Capteurs Sans Fils) peuvent être utilisés dans plusieurs applications [Jun 2002] [Cho 2003]. Parmi elles, nous citons :

- **Découverte de catastrophes naturelles** : on peut créer un réseau autonome en dispersant les nœuds dans la nature. Des capteurs peuvent ainsi signaler des événements tels que les feux de forêts, les tempêtes ou les inondations. Ceci permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours.
- **Détection d'intrusions** : en plaçant à différents points stratégiques des capteurs, on peut ainsi prévenir des cambriolages ou des passages de gibier sur une voie de chemin de fer (par exemple) sans avoir à recourir à de coûteux dispositifs de surveillance vidéo.
- **Gestion de stock** : on pourrait imaginer devoir stocker des denrées nécessitant un certain taux d'humidité et une certaine température. Dans ces applications, le réseau doit pouvoir collecter ces différentes informations et alerter en temps réel si les seuils critiques sont dépassés.
- **Contrôle de la pollution** : des capteurs au-dessus d'un emplacement industriel offrent la possibilité de détecter et de contrôler des fuites de gaz ou de produits chimiques. Ces applications permettent de donner l'alerte en un temps record et de pouvoir suivre l'évolution de la catastrophe.
- **Agriculture** : des nœuds peuvent être incorporés dans la terre et on peut interroger le réseau sur l'état du champ et déterminer par exemple les secteurs les plus secs afin de les arroser en priorité. On peut aussi imaginer équiper des troupeaux de bétail de

capteurs pour connaître en tout temps, leur position ce qui éviterait aux éleveurs d'avoir recours à des chiens de berger.

- **Surveillance médicale** : en implantant sous la peau de mini capteurs vidéo, on peut recevoir des images d'une partie du corps en temps réel sans aucune chirurgie. On peut ainsi surveiller la progression d'une maladie ou la reconstruction d'un muscle.
- **Surveillance de barrages** : on peut inclure sur les parois des barrages des capteurs qui permettent de calculer en temps réel la pression exercée. Il est donc possible de réguler le niveau d'eau si les limites sont atteintes. On peut aussi imaginer inclure des capteurs entre les sacs de sables formant une digue de fortune. La détection rapide d'infiltration d'eau peut servir à renforcer le barrage en conséquence. Cette technique peut aussi être utilisée pour d'autres constructions tels que ponts, voies de chemins de fer, routes de montagnes, bâtiments et autres ouvrages d'art.

IV. Les réseaux de capteurs sans fils :

IV.1. Définition d'un réseau de capteurs sans fils :

Les réseaux de capteurs sans fil (WSNs: wireless sensor networks) sont un type particulier de réseau Ad-hoc, dans lesquels les nœuds sont des « capteurs intelligents » (smart sensor). Ils se composent généralement d'un grand nombre de capteurs communicants entre eux via des liens radio pour le partage d'information et le traitement coopératif. Dans ce type de réseau, les capteurs échangent des informations par exemple sur l'environnement pour construire une vue globale de la région contrôlée, qui est rendue accessible à l'utilisateur externe par un ou plusieurs nœuds. Les données collectées par ces capteurs sont acheminées directement ou via les autres capteurs de proche en proche à un « point de collecte », appelé station de base (ou SINK NODE s'il s'agit d'un nœud). Cette dernière peut être connectée à une machine puissante via internet ou par satellite. En outre, l'utilisateur peut adresser ses requêtes aux capteurs en précisant l'information d'intérêt.

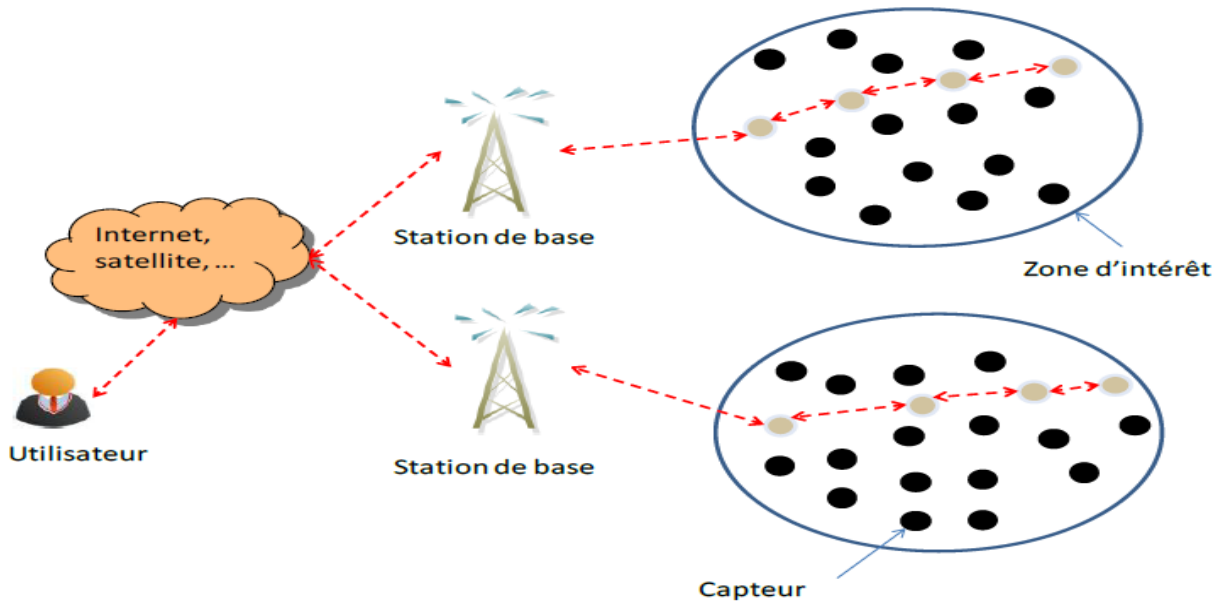


Figure I.3: Exemple de réseaux de capteurs

Un exemple de réseaux de capteurs est fourni dans la figure I.3 les capteurs sont déployés d'une manière aléatoire dans une zone d'intérêt, et une station de base, située à l'extrémité de cette zone, est chargée de récupérer les données collectées par les capteurs. Lorsqu'un capteur détecte un événement pertinent, un message d'alerte est envoyé à la station de base par le biais d'une communication entre les capteurs. Les données collectées sont traitées et analysées par des machines puissantes.

Les réseaux de capteurs viennent en soutien de l'environnement et de l'industrie grâce aux récents développements réalisés dans le domaine des techniques sans fils. Depuis quelques décennies, le besoin d'observer et de contrôler des phénomènes physiques tels que la température, la pression ou encore la luminosité est essentiel pour de nombreuses applications industrielles et scientifiques.

IV.2. Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fils :

Un réseau de capteurs sans fils présente les caractéristiques suivantes [Kam 2009] :

- ❖ **Absence d'infrastructure** : les réseaux Ad-hoc en général, et les réseaux de capteurs en particulier se distinguent des autres réseaux par la propriété d'absence d'infrastructure préexistante et de tout genre d'administration centralisée.

- ❖ **Taille importante** : un réseau de capteurs peut contenir des milliers de nœuds.
- ❖ **Interférences** : les liens radio ne sont pas isolés, deux transmissions simultanées sur une même fréquence, ou utilisant des fréquences proches, peuvent interférer.
- ❖ **Topologie dynamique** : les capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire rendant ainsi la topologie du réseau fréquemment changeante.
- ❖ **Sécurité physique limitée** : les réseaux de capteurs sans fil sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé.
- ❖ **Bande passante limitée** : une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé. Ce partage fait que la bande passante réservée à un nœud est limitée.
- ❖ **Contrainte d'énergie** : de stockage et de calcul - la caractéristique la plus critique dans les réseaux de capteurs est la modestie de ses ressources énergétiques car chaque capteur du réseau possède de faibles ressources en termes d'énergie (batterie). Afin de prolonger la durée de vie du réseau, une minimisation des dépenses énergétiques est exigée chez chaque nœud. Ainsi, la capacité de stockage et la puissance de calcul sont limitées dans un capteur.

IV.3. Contraintes de conception des RCSF :

Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit [Yas 2010] :

- ❖ **La tolérance aux fautes**: la tolérance aux fautes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau en présence de fautes. La fiabilité des réseaux de capteurs sans fil est affectée par des défauts qui se produisent à cause de diverses raisons telles que le mauvais fonctionnement du matériel ou à cause d'un manque d'énergie. Ces problèmes n'affectent pas le reste du réseau.
- ❖ **Le facteur d'échelle (Scalability)**: le nombre de nœuds de capteurs augmente sur un réseau sans fil et ce nombre peut atteindre le million. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions entre les nœuds et peut imposer des difficultés pour le transfert de données.

- ❖ **Les coûts de production:** souvent les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre de nœuds. Le prix d'un nœud est critique afin de pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel.
- ❖ **L'environnement :** les capteurs sont souvent déployés en masse dans des endroits tels que des champs de bataille, à l'intérieur de grandes machines, au fond d'un océan, dans des champs biologiquement ou chimiquement souillés,... Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiques éloignées.
- ❖ **La topologie de réseau:** le déploiement d'un grand nombre de nœuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phases : déploiement, post-déploiement (les capteurs peuvent bouger, ne plus fonctionner,...) et redéploiement de nœuds additionnels.
- ❖ **Les contraintes matérielles:** la principale contrainte matérielle est la taille du capteur. Les autres contraintes sont la consommation d'énergie qui doit être moindre pour que le réseau survive le plus longtemps possible, qu'il s'adapte aux différents environnements (fortes chaleurs, eau,...), qu'il soit autonome et très résistant vu qu'il est souvent déployé dans des environnements hostiles.
- ❖ **Les médias de transmission :** dans un réseau de capteurs, les nœuds sont reliés par une architecture sans fil. Pour permettre des opérations sur ces réseaux dans le monde entier, le média de transmission doit être standardisé. On utilise le plus souvent l'infrarouge, le Bluetooth et les communications radio Zig Bee.
- ❖ **La consommation d'énergie:** un capteur, de par sa taille, est limité en énergie (<1.2V). Dans la plupart des cas le remplacement de la batterie est impossible. Ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de la batterie. Dans un réseau de capteurs (multi-sauts) chaque nœuds collecte des données et envoie/transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de quelques nœuds nécessite un changement de la topologie du réseau et un re-routage des paquets. Toutes ces opérations sont gourmandes en énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens de réduire cette consommation

V. Les Axes de travaux pour les réseaux de capteurs sans fils :

Le domaine des réseaux de capteurs est encore vierge et nécessite plusieurs travaux pour arriver à un certain degré de stabilité. Les travaux sur les protocoles de routage ont pris la part du lion. Dans le chapitre III, nous présentons quelques protocoles, dans ce qui suit nous citons d'autres axes de recherches pour les réseaux de capteurs sans fils.

V.1. Architecture hardware des capteurs :

La conception des nœuds est motivée par le besoin d'avoir des dispositifs peu coûteux avec une petite taille et une faible dissipation d'énergie. Pour cette raison, plusieurs projets ont vu le jour.

- Le projet WINS (Wireless Integrated Network Sensors) lancé par UCLA et, Rockwell a permis de développer des capteurs intégrant la capture, le traitement, et la communication. Ces capteurs sont fabriqués en utilisant la technologie LWIM (low-power wireless integrated microsensor) [Bul 1996]. Une nouvelle génération des nœuds WINS est développée par la société Sensoria Corporation permet de contrôler et de traiter plusieurs signaux. Les données capturées et les messages sont échangés à travers les nœuds via des modems utilisant la radiofréquence.
- Le projet Smart-Dust utilise des nœuds capteurs basés sur la technologie MEMS (Micro Electro Mechanical System) avec une taille approximative de 1 millimètre cube qui communiquent avec une station de base via des liens optiques. L'utilisateur communique avec les nœuds attachés aux objets contrôlés en utilisant une station de base mobile équipée d'une unité émetteur-récepteur.
- L'objectif du projet μ AMPS (micro-Adaptive Multi-domain Power-aware Sensors) est de concevoir des capteurs efficaces en énergie, des logiciels pour ces nœuds, et des protocoles de communication.
- Le projet PicoRadio [Pic web] a l'intention d'implémenter des mono-puces de faible dissipation d'énergie ($<500\mu\text{W}$), des dispositifs radio reconfigurables, et interconnecter un grand nombre de dispositifs. Ces objectifs peuvent être atteints particulièrement en optimisant les couches physique, MAC (Medium Access Control), et réseau.

- Rockwell Science Center [Roc web] a développé un prototype de micro-capteur avec un schéma modulaire lui permettant d'incorporer plusieurs modules de capture dans un seul nœud.
- Crossbow propose 3 familles de capteurs sans fil équipé de processeurs miniatures-MICA (MPR300), MICA2 (MPR 400) et MICA2 – DOT (MPR500). Ces modules sont équipés de processeurs fonctionnant avec un système d'exploitation très réduit, ils existent en version radio, émission/réception, dans la bande ISM, et en version enregistreur disposant d'une capacité de stockage de 100 000 mesures. Les dernières générations de Crossbow (MPR400 et MPR500) disposent de possibilités de réglage en fréquence, ainsi que des dernières fonctionnalités de la bande FM, ils disposent également de fonctions de reprogrammation des processeurs à distance.
- Beaucoup d'autres fabricants existent par exemple: Digital Sun [Dig web], Dust Networks [Dus web], Intel [Int web], Ember Corporation [Emb web], Ferro Solutions [Fer web], Senera [Sen web], Sensicast [Cas web] et Xsilog [Xsi web].

V.2. Système d'exploitation pour les réseaux de capteurs sans fils:

Le système d'exploitation (en anglais *Operating System* ou *OS*) est un ensemble de programmes responsables de la liaison entre les ressources matérielles d'un dispositif et les applications de l'utilisateur. Les OSs destinés aux réseaux de capteurs doivent être de petite taille à cause des limitations en ressources physiques, mais avec plus de performances en temps d'exécution, en occupation de mémoire et en gestion d'énergie. Comme exemple d'OS pour les réseaux de capteurs nous pouvons citer:

❖ TinyOS

TinyOS (Tiny Operating System) [Tin web] est un système d'exploitation "open source" pour les réseaux de capteurs conçu par l'université américaine de BERKELEY. Sa conception a été entièrement réalisée en NesC, langage orienté composant syntaxiquement proche du C. Il repose sur:

- une architecture basée composant.
- un modèle de programmation basé évènement.
- un modèle de concurrence basé sur des évènements et des tâches.

La bibliothèque de composants de TinyOS est particulièrement complète puisqu'on y retrouve des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données. Un programme s'exécutant sur TinyOS est constitué d'une sélection de composants systèmes et de composants développés spécifiquement pour l'application à laquelle il sera destiné

(mesure de température, du taux d'humidité...).

❖ Think

C'est une implémentation du modèle Fractal en C [Fas 2001]. Il est développé par l'INRIA et France Télécom R&D pour:

- Créer des systèmes d'exploitation pour les systèmes embarqués.
- Créer les applications s'exécutant dessus.

Il repose sur une utilisation plus large de l'ingénierie logicielle basée composant (aspect dynamique) et propose une gestion des aspects non fonctionnels via des contrôleurs. Contrairement à TinyOS, il permet l'allocation dynamique de ressources.

V.3. Déploiement d'un réseau de capteurs :

L'une des caractéristiques des réseaux de capteurs est la grande densité des nœuds redondants placés dans la région cible. La manière de déployer ces nœuds (ie: déterminer où les placer et suivant quelle structure permettant une couverture optimale de la région cible) est un problème qui reste toujours posé. Le déploiement des nœuds dépend de plusieurs facteurs: les capacités individuelle des nœuds, les caractéristiques de propagation radio, et la topologie de la région [Meh 2001].

Plusieurs travaux sont faits pour cette raison, par exemple Sadegh et Spall [Sad 2000] ont proposé un modèle pour le placement des nœuds en se basant sur la corrélation entre les réponses des nœuds. Plusieurs techniques d'optimisation sont étudiées pour être utilisées comme FDSA (Finite Difference Stochastic Approximation), SPSA (Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation), DGBT (Deterministic Gradient Based Techniques), et les Algorithmes génétiques. Cette approche a pour avantage de ne pas nécessiter des mesures exactes sur la configuration initiale. Une approche basée sur les frontières (frontier-based) est proposée par [Yam 1998] dans laquelle une carte d'occupation globale de l'environnement cible est construite de manière incrémentale. Cette carte est ensuite analysée afin de localiser les frontières entre les espaces libres et inconnus. Howitt et Ham [How 1999] ont proposé une technique pour localiser la station de base en formulant le problème sous forme d'un modèle optimisant une fonction objective par des méthodes stochastiques.

V.4. Agrégation de données :

L'une des caractéristiques des réseaux de capteurs est la possibilité de réduire la quantité de données circulant dans le réseau, afin de conserver de l'énergie, en fusionnant les données par des nœuds particulier du réseau. Ce processus est appelé agrégation de données.

L'agrégation exige, non seulement, la transmission des données mais aussi les messages de contrôle, ce qui impose des contraintes sur l'architecture du réseau. Pendant l'agrégation nous devons aussi prendre en considération quelques problèmes: Les erreurs dans les messages, les messages perdus, la redondance des données, la synchronisation entre les nœuds ...etc. Dans ce qui suit nous présentons quelques travaux dans ce sujet. Karl et al. [Kar 2003] ont proposé une framework pour l'agrégation de données dans laquelle un mécanisme de contrôle des erreurs est assuré. Chaque message contient trois parties: la valeur des données, le nombre des nœuds qui ont contribué à cette valeur, et la zone qui forme l'ensemble des nœuds qui doivent contribuer dans l'opération de l'agrégation. Ding et al. [Din 2003] ont proposé une méthode heuristique afin de construire et maintenir un arbre d'agrégation dans un réseau de capteurs sans fil. Les auteurs dans [Kar 2003] ont introduit deux algorithmes, exacte et approximatif, pour l'agrégation des données. Le processus se fait en deux niveaux. Premièrement, des agrégateurs locaux sont utilisés pour fusionner les données reçues à partir des nœuds locaux, puis des agrégateurs maîtres sont choisis de façon optimale pour réaliser le deuxième niveau d'agrégation.

Motegi et al. [Mot 2006] ont proposé une méthode pour l'agrégation de données qui est divisé en deux phases:

- la première consiste en la formation d'un graphe acyclique orienté (DAG: Directed Acyclic Graph) qui permet aux nœuds d'avoir plusieurs parents pour la collection des données.
- dans la deuxième et pendant la transmission des données, le graphe est étendu en utilisant un contrôle temporel selon le nombre de saut actuel dans le graphe.

IV. Conclusion :

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant vu la diversité de ces applications : santé, environnement, industrie et même dans le domaine sportif.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures de communication, la pile protocolaire des capteurs et leurs diverses applications. Cependant, nous avons remarqué que plusieurs facteurs et contraintes compliquent la gestion de ce type de réseaux. En effet, les réseaux de capteurs se caractérisent

par une capacité énergétique limitée rendant l'optimisation de la consommation d'énergie dans des réseaux pareils une tâche critique pour prolonger la durée de vie du réseau.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons les différents facteurs qui interviennent dans la consommation d'énergie et nous présenteront quelques techniques pour la conserver.

I. Introduction :

La durée de vie est sans doute la métrique la plus importante dans l'évaluation des performances d'un réseau de capteurs sans fils. En effet les capteurs sont conçus pour fonctionner durant des mois voire des années. Ainsi, la capacité énergétique des capteurs doit être utilisée efficacement afin de maximiser la durée de vie du réseau. A noter qu'une fois qu'un nœud capteur a épuisé son énergie, il est considéré comme défaillant. Ainsi, il y a une forte probabilité de perdre la connectivité du réseau.

Dans ce chapitre, nous décrivons la problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Nous présenterons aussi les principales solutions proposées dans la littérature pour la gestion de la consommation de l'énergie.

II. Notion de durée de vie d'un réseau de capteurs sans fils:

Un réseau ne peut accomplir son objectif que tant qu'il est « en vie », mais pas au delà. La durée de vie prévue est donc critique dans tout déploiement de réseau de capteurs. Le but des scénarios applicatifs classiques consiste à déployer des nœuds dans un domaine sans surveillance pendant des mois voire des années [Kac 2009].

La vie d'un réseau de capteurs correspond à la période de temps durant laquelle le réseau peut, selon le cas : maintenir assez de connectivité, couvrir le domaine entier, ou garder le taux de perte d'information en-dessous d'un certain niveau. La vie du système est donc directement liée à la vie nodale, même si elle peut en différer. La vie nodale correspond à la vie d'un des nœuds du réseau. Elle dépend essentiellement de deux facteurs : l'énergie qu'il consomme en fonction du temps et la quantité d'énergie dont il dispose.

Selon la discussion d'Akyildiz et al. Dans [Aky 2002], la quantité prédominante d'énergie est consommée par un nœud-capteur durant la détection, la communication puis le traitement des données.

Il existe différentes définitions pour la durée de vie d'un réseau de capteurs (fondées sur la fonctionnalité désirée). Elle peut être définie par la durée jusqu'au moment où le premier nœud meurt. Elle peut également être définie par le temps jusqu'au moment où une proportion de nœuds meurt. Si la proportion de nœuds morts dépasse un certain seuil, cela peut avoir comme conséquence la non couverture de sous-régions et/ou le partitionnement du réseau. Les définitions possibles et proposées dans la littérature sont les suivantes :

1. La durée jusqu'à ce que le premier nœud épuise toute son énergie [Hol 2005]
[Gir 2005]
2. La durée jusqu'à ce que le premier clusterhead épuise toute son énergie [Sta 2005] ;
3. La durée jusqu'à ce qu'il reste au plus une certaine fraction de nœuds survivants dans le réseau [Sta 2005] ;

4. Demi-vie du réseau : la durée jusqu'à ce que 50% des nœuds épuisent leurs batteries et s'arrêtent de fonctionner [Hol 2005] ;

5. La durée jusqu'à ce que tous les capteurs épuisent leur énergie;

6. La durée jusqu'à ce que le réseau soit partitionné : apparition de la première division du réseau en deux (ou plus). Cela peut correspondre aussi à la mort du premier nœud (si celui ci tient une position centrale) ou plus tard si la topologie du réseau est plus robuste [Hol 2005];

7. k-couverture : la durée pendant laquelle la zone d'intérêt est couverte par au moins k nœuds;

8. 100%-couverture

_ (a) La durée pendant laquelle chaque cible est couverte par au moins un nœud;

_ (b) La durée pendant laquelle l'ensemble de la zone est couverte par au moins un nœud;

9. α -couverture

_ (a) La durée cumulée, au bout de laquelle au moins une portion de la région est couverte par au moins un nœud;

_ (b) La durée pendant laquelle la couverture tombe en-dessous d'un seuil prédéfini α ;

_ (c) La durée de fonctionnement continu du système avant que la couverture ou la proportion de paquets reçus (PDR pour Packet Delivery Ratio) tombent en-dessous d'un seuil prédéfini α ;

10. La durée pendant laquelle un pourcentage donné de nœuds possèdent un chemin vers la Station de Base ;

11. L'espérance de l'intervalle complet pendant lequel la probabilité de garantir simultanément une connectivité et une k-couverture est au moins α ;

12. La durée jusqu'à la perte de la connectivité ou de la couverture ;

13. La durée jusqu'à ce que le réseau ne fournisse plus un taux acceptable de détection d'événements;

14. La durée pendant laquelle le réseau satisfait continuellement les besoins de l'application.

Finalement, nous constatons bien que plusieurs définitions convergent puisque certaines d'entre elles ne sont que des relaxations des autres et la majorité suggère que la durée de vie du réseau dépend de la consommation d'énergie de ses nœuds. Toutefois, il peut

s'avérer judicieux d'introduire une métrique pour affiner ou choisir une de ces définitions telle que la fiabilité, la couverture, la robustesse, etc. Ce que l'on peut également constater c'est que la définition même de la durée de vie va dépendre de l'application dédiée au réseau de capteurs sans fils.

III. consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fils :

La première étape dans la conception de système énergétique de capteurs consiste à analyser les caractéristiques de consommation d'énergie d'un nœud de capteur sans fil. Cette analyse systématique de l'énergie d'un nœud capteur est extrêmement importante pour identifier les problèmes dans le système énergétique pour permettre une optimisation efficace. Comme nous l'avons déjà cité l'énergie consommée par un nœud capteur est principalement due aux opérations suivantes : la détection (ou la capture), le traitement et la communication [96].

III.1 Energie de capture :

L'énergie de capture est dissipée pour accomplir les tâches suivantes : échantillonnage, traitement de signal, conversion analogique/numérique et activation de la sonde de capture.

En général, l'énergie de capture représente un faible pourcentage de l'énergie totale consommé par un nœud capteur.

III.2 Energie de traitement

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

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

III.3 Energie de communication

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

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

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

❖ Etat du module radio

Le module radio est le composant du nœud capteur qui consomme le plus d'énergie, puisque c'est lui qui assure la communication entre les nœuds. On distingue quatre états des composants radio (transmetteur et récepteur) : actif, réception, transmission et sommeil [Moa 2008]

- Etat actif : la radio est allumée, mais elle n'est pas employée. En d'autres termes, le nœud capteur n'est ni en train de recevoir ni de transmettre. Cet état provoque une perte de l'énergie suite à l'écoute inutile du canal de transmission. Pour éviter cette perte d'énergie, un capteur doit s'activer qu'en cas de nécessité, et le reste du temps il doit se mettre dans l'état sommeil.
- Etat sommeil : la radio est mise hors tension.
- Etat transmission : la radio transmet un paquet.
- Etat réception : la radio reçoit un paquet.

Il est aussi à noter que le passage fréquent de l'état actif à l'état sommeil peut avoir comme conséquence une consommation d'énergie plus importante que de laisser le module radio en mode actif. Ceci est dû à la puissance nécessaire pour la mise sous tension du module radio. Cette énergie est appelée l'énergie de transition. Il est ainsi souhaitable d'arrêter complètement la radio plutôt que de transiter dans le mode sommeil. Le changement d'état du module radio doit être géré par un protocole de la couche MAC.

❖ Accès au medium de transmission :

La sous couche MAC assure l'accès au support de transmission, la fiabilité de transmission, le contrôle de flux, la détection d'erreur et la retransmission des paquets.

Puisque les nœuds partagent le même médium de transmission, la sous-couche MAC joue un rôle important pour la coordination entre les nœuds et la minimisation de la consommation d'énergie. En effet, minimiser les collisions entre les nœuds permet de réduire la perte d'énergie. Dans ce qui suit, nous analyserons les principales causes de consommation d'énergie au niveau de la couche MAC [Moa 2008].

❖ La retransmission :

Les nœuds capteurs possèdent en général une seule antenne radio et partagent le même canal de transmission. Par ailleurs, la transmission simultanée des données provenant de plusieurs capteurs peut produire des collisions et ainsi une perte de l'information

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

❖ **L'écoute active :**

L'écoute active (*idle listening*) du canal pour une éventuelle réception de paquet qui ne sera pas reçu peut engendrer une perte importante de la capacité des nœuds en énergie. Pour éviter ce problème, il faut basculer les nœuds dans le mode sommeil le plus longtemps possible.

❖ **La sur-écoute :**

Le phénomène de sur-écoute (*overhearing*) se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés (voir figure 2.1). La sur-écoute conduit à une perte d'énergie additionnelle à cause de l'implication des autres capteurs dans la réception des données.

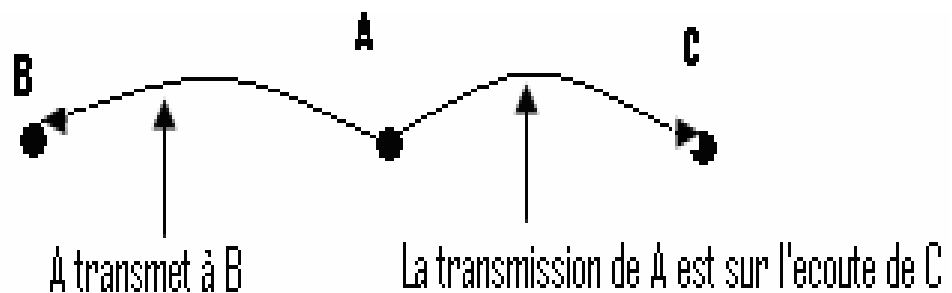


Figure II.1 : La sur-écoute dans une transmission.

❖ **La surcharge :**

Plusieurs protocoles de la couche MAC fonctionnent par échange de messages de contrôle (*overhead*) pour assurer différentes fonctionnalités : signalisation, connectivité, établissement de plan d'accès et évitement de collisions. Tous ces messages nécessitent une énergie additionnelle.

❖ **La surémission**

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

❖ **La taille des paquets**

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

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

IV. Techniques de minimisation de la consommation d'énergie :

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

Après la description des principales causes de consommation d'énergie dans les RSCF, nous présentons dans ce qui suit les différentes techniques utilisées pour minimiser cette consommation. Ces techniques sont appliquées soit au niveau de la couche liaison soit au niveau de la couche réseau. Le schéma suivant donne un aperçu global de ces mécanismes:

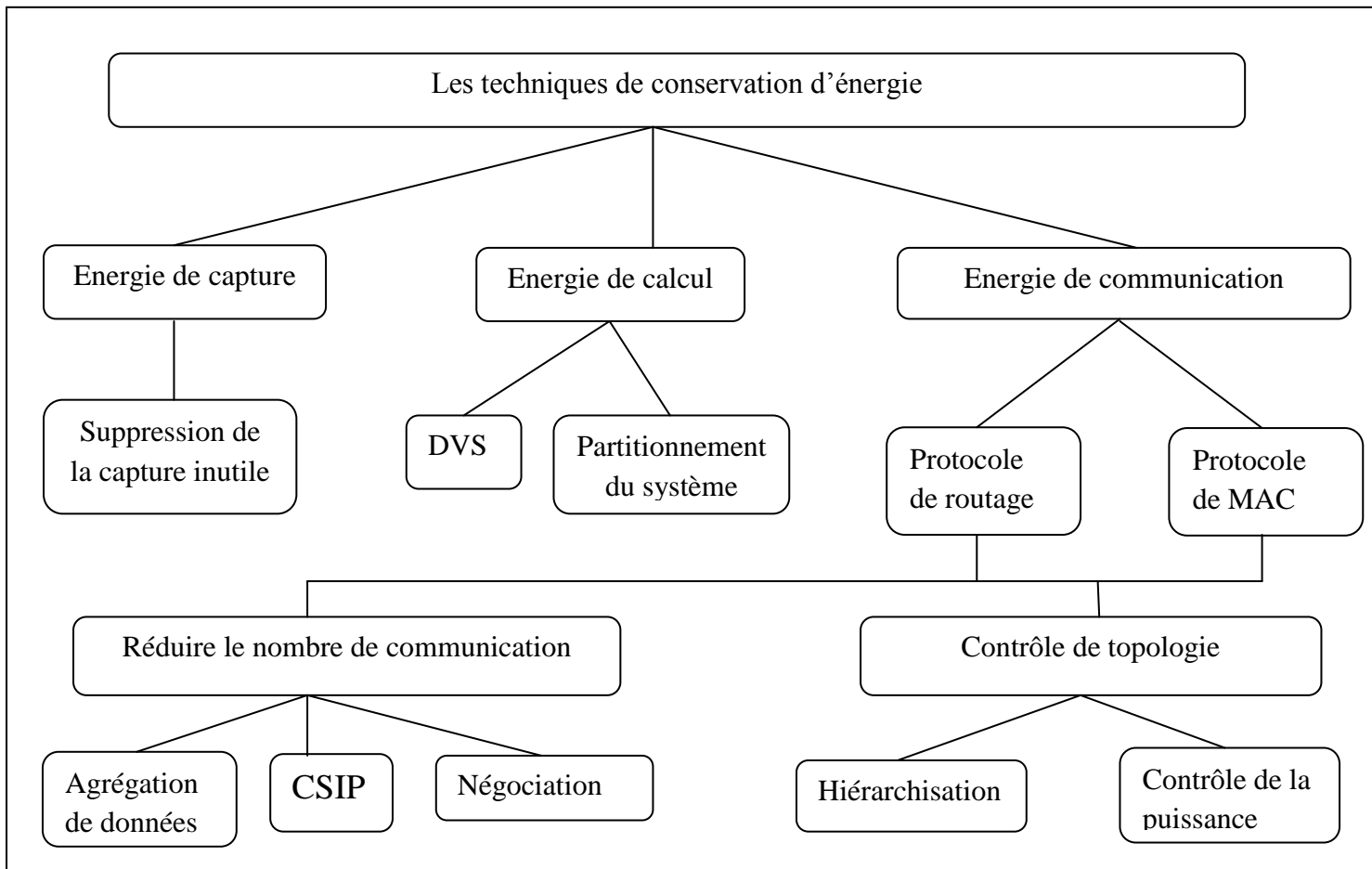


Figure II.2 : Les techniques de conservation d'énergie.

L'énergie du capteur peut être économisée soit au niveau de la capture, au niveau de traitement ou au niveau de la communication.

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

B. L'énergie de calcul peut être optimisée en utilisant deux techniques :

- L'approche DVS (Dynamic Voltage Scaling) [Jin 2000] qui consiste à ajuster de manière adaptative la tension d'alimentation et la fréquence du microprocesseur pour économiser la puissance de calcul sans dégradation des performances.

- L'approche de partitionnement de système qui consiste à transférer un calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul

C. La minimisation de la consommation d'énergie pendant la communication est étroitement liée aux protocoles développés pour la couche réseau et la sous-couche MAC. Ces protocoles se basent sur plusieurs techniques : l'agrégation de données, la négociation et à la technique CSIP (Collaborative Signal and Information Processing). Cette dernière technique est une discipline qui combine plusieurs domaines [45] : la communication et le calcul à basse puissance, le traitement de signal, les algorithmes distribués, la tolérance aux fautes, les systèmes adaptatifs et la théorie de fusion des capteurs et des décisions. Ces techniques ont le but de réduire le nombre d'émission/réception des messages. [Moa 2008]

V. Conclusion

Contrairement aux réseaux traditionnels et des réseaux Ad Hoc qui se préoccupent de garantir une bonne qualité de service (QoS : Quality of Service), les réseaux de capteurs doivent, en plus, donner de l'importance à la conservation d'énergie. Ils doivent intégrer des mécanismes qui permettent de prolonger la durée de vie du réseau en entier, car chaque nœud est alimenté par une source d'énergie limitée et généralement irremplaçable.

Dans ce qui suit nous allons parler des protocoles de routage qui justement se focalisent sur l'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fils.

I. Introduction:

Le routage est une méthode d'acheminement des informations vers une destination donnée dans un réseau de connexion. Comme nous l'avons déjà vu, l'architecture des réseaux de capteurs sans fils est caractérisée par l'absence d'infrastructure fixe préexistante, à l'inverse des réseaux de télécommunication classiques. Un réseau de capteurs sans fils doit s'organiser automatiquement de façon à être déployé rapidement et pouvoir s'adapter aux conditions du trafic et aux différents mouvements pouvant intervenir au sein des nœuds mobiles.

Dans le but d'assurer la connectivité du réseau, malgré l'absence d'infrastructure fixe, chaque nœud est susceptible d'être mis à contribution pour participer au routage et pour retransmettre les paquets d'un nœud qui n'est pas en mesure d'atteindre sa destination directement ; tout nœud joue ainsi le rôle de poste de travail et de routeur.

Chaque nœud participe donc au routage ce qui lui permet de découvrir les chemins existants afin d'atteindre les autres nœuds du réseau. Le fait que la taille d'un réseau puisse être importante, souligne que les techniques de routage dans les réseaux classiques nécessitent des modifications. Le problème qui se pose dans le contexte de ces réseaux est l'adaptation de la méthode d'acheminement utilisée à un grand nombre de nœuds possédant de modestes capacités de calculs et de sauvegarde et parfois même présentant des changements de topologie.

Il est impossible qu'un nœud puisse garder les informations de routage concernant tous les autres nœuds, car le réseau peut être volumineux. Ce problème ne se pose pas dans le cas des réseaux de petites tailles, car l'inondation (la diffusion pure qui fait propager un paquet dans le réseau entier) faite pour ce but dans ces réseaux n'est pas coûteuse ; par contre dans un réseau volumineux, le manque de données de routage concernant les destinations peut impliquer une large diffusion dans le réseau. Cela – si on considère seulement la phase de découverte des routes - peut dégrader considérablement les performances du système caractérisé principalement par une faible bande passante et une capacité énergétique limitée.

Dans le cas où le nœud destination se trouve dans la portée de communication du nœud source, le routage devient évident et aucun protocole de routage n'est initié, ce qu'on appelle envoi direct ou à un seul saut. Mais ce cas est généralement rare dans les réseaux Ad-hoc et

les réseaux de capteurs. Un nœud source peut avoir besoin de transférer des données à un autre nœud qui ne se trouve pas dans sa portée de communication. La Figure III.1 montre un exemple d'un réseau constitué de quatre nœuds. Le nœud A envoie directement un paquet à B sans besoin de routage puisque B est dans la portée de communication de A (envoi direct). D'ailleurs, si le nœud A veut envoyer un paquet au nœud D, il doit utiliser les « services » des nœuds intermédiaires B et C puisque le nœud D n'est pas dans la portée de A. A envoie le paquet à B ; B transmet le paquet à C ; C, à son tour, transmet le paquet au nœud D. Cette technique est appelée routage multi-sauts (multi-hops).

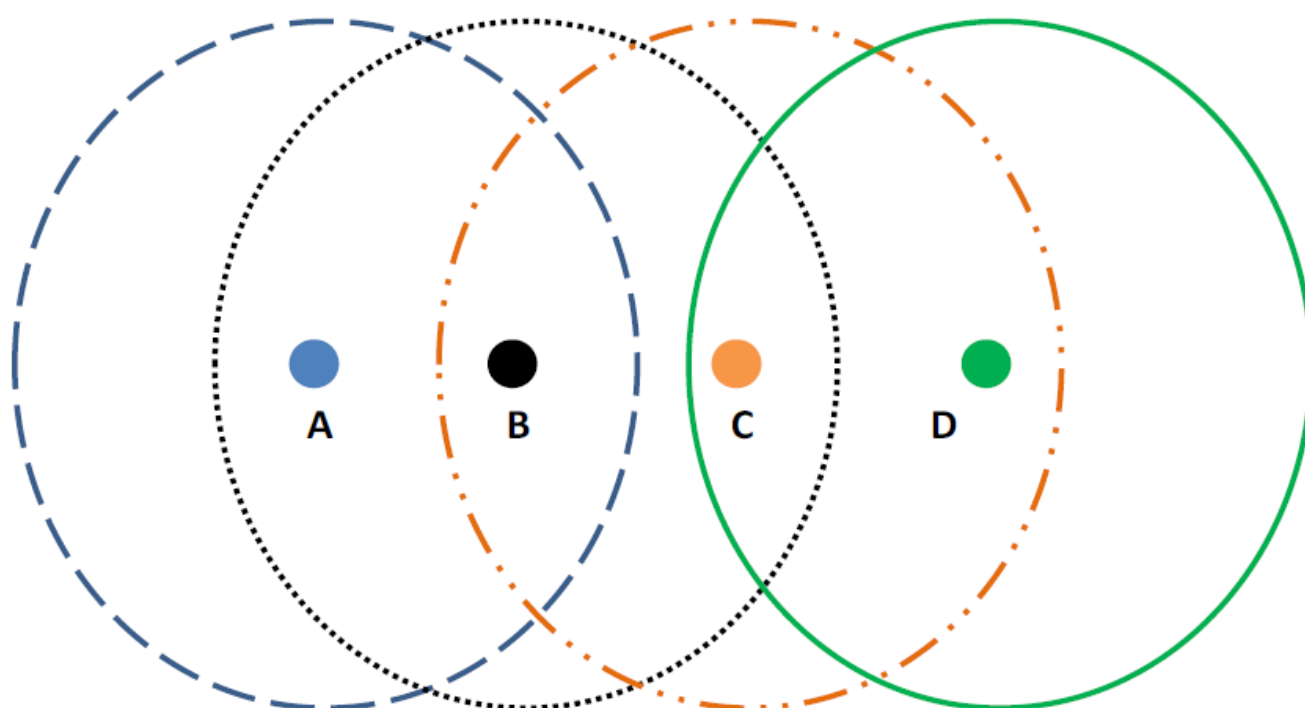


Figure III.1 : Communication multi sauts entre A et D.

II. Les protocoles de routages :

Dans les réseaux de capteurs, la conservation de l'énergie qui a une grande influence sur la durée de vie du réseau, est considérée, relativement, plus importante que les performances du réseau. Donc les protocoles de routages doivent permettre une consommation minimale de l'énergie sans dégrader considérablement les performances du réseau. Il existe différentes manières de les classifier comme le montre la figure suivante.

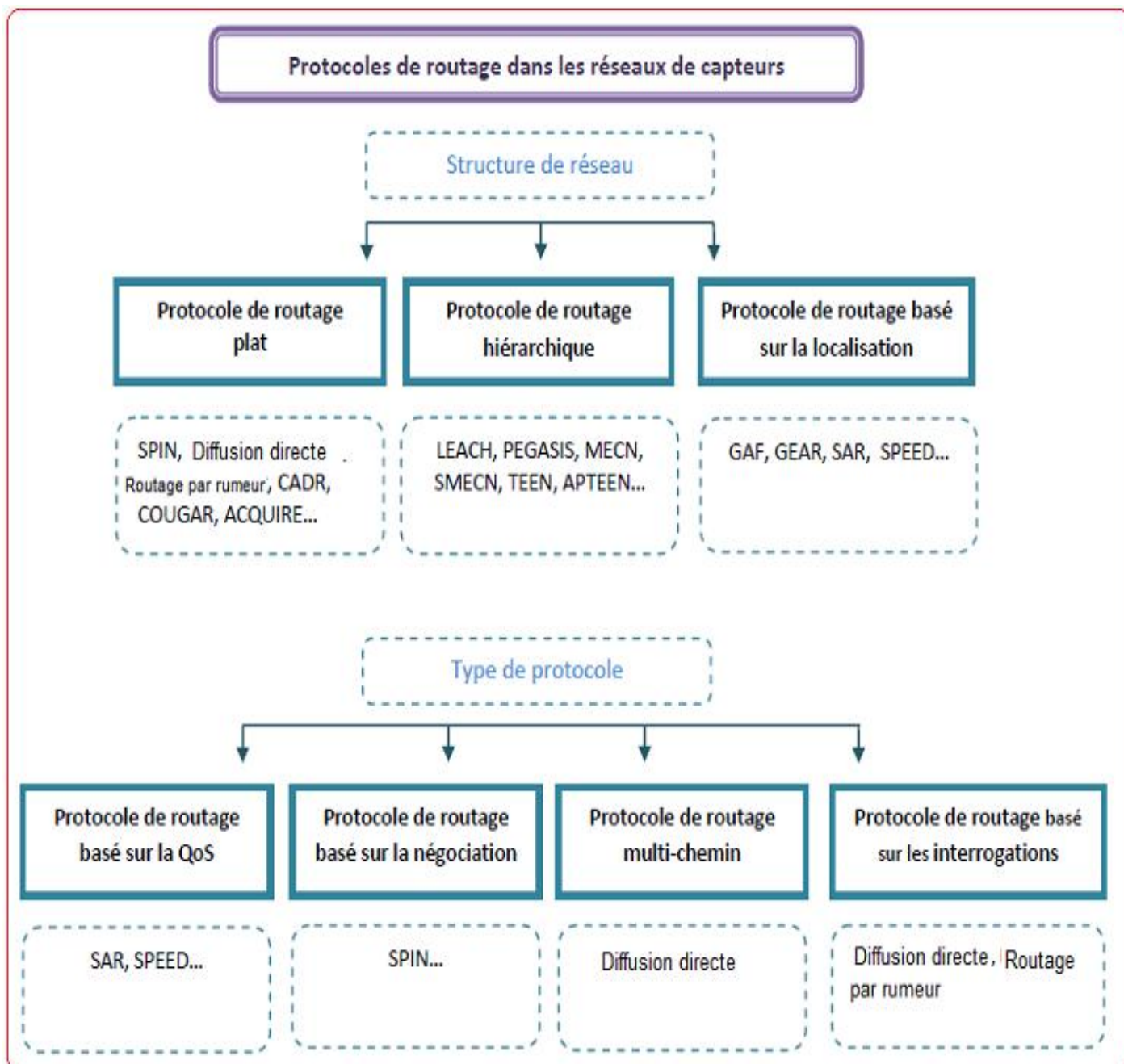


Figure III.2 : Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fils

II.1. Protocoles de routages pour les réseaux Ad Hoc :

Puisque les réseaux de capteurs font partie des réseaux ad hoc, il est intéressant de présenter quelques protocoles de routage de ces derniers. Selon l'information utilisée pour calculer les routes deux types de routage existent [Dho 2003]:

- ❖ **Routage à état de liens:** Maintenir dans chaque nœud une carte du réseau où figurent les nœuds et les liens entre eux aidant à construire les tables de routage. Par exemple: le protocole OLSR (Optimized Link State Routing) et le Protocole FSR (Fisheye State Routing).
- ❖ **Routage à vecteur de distance:** Plutôt que de maintenir une carte complète du réseau, ces protocoles ne conservent que la liste des nœuds du réseau et l'identité du voisin par lequel on passe pour atteindre la destination par le chemin le plus court. Par exemple: le protocole AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector).

Selon la méthode utilisée pour construire une route entre un noeud source et une autre de destination trois classes de protocole se figure [Dho 2003]:

- **L'approche réactive:** Ces protocoles ne cherchent à calculer une route qu'à la demande d'une application. Cela permet d'économiser de la bande passante et de l'énergie. Par exemple: le protocole DSR (Dynamic Source Routing).
- **L'approche proactive:** Le principe de base est de maintenir à jour les tables de routage périodiquement par l'échange de trames de contrôle, de sorte que lorsqu'un nœud désire envoyer un paquet à un autre, une route sera immédiatement connue. Par exemple: le protocole DSDV, le protocole OLSR et le Protocole FSR.
- **Les protocoles hybrides:** Le principe est de connaître notre voisinage de manière proactive jusqu'à une certaine distance (par exemple trois ou quatre sauts), et d'effectuer une recherche réactive à l'extérieur de cette zone. L'un des protocoles de ce type est le Protocole ZRP (Zone Routing Protocol).

➤ **Les protocoles proactifs vs les protocoles réactifs :**

Le tableau ci-dessous montre les points essentiels distinguant les protocoles proactifs des protocoles réactifs

Protocoles proactifs	Protocoles réactifs
▪ Echange de paquets de contrôle.	▪ Réaction à la demande par diffusion de requêtes.
▪ Mise à jour continue des tables de routage.	▪ Pas de tables de routage maintenues en continu.
☞ Les routes sont immédiatement disponibles à la demande.	☞ Coût important pour la mise en place des routes (inondation). ☞ Délais importants avant l'ouverture de chaque route.
☞ Le trafic de contrôle et de mise à jour peut être trop important et partiellement inutile.	☞ Pas de trafic continu pour les routes non utilisées.

Tableau III.1 : Comparaison entre les protocoles proactifs des protocoles réactifs

II.2. Protocoles basés sur la structure du réseau :

La structure du réseau peut jouer un rôle significatif dans le fonctionnement d'un protocole de routage dans un réseau de capteurs. Dans cette section nous donnons quelques protocoles qui rentrent dans cette catégorie.

II.2.1. Routage horizontal (plat) :

Dans les réseaux horizontaux ou plats, chaque nœud joue typiquement le même rôle et collabore avec les autres nœuds afin d'accomplir les tâches de capture et de routage. Vu le nombre important de nœuds utilisés, il est presque infaisable d'assigner un identificateur à chaque nœud. Dans ce cas le routage centré-données (data-centric routing) est utilisé, où la station de base lance une requête vers une région et attend les données à partir des nœuds se trouvant dans la région sélectionnée [Kar 2003]. Dans ce qui suit nous présentons quelques protocoles de cette famille.

✚ **Routage basé sur la diffusion dirigée (DD: Directed Diffusion)**

La diffusion dirigée ou Directed Diffusion [Bha 2006] est basé sur le Data-Centric (DC). L'idée principale du paradigme DC est de combiner les données venant de différentes sources, éliminer les redondances et minimiser le nombre de transmissions afin de conserver l'énergie du réseau. Contrairement au traditionnel paradigme appelé Address-Centric (AC) qui tente de trouver le plus court chemin entre deux nœuds mobiles (end-to-end routing), DC cherche les chemins de multiples sources à une seule destination ce qui cause une redondance de données. La figure III.3 montre un exemple de la différence entre les deux paradigmes de routage. Dans le routage AC chacun des trois nœuds sources détecte son chemin vers la destination indépendamment des autres. Par contre, dans le routage DC le nœud B (un nœud accumulateur) reçoit tous le flux de données pour l'envoyer à la destination [Cal 2004].

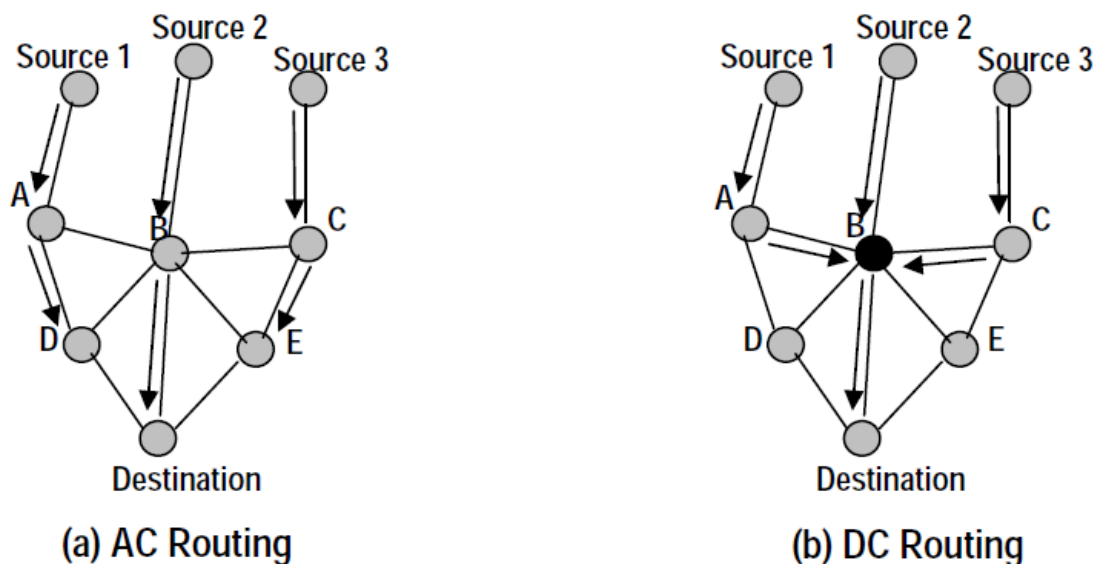


Figure III.3 : La différence entre le AC et le DC routing.

Avantages:

- L'agrégation, l'utilisation de caches, et l'élimination des redondances de données permettent la conservation de l'énergie.
- Sélectionne les meilleurs chemins et élimine ceux qui contiennent des boucles.

Inconvénients:

- L'agrégation de données nécessite une synchronisation.

- La sauvegarde des informations fusionnées peut causer l'overhead.

Protocole EAR (Energy Aware Routing)

Shah et Rabaey dans [Sha 2002] ont proposé un mécanisme où chaque nœud maintient un ensemble de chemins optimaux vers la station de base au lieu d'un seul. Durant la propagation des données dans le protocole Directed Diffusion, chaque nœud recevant un paquet choisi un voisin en direction de la station de base suivant une probabilité qui est inversement proportionnelle au coût d'atteindre la station de base via ce nœud. Le protocole suppose que chaque nœud peut être adressable selon des classes d'adressage qui incluent: la localisation géographique, le type du nœud (capteur, déclencheur, contrôleur), et le sous-type du nœud (Température, chimique...) [Mis 2004].

Avantages:

- D'après ses auteurs (Shah et Rabaey), et en le comparant avec Directed Diffusion, il réduit la consommation d'énergie par 21,5%, et augmente la durée de vie du réseau par 44%.

Inconvénients:

- Cette approche a besoin de collecter des informations sur les localisations et d'établir un mécanisme d'adressage pour chaque nœud ce qui complique sa structure.
- Très sensible à la mobilité des nœuds et à l'extensibilité du réseau.

Routage basé sur le gradient (GBR)

L'algorithme de routage GBR (Gradient-Based Routing) est une autre variante de Directed Diffusion. L'idée de base dans GBR est de mémoriser le nombre de sauts quand la requête est diffusée dans le réseau. Chaque nœud peut calculer un paramètre appelé hauteur du nœud, qui est le minimum du nombre de sauts pour atteindre la station de base. La différence entre les hauteurs des nœuds et celle de ses voisins dans un lien constitue le gradient de ce dernier. GBR utilise quelques techniques auxiliaires telles que l'agrégation et la distribution du trafic afin de diviser uniformément le trafic à travers le réseau.

Avantages:

- La simulation dans [Ham 2007] montre qu'il donne des meilleures performances par rapport au protocole Directed Diffusion en terme de consommation d'énergie.

Inconvénients:

- La mobilité des nœuds est limitée, sinon les hauteurs doivent être recalculées.

Plusieurs autres protocoles qui rentrent dans cette catégorie ont été proposés. Dans Rumor routing [Bra 2002], au lieu de diffuser les requêtes dans tout le réseau, c'est d'envoyer les requêtes seulement aux nœuds qui ont observé des événements particuliers. Le routage SAR (Sequential Assignment Routing) prend en considération trois facteurs lors de la construction des chemins: les sources d'énergie, la QoS de chaque chemin et le niveau de priorité de chaque paquet. L'algorithme MCFA (Minimum Cost Forwarding Algorithm) [Ye 2001] exploite le fait que la direction du routage est toujours connue (i.e. vers une station de base fixe). Dans cet algorithme, chaque nœud maintient le coût minimal estimé de ce dernier vers la station de base afin de choisir dans le routage le chemin ayant le coût minimal. L'approche du routage avec passage aléatoire (Routing with Random Walks) [Ser 2002] peut être considérée comme étant le premier algorithme réalisant un routage multi-chemins en plus qu'elle atteint un équilibre de la charge dans le réseau. L'idée principale du protocole IDSQ (constrained anisotropic diffusion routing) [Chu 2002] est d'interroger les capteurs et de router les données dans le réseau de telle sorte que le gain en informations est maximisé tandis que le temps d'attente et la bande passante sont minimisés. Dans IDSQ (Information-driven sensor querying), le nœud interrogé peut déterminer quel nœud peut fournir l'information la plus utile avec l'avantage d'équilibrer le coût d'énergie. Le protocole COUGAR [Yao 2002] qui voit le réseau comme étant une immense base de données distribuée. L'idée principale est d'utiliser des requêtes déclaratives afin d'abstraire le traitement des requêtes en rajoutant une couche de requêtes entre les couches réseau et application. Le protocole ACQUIRE (Active Query forwarding In sensor nEtworks) et similaire à COUGAR dans lequel Les requêtes complexes sont divisées en sous requêtes simples. Chaque nœud recevant une requête essaye de répondre partiellement à cette dernière en utilisant les informations sauvegardées dans son cache.

II.2.2. Le routage hiérarchique:

Le routage hiérarchique ou basé-groupe (cluster-based) est originalement proposé pour les réseaux filaires et ensuite utilisé pour les réseaux de capteurs. Dans une architecture hiérarchique, des nœuds ayant plus d'énergie sont utilisés pour traiter et transmettre les informations tandis que les nœuds de faible énergie sont utilisés pour capturer à la proximité

de la cible. C'est-à-dire construire des groupes de nœuds et leur associer spécialement les tâches à exécuter [Cal 2004]. Le routage hiérarchique se fait principalement en deux niveaux: dans l'un les représentants des groupes (cluster-heads) sont sélectionnés, et dans l'autre le routage proprement dit est procédé [Kar 03]. Dans ce qui suit nous présentons quelques protocoles de cette famille.

Protocole LEACH

Le protocole LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [Hei 2000] est basé sur une structure distribuée de cluster dans laquelle un représentant de cluster (CH: Cluster-Head) est choisi aléatoirement. LEACH fusionne les données dans le protocole de routage afin de réduire la quantité d'informations transmis vers la station de base. Il utilise aussi le protocole TDMA/CDMA pour réduire les collisions inter- et intra-cluster ; collection de données est centralisée et faite périodiquement (l'utilisateur n'a pas besoin de toutes les données immédiatement). Pour exploiter cette caractéristique, ce protocole introduit un groupement adaptatif, c'est-à-dire, réorganiser les clusters après un intervalle de temps aléatoire, en utilisant des contraintes énergétiques, afin d'avoir une dissipation d'énergie uniforme dans le réseau.

L'exécution du protocole LEACH est faite cycliquement où chaque cycle est divisé en quatre étapes [Mis 2004]:

1) La phase d'annonce:

Pendant cette phase, une partie des nœuds prédéterminée P est élu comme étant des CHs comme suit. Un nœud choisi un nombre aléatoire r entre 0 et 1. Si ce nombre est plus petit qu'une valeur de seuil $T(n)$, le nœud devient CH pour le cycle courant. $T(n)$ est calculé par une formule basée sur le pourcentage de vouloir être un CH, et l'ensemble G des nœuds non sélectionnés pour les derniers $1/P$ cycles. Elle est donné par:

$$T(n) = \frac{p}{1 - p(r \bmod (1/p))} \quad \text{si } n \in G$$

Quand G est l'ensemble des nœuds qui, après la sélection des CHs, diffusent un message d'annonce pour le reste des nœuds du réseau qu'ils sont des têtes de clusters.

2) La phase d'organisation des clusters:

En recevant le message d'annonce, tous les nœuds non CHs décident dans quel cluster ils veulent appartenir selon la puissance du signal du message et informent les CHs choisis.

3) La phase d'ordonnement:

Après la réception de tous les messages des nœuds désirant être membre d'un cluster, le CH crée un ordonnancement TDMA, qui sera diffusé à tous les membres du cluster, et assigne à chaque nœud un intervalle de temps.

4) La phase de transmission:

Pendant cette phase les états sont stabilisés, et les nœuds peuvent commencer d'envoyer et de recevoir les données aux CHs. Ces derniers fusionnent et compressent toutes données reçues et les envoient vers la station de base. Après un certain temps prédéterminé, le réseau va rentrer dans un nouveau cycle en revenant à la première phase.

Avantages et Inconvénients :

Le protocole LEACH est capable de minimiser la consommation d'énergie des nœuds et d'augmenter la durée de vie du réseau, mais cela est fait sous certaines suppositions:

- Il suppose que tous les nœuds peuvent transmettre avec une quantité suffisante d'énergie pour atteindre la station de base.
- chaque nœud a une capacité de calcul pour supporter différents protocoles MAC.
- les nœuds ont toujours des données à transmettre.
- tous les nœuds commencent avec la même quantité d'énergie et les CHs enlèvent approximativement la même quantité d'énergie de chaque nœud membre du cluster.
- De plus, il n'est pas évident que le nombre des CHs soit uniformément distribué, donc il est possible que les CHs élus puissent être concentrés dans une partie du réseau. Par conséquent, certains nœuds n'auront pas des CHs dans leurs voisinages.

Protocole TEEN :

TEEN (Threshold-sensitive Energy-Efficient sensor Network) est proposé par Manjeshwar et Agarwal [Man 2001] pour les applications critiques en termes de temps. Dans TEEN, les nœuds capturent de manière continue, mais la transmission de données n'est pas faite fréquemment. Un nœud CH envoie à ses membres un seuil hard déterminant les attributs de capture, et un autre soft donnant les petits changements dans les valeurs des attributs de

captures dans la période de transmission du cluster. Les nœuds surveillent leur environnement continuellement. Si un paramètre des attributs atteint son seuil hard, et il y a un changement des valeurs capturées supérieur ou égal au seuil soft, le nœud envoie les données capturées à leurs destinations. A chaque changement de temps du cluster, les paramètres sont diffusés à nouveau.

Avantages:

- Adéquat aux applications critiques en terme de temps.
- Il consomme moins d'énergie puisque le nombre de messages transmis est réduit.
- Le seuil soft peut être changé selon les besoins.

Inconvénients:

- Si les seuils ne sont pas atteints les nœuds ne vont jamais se communiquer.
- Les *CHs* perdent la majorité du temps dans l'attente des données transmises par les autres nœuds au lieu de transmettre.
- Des intervalles de temps sont consommés inutilement par des nœuds n'ayant pas de données à transmettre.
- Pas de mécanisme de distinction entre les nœuds qui n'ont pas sensé un grand changement de ceux qui sont tombés en panne.

Une extension du protocole TEEN appelé APTEEN (Adaptive Periodic TEEN) est proposée par Manjeshwar et Agarwal [Man 2001]. C'est un protocole hybride qui change la périodicité et les valeurs seuils utilisés dans TEEN selon les besoins des utilisateurs et le type de l'application.

Routage VGAR

Un paradigme de routage optimisant l'énergie appelé VGAR (Virtual Grid Architecture Routing) est proposé dans [Kar 2003]. Il est basé sur le concept d'agrégation et le traitement des données en deux niveaux: local puis global. Due à la stationnarité ou l'extrêmement faible mobilité des nœuds, une approche raisonnable pour les WSNs est d'arranger les nœuds dans une topologie fixe. Dans des clusters carrés sont utilisés pour obtenir une topologie virtuelle rectiligne fixe comme le montre la figure suivante:

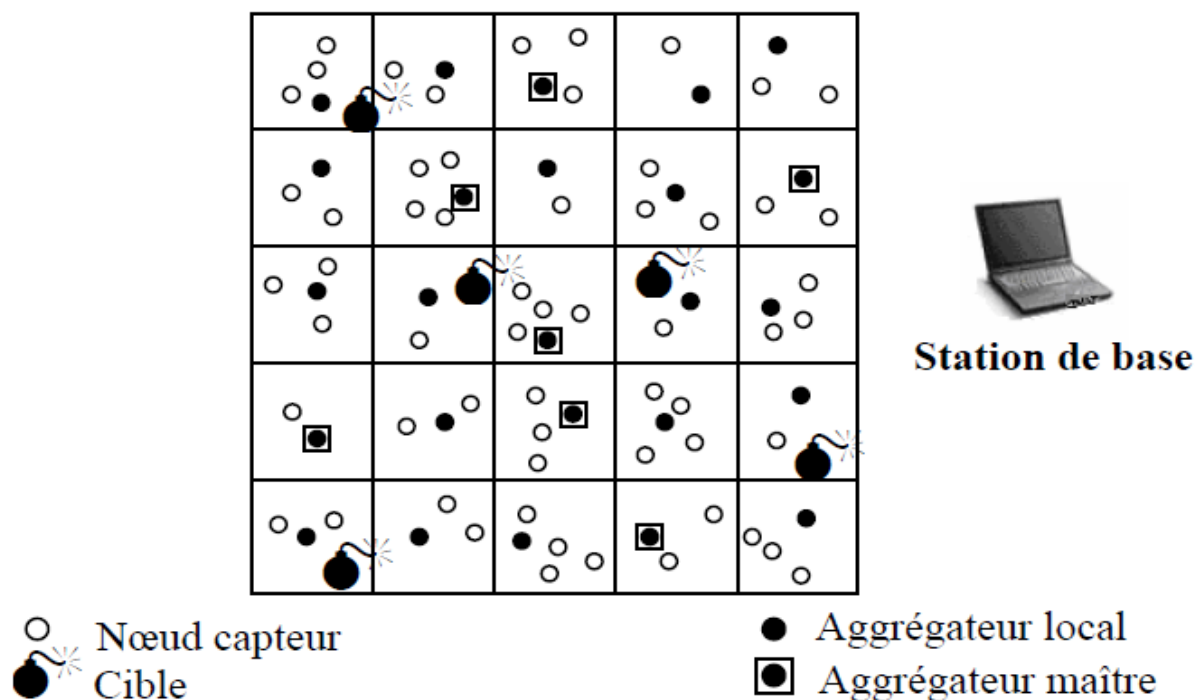


Figure III.4 : Exemple des zones fixe pour le routage VGAR.

La sélection des agrégateurs maîtres parmi les agrégateurs locaux est un problème NPComplet. Elle peut se faire soit par le calcul exacte en utilisant la programmation linéaire (ILP: Integer Linear Program), soit en utilisant différents méthodes heuristiques connues ou l'approche CBAH (Clustering-Based Aggregation Heuristic) proposée dans [Kar 2003].

Avantages:

- Minimise la consommation d'énergie et augmente la durée de vie du réseau.
- Moins complexe à implémenté.
- Prend en charge l'extensibilité du réseau.

Inconvénients:

- La méthode exacte pour la sélection des agrégateurs maîtres est consommable en énergie et les méthodes heuristiques peuvent ne pas conduire à la solution optimale.
- Afin de minimiser l'overhead il est supposé que les nœuds du même groupe surveillent le même phénomène.
- Les nœuds doivent être fixes, donc la mobilité des nœuds n'est permise.

Plusieurs autres protocoles qui rentrent dans cette catégorie ont été proposés. Une amélioration du protocole LEACH a donné le protocole PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems). L'idée de base de ce protocole est que les nœuds ont besoin seulement de communiquer avec leurs voisins les plus proches. Le protocole Hierarchical-PEGASIS est une extension du protocole PEGASIS. Son objectif est de diminuer le retard encouru durant la transmission vers la station de base. Pour cette raison, les transmissions simultanées sont étudiées afin d'éviter les collisions qui peuvent se produire. Ensuite, seuls les nœuds séparés spatialement sont autorisés à transmettre en même temps. Li et al ont proposé le protocole HPARP (hierarchical power-aware routing protocol) qui divise le réseau en groupe de capteurs. Les capteurs en proximité géographique sont regroupés ensembles en zones où chaque zone sera traitée comme une seule entité. Pour réaliser le routage, chaque zone est autorisée à décider comment elle va router les messages hiérarchiquement à travers les autres zones. Le protocole TTDD (Two-Tier Data Dissemination) [Ye 2002] permet de délivrer efficacement les données vers plusieurs stations de base mobiles. Chaque source de données construit de manière proactive une structure de grille qui est utilisée pour diffuser les données vers les stations de base. Subramanian et Katz [Sub 2000] décrivent un protocole avec auto-organisation appelé SOP (Self Organizing Protocol) et une taxonomie d'applications utilisées pour construire une architecture qui supporte des capteurs hétérogènes qui peuvent être mobile ou stationnaire.

Routage horizontal et routage hiérarchique :

Les protocoles hiérarchiques diffèrent des protocoles plats en plusieurs points. Le tableau suivant résume les grandes différences entre ces deux approches :

Routage hiérarchique	Routage horizontal
▪ Ordonnancement basé sur la réserve d'énergie.	▪ Ordonnancement basé sur le conflit.
▪ Evite les collisions.	▪ L'overhead des collisions se présente.
▪ Cycle de travail réduit dû au sommeil périodique.	Cycle de travail variable par le contrôle du temps de sommeil des nœuds.
▪ L'agrégation des données par les Cluster-Heads.	▪ Les nœuds dans le chemin accumulent les données venant des nœuds voisins.
▪ Simple mais pas optimal.	▪ Routage complexe mais optimal.
▪ Nécessite une synchronisation globale et locale.	▪ Liens formés à la voler sans synchronisation.
▪ L'overhead de la configuration des clusters à travers le réseau.	▪ Les routes formées seulement dans les régions qui ont des données à transmettre.
▪ Un temps d'attente réduit parce que les multi-sauts formés par les CHs sont toujours disponibles.	▪ Un temps d'attente dû au réveil intermédiaire des nœuds et l'établissement des multis-sauts.
▪ La dissipation d'énergie est uniforme.	▪ La dissipation d'énergie dépend du modèle du rafic.
▪ La dissipation d'énergie ne peut pas être contrôlée.	▪ La dissipation d'énergie s'adapte au modèle du rafic.
▪ Allocation des canaux équilibrés.	▪ L'équilibrage n'est pas garanti.

Tableau III.2 : Comparaison entre le routage hiérarchique et horizontale.

II.2.3. Routage basé sur la localisation :

Dans ce type de routage, les nœuds sont adressés à l'aide de leurs positions. La distance entre les nœuds voisins peut être estimée sur la base de la puissance du signal arrivé [Sav 2001]. La localisation des nœuds peut être disponible en communiquant avec un satellite, utilisant un système GPS (Global Positioning System), si les nœuds sont équipés d'un

récepteur GPS de faible énergie. Dans ce qui suit, nous présentons quelques protocoles de routage basés sur un système de localisation.

Protocole GAF (Geographic Adaptive Fidelity):

Dans ce protocole [Xu 2001] le réseau est premièrement divisé en zones fixes formant une grille virtuelle. Dans chaque zone, les nœuds collaborent avec eux pour jouer différents rôles. Chaque nœud utilise son GPS (Global Positioning System) pour savoir sa position dans la grille virtuelle. Les nœuds associés au même point dans la grille sont considérés équivalent en terme de coût de routage des paquets.

La figure III.5 donne un exemple des zones fixes qui peut être étendu pour l'utiliser dans les réseaux de capteurs. L'extension est d'utiliser deux zones pour recevoir les signaux à la place d'une seule. Après une certaine distance r , le signal va s'affaiblir, donc un nœud dans la deuxième zone appelée zone de bordure (border zone), peut ne pas entendre le signal contrairement à ceux qui se trouvent dans la zone de garantie (guaranteed zone).

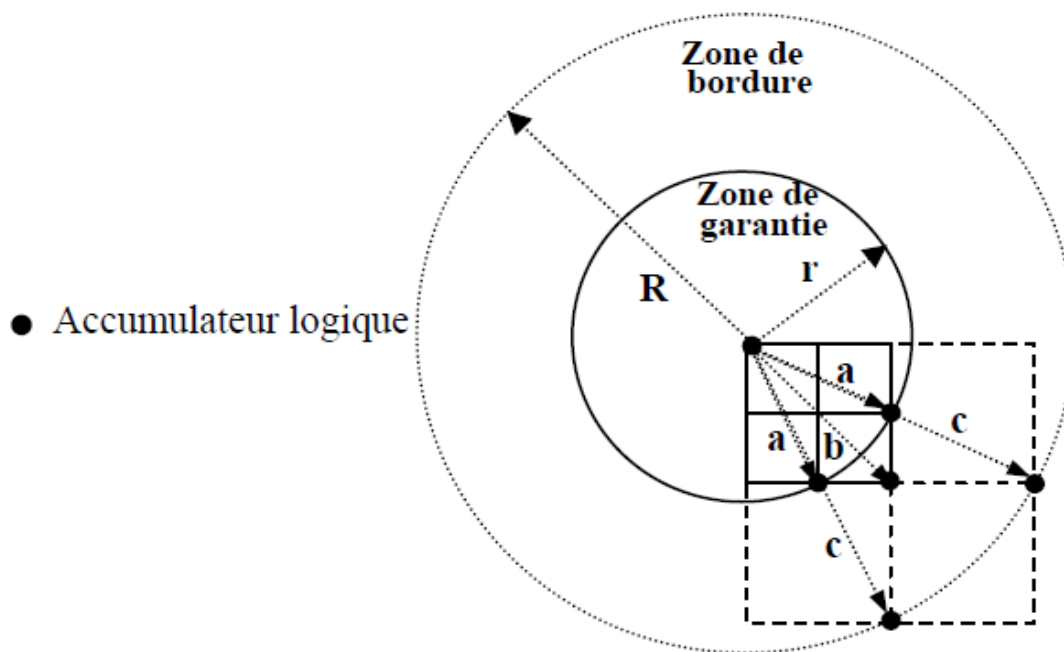


Figure III.5 : Exemple de découpage en zones dans un réseau de capteurs.

Avantages:

- Les simulations ont montré que GAF fournit une performance de routage en terme de temps d'attente et perte des paquets et augmente la durée de vie du réseau.
- En plus d'être un protocole basé sur la localisation, il peut être considéré comme un protocole hiérarchique, où les *CHs* sont choisis selon leurs positions géographiques.

Inconvénients:

- Il est supposé que les nœuds peuvent connaître leurs positions en utilisant un système GPS, ce qui n'est pas évident dans tous les cas.
- Les *CHs* ne font pas d'agrégation de données comme il est le cas dans les protocoles hiérarchiques.

✚ Protocole GEAR (Geographic and Energy Aware Routing):

Le protocole GEAR [Yu 2001] utilise une sélection heuristique basée sur des informations géographiques sur les nœuds voisins pour router les paquets aux destinations. L'idée de base est de restreindre le nombre de requête en considérant seulement certaines régions plutôt que les diffuser dans le réseau entier.

Dans GEAR, chaque nœud conserve un coût d'estimation et un coût d'apprentissage. Le coût d'estimation combine l'énergie résiduelle et la distance vers la destination. Le coût d'apprentissage est un raffinement du coût d'estimation qui prend en compte le routage autour des trous dans le réseau. Un trou apparaît quand un nœud n'a pas de voisins proches vers la destination.

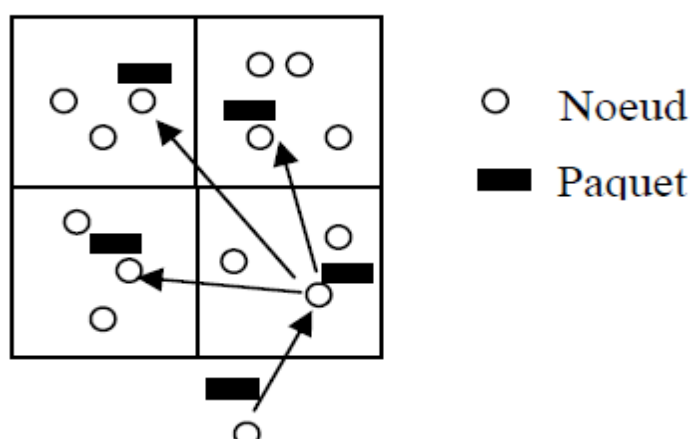


Figure III.6 : Transmission géographique récursive dans GEAR.

Avantages:

- GEAR non seulement réduit la consommation d'énergie pour établir les routes, mais fournit de meilleures performances en terme de livraison de paquets.

Inconvénients:

- Si on a une grande densité de nœuds, le schéma récursif est très coûteux.

II.2.4. Routage adaptatif :

Une famille de protocoles adaptatifs est proposée par [Hei 2000] appelés protocoles de capture d'informations via la négociation (SPIN: Sensor Protocols for Information via Negotiation). Ces protocoles diffusent toutes les informations dans chaque nœud à tous les nœuds du réseau, en supposant que tous les nœuds sont des stations de bases potentielles. Ils utilisent la propriété que les nœuds tout près ont des données similaires et donc ils distribuent seulement ces données aux autres nœuds qui ne l'ont pas. Les nœuds utilisent des méta-données pour décrire ses données capturées et exécutent des négociations méta-données avant de transmettre les données. Cela évite l'envoi des données redondantes. De plus, SPIN accède au niveau d'énergie courant du nœud et adapte le protocole à la quantité d'énergie restante.

Dans les protocoles SPIN, les nœuds utilisent trois types de messages pour communiquer: ADV (advertises new data), REQ (requests data) et DATA (le message actuel). Le protocole commence quand un nœud obtient de nouvelles données. Il diffuse un message ADV contenant les méta-données. Si un nœud voisin est intéressé par ces données, il envoie un message REQ pour demander les données qui lui seront ensuite transmises. Deux protocoles, nommés SPIN-1 et SPIN-2, s'associent dans la négociation avant d'envoyer les données. Quand les nœuds ont suffisamment d'énergie, ils communiquent en utilisant les trois phases du protocole SPIN-1. Cependant, quand l'énergie dans un nœud se rapproche à un seuil minimal, il rentre dans le protocole SPIN-2. Autres protocoles entrant dans cette famille [Cal 2004]:

- ❖ *SPIN-BC*: ce protocole est désigné pour les canaux de diffusion. Les nœuds doivent attendre pour la transmission si le canal est occupé. De plus, ils attendent un temps aléatoire après la réception d'un message ADV avant d'envoyer le message REQ.
- ❖ *SPIN-PP*: si deux nœuds peuvent communiquer entre eux sans l'intermédiaire des autres voisins, ce protocole sera utilisé. Il est désigné pour des communications point-

à point, et suppose que l'énergie n'est pas une contrainte majeure et que les paquets ne se perdent pas. La figure III.7 montre un exemple de l'utilisation de ce protocole.

- ❖ *SPIN-EC*: Il est similaire au *SPIN-PP*, mais il ajoute des heuristiques d'énergie.
- ❖ *SPIN-RL*: Dans *SPIN-PP*, il est supposé que le paquet ne se perd jamais. Quand le canal perd des paquets, le protocole *SPIN-RL* est utilisé. Son principe est de sauvegarder les messages reçus pendant une durée prédéfinie.

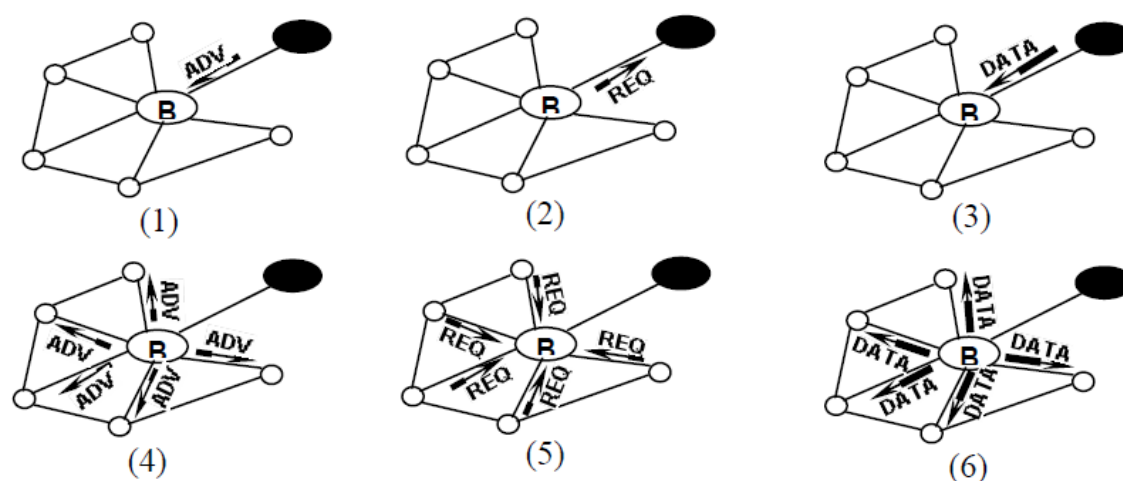


Figure III.7 : Un exemple de protocole SPIN-PP.

Avantages:

- Le changement de la topologie ne pose pas de problèmes, du fait que chaque nœud à besoin de connaître seulement les nœuds voisins d'un seul saut.
- Prend en compte la redondance des données via un mécanisme de négociation.
- L'utilisation des méta-données pour la négociation avant de transmettre les données consomme moins d'énergie qu'envoyer directement les données.
- Fournit une meilleure gestion de l'énergie en s'adaptant au niveau d'énergie de chaque nœud.

Inconvénients:

- Une faible extensibilité du réseau, puisque une grande densité de nœuds peut surcharger le réseau avec la quantité d'informations communiquées.

- La livraison des paquets n'est pas garantie, donc une retransmission des données est nécessaire.
- Les nœuds voisins de la station de base peuvent consommer leur énergie très rapidement puisqu'ils seront les plus interrogés.
- Ils ne sont pas adéquats aux applications qui ont besoin de recevoir les données périodiquement

II.2.5. Routage basé sur les opérations du protocole :

Dans cette section nous proposons les protocoles de routage basés sur le fonctionnement, du protocole. Il est à noter que certains de ces protocoles peuvent appartenir à une ou plusieurs catégories de routage.

II.2.5.1. Routage multi-chemins

La résistance d'un protocole peut être mesurée par sa capacité à trouver des chemins alternatifs entre la source et la destination en cas de défaillance du chemin primaire. Cela peut être garanti en maintenant plusieurs chemins ne consommant pas beaucoup d'énergie et en les laissant actifs par l'envoi de messages périodiques [Cal 2004].

- ❖ Ganesan et ses collègues [Gan 2001] ont proposé un protocole de routage multi-chemins efficace en énergie qui utilise des chemins entrelacés à la place des chemins complètement disjoints afin de minimiser le coût des maintenances.
- ❖ Chang et Tassiulas [Cha 2000] ont proposé un algorithme pour router les données à travers des chemins dont les nœuds ont une grande quantité d'énergie résiduelle. Le chemin est changé à chaque fois qu'un nouveau meilleur chemin est découvert. Le chemin primaire sera utilisé jusqu'à ce que son énergie chute en dessous de l'énergie de l'ancien chemin. De cette manière, les nœuds dans le chemin primaire ne vont pas épuiser leurs ressources d'énergie.
- ❖ L'idée de Rahul et Rabaey [Rah 2002] est d'utiliser de temps en temps un ensemble de chemins sous-optimaux pour augmenter la durée de vie du réseau. Ces chemins sont choisis par des moyens probabilistes essayant de minimiser la consommation d'énergie de chaque chemin.

Avantages:

- Permet de maintenir plusieurs chemins consommant moins d'énergie pour router les données vers les destinations.

Inconvénient:

- L'utilisation de plusieurs chemins nécessite de les maintenir actifs, ce qui consomme énormément d'énergie.

II.2.5.2. Routage basé sur les requêtes :

Dans ce type de routage, les nœuds destinataires propagent une requête de données de la part de la station de base à travers le réseau et le nœud qui détient ces données les envoie au nœud demandeur en suivant le chemin inverse de la requête.

Tous les nœuds détiennent des tables qui se composent des requêtes sur les tâches de capture, et envoient les données correspondantes aux requêtes quand ils les reçoivent. Les protocoles Directed Diffusion et rumor routing sont deux exemples de ce type de routage.

II.2.5.3. Protocoles basés sur la négociation :

Ces protocoles utilisent des descripteurs de données de haut niveau et des messages de négociation afin d'éliminer la transmission des données redondantes.

La famille des protocoles SPIN déjà présenté est un bon exemple de ce type de protocoles.

II.2.5.4. protocoles basés sur la qualité de service (QoS) :

Dans ce type de protocoles on doit faire l'équilibre entre la consommation d'énergie et la qualité de services.

- L'un des premiers protocoles qui a introduit la notion de QoS dans la décision du routage est le protocole SAR (Sequential Assignment Routing). Il dépend de trois facteurs: les ressources d'énergie, la QoS dans chaque chemin, et le niveau de priorité de chaque paquet.
- Le *protocole SPEED*: SPEED est un autre protocole basé sur la qualité de service. il nécessite que chaque nœud maintienne des informations sur ses voisins et son emplacement géographique pour trouver les chemins. De plus, il essaye d'assurer une certaine rapidité à chaque paquet dans le réseau pour que l'application puisse estimer les délais de bout en bout pour ces paquets en divisant la distance entre la station de base par la vitesse du paquet, et aussi d'éviter l'encombrement qui peut se produire dans le réseau.

Le module de routage dans SPEED est appelé SNFG (Stateless Geographic Non Deterministic Forwarding), et il travaille avec quatre modules comme le montre la figure suivante:



Figure III.8 : Les composants du protocole SPEED.

- BE (Beacon Exchange): collecte les informations sur les nœuds et leurs emplacements.
- BR (Backpressure Rerouting): utilisé pour prévenir les vides (quand un nœud n'arrive pas à trouver le nœud de prochain saut) et éliminer l'encombrement dans le réseau.
- NFL (Neighborhood Feedback Loop): est responsable du calcul du taux d'émission.
- DE (Delay Estimation): pour chaque nœud on calcule le temps écoulé avant de recevoir un ACK. Ce temps aide SNGF à sélectionner la vitesse nécessaire à ce nœud.

Avantage:

- Comparé aux protocoles DSR et AOVN, SPEED s'exécute mieux en terme de bout en bout, de retard et de taux d'échec.

Inconvénients:

- Dans l'architecture de SPEED aucune métrique d'énergie n'est prise en considération. De plus aucune comparaison n'est faite avec les autres protocoles qui prennent en charge la consommation d'énergie.

II.2.6. Comparaison entre les protocoles de routages :

Le tableau suivant résume les caractéristiques de chaque protocole.

Critère Protocole	Classifi-cation	Mobilité SB / ND	Aggrégation	Extensibilité	Complexité	Consommation d'Énergie	Localisation	Multi-chemins	Nego-based	Query-based
<i>SAR</i>	Horiz/ QoS	Non/ Non	Oui	Limitée	Moyen	Non Spécifié	Non	Oui	Oui	Oui
<i>DD</i>	Horizontal	Limitée/ Limitée	Oui	Limitée	Faible	Limitée	Oui	Oui	Oui	Oui
<i>Rumor routing</i>	Horizontal	T Limitée/ Limité	Oui	Bonne	Faible	Non Spécifié	Non	Non	Non	Oui
<i>MCFA</i>	Horizontal	Non/ Non	Non	Bonne	Faible	Non Spécifié	Non	Non	Non	Non
<i>GBR</i>	Horizontal	Limitée/ Limitée	Oui	Limitée	Faible	Non Spécifié	Non	Non	Non	Oui
<i>IDSQ et CADR</i>	Horizontal	Non/ T Limité	Oui	Limitée	Faible	Limitée	Non	Non	Non	Non
<i>COUGAR</i>	Horizontal	Non/ Non	Oui	Limitée	Faible	Limitée	Non	Non	Non	Oui
<i>ACQUIRE</i>	Horizontal	Limitée/ Limitée	Oui	Limitée	Faible	Non Spécifié	Non	Non	Non	Oui
<i>EAR</i>	Horizontal	Limitée/ Limitée	Non	Limitée	Faible	Non Spécifié	Non Spécifié	Non	Non	Non
<i>Random Walks</i>	Horizontal	Non/ Non	Non	Bonne	Simple	Non Spécifié	Oui	Oui	Non	Non
<i>LEACH</i>	Hiérarchique	Non/ Non	Oui	Bonne	Basée sur CHs	Max pour SB	Oui	Non	Non	Non
<i>N-LEACH</i>	Hiérarchique	Non/ Non	Oui	Bonne	CHs Négocia-tion	diminuée	Oui	Non	Oui	Non
<i>M-LEACH</i>	Hiérarchique	Non/ Non	Oui	Bonne	CHs Multi-Sauts	Limitée pour ND	Oui	Non	Non	Non
<i>PEGASIS</i>	Hiérarchique	Non/ T Limité	Oui	Limitée	faible	Max pour SB	Oui	Non	Non	Non
<i>H-PEGASIS</i>	Hiérarchique	Non/ Non	Oui	Limitée	moyen	Max pour SB	Oui	Non	Non	Non
<i>TEEN et APTEEN</i>	Hiérarchique	Non/ Non	Oui	Bonne	Basée sur CHs	Maximum	Oui	Non	Non	Non
<i>SMECN</i>	Hiérarchique	Non/ Non	Non	Faible	Faible	Maximum	Non	Non	Non	Non
<i>VGAR</i>	Hiérarchique	Non/ Non	Oui	Bonne	Basée sur CHs	Non Spécifié	Oui	Oui	Oui	Non
<i>HPARP</i>	Hiérarchique	Non/ Non	Non	Bonne	Faible	diminuée	Non	Non	Non	Non
<i>TTDD</i>	Hiérarchique	Oui/ Non	Non	Faible	Moyen	Limitée	Non	Possible	Non	Possible
<i>SOP</i>	Hiérarchique	Non/ Non	Non	Faible	Faible	Non Spécifié	Non	Non	Non	Non
<i>GAF</i>	Local/ Hiéra	Limitée/ Limitée	Non	Bonne	Faible	Limitée	Non	Non	Non	Non
<i>GEAR</i>	Localisation	Limitée/ Limitée	Non	Limitée	Faible	Limitée	Non	Non	Non	Non
<i>SPAN</i>	Localisation	Limitée/ Limitée	Non	Limitée	Faible	Non Spécifié	Non	Non	Oui	Non
<i>SPIN</i>	Hoeiz/ Adaptatif	Possible/ Limitée	Oui	Limitée	Faible	Limitée	Non	Oui	Oui	Oui
<i>SPEED</i>	QoS/ Local	Non/ Non	Non	Limitée	Moyen	Non Spécifié	Non	Non	Non	Oui

Tableau III.3 : Comparaison entre les protocoles de routages.

III. Conclusion :

La communication est très importante dans un réseau de capteurs, puisqu'elle permet, aux nœuds de coopérer entre eux et d'acheminer les données vers leurs destinations. Plusieurs facteurs de performance doivent être pris en considération pendant la conception des protocoles de communication tels que: la tolérance aux pannes, la scalabilité, la limitation des capacités des capteurs, l'architecture du réseau, la mobilité des nœuds, le modèle de livraison des données, l'hétérogénéité des nœuds et la consommation d'énergie. L'efficacité en consommation d'énergie représente une métrique de performance significative qui influence directement la durée de vie du réseau en entier. Pour cela, les concepteurs peuvent au moment du développement des protocoles de communication négliger les autres métriques de performance. Plusieurs recherches ont été faites pour cette raison, mais peu de standard ont été maintenu jusqu'au présent. Les nouveaux travaux dans ce domaine ont été orientés vers l'utilisation du paradigme des agents pour résoudre le problème d'efficacité de la communication dans les réseaux de capteurs. Les agents sont des programmes autonomes qui donnent aux capteurs une certaine capacité d'intelligence leur permettant de prendre les bonnes décisions pendant l'acheminement des données vers leurs destinations. Dans le prochain chapitre nous allons expliciter le protocole de routage LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy).

I. Introduction :

Dans les réseaux de capteurs sans fil, puisque l'énergie de chaque nœud capteur est limitée, l'économie d'énergie est de la plus haute importance pour prolonger la durée de vie des réseaux. Le protocole de routage que nous proposons d'étudier permet d'optimiser la consommation de l'énergie, Il peut prolonger la durée d'exploitation du réseau.

Les protocoles de routage hiérarchiques sont considérés comme étant des protocoles très favorables en termes d'efficacité énergétique. Deux grandes approches sont dérivées de ce type de protocoles: l'approche basée sur les chaînes (chaine-based approach) dont l'idée de formation de chaînes a été proposée pour la première fois dans l'algorithme PEGASIS, et, l'approche basée sur les groupes (cluster-based approach).

Nous avons retenu les travaux de Heinzelman et al. [Hei 2002] qui présentent aujourd'hui d'excellents résultats en terme d'économie d'énergie. Ces derniers ont proposé le protocole LEACH, ce protocole s'appuie sur le clustering (FigureIV.1), qui consiste, de façon similaire aux réseaux téléphoniques cellulaires, à partitionner le réseau en groupes (clusters). Les nœuds transmettent leurs données vers des représentants de groupes dits clusterheads (CHs), qui à leur tour envoient ces données vers la destination désirée ou la station de base.

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

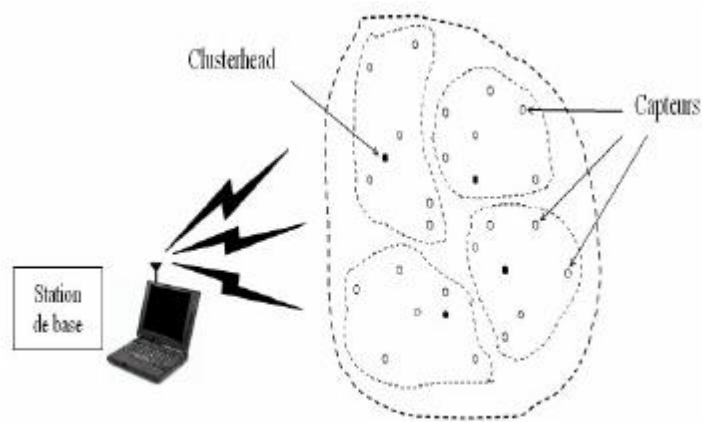


Figure IV.1 : Le Clustering dans un réseau de capteurs

Avec le protocole LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), les agrégations, les compressions ainsi que le routage des données minimisent la consommation d'énergie en réduisant le flux des données et ainsi les communications globales. Les nœuds d'un réseau sont homogènes et ont les mêmes contraintes d'énergie. Le clustering permet aux nœuds d'effectuer des communications sur de petites distances avec leurs CHs, ces derniers ayant pour tâche de communiquer les résultats de leurs calculs à la station de base. Ceci leur coûte en terme d'énergie. Ce protocole présente d'excellents résultats comparés à d'autres algorithmes de clustering [Hei 2002].

II. Protocoles MAC utilisés par LEACH :

Pendant son fonctionnement, le protocole LEACH appelle certains schémas des protocoles MAC qui seront détaillés dans cette section pour mieux comprendre son déroulement. Les nœuds doivent avoir une certaine capacité de calcul pour supporter différents protocoles MAC. Comme les RCSF ont des caractéristiques distinctes de tout autre type de réseaux sans fil, les protocoles MAC conçus pour ces derniers ne sont pas toujours applicables dans les RCSF. Deux versions des protocoles MAC pour l'accès au media sont alors proposées pour les RCSF : l'accès aléatoire et l'allocation fixe [Khe 2004].

II.1. Accès aléatoire :

Les schémas à accès aléatoire sont à base de contention. Dans ces schémas, les nœuds qui possèdent des données à transmettre doivent essayer d'obtenir l'autorisation pour l'accès au media tout en réduisant les collisions avec les transmissions des données des autres nœuds. Le schéma d'accès multiple avec surveillance de porteuse CSMA (Carrier Sense Multiple

Access) sur lequel se base le protocole LEACH est l'un des schémas d'accès aléatoire [Gue 2007].

Lorsqu'un nœud veut transmettre un message, il examine le média pour vérifier s'il est libre ou occupé par un autre nœud. Dans le cas où le media est libre, ce nœud pourra émettre son message afin d'éviter les collisions. Cela dit, des nœuds peuvent émettre des données en même temps, ce qui mène à des collisions. Il est nécessaire donc que celles-ci soient détectées et que la récupération de données soit effectuée et que ces données soient retransmises. Si les retransmissions se passent encore en même temps, d'autres collisions vont se produire. Une solution à ce problème consiste à introduire que chaque nœud attende un délai aléatoire avant de retransmettre ses données, ce qui réduit la probabilité d'une autre collision. [Her 2004]

II.2 Allocation fixe :

Les schémas à allocation fixe permettent d'allouer pour chaque nœud le media de transmission suivant des intervalles de temps (schéma TDMA) ou un schéma de codage particulier (schéma CDMA).

Étant donné que chaque nœud est attribué en exclusivité à un intervalle, il n'y a presque pas de collisions entre les données. Toutefois, les schémas à allocation fixe s'avèrent inefficaces lorsque tous les nœuds n'ont pas de données à transmettre. En effet, ces intervalles sont affectés à des nœuds qui n'ont pas besoin de les utiliser. [Her 2004]

II.2.1 TDMA :

Le schéma d'accès multiple à répartition de temps ou TDMA (Time Division Multiple Access) permet de diviser le temps en intervalles (time-slot) attribués à chaque nœud (voir figure IV-1). Ainsi, un seul nœud a le droit d'accès au canal (il utilise toute la plage de la bande passante du canal), mais doit émettre ses données pendant les intervalles de temps qui lui sont accordés. [Her 2004]

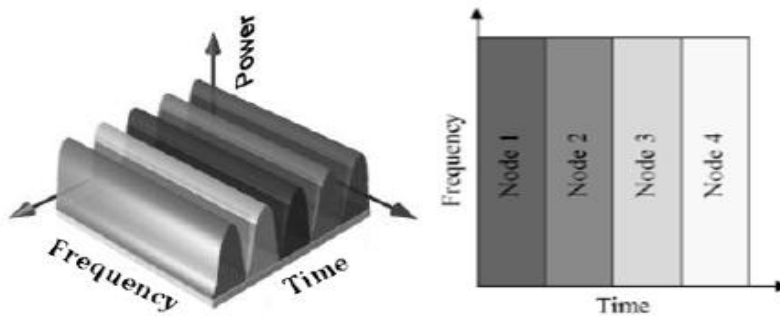


Figure IV.2 : Diagrammes représentant le protocole MAC TDMA.

II.2.2 CDMA :

Le schéma d'accès multiple par répartition en code ou CDMA (Code Division Multiple Access) permet de côtoyer plusieurs nœuds simultanément (voir figure IV.3). En effet, il ne divise ni la plage de fréquences ni l'intervalle de temps. Ainsi, des nœuds peuvent émettre leurs données continuellement et selon une large plage de fréquence. Le protocole CDMA utilise des techniques d'étalement de spectre afin d'éviter les collisions entre les transmissions simultanées des nœuds. [Law 2001]

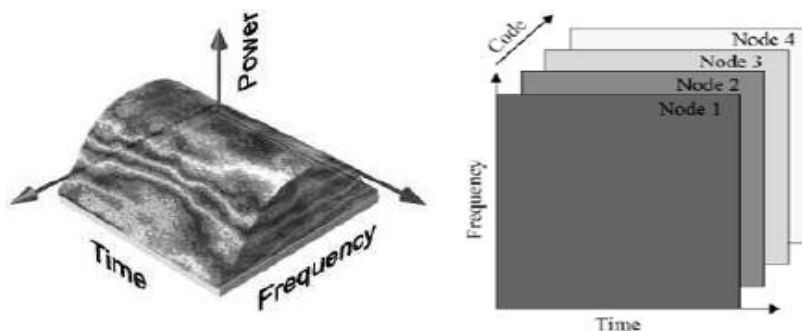


Figure IV.3 : Diagrammes représentant le protocole MAC CDMA.

III. Architecture de communication de LEACH :

L'architecture de communication de LEACH consiste, de façon similaire aux réseaux cellulaires, à former des cellules basées sur l'amplitude du signal, et utiliser les têtes de cellules comme routeurs vers le nœud puits. Ces cellules sont appelées groupes (clusters), quant aux têtes : chefs de groupes (cluster-heads CH). Les chefs de groupes sont choisis de façon aléatoire selon un algorithme spécifique d'élection basé sur une fonction de probabilité qui prend en compte différents critères comme l'énergie disponible des nœuds.

Comme la figure IV.4 l'indique, les nœuds sont chargés de collecter des données, les envoyer à leurs CH qui les agrègent et transmettent, à leur tour, les résultats d'agrégation au nœud puits selon une communication unicast (à un seul saut).

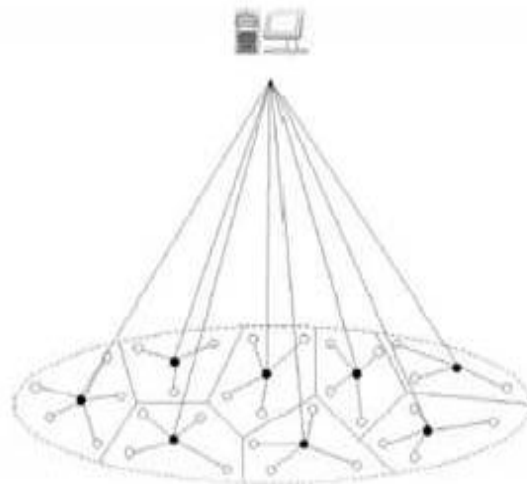


Figure IV.4 : Architecture de communication du protocole LEACH.

Les CH ont pour mission d'assurer les fonctions les plus coûteuses en énergie, à savoir la communication avec le nœud puits qui est supposé éloigné, ainsi que tous les traitements de données (agrégation, fusion et transmission de données) afin de réduire la quantité des données transmises. Ce dispositif permet d'économiser l'énergie puisque les transmissions sont uniquement assurées par les CH plutôt que par tous les nœuds du réseau. Par conséquent, LEACH réalise une réduction significative de la dissipation d'énergie [Bou 2006].

IV. Fonctionnement de l'algorithme de LEACH :

L'algorithme se déroule en « rounds » qui ont approximativement le même intervalle de temps déterminé au préalable. Chaque round est constitué d'une phase d'initialisation et d'une phase de transmission.

IV.1. Phase d'initialisation :

Comme l'indique la figure IV.5, la phase d'initialisation est composée de 3 sous phases: d'annonce, d'organisation des groupes et enfin d'ordonnancement, et qui seront détaillée ci-dessous.

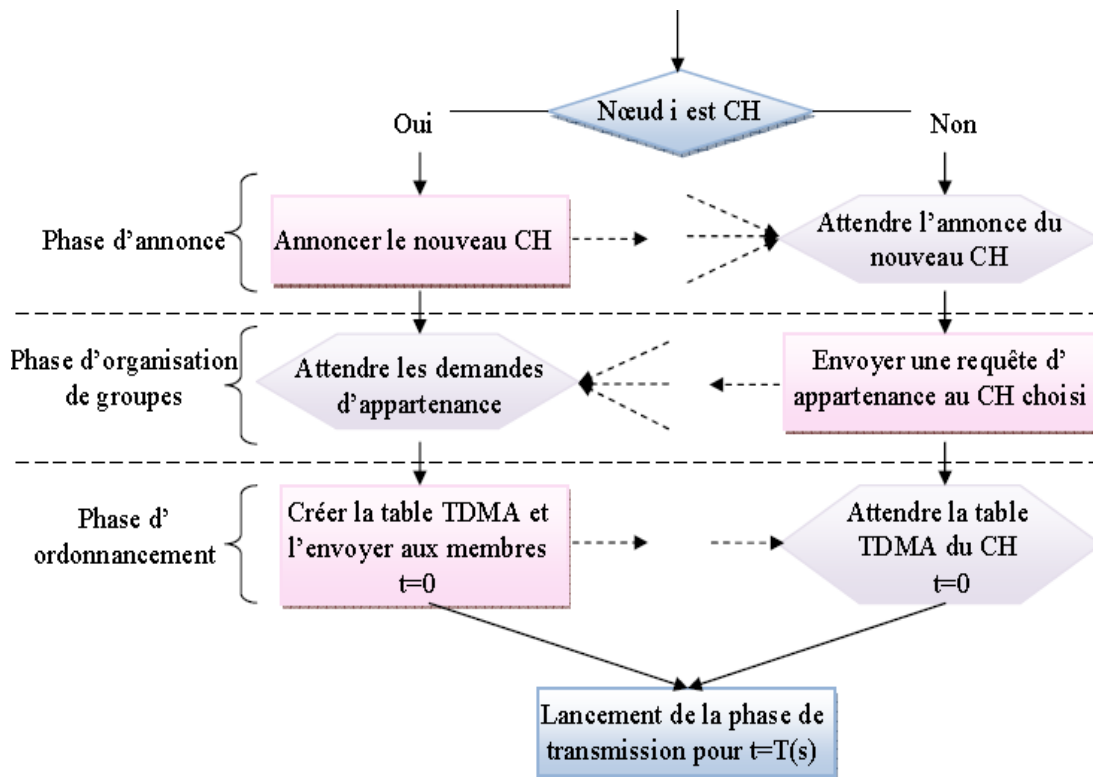


Figure IV.4 : Opérations de l'étape d'initialisation de LEACH.

IV.1.1 Phase d'annonce :

Avant de lancer cette phase, on désire avoir un certain nombre de CH. Ce nombre, que l'on note K, est fixe et il est inchangé durant tous les rounds. On estime que le pourcentage

optimal du nombre de CH désirés devrait être de 5% à 15% du nombre total de nœuds [Bou 2006]. Si ce pourcentage n'est pas respecté, cela mènera à une grande dissipation d'énergie dans le réseau. En effet, si le nombre de CH est très élevé, on aura un nombre important de nœuds(CH) qui se consacrent aux tâches très coûteuses en ressources énergétiques. Ainsi, on aura une dissipation d'énergie considérable dans le réseau.

De plus, si le nombre de CH est très petit, ces derniers vont gérer des groupes de grandes tailles. Ainsi, ces CH s'épuiseront rapidement à cause du travail important qui leur est demandé.

Cette phase commence par l'annonce du nouveau round par le nœud puits, et, par la prise de décision locale d'un nœud pour devenir CH avec une certaine probabilité $P_i(t)$ au début du round $r+1$ qui commence à l'instant t . Chaque nœud i génère un nombre aléatoire entre 0 et 1. Si ce nombre est inférieur à $P_i(t)$, le nœud deviendra CH durant le round $r+1$. $P_i(t)$ est calculé en fonction de K et de round r [Hei 2002]:

$$\text{Nombre(CH)} = \sum_{i=1}^N P_i(t) = K$$

Où N est le nombre total de nœuds dans le réseau. Si on a N nœuds et K CH, alors, il faudra N/K rounds durant lesquels un nœud doit être élu seulement une seule fois autant que CH avant que le round soit réinitialisé à 0.

Donc la probabilité de devenir CH pour chaque nœud i est :

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

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{K}{N - k * (r \bmod N/k)} & : C_i(t) = 1 \\ 1 & : C_i(t) = 0 \end{cases} \dots (1)$$

Où $C_i(t)$ égal à 0 si le nœud i a déjà été CH durant l'un des $(r \bmod N/K)$ rounds précédents, et, il est égal à 1 dans le cas contraire. Donc, seuls les nœuds qui n'ont pas encore été CH, ont vraisemblablement une énergie résiduelle suffisante que les autres et ils pourront être choisis.

Le terme $\sum_{i=1}^N C_i(t)$ représente le nombre total des nœuds éligibles d'être CH à l'instant t. Il est égal à :

$$\sum_{i=1}^N C_i(t) = N - K * (r \bmod N/K) \dots (2)$$

Utilisant l'équation (1) et (2), le nombre de CH par round est :

K

$$\text{Nombre (CH)} = \sum_{i=1}^N P_i(t) * C_i(t) = (K * (r \bmod N/K)) * \left(\frac{K}{N - K * (r \bmod N/K)} \right)$$

La probabilité $P_i(t)$ est basée sur la supposition que tous les nœuds sont initialement homogènes et commencent avec la même quantité résiduelle d'énergie et meurent approximativement en même temps. Cependant, ceci pourrait être le cas juste après le déploiement, mais il n'est pas réellement valable après un certain temps. Alors, si l'énergie des nœuds diffère, il sera plus pratique que la probabilité $P_i(t)$ soit en rapport avec l'énergie restante au niveau de chaque nœud. Cette probabilité sera donc égale à :

$$P_i(t) = \frac{E_i(t)}{E_{\text{total}}(t)} K \dots (3)$$

Où $E_i(t)$ est l'énergie résiduelle relative à chaque nœud i. Utilisant cette probabilité, le nœud avec une plus grande ressource d'énergie a une plus grande chance de devenir CH. Ainsi, le nombre de nœuds souhaités pour être CH dans chaque round est:

$$\text{Nombre(CH)} = \sum_{i=1}^N P_i(t) * C_i(t) = \left(\frac{E_1(t)}{E_{\text{total}}(t)} + \frac{E_2(t)}{E_{\text{total}}(t)} + \dots + \frac{E_n(t)}{E_{\text{total}}(t)} \right) K = K$$

Les équations (2) et (3) seront égales si les nœuds commencent avec la même énergie. De plus, en utilisant l'équation (3), les nœuds requièrent des informations sur toute l'énergie disponible dans le réseau.

IV.1.2 Phase d'organisation de groupes :

Après qu'un nœud soit élu CH, il doit informer les autres nœuds non-CH de son nouveau rang dans le round courant. Pour cela, un message d'avertissement ADV contenant l'identificateur du CH est diffusé à tous les nœuds non-CH en utilisant le protocole MAC CSMA pour éviter les collisions entre les CH. La diffusion permet de s'assurer que tous les nœuds non-CH ont reçu le message. Par ailleurs, elle permet de garantir que les nœuds appartiennent au CH qui requière le minimum d'énergie pour la communication. La décision est basée donc sur l'amplitude du signal reçu; le CH ayant le signal le plus fort (i.e. le plus proche) sera choisi. En cas d'égalité des signaux, les nœuds non-CH choisissent aléatoirement leur CH [Hei 2002].

Chaque membre informe son CH de sa décision. Une fois que le CH ait reçu la demande, il lui envoie un message d'acquiescement Join- REQ.

IV.1.3 Phase d'ordonnancement :

Après la formation des groupes, chaque CH agit comme un centre de commande local pour coordonner les transmissions des données au sein de son groupe. Il crée un ordonnanceur (schedule) TDMA et assigne à chaque nœud membre un slot de temps durant lequel il peut transmettre ses données. L'ensemble des slots assignés aux nœuds d'un groupe est appelé frame. La durée de chaque frame diffère selon le nombre de membres du groupe.

Par ailleurs, afin de minimiser les interférences entre les transmissions dans des groupes adjacents, chaque CH choisit aléatoirement un code dans une liste de codes de propagation CDMA. Il le transmet par la suite à ses membres afin de l'utiliser pour leurs transmissions.

[Muj 2004]

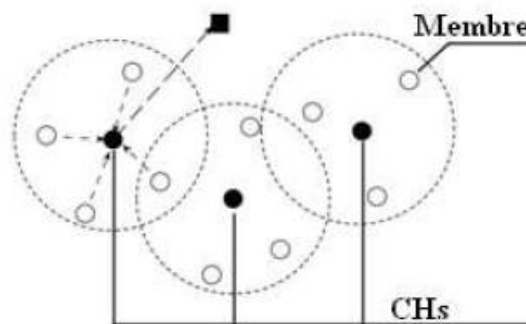


Figure IV.6 : Interférence lors d'une communication dans LEACH.

IV.2 Phase de transmission :

Cette phase est plus longue que la phase précédente, et permet la collecte de données captées. En utilisant l’ordonnanceur TDMA, les membres émettent leurs données captées pendant leurs propres slots. Cela leur permet d’éteindre leurs interfaces de communication en dehors de leurs slots afin d’économiser leur énergie. Ces données sont ensuite agrégées par les CH qui les fusionnent et les compressent, et, envoient le résultat final au nœud puits.

Après un certain temps prédéterminé, le réseau va passer à un nouveau round. Ce processus est répété jusqu’à ce que tous les nœuds du réseau seront élus CH, une seule fois, tout au long des rounds précédents. Dans ce cas, le round est réinitialisé à 0.

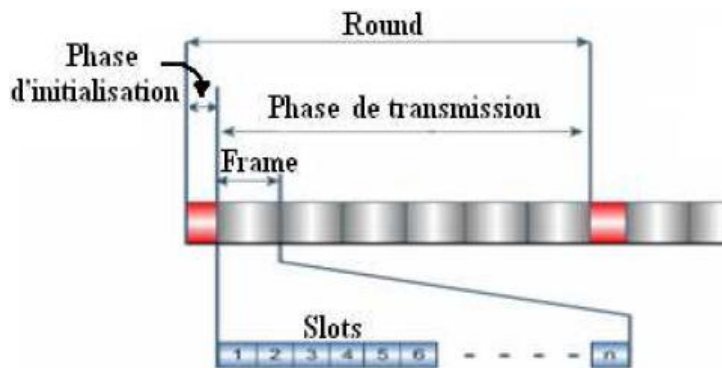


Figure IV.7 : Répartition du temps et différentes phases pour chaque round.

V. Avantages et inconvénients de LEACH :

V.1 Avantages :

- **Protocole auto-organisateur basé sur le groupement adaptatif:** LEACH est complètement distribué, autrement dit, les nœuds prennent leurs décisions de façon autonome et agissent de manière locale et n’ont pas besoin d’une information globale ni d’un système de localisation pour opérer de façon efficace. De plus, la collection de

données est faite périodiquement (l'utilisateur n'a pas besoin de toutes les données immédiatement). Pour exploiter cette caractéristique, ce protocole introduit un groupement adaptatif, c'est-à-dire, il réorganise les groupes après un intervalle de temps aléatoire, en utilisant des contraintes énergétiques afin d'avoir une dissipation d'énergie uniforme à travers tout le réseau. [Rag 2003]

- **Rotation des rôles de chefs de groupes:** La rotation des rôles de chefs de groupes s'avère un facteur important pour l'organisation des nœuds. Ce rôle est épuisant en termes d'énergie car les CH sont actifs tout au long de leur élection. Puisque le nœud puits est généralement loin du champ de surveillance, les CH diffusent une quantité plus importante d'énergie pour lui transmettre leurs données. Donc, si les CH sont choisis d'une manière fixe, leur énergie s'épuisera rapidement ce qui induit à leur défaillance. Par conséquent, tous les autres nœuds seront sans CH et donc inutiles. C'est pourquoi, les algorithmes de groupement (clustering) étudiés jusqu'ici adoptent la rotation du rôle de chefs de groupes. [Rag 2003]
- **Faible énergie pour l'accès au média:** Le mécanisme de groupes permet aux nœuds d'effectuer des communications sur des petites distances avec leurs CH afin d'optimiser l'utilisation du média de communication en la faisant gérer localement par un CH pour minimiser les interférences et les collisions.
- **Compression locale (agrégation) :** Les CH compressent les données arrivant de leurs membres, et envoient un paquet d'agrégation au nœud puits afin de réduire la quantité d'informations qui doit lui être transmise. Cela permet de réduire la complexité des algorithmes de routage, de simplifier la gestion du réseau, d'optimiser les dépenses d'énergie et enfin de rendre le réseau plus évolutif (scalable).

V.2 Les inconvénients :

- On pourra ne pas avoir des CH durant un round si les nombres aléatoires générés par tous les nœuds du réseau sont supérieurs à la probabilité $P_i(t)$.
- Les nœuds les plus éloignés du CH meurent rapidement par rapport aux plus proches.

- L'utilisation d'une communication à un seul saut au lieu d'une communication multi-sauts diminue l'énergie des nœuds.
- Le protocole LEACH ne peut pas être appliqué à des applications temps-réel du fait qu'il résulte en une longue latence.
- La rotation des CH permet de ne pas épuiser les batteries. Cependant, cette méthode n'est pas efficace pour de grandes structures de réseaux à cause de la surcharge d'annonces engendrées par le changement des CH, et qui réduit le gain d'énergie initial.
- Il n'est pas évident que les CH soient uniformément distribués. Donc, il est possible que les CH puissent être concentrés dans une partie du réseau. Par conséquent, certains nœuds n'auront pas des CH dans leurs voisinages.
- Le protocole LEACH n'est pas sécurisé. Aucun mécanisme de sécurité n'est intégré dans ce protocole. Ainsi, il est très vulnérable même aux simples attaques. Donc, un attaquant peut facilement monopoliser le réseau et induit à son dysfonctionnement.

IV. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le protocole de routage hiérarchique LEACH qui suit une approche basée sur les groupes. Cette approche a montré son efficacité, comparée aux autres approches (par exemple, la topologie plate), en termes de consommation et de dissipation uniforme d'énergie prolongeant ainsi la durée de vie du réseau.

Nous avons vu que le protocole LEACH est soumis à certaines contraintes et suppositions qui engendrent toutefois des inconvénients. Par exemple, la communication unicast, établie entre le nœud puits et les CH et entre ces derniers et leurs membres, n'est pas toujours efficace par rapport à la communication multi-sauts.

I. Introduction :

L'intervention humaine dans les réseaux de capteurs sans fils est pratiquement impossible ce qui mène les chercheurs à trouver d'autres alternatives pour résoudre les problèmes de ces derniers et notamment les problèmes de ressources énergétique. Plusieurs algorithmes ont été développés afin de résoudre le problème de consommation d'énergie.

Dans ce qui suit nous allons simuler un réseau de capteurs au sein de la plateforme TinyOS, et nous allons modéliser le protocole LEACH et nous essaierons de l'évaluer selon des critères d'évaluation que nous allons détailler dans ce chapitre.

II. Environnement de développement :

Pour simuler le comportement réel d'un réseau de capteurs, il est important de connaître et de décrire le comportement de l'appareillage utilisé, ainsi que son analyse énergétique, car les deux plus grandes contraintes que nous pouvons rencontrer lors d'une simulation de réseau de capteurs sont les faibles ressources en énergie et la faible mémoire des composants utilisés.

L'université de Berkeley a proposé alors un système d'exploitation minimal (TinyOS), Afin de respecter les contraintes mémoire des composants matériels, TinyOS a été programmé en langage nesC, tout comme les applications tournant dessus, Il est prévu pour implanter sur chaque noeud du réseau et il est présent en Open source.

II.1. Le système d'exploitation TinyOS :

II.1.1. Aperçus sur TinyOS :

Parmi les systèmes d'exploitation développés pour les réseaux de capteurs, nous citons TinyOS. Ce dernier est un système moins complexe et plus répandu [14] comparant aux autres, il est intégré, modulaire et open-source. Pour être compatible avec les réseaux de capteurs, TinyOS est doté d'une bibliothèque de composants presque complète possédant des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils nécessaires à l'acquisition de données.

II.1.2. Propriétés de TinyOS :

Afin de s'adapter aux systèmes à faible ressources, TinyOS se base sur quatre grandes propriétés

- **Événementiel** : Vu les faibles ressources énergétique des capteurs, TinyOS s'active à l'apparition d'un évènement qui induit à l'activation des tâches. En l'absence d'évènement, le capteur se met en veille.
- **Non préemptif** : Une tâche ne peut pas arrêter l'exécution d'une autre, mais une interruption matérielle peut stopper l'exécution d'une tâche, donc TinyOS donne la priorité aux interruptions matérielles.
- **Pas de temps réel** : TinyOS n'est pas un système d'exploitation temps réel, il ne gère pas des niveaux de propriétés dans ses tâches permettant de respecter les échéances données par son environnement.
- **Consommation** : Le comportement énergétique de TinyOS a été conçu de manière à minimiser la consommation, ainsi en l'absence d'évènement et lorsque toutes les tâches sont inactives, il rentre automatiquement en mode veille.

II.1.3. L'ordonnanceur TinyOS :

Le fonctionnement global d'un système est déterminé par le choix de l'ordonnanceur, TinyOS est ordonnancé sur 2 niveau de priorité, haut pour les évènements et bas pour les tâches, les tâches s'exécutent en file d'attente (FIFO) selon leurs priorité, elles sont ordonnancées dans la file en suivant leurs niveau de priorité, si la file est pleine la tâches qui a la plus faible priorité est enlevée à l'arrivée d'une nouvelle tâche.

Procédure d'installation de TinyOS sous Windows XP

TinyOS est prévu pour fonctionner sur plusieurs plateformes. Il peut être installé sur Windows, Linux, Mac OS ou sur un capteur. La procédure d'installation de TinyOS sur Windows XP était relativement longue et studieuse, le fait qu'elle diffère de la procédure habituelle à l'aide des installateur, l'installation de tinyOS a nécessité d'installer un émulateur linux (Cygwin) afin d'avoir un Shell et de pouvoir compiler et exécuter les programmes fournis.

Pour installer TinyOS il faut suivre ces étapes:

1. Téléchargez et installez JDK 1.4 ;
2. Téléchargez le fichier tinyos-1.1.0-1is.exe de la source <http://webs.cs.berkeley.edu/tos/dist-1.1.0/tools/windows/tinyos-cygwin-1.1.zip>;

Décompressez le, et lancez le script install.bat L'installation se fait automatiquement.

Un raccourci de Cygwin apparait sur le bureau. A partir de cette étape, le reste de l'installation s'effectue à l'aide de Cygwin.

3. Installez javax.comm Soleil, après son téléchargement dans le répertoire c: \ Program Files \jdk:, en utilisant les commandes suivantes dans le shell Cygwin

- unzip javacomm20-win32.zip
- cd commapi
- cp win32com.dll "c: \ Program Files \jdk \jre \ bin"
- chmod 755 "C: \ Program Files \jdk \jre \ bin \ win32com.dll"
- cp comm.jar "c: \ Program Files \jdk \jre \ ext \ lib"
- cp javax.comm.properties "c: \ Program Files \jdk \jre \ lib"

4. Télécharger graphviz de <http://webs.cs.berkeley.edu/tos/dist-1.1.0/tools/windows/graphviz-1.10.exe> et installez-le en l'exécutant.

5. Téléchargez les RPM suivants et les installez avec la commande "rpm - ivh" dans le répertoire où vous avez enregistré les fichiers (dans un shell cygwin).

- avarice-2.0.20030825cvs-1w.cygwin.i386.rpm
- avr-binutils-2.13.2.1-1w.cygwin.i386.rpm
- avr-gcc-3.3tinyos-1w.cygwin.i386.rpm
- AVR-insight-pre6.0cvs.tinyos-1w.cygwin.i386.rpm
- avr-libc-20030512cvs-1w.cygwin.i386.rpm
- CNES1.1-1w.cygwin.i386.rpm
- TinyOS-tools-1.1.0-1.cygwin.i386.rpm
- TinyOS-1.1.0-1.cygwin.noarch.rpm

Remarque:

TinyOS est installé dans / opt/tinyos-1.x.

La commande Toscheck nous aide à vérifier si l'installation de TinyOS s'est bien déroulée.

II.2. Langage de programmation nesC :

Le système TinyOS, ses bibliothèques et ses applications sont écrits en nesC , un nouveau langage pour le développement d'applications orientées composants.

II.2.1. sur nesC

nesC est le langage avec lequel sont développés le système TinyOS, ses bibliothèques et ses applications. C'est un langage dérivant du langage C, il optimise de manière à minimiser l'utilisation de la mémoire. Il est utilisé principalement dans les systèmes embarqués comme les réseaux de capteurs. Avec nesC, les concepteurs d'applications peuvent construire des composants qui peuvent être composés rapidement en des systèmes complets, concurrents, tout en permettant une vérification profonde à la compilation.

II.3. TOSSIM :

Avant sa mise en place, le déploiement d'un RCSF nécessite une phase de simulation afin de s'assurer du bon fonctionnement de tous les protocoles de communication qu'il utilise. En effet, pour de grands réseaux, le nombre de capteurs peut atteindre plusieurs milliers et entraîne donc un coût financier relativement important. Ainsi, il faut réduire au maximum les erreurs de la conception. Malgré cela, il reste des facteurs réels qui ne peuvent être pris en compte par la simulation, tels que les contraintes physiques (perturbations électromagnétiques, inondations, etc.) ou les aléas (détériorations dues à un animal, etc.). Pour arriver à simuler le comportement des capteurs au sein d'un RCSF, un outil très puissant a été développé et proposé pour TinyOS sous le nom de TOSSIM. Le principal but de TOSSIM est de créer une simulation très proche de ce qui se passe dans les RCSF dans le monde réel. Une économie d'effort et une préservation du matériel sont possibles grâce à cet outil.

Pour une compréhension moins complexe de l'activité du réseau, TOSSIM peut être utilisé avec une interface graphique TinyViz. Cette dernière est équipée par plusieurs API plugins qui permettent d'ajouter plusieurs fonctions à notre simulateur comme par exemple suivre la dépense d'énergie en utilisant un autre simulateur qui s'appelle PowerTOSSIM.

II.3.1. TinyViz :

TinyViz est une interface graphique Java. Elle permet de donner un aperçu des capteurs à tout instant ainsi que des divers messages qu'ils émettent. Elle détermine un délai entre chaque itération des capteurs afin de permettre une analyse pas à pas du bon déroulement des actions en activant différents modes comme Radio, CPU, etc.

II.3.2. PowerTOSSIM :

Le simulateur TOSSIM n'a pas la capacité de vérifier le taux d'énergie dissipée pendant l'exécution des applications. Cependant, le besoin de vérifier la consommation énergétique dans un RCSF a un intérêt primordial. L'université de Harvard a conçu le simulateur PowerTOSSIM qui surmonte ce problème. Ce nouveau simulateur est intégré dans TOSSIM. Il permet de générer un fichier de l'extension .trace qui enregistre les détails de la simulation comme l'énergie consommée dans le réseau.

III. Implémentation du protocole LEACH :

Dans cette section, nous décrivons les structures de données ainsi que les principaux commandes et événements nécessaires pour l'implémentation du protocole LEACH.

III.1. Structures de données :

Le paquet dans TinyOS est envoyé dans une structure appelée TOS_Msg, qui est contenue dans un champ « int8_t data[TOSH_DATA_LENGTH] ». Les structures de données du paquet diffèrent selon le rang du nœud (puits, CH ou membre).

A) Le nœud puits :

```
typedef struct PUIITS
{uint16_t ID;           //l'identificateur du puits qui correspond à tos_local_address=0
uint8_t round;         //le round courant
float probability;     //la probabilité que chaque nœud devienne CH
uint8_t Depth;        //la puissance du signal d'un CH dans le réseau
}PUIITS;
```

B) Le nœud CH :

```
typedef struct CLUSTER_HEAD
{
uint16_t ID_CH;        //l'identificateur de chaque CH qui correspond à tos_local_address
uint16_t ID_MEMBRE;   //l'identificateur du membre qui appartiendra à ce CH
uint8_t data_agre;    //la donnée agrégée à envoyer au nœud puits
uint16_t SLOT_ATT;    //le slot attribué à chaque membre
uint16_t FREQ;        //la fréquence avec laquelle un membre envoie sa donnée
}CLUSTER_HEAD;
```

C) Le nœud membre :

```
typedef struct MEMBRE
{
uint16_t ID_MEMBRE;//l'identificateur de chaque membre qui correspond à tos_local_adress
uint16_t ID_CH; //l'identificateur du CH auquel appartiendra le nœud membre
uint8_t temp; //la température captée
}MEMBRE;
```

III.2. Événements et commandes :

Nous citons ici les principaux événements utilisés pour l'implémentation de LEACH.

Événement	Sortie	Fonction
LEACH_ReceiveMsg.receive(TOS_MsgPtr pmsg)	TOS_MsgPtr	Réception du round
ANNONCE_ReceiveMsg.receive(TOS_MsgPtr pmsg)	TOS_MsgPtr	Annonce du CH
ORGANISATION_ReceiveMsg.receive(TOS_MsgPtr pmsg)	TOS_MsgPtr	Formation de groupes
SLOT_ReceiveMsg.receive(TOS_MsgPtr pmsg)	TOS_MsgPtr	Réception des slots
Temperature_ReceiveMsg.receive(TOS_MsgPtr pmsg)	TOS_MsgPtr	Réception du CH des températures captées
AGGREGATION_ReceiveMsg.receive(TOS_MsgPtr pmsg)	TOS_MsgPtr	Réception du puits des résultats d'agrégation

III.3. Déroulement :

Dans cette partie, nous expliquons et déroulons les phases de l'algorithme LEACH en faisant appel à TinyViz. Un fichier de configuration est créé et permet à TinyViz de se lancer avec des paramètres spécifiés. Ces derniers représentent : le nombre et l'emplacement des capteurs, la durée de la simulation et les plugins que nous souhaitons activer dès le début de la simulation comme Debug Messages. A propos des captures d'écran de TinyViz, nous nous limitons, dans cette étape, sur la partie où l'on peut visualiser les capteurs.

III.3.1. Déclenchement et relai du nouveau round, et, annonce des CH:

La figure VI-1 représente les transmissions broadcast qui se passent durant différentes étapes de l'algorithme LEACH. Une transmission broadcast est repérée par un cercle bleu. Le noeud puits envoie un broadcast aux noeuds voisins pour l'annonce du round. Ses voisins prennent le relai en envoyant à leur tour selon une transmission broadcast. De plus, nous pouvons voir que le noeud 15 est élu CH. Cet évènement est marqué par l'activation des LED rouges des CH. Ensuite, le CH 15 diffuse une annonce pour signaler son statut.

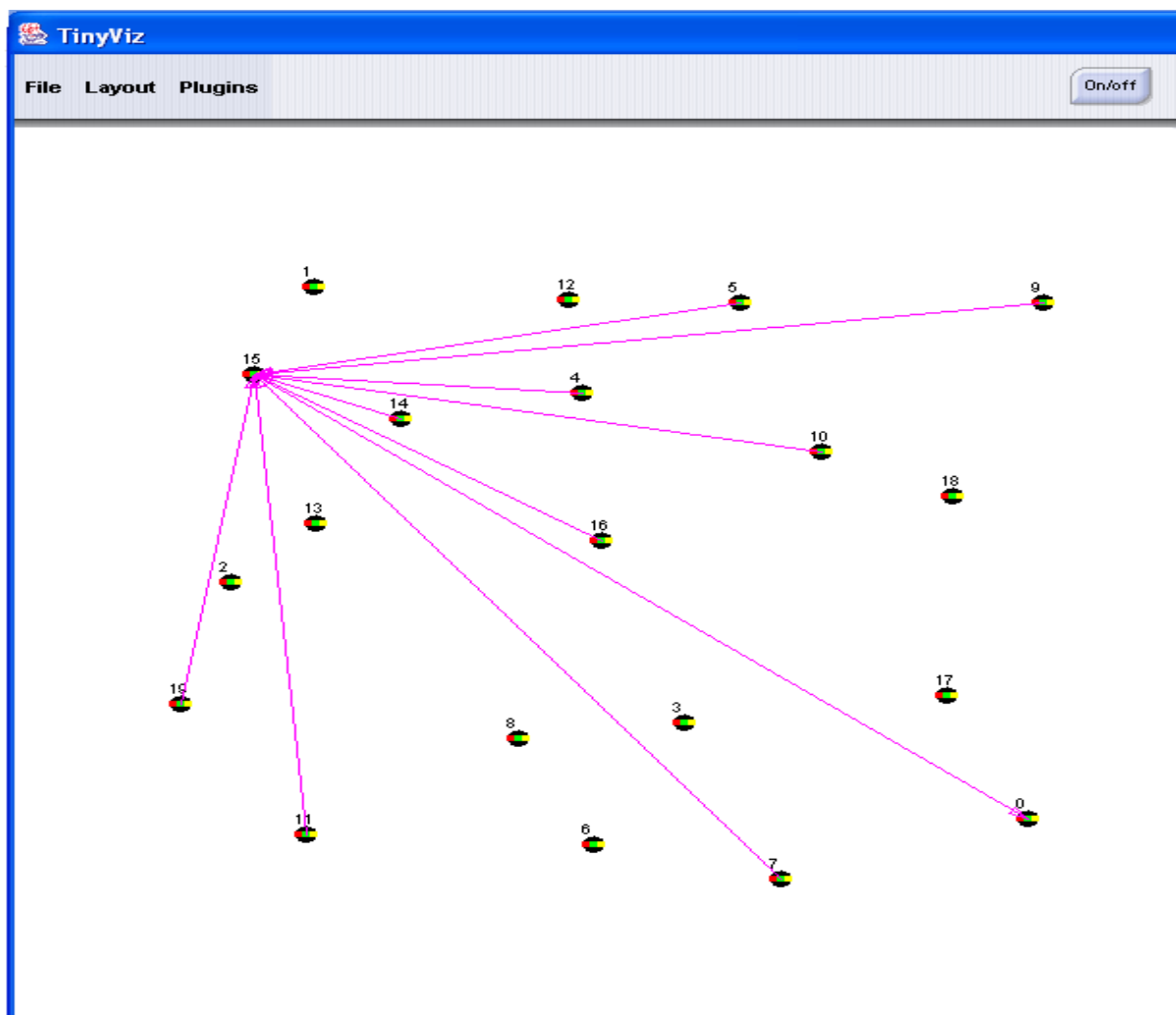


Figure V.1 : Déclenchement du nouveau round et annonce du CH 15

III.3.2. Formation de groupes et envoi des températures:

La figure VI-2 représente quelques transmissions unicast qui se passent durant différentes étapes de l'algorithme LEACH. Une transmission unicast est repérée par une flèche. Durant la première étape, les noeuds non-CH répondent à l'annonce du CH le plus proche. La figure VI-2 illustre la formation du CH 7. Quant à la seconde étape, chaque membre capte la température et attend le début de son slot pour qu'il puisse l'envoyer à son CH. Nous avons utilisé une application qui retourne la température sur une zone donnée afin de pouvoir valider l'implémentation du protocole LEACH.

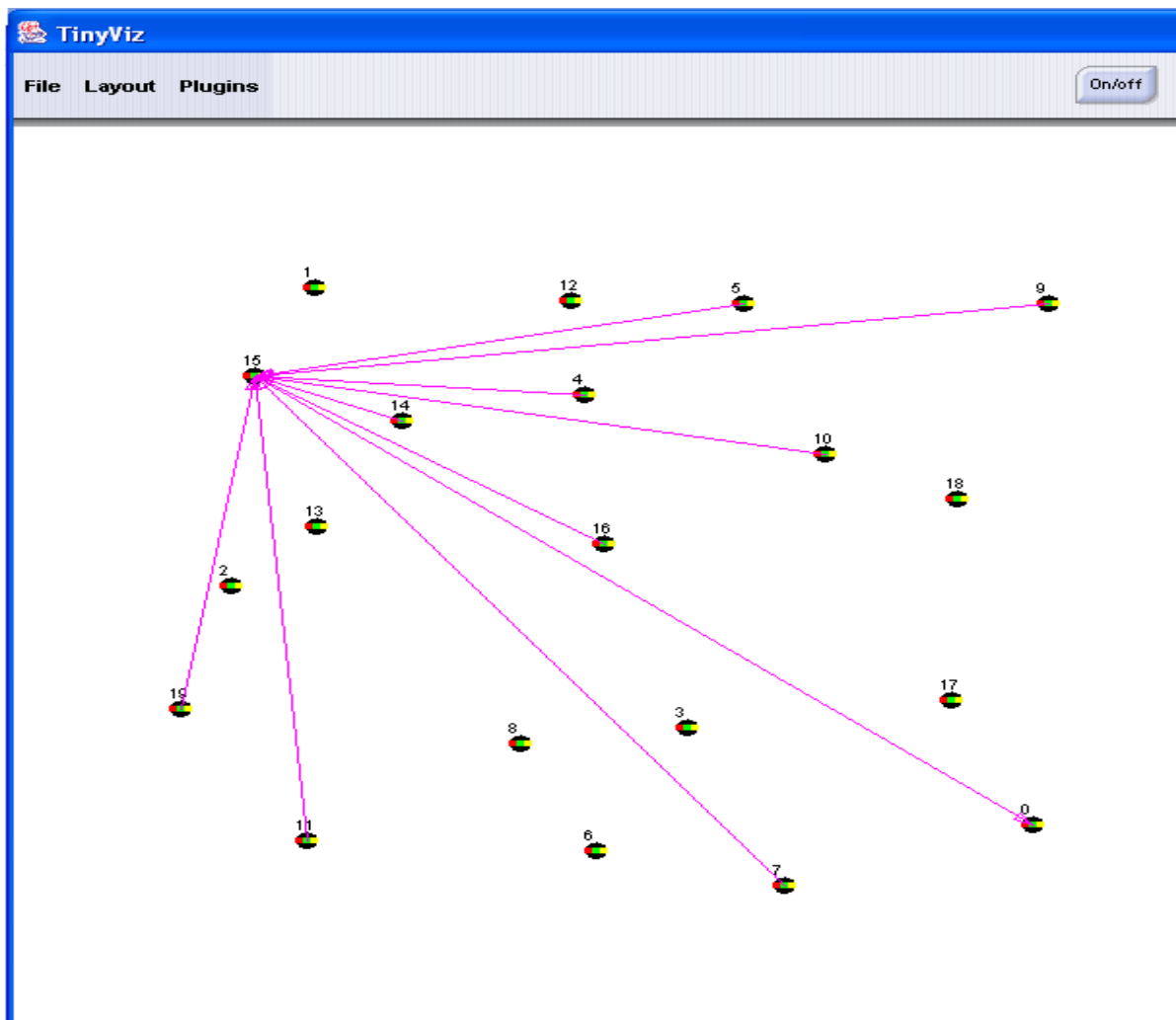


Figure V.2 : Formation de groupes et envoi de la température.

III.3.3. Envoi des résultats d'agrégation des températures au nœud puits :

Dans la figure VI.3, le CH 15 agrège les températures reçues et envoie son résultat d'agrégation au nœud puits.

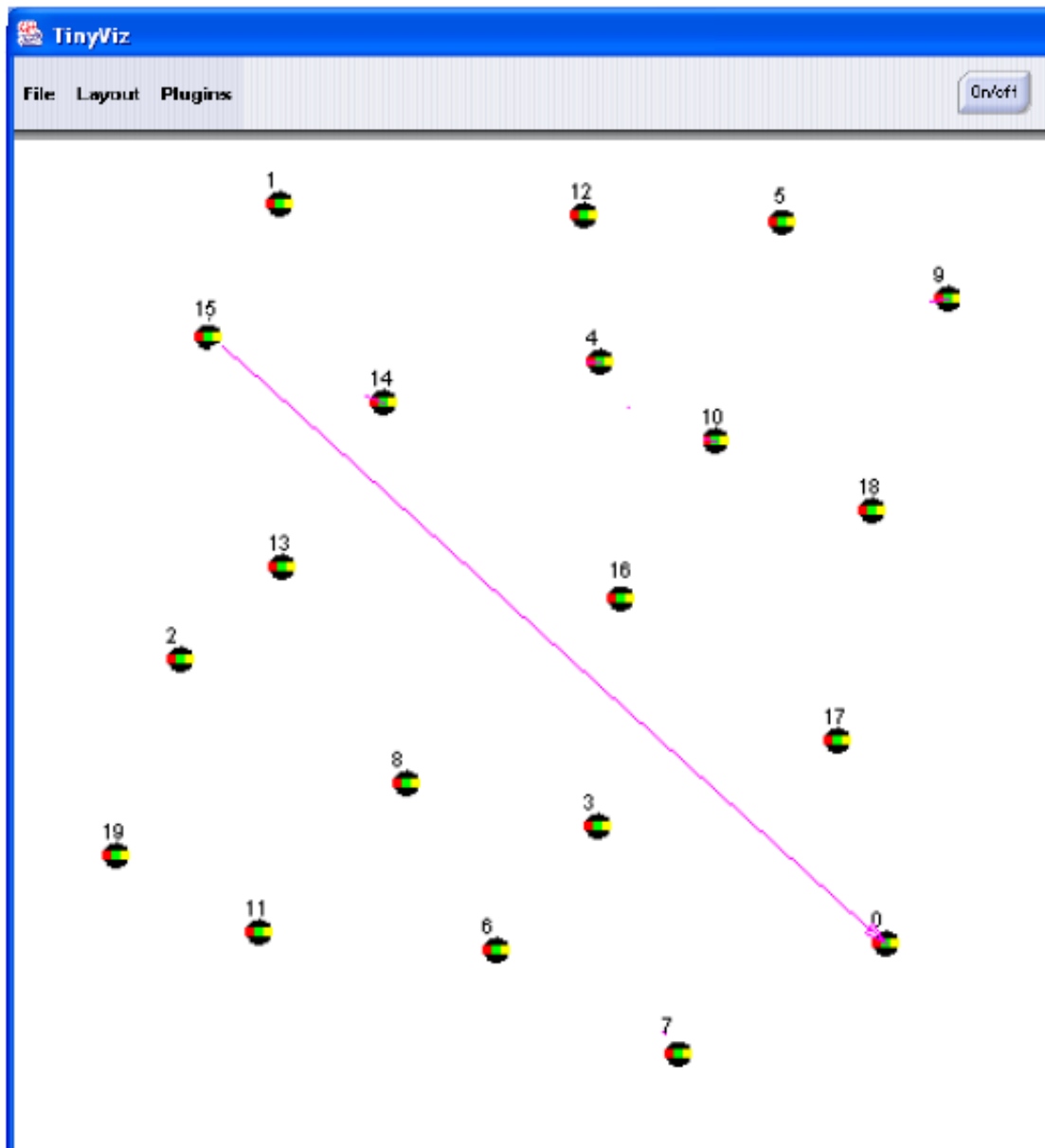


Figure V.3 : Envoi du résultat d'agrégation du CH 15 au nœud puits.

IV. Métriques à évaluer :

Pour pouvoir évaluer les performances de LEACH, il est commode de mesurer certaines métriques qui sont :

IV.1. Consommation énergétique :

Nous nous sommes intéressés essentiellement à la consommation d'énergie des nœuds puisqu'elle constitue un paramètre primordial pour la détermination de la durée de vie d'un RCSF. Le premier facteur limitant cette métrique est l'alimentation en énergie, chaque nœud du réseau est conçu pour contrôler sa propre alimentation afin de maximiser la durée de vie de tout le réseau.

Pendant le fonctionnement d'un nœud capteur, la communication radio, les traitements et la gestion des données...etc consomment beaucoup d'énergie. Donc il est trop important d'évaluer l'utilisation de la batterie. Pour se faire, nous prenons comme critère l'énergie moyenne consommée par chaque nœud du réseau.

IV.2. Perte de paquets :

Le choix de cette métrique, comme étant un critère de performance, revient à sa nécessité dans certaines applications où les données échangées sont très critiques. Pour la mesurer, nous calculons la moyenne des taux de perte de paquets de températures entre les membres et leurs CH, et de paquets d'agrégation de ces températures entre les CH et le nœud puits.

IV.3. Délai de bout-en-bout :

Le choix de cette métrique, comme étant une mesure de performance, revient à sa nécessité dans certaines applications temps-réel où on est obligé d'obtenir l'information le plus tôt possible afin de prendre les mesures nécessaires. Certains auteurs utilisent comme critère le temps moyen pour qu'un paquet soit acheminé d'une source jusqu'au nœud puits. Cependant, les CH dans les protocoles LEACH ne permettent pas d'utiliser ce critère. En effet, les températures captées par les membres ne sont pas envoyées au nœud puits, mais, elles sont agrégées par les CH. Rappelons que ces derniers attendent que tous les membres achèvent l'opération de captage avant de passer à la phase d'agrégation. Donc, le critère que nous utilisons est l'EED moyen de tous les paquets transitant dans le réseau.

V. Résultat et interprétations :

Dans cette section, nous allons évaluer les métriques cités précédemment sur le protocole LEACH.

V.1. Consommation d'énergie :

- Consommation d'énergie des CH (cluster head) et des nœuds membres sur un échantillon de 50 nœuds :

Dans ce test, nous avons mesuré le taux de consommation d'énergie des CH par rapport aux nœuds membres pour le protocole LEACH.

	LEACH
Consommation énergétique des MBR (Joules)	15,611
Consommation énergétique des CH (Joules)	19,836
Energie additionnelle des CH par rapport aux membres	21,29%

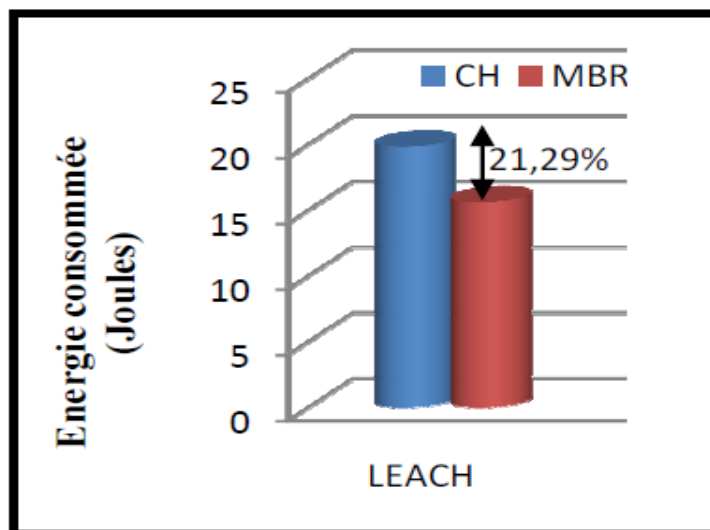


Figure V.4 : Consommation d'énergie des CH par rapport aux nœuds membres.

Comme l'illustre le résultat de la figure V.4, la moyenne de la consommation d'énergie des CH dans le protocole LEACH est plus élevée que celle des membres avec un taux de 21,29%. Cette hausse enregistrée dans la consommation d'énergie est induite par les tâches coûteuses en termes d'énergie qu'effectue le CH lors de son élection.

- **Variation de la consommation d'énergie au nombre de nœuds du réseau :**

Nombre de nœuds	50	100	150	200
Moyenne de consommation d'énergie dans LEACH (Joules)	16,315	16,438	16,243	16,487

Comme l'illustre le résultat du tableau, nous remarquons que la moyenne d'énergie consommée dans le réseau est indépendante du nombre de nœuds déployés à cause de la topologie hiérarchique du protocole LEACH qui le rend très scalable. En effet, quand la taille du réseau augmente, le nombre de CH augmente. Donc, les nouveaux nœuds vont être affectés aux nouveaux CH et regroupés indépendamment des groupes déjà existants dans le réseau. Donc, malgré l'augmentation du nombre de nœuds déployés, la taille de tous les groupes est la même. Ainsi, tous les CH effectuent le même taux de tâches. Donc, LEACH maintient la consommation d'énergie des nœuds quelque soit la taille du réseau.

VI. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'implémentation ainsi que l'évaluation du protocole LEACH. Le système d'exploitation TinyOS est utilisé. Il consiste une programmation entière en langage NesC et une simulation avec TOSSIM.

Par ailleurs, nous avons constaté que les tests de performances effectués sur la consommation d'énergie ont montré que le protocole LEACH répond bien aux critères de performances souhaités. En effet, ce protocole ne permet pas de surcharger les nœuds capteurs, ni de dégrader les performances du réseau.

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

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés au problème de routage et de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fils. Nous avons présenté un petit état de l'art sur les protocoles de routages dans les réseaux de capteurs sans fils. Par la suite nous avons explicité le fonctionnement du protocole de routage LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

- [Aky 2002] I. Akyildiz, W. Su, E. Cayirci, Y. Sankarasubramaniam. "A survey on sensor networks", IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA. Août 2002.
- [Bha 2006] Bhaskar Krishnamachari. Networking Wireless Sensors. Cambridge University Press, 2006. 1, 5, 10
- [Bou 2005] Samra Boulfekhar, « approche de minimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fils » Mémoire de magistère, Université Abderahmane Mira de bejaia ; 2006.
- [Bra 2002] David Braginsky and Deborah Estrin. Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks. in the Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), Atlanta, GA. October 2002.
- [Bul 96] K. Bult, A. Burstein, D. Chang, M. Dong, and W. Kaiser. Wireless integrated microsensors. Proceedings of Conference on Sensors and Systems (Sensors Expo). Anaheim, CA, USA, Pages:33–38. April 16-18 1996.
- [Cal 2004] Edgar H. Callaway. Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols. CRC Press 2004.
- [Cas web] Sensicast. <http://www.sensicast.com>.
- [Cha 2000] J.-H. Chang and L. Tassiulas. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks. Proc. Adv. Telecommun. Inf. Distribution Res. Program (ATIRP2000), College Park, MD, Mar. 2000.
- [Cho 2003] C. Chong and S. Kumar, "Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges" Proceedings of IEEE, August 2003.
- [Chu 2002] M. Chu, H. Haussecker, and F. Zhao. Scalable Information-Driven Sensor Querying and Routing for ad hoc Heterogeneous Sensor Networks. The International Journal of High Performance Computing Applications, August 2002.
- [Dho 2003] Dominique Dhoutaut. Etude du standard IEEE 802.11 dans le cadre des réseaux Ad hoc: de la simulation à l'expérimentation. Thèse pour obtenir le grade de Doctorat en Informatique. 2003.

- [Dig web] Digital Sun <http://www.digitalsun.com>
- [Dus web] Dust Networks <http://www.dust-inc.com>
- [Emb web] Ember Corporation <http://www.ember.com>
- [Eug 2001] Eugene Shih, Seong-Hwan Cho, Nathan Ickes, Rex Min, Amit Sinha, Alice Wang, and Anantha Chandrakasan. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy efficient wireless sensor networks. In Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile Computing and networking , pages 272_287, New York, USA, 2001.
- [Fas 2001] Jean-Philippe Fassino. THINK: vers une architecture de systèmes flexibles. laboratoire Architecture des Systèmes Répartis de la Direction des Techniques Logicielles de France Télécom Recherche & Développement 2001.
- [Fer web] Ferro Solutions <http://www.ferrosi.com>.
- [Gan 2001] D. Ganesan, R. Govindan, S. Shenker, and D. Estrin. Highly resilient, energyefficient multipath routing in wireless sensor networks. ACM Mobile Computing Commun. Rev., 5(4), October 2001.
- [Gir 2007] Arvind Giridhar and P. R. Kumar. Maximizing the functional lifetime of sensor networks. In Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05), Piscataway, NJ, USA, 2005. IEEE Press.
- [Gue 2007] Isabelle Guérin Lassous, "Autonomic computing: acces au medium radio" Cours M2 recherche RTS, RTS5 Université de Lyon septembre 2007.
- [Ham 2007] Abdelhakim HAMZI ; « Plateforme basée agents pour l'aide à la conception et la simulation des réseaux de capteurs sans fil » ; Magistère en informatique ; Institut National de formation en Informatique (I.N.I) Oued-smar Alger ; juillet 2007
- [Hei 2000] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. Proc. 33rd Hawaii Int. Conf. Syst. Sci. (HICSS '00), January 2000.
- [Hei 2002] W. Heinzelman, A.P. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks", 2002.

- [Her 2004] Ted Herman, Sébastien Tixeuil; « Un algorithme TDMA réparti pour les réseaux de capteurs » ; INRIA Projet Grand Large, Université Paris-Sud XI ; 2004
- [Hol 2005] K. Holger and Andreas Willig. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. Wiley, 2005.
- [How 1999] I. Howitt and H. Seung-Yong. Base station location optimization. IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference. VTC 1999.
- [Int web] Intel <http://www.intel.com>.
- [Jin 2000] Li, Jinyang, et al. A scalable location service for geographic ad hoc routing. 6th annual international conference on Mobile computing and networking. 2000,
- [Jun 2002] B. Jung and G. Sukhatme, “Multi-target tracking using a mobile sensor network”. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2002.
- [Kac 2009] Kacimi Rahim, « Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil » ; Institut National Polytechnique de Toulouse, Réseaux et Télécommunications, septembre 2009.
- [Kam 2009] Kamal Beydoun, « Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs »; L'U.F.R des sciences et techniques de l'université de FRANCHE-COMTE, France 2009.
- [Kar 2003] Holger Karl, Marc Löbbers, Tim Nieberg. A Data Aggregation Framework for Wireless Sensor Networks. Technical University Berlin. Telecommunication Networks Group. September 2003
- [Khe 2004] Lyes Khelladi, Nadjibe Badache; « Les réseaux de capteurs sans : Etat de l'art » ; Rapport de recherche ; Algérie ; Février 2004.
- [Law 2001] Eric Lawry « The suitability of OFDM as a modulation technique for wireless communication with a CDMA comparison » Projet d'ingénieur, université Jams Cook; Australie; 2001.
- [Man 2001] Arati Manjeshwar, Dharma P. Agrawal. TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 15th International

Parallel & Distributed Processing Symposium. IEEE Computer Society Washington, DC, USA. 2001

[Meh 2001] Shashank Mehrotra. Distributed Algorithms for Tasking Large Sensor Networks. Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. 2001

[Mis 2004] Nilesh Mishra. Routing in Wireless Sensor Networks. Dept. of Computer Science and Engineering IIT Kanpur, India. 2004.

[Moa 2008] Sofiane Moad, Etude bibliographique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, Master Recherche 2 en Informatique, IFSIC-Rennes 1, 2008

[Mot 2006] Shinji Motegi, Kiyohito Yoshihara and Hiroki Horiuchi. DAG based In-Network Aggregation for Sensor Network Monitoring. Proceedings of the 2005 Symposium on Applications and the Internet (SAINT'06). 2006.

[Muj 2004] Sachin Mujumdar, « Prioritized Geographical Routing In Sensor Network » Thèse; Université Vanderbilt; Mai 2004.

[Pic web] PicoRadio Project, [http://bwrc.eecs.berkeley.edu/research/pico radio](http://bwrc.eecs.berkeley.edu/research/pico%20radio).

[Rag 2003] Srajan Raghuwanshi “An Energy Efficient Cross Layer Design Scheme For Wireless Sensor Networks”; Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University; Août 2003.

[Rah 2002] C. Rahul and J. Rabaey. Energy-aware routing for low energy ad hoc sensor networks. Wireless Commun Networking Conf. (WCNC), Orlando, FL. March, 2002.

[Roc web] Rockwell Science Center, <http://wins.rsc.rockwell.com>.

[Sad 2000] P. Sadegh and J. Spall. Optimal sensor configuration for complex systems with application to signal detection in structures. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000. IMTC2000. Proceedings of the 17th IEEE, 2000.

[Sav 2001] A. Savvides, C-C Han, and M. Srivastava. Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc networks of sensors. Proceedings of the Seventh ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), July 2001.

- [Sch 2002] Curt Schurgers, Vlasios Tsiatsis, and Mani B. Srivastava. STEM : Topology management for energy efficient sensor networks. In Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, volume 3, pages 78_89, Big Sky, Montana, USA, 2002.
- [Sen web] Senera <http://www.senera.com>.
- [Ser 2002] S. Servetto and G. Barrenechea. Constrained Random Walks on Random Graphs: Routing Algorithms for Large Scale Wireless Sensor Networks. proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, Atlanta, Georgia, USA, 2002.
- [Sha 2002] R. C. Shah and J. Rabaey. Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), March 17-21, 2002.
- [Sta 2005] Stanislava Soro and Wandi B. Heinzelman. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering. In Proceedings of 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'05), Denver, Colorado, USA, April 2005
- [Sub 2000] L. Subramanian and R. H. Katz. An Architecture for Building Self Configurable Systems. In the Proceedings of IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, Boston, MA. August 2000.
- [Tin web] TinyOS <http://www.tinyos.net>.
- [Xsi web] Xsilogy <http://www.xsilogy.com>.
- [Xu 2001] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin. Geography-informed Energy Conservation for Ad-hoc Routing. In Proceedings of the Seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, 2001.
- [Yam 1998] B. Yamauchi, A. Schultz, W. Adams. Mobile robot exploration and mapbuilding with continuous localization. In: In Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation. Volume 4. 1998.
- [Yao 2002] Y. Yao and J. Gehrke. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks. in SIGMOD Record, September 2002.

[Yas 2010] YOUSEF Yaser, « Routage pour la Gestion de l'Energie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil »; UNIVERSITE DE HAUTE ALSACE Faculté des Sciences et Techniques ; juillet 2010.

[Ye 2001] F. Ye, A. Chen, S. Liu, and L. Zhang. A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks. Proc. 10th Int. Conf. Computer Commun. Networks (ICCCN), 2001.

Figure I.1 : Architecture physique d'un capteur	2
Figure I.2 : La pile protocolaire dans les réseaux de capteurs.....	3
Figure I.4: Exemple de réseaux de capteurs.....	6
Figure II.1 : La sur-écoute dans une transmission.....	18
Figure II.2 : Les techniques de conservation d'énergie.....	20
Figure III.1 : Communication multi sauts entre A et D.....	23
Figure III.2 : Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fils	24
Figure III.3 : La différence entre le AC et le DC routing	27
Figure III.4 : Exemple des zones fixe pour le routage VGAR.....	33
Figure III.5 : Exemple de découpage en zones dans un réseau de capteurs.....	36
Figure III.6 : Transmission géographique récursive dans GEAR.....	37
Figure III.7 : Un exemple de protocole SPIN-PP.....	39
Figure III.8 : Les composants du protocole SPEED.....	42
Figure IV.1 : Le Clustering dans un réseau de capteurs.....	46
Figure IV.2 : Diagrammes représentant le protocole MAC TDMA.....	47
Figure IV.3 : Diagrammes représentant le protocole MAC CDMA.....	48
Figure IV.4 : Architecture de communication du protocole LEACH.....	49
Figure IV.4 : Opérations de l'étape d'initialisation de LEACH.....	50
Figure IV.6 : Interférence lors d'une communication dans LEACH.....	53
Figure IV.7 : Répartition du temps et différentes phases pour chaque round.....	54
Figure V.1 : Déclenchement du nouveau round et annonce du CH 15.....	64
Figure V.2 : Formation de groupes et envoi de la température.....	65

Figure V.3 : Envoi du résultat d'agrégation du CH 15 au nœud puits.....	66
Figure V.4 : Consommation d'énergie des CH par rapport aux nœuds membres.....	68