

République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Abou Bakr Belkaid- Tlemcen
Faculté des Sciences
Département d'Informatique

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique

Option: Système d'Information et de Connaissances (S.I.C)

Thème

Etude et proposition d'un modèle
d'économie d'énergie pour les réseaux de
capteurs sans fil :
Application médicale sportive

Réalisé par :

- **Hichem HADDOU BENDERBAL**
- **Imen KOULOUGHLI**

Présenté le 26 septembre 2012 devant le jury composé de MM.

- *Mr. Amine CHIKH* (Président)
- *Mr. Hassine MOUNGLA* (Encadreur)
- *Mme. Souad KHITRI* (Co-Encadreur)
- *Mr. Amine BOUDEFLA* (Examineur)
- *Mr. Mohammed LEHSAINI* (Examineur)

« Tout dépend des perspectives, Alors soyez créatifs »

HB. Hichem 2012

Remerciements

Au nom d'ALLAH, le Tout Miséricordieux le plus grand merci lui revient de nous avoir guidé vers le droit chemin, de nous avoir aidé tout au long de nos années d'étude et pour toutes ses grâces qui nous entourent.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Nous tenons à remercier sincèrement Monsieur Hassine Moun gla, qui, en tant qu'encadreur de ce mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de notre travail, ainsi que pour l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Nos remerciements s'adressent également à Madame Souad Khitri: notre enseignante et co-encadreur pour sa générosité, sa confiance, et la grande patience dont elle a su faire preuve malgré ses charges.

Nous exprimons notre gratitude à Monsieur Chems Eddine Benmoussat qui a accepté de répondre à nos questions avec gentillesse, et pour tous ses conseils.

Nous remercions aussi les membres du jury Mr A.CHIKH d'avoir accepté de présider ce jury, Mr A.BOUDEF LA et Mr M.LEHSAINI d'avoir accepté d'évaluer et d'examiner ce travail, et de consacrer une partie de leurs précieux temps afin de le juger au mieux.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenus et encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire. Nous remercions particulièrement nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Merci à tous et à toutes.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à ma nièce adorée Lydia qui m'apporte énormément de bonheur et de joie.

Je dédie également ce mémoire à mes deux sœurs kamila et sihem qui ont toujours su m'aider et m'encourager à aller de l'avant.

A mes parents qui m'ont soutenu à faire mes premiers pas étant enfant, puis mes premiers pas dans la vie d'adulte.

A ma tante Malika qui m'a toujours épaulée quand j'en eu besoin.

K. Imen

Dédicaces

Je dédie ce petit travail

A ma grand-mère paix à son âme,

A mes très chers parents pour tous leurs sacrifices et efforts durant ces longues années,

A mon très cher oncle Habib et à ma deuxième chère mère Fatiha de m'avoir accueilli en tant que fils,

A mes frères Djamel, Amine, Otman et Ayoub,

A mes sœurs Soumaia et aya,

A toute la famille HADDOU BENDERBAL,

A tous mes amis spécialement Oussama, Tariq, SAKY, Saouli, Fayssal, Fethi et Elhadi,

A toute la promotion Informatique qui contient mes très chers collègues,

Au Club Universitaire Scientifique de Tlemcen CLUST et surtout au noyau,

Finalement je le dédie avec un grand plaisir aux chercheurs qui contribuent chaque jour pour nous apporter les merveilles des sciences et aux futurs chercheurs qui vont continuer à donner.

HB. Hichem

Résumé

Dans ce mémoire, nous nous sommes tout d'abord focalisés sur des réseaux de capteurs sans fils de petite taille dans le domaine médico-sportif. Nous avons conçu une solution protocolaire dédiée pour le routage dynamique et l'économie d'énergie, cette solution nommée « DREEM : Dynamic Routing Energy Efficient Model » est composée de :

- Une stratégie de mise en veille que nous proposons permettant d'étendre la durée de vie du réseau.
- Un algorithme de localisation « **CTA : Closer Tracking Algorithme** » pour localiser les capteurs en se basant sur la métrique « RSSI : Received Signal Strength Indication ». Pour adopter cet algorithme à notre cas d'étude nous lui avons apporté les modifications nécessaires afin de déterminer dans quel état se trouvait l'athlète et selon cet état il était possible de choisir une topologie pour appliquer le troisième algorithme d'un protocole de routage ELQR (Energy and Link Quality based Routing).
- Le protocole de routage ELQR : L'avantage qu'offre ELQR en plus de prendre en considération l'état du lien est le fait d'avoir une colonne de plus dans les tables de routage spécialement dédiée à l'énergie résiduelle des nœuds voisins.

Mots clés : Réseaux de capteurs sans fil, capteurs médicaux-sportifs, capteur intelligent, WBAN, Routage dynamique, RSSI, Economie d'énergie.

Glossaire

ACA Approximately Closer Approach

AoA Angle of Arrival

CTA Closer Tracking Algorithm

CTP Collection Tree Protocol

DREEM Dynamic Routing Energy Efficient Model

ELQR Energy and Link Quality based Routing

ETX Expected Transmission Count

FPT Fingerprinting

HEED Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering

GEAR Geographic and Energy Aware Routing

LEACH Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy

LQE Link Quality Estimator

PRR Packet Reception Ratio

QoS Quality of Service

RCSF Réseaux de Capteurs Sans Fil

RSSI Received Signal Strength Indication

RTT Real Time Tracking

SAR Sequential Assignment Routing

SPIN Sensor protocol for Information via Negotiation

SRB Saved ReBroadcast

TEEN Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol

TDoA Time Difference of Arrival

ToA Time of Arrival

WBAN Wireless Body Area Network

WSN Wireless Sensor Network

Table des matières

1	Réseaux de capteurs sans fil	3
1.1	Introduction.....	4
1.2	Capteur	4
1.2.1	Unité de captage.....	4
1.2.2	Unité de traitement.....	4
1.2.3	Unité de communication.....	4
1.2.4	Unité de contrôle d'énergie	5
1.3	Réseaux de capteurs	6
1.3.1	Définition.....	6
1.3.2	Composition d'un réseau de capteurs.....	6
1.3.3	Types d'architectures des réseaux de capteurs	7
1.3.4	Caractéristiques des réseaux de capteurs.....	7
1.4	WBAN (Wireless Body Area Network).....	9
1.5	Économie d'énergie des capteurs.....	9
1.5.1	Etat de capteur	10
1.5.2	Optimisation de la consommation d'énergie	10
1.6	Mobilité	11
1.7	Architecture protocolaire	12
1.8	Protocoles	13
1.8.1	Performance d'un protocole de diffusion	13
1.8.2	Mécanismes utilisés pour atteindre les caractéristiques requises des WSNs (Wireless Sensor Network).....	14
1.8.3	Clustering	15
1.8.4	Classification des protocoles de routage des RCSF.....	16
1.9	Conclusion	19
2	Etat de l'art	20
2.1	Introduction.....	21
2.2	Travaux de recherche sur les réseaux de capteurs sans fil	21
2.2.1	MOBINET.....	21
2.2.2	Un capteur pour sportifs	21
2.2.3	Xtremlog.....	22
2.2.4	Des capteurs de pression ultra souples.....	22
2.2.5	Limites sur la Durée de vie de Réseau	22

2.2.6	Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs	23
2.2.7	Étude Comparative des Protocoles de communication sans fil	23
2.3	Estimations des distances dans les RCSF	24
2.3.1	RSSI (Received Signal Strength Indicator)	25
2.3.2	Time Difference of Arrival (TDoA)	25
2.3.3	Angle of Arrival (AoA)	26
2.3.4	Time Of Arrivals	26
2.4	Synthèse	27
2.5	Conclusion	29
3	Conception du Modèle DREEM	30
3.1	Introduction	31
3.2	Dynamic Routing Energy Efficient Model (DREEM)	32
3.2.1	Architecture du modèle DREEM	32
3.2.2	Réseau de capteurs sans fil	32
3.2.3	Stratégie de mise en veille	37
3.2.4	Choix dynamique de la topologie	39
3.2.5	Routage avec économie d'énergie	43
3.2.6	Fonctionnement du modèle	46
3.2.7	Schématisation du Modèle DREEM	50
3.3	Conclusion	52

Liste des figures

FIGURE 1.1: COMPOSANTS D'UN CAPTEUR [10]	5
FIGURE 1.2 COMPOSITION D'UN RESEAU DE CAPTEURS SANS FIL [4]	6
FIGURE 1.3 ARCHITECTURES ADOPTEES POUR LES RESEAUX DE CAPTEURS [10]	7
FIGURE 1.4 PILE PROTOCOLAIRE [8]	13
FIGURE 1.5 CLUSTRING [5]	16
FIGURE 3.1 ARCHITECTURE DU MODELE DREEM	32
FIGURE 3.2 EMBLACEMENT DES CAPTEURS SUR LE CORPS DE L'ATHLETE	33
FIGURE 3.3 EMBLACEMENT DES CAPTEURS ET TOPOLOGIE POUR L'ETAT A VOS MARQUES	34
FIGURE 3.4 EMBLACEMENT DES CAPTEURS ET TOPOLOGIE POUR L'ETAT PRETS.....	35
FIGURE 3.5 EMBLACEMENT DES CAPTEURS ET TOPOLOGIE POUR L'ETAT PARTEZ	36
FIGURE 3.6 EMBLACEMENT DES CAPTEURS ET TOPOLOGIE POUR L'ETAT REPOS	36
FIGURE 3.7 ARCHITECTURE D'ELQR [28]	44
FIGURE 3.8 LOCALISATION DE LA MAIN DROITE.....	50
FIGURE 3.9 ROUTAGE AVEC DREEM.....	51

Liste des tableaux

TABLEAU 2.1 COMPARAISON ENTRE LES PROTOCOLES DE COMMUNICATION [18].....	24
TABLEAU 3.1 ROLE DES CAPTEURS	38
TABLEAU 3.2 PROPOSITION D'UNE STRATEGIE DE MISE EN VEILLE	39
TABLEAU 3.3 LES TERMES PRIMITIFS DE L'ALGORITHME CTA.....	40
TABLEAU 3.4 LES TERMES PHYSIQUE DE L'ALGORITHME CTA	40
TABLEAU 3.5 LES TERMES DRIVES DE L'ALGORITHME CTA.....	40
TABLEAU 3.6 PSEUDO CODE CTA (1) [27]	41
TABLEAU 3.7 PSEUDO CODE CTA (2) [27].....	42
TABLEAU 3.8 MODIFICATIONS SUR ETAPE 1 DE CTA.....	42
TABLEAU 3.9 MODIFICATIONS SUR ETAPE 4 DE CTA.....	43
TABLEAU 3.10 MODIFICATIONS SUR ETAPE 2 D'ELQR	45
TABLEAU 3.11 ALGORITHME DU MODELE DREEM (1)	47
TABLEAU 3.12 ALGORITHME DU MODELE DREEM (2)	48
TABLEAU 3.13 ALGORITHME DU MODELE DREEM (3)	49

Introduction générale

Actuellement, l'avancement technologique réalisé dans les domaines des technologies de communication sans fil, et la micro-électronique permettent de créer de petits systèmes communicants équipés de capteurs à un coût raisonnable. De ce fait, un nouveau domaine de recherche est apparu offrant des solutions économiquement intéressantes, qui est le domaine des réseaux de capteurs sans fil. Leurs rôles est de collecter des données d'un environnement et de les diffuser au sein du réseau. Ce type de réseaux de capteurs pourrait avoir de très diverses applications.

Les nœuds capteurs composants le réseau disposent généralement de faibles capacités de calcul, de mémoire et d'énergie, l'accès au médium radio étant l'élément le plus coûteux. Ainsi réduire cette consommation(en réduisant le nombre de paquets circulant dans le réseau) et prolonger la durée de vie du réseau représentent un énorme défi. En effet, un réseau de capteurs ne peut survivre s'il perd trop de nœuds ce qui engendre des pertes de communication dues à une trop grande distance entre les capteurs.

Les réseaux de capteurs peuvent être programmés à un grand nombre de fins, telles que le contrôle d'intrusions, le calcul de températures, le calcul de changements climatiques, parmi ces objectifs nous trouvons la surveillance médicale des patients ou même la surveillance des athlètes. En implantant des capteurs sur l'athlète, ces derniers doivent être placés de manière intelligente dans le but de ne pas le gêner lors de son activité physique. Ces capteurs pourront communiquer entre eux pour ensuite reléguer les informations collectées à la station de base.

L'un des problèmes majeurs de ces réseaux de capteurs est de trouver le protocole de routage le mieux adapté afin de consommer le moins d'énergie possible. Effectivement, la plupart des recherches actuelles se focalisent soit sur des protocoles d'accès au médium, soit sur des protocoles de routage sans tenir compte de la possibilité que certains des capteurs composant le réseau soient mobiles (des capteurs positionnés sur les bras et/ou pieds) ce qui implique un changement momentané de la topologie.

Dans ce contexte s'inscrit notre travail, qui consiste à proposer une solution sous forme d'un modèle que nous avons baptisé « **DREEM : Dynamic Routing Energy Efficient Model** ». Ce modèle se base sur l'intelligence artificielle permettant d'une part de répondre au souci de mobilité dans un réseau à fortes contraintes, et d'autre part d'économiser l'énergie des capteurs et ainsi celle du réseau, de telle sorte à ce que la

Introduction Générale

qualité du monitoring ne soit pas affectée et que le routage des informations soit optimale.

La suite de notre document est composée de trois chapitres :

- ✓ le premier présente des généralités sur les réseaux de capteurs.
- ✓ le second dresse un état de l'art sur les travaux portant sur les défis mentionnés.
- ✓ le troisième chapitre décrit le modèle « **DREEM** » que nous proposons comme solution aux problèmes de routage dynamique et d'économie d'énergie.

1 Réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

Grâce aux avancées technologiques, il est aujourd'hui possible 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. Possédant 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 sans fils sont constitués de nœuds (capteurs) qui possèdent des capacités particulières comme l'auto-organisation, rapidité de déploiement, tolérance aux erreurs et leur faible cout.

Nous présentons dans ce chapitre le fonctionnement des réseaux de capteurs sans fils en mettant l'accent sur les démarches et les principes permettant d'économiser l'énergie ainsi que les protocoles facilitant la mobilité.

1.2 Capteur

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, etc.), et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base. Il est composé de quatre unités de base: l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de communication et l'unité de contrôle d'énergie [1], la figure 1.1 montre les différents composants d'un capteur.

1.2.1 Unité de captage

Elle englobe généralement deux sous-unités, le capteur lui même en plus d'un convertisseur analogique-numérique (CAN) qui transforme les signaux analogiques produits par les capteurs.

1.2.2 Unité de traitement

Elle comprend un processeur généralement associé à une petite unité de stockage. Elle fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les micro-capteurs (TinyOS par exemple) [2]. Elle exécute les protocoles de communication qui permettent de faire "collaborer" le nœud avec les autres nœuds du réseau. Elle peut aussi analyser les données captées pour alléger la tâche du nœud puits.

1.2.3 Unité de communication

Elle effectue toutes les émissions et réceptions des données sur un médium « sans-fil ». [3]

1.2.4 Unité de contrôle d'énergie

Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique (généralement une batterie). Etant donné sa petite taille, cette ressource énergétique est limitée et généralement non-replaçable. L'énergie est la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteurs, car elle influe directement sur la durée de vie des micro-capteurs et donc du réseau entier.

L'unité de puissance constitue donc un système essentiel. Elle doit répartir l'énergie disponible aux autres modules, de manière optimale (par exemple en réduisant les dépenses inutiles et mettant en veille les composants inactifs). Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement via des cellules photovoltaïques. Afin d'étendre la durée de vie totale du réseau, il est possible d'utiliser des systèmes de rechargement d'énergie basés sur l'extraction de cette énergie à partir de l'environnement observé. Les cellules solaires sont un exemple typique de ces systèmes.

On trouve aussi des capteurs qui possèdent d'autres composants additionnels :

- **Système de localisation**

Il fournit des informations sur la localisation requise par les techniques de routage telle que GPS (Global Position System).

- **Mobilisateur**

Il est appelé si le nœud capteur doit être déplacé pour accomplir la requête à traiter.

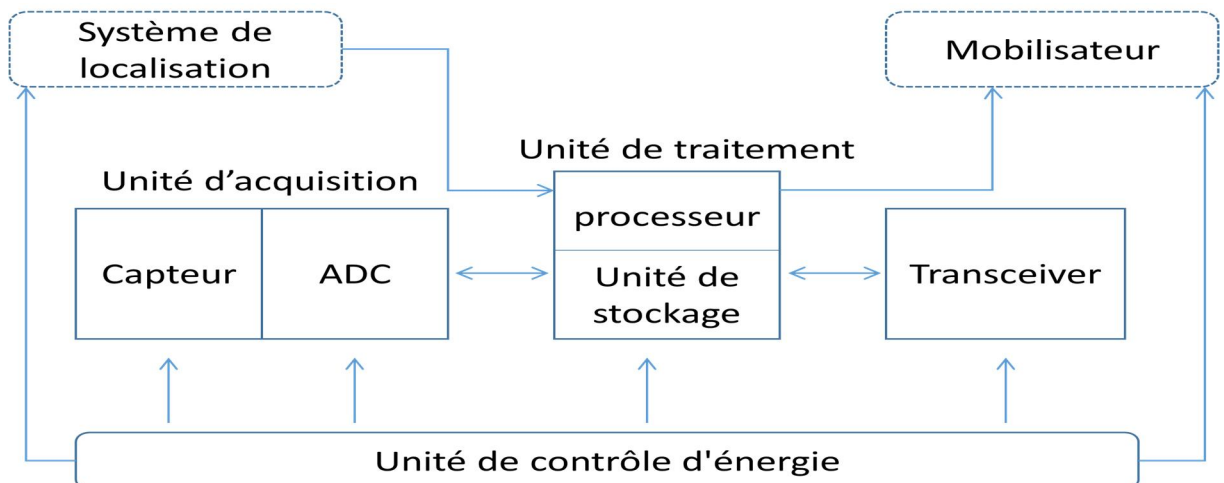


Figure 1.1: Composants d'un capteur [10]

1.3 Réseaux de capteurs

1.3.1 Définition

Un réseau de capteurs sans fil est un réseau ad hoc avec un grand nombre de nœuds qui sont des micro-capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils peuvent être aléatoirement dispersés dans une zone géographique, appelée « champ de captage » correspondant au terrain d'intérêt pour le phénomène capté. [3]

Dans les télécommunications, les médiums de transmission peuvent être classés selon deux types de supports différents : filaire et sans fil. Les supports filaires sont les câbles électriques, des fibres optiques ; tandis que les supports sans fil sont les ondes radio, les ondes lumineuses, magnétiques d'où les deux types de réseaux de capteurs filaires et sans fils.

Tel réseau ne se limite pas à un domaine particulier mais il peut s'adresser à une diversité de secteurs comme la biologie, la chimie, l'environnement, ainsi que la surveillance sismique et même la télésurveillance personnelle... [4]

1.3.2 Composition d'un réseau de capteurs

Un réseau de capteurs comme montré dans la figure 1.2 est constitué de plusieurs nœuds (capteurs) répartis dans une zone. Ces nœuds sont reliés à une ou plusieurs passerelles appelées «Sink», « puits » ou encore « station de base » dont le rôle est d'assurer l'interconnexion avec les autres réseaux (internet, satellite,...) et de récupérer les données.

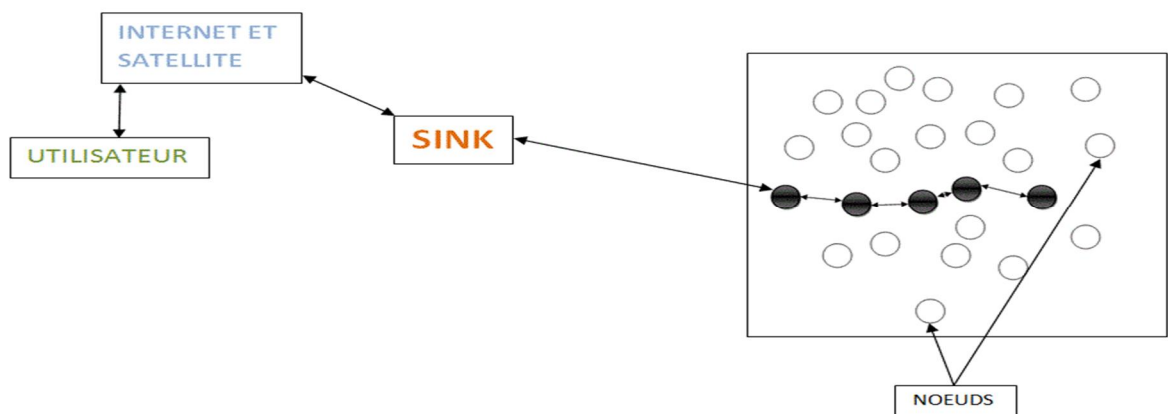


Figure 1.2 Composition D'un réseau de capteurs sans fil [4]

1.3.3 Types d'architectures des réseaux de capteurs

Dans les réseaux de capteurs les architectures choisies suivent les applications et les techniques utilisées pour faire acheminer l'information des capteurs à la station de base. Une taxonomie des applications peut être dérivée et l'adaptabilité d'algorithmes à ce genre de scénario peut être évaluée [10].

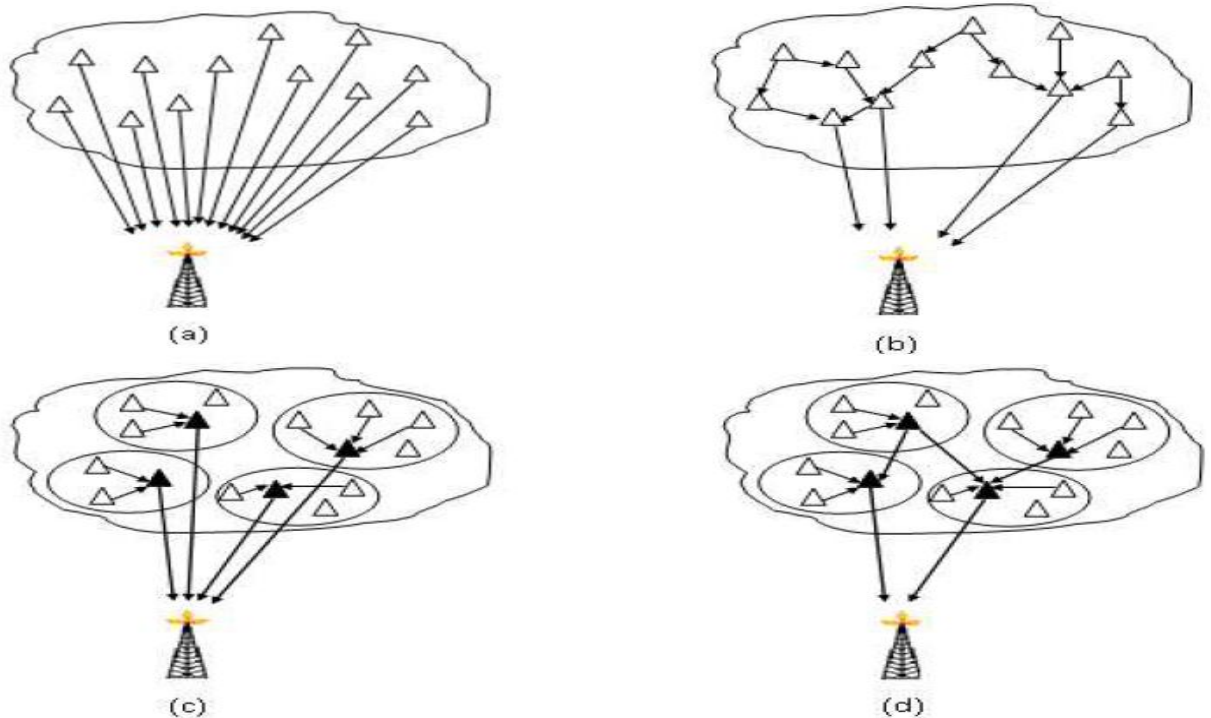


Figure 1.3 Architectures adoptées pour les réseaux de capteurs [10]

L'acheminement de l'information des capteurs vers la station de base peut suivre quatre formes. D'une part dans les architectures à plat, les capteurs peuvent communiquer directement avec la station de base en utilisant une forte puissance, ceci engendre une forte consommation d'énergie (figure 1.3 (a)). Ou via un mode multi sauts avec des puissances très faibles (figure 1.3 (b)).

D'autre part dans les architectures hiérarchisées, le nœud représentant le cluster, appelé cluster-Head, transmet directement les données à la station de base (figure 1.3 (c)), ou via un mode multi-saut entre les cluster-Head (figure 1.3 (d)).

1.3.4 Caractéristiques des réseaux de capteurs

Les principales caractéristiques des réseaux de capteurs sont :

a) Densité « importante » des nœuds

Les réseaux de capteurs se composent généralement d'un nombre très important de nœuds pour garantir une couverture totale de la zone surveillée. Ceci engendre un

Chapitre I : Réseaux de capteurs sans fil (RCFS)

niveau de surveillance élevé et assure une transmission plus fiable des données sur l'état du champ de capteur.

b) Topologie dynamique

La topologie des réseaux de capteurs instable est le résultat des trois facteurs essentiels suivants :

- **Mobilité des nœuds** : les nœuds capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent librement et arbitrairement, introduisant ainsi une topologie instable du réseau.
- **Défaillance des nœuds** : du fait de l'autonomie énergétique limitée des nœuds, la topologie du réseau n'est pas fixée (les nœuds « morts » sont, d'un point de vue logique, simplement supprimés).
- **Ajout de nouveaux nœuds** : de nouveaux nœuds peuvent facilement être rajoutés. Il suffit de placer un nouveau capteur qui soit dans la portée de communication d'au moins un autre nœud capteur du réseau déjà existant.

c) Auto organisation

L'auto organisation s'avère très nécessaire pour ce type de réseau afin de garantir sa maintenance. Comme la topologie du réseau peut être instable, ce dernier devra être capable de s'auto organiser pour continuer ses applications.

d) Tolérance des erreurs

Le réseau doit être capable de maintenir ses fonctionnalités sans interruptions en cas de défaillance d'un ou plusieurs de ses capteurs. Cette défaillance peut être causée par une perte d'énergie, ou par dommage physique ou interférence de l'environnement.

e) Scalabilité

Les réseaux de capteurs peuvent contenir des centaines voire des milliers de nœuds capteurs. Un nombre aussi important engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que le nœud « Sink » soit équipé d'une mémoire importante pour stocker les informations reçues.

• **La communication dans les réseaux de capteurs**

La communication dans les réseaux de capteurs est très différente que celle que nous retrouvons dans les réseaux IP. En effet Il n'y a pas généralement de communication capteur-à-capteur (pair-à-pair). A la place, les capteurs envoient les mesures directement ou en mode multi-sauts à une ou plusieurs stations de base. [5]

- **Domaines d'application**

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. Parmi ces applications nous trouvons :

Les applications militaires.

Les applications à la sécurité.

Les applications environnementales.

Les applications médicales :

Dans le domaine médico-sportif, les capteurs permettent d'étudier la physiologie sportive et le diagnostic de quelques maladies à partir de mesures physiologiques telles que : la tension artérielle, les battements du cœur, ... ceci à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière. Grâce à l'introduction de ces capteurs, il sera alors possible de suivre l'évolution physique d'un sportif et aussi de détecter d'éventuelles situations anormales.

1.4 WBAN (Wireless Body Area Network)

Un nombre petit de capteurs, stratégiquement placés ou implantés sur le corps d'un patient. Les capteurs peuvent créer un réseau de capteurs sans fil placé sur le corps humain nommé WBAN (Wireless Body Area Network). Ces réseaux sont utilisés pour surveiller les signes vitaux, fournir un feedback temps réel afin de permettre aux patients une procédure de diagnostic via un suivi continu des conditions chroniques ou même récupérer le progrès d'une maladie ou d'une opération chirurgicale.

1.5 Économie d'énergie des capteurs

La durée de vie est un élément indispensable pour tout réseau de capteurs sans fil. L'objectif d'une application d'un réseau de capteurs est d'avoir des nœuds placés sur le terrain pour une longue durée (semaines, mois,...). Le facteur essentiel qui limite la durée de vie d'un capteur par conséquence du réseau de capteurs est l'énergie. Comme la seule source d'énergie d'un capteur est une batterie à durée de vie limitée, l'optimisation énergétique doit être prise en considération quelque soit le problème traité. En effet, un réseau de capteurs ne peut pas survivre si la perte de nœuds est très importante car ceci engendre des pertes de communications dues à une très grande distance entre les nœuds restants. Donc il est très important que les batteries durent le

plus longtemps possible, étant donné que dans la plupart des applications il est impossible de retourner les changer.

Ainsi, le modèle de consommation d'énergie [6] dans un nœud capteur est défini comme suit :

- **Énergie de détection d'évènements** : c'est l'énergie consommée par un nœud capteur lors de l'activation de son unité d'acquisition et de collecte de données. Le coût de cette énergie dépend du type spécifique du capteur (image, son, température, etc.) et des tâches (échantillonnage et conversion des signaux physiques en signaux électriques, conditionnement des signaux et conversion analogique-numérique, etc.) qui lui sont assignées.
- **Énergie de traitement de données** : c'est l'énergie consommée par un nœud lors de l'activation de son unité de traitement de données (opérations, lecture/écriture en mémoire).
- **Énergie du transmetteur radio** : c'est l'énergie consommée par un nœud lors de l'activation de son unité de transmission. Cette énergie est beaucoup plus élevée que celle dissipée par l'unité de traitement. Il a été démontré dans (Pottie et Kaiser, 2000) que la transmission d'un bit d'information peut consommer autant que l'exécution de quelques milliers d'instructions.

1.5.1 Etat de capteur

Un nœud capteur peut se trouver dans l'un des quatre états suivants [7]: actif en mode d'écoute, actif en mode de traitement de données, actif en mode de transmission ou non actif en mode veille. Un capteur est en veille lorsque sa radio est éteinte, dans ce cas sa consommation d'énergie est presque nulle. En effet, la principale source de consommation d'énergie d'un capteur est l'utilisation du réseau sans fil via son module de radiocommunications. Cette consommation d'énergie peut être réduite par la diminution de la transmission des données, d'où la nécessité du traitement local.

1.5.2 Optimisation de la consommation d'énergie

Plusieurs solutions, à la fois matérielles et logicielles, ont été proposées afin d'optimiser la consommation d'énergie pour maximiser la durée de vie du réseau de capteurs. Par exemple les fondeurs des systèmes électroniques, cherchent à produire des composants dédiés aux réseaux de capteurs offrant le meilleur rapport puissance/watt consommé. Du côté des batteries, nous constatons plusieurs tentatives d'évolution. Au niveau logiciel, le but est de concevoir des algorithmes non complexes distribués pour

minimiser la consommation d'énergie, et des protocoles (routage par exemple) à moindre communication. Une autre solution proposée pour économiser l'énergie des capteurs consiste à les mettre en état de veille. Dans le cas d'un déploiement redondant, les protocoles d'ordonnancement d'activité permettent aux capteurs redondants de passer du mode actif, dans lequel ils participent à la vie du réseau, au mode en veille. Les décisions de changement d'état peuvent être prises par une entité centrale avec une connaissance globale du réseau, ou par les nœuds eux-mêmes qui se basent alors uniquement sur des informations de voisinage.

1.6 Mobilité

Dans cette section, nous illustrons brièvement les différences entre les réseaux de capteurs statiques et mobiles.

Un réseau de capteurs statique ne considère aucune mobilité des nœuds, ni de l'observateur, ni de la zone d'intérêt. Dans ce cas, les capteurs sont regroupés pour capter par exemple la température dans une région déterminée. Cela exige une mise en place initiale des infrastructures de communication afin de créer le chemin entre l'observateur et les capteurs.

Dans un réseau de capteurs mobile les nœuds, la zone d'intérêt, et l'observateur sont mobiles. Si les nœuds se déplacent, cela implique un changement de la zone d'intérêt qui devient alors « mobile ». Comme la zone se change, l'observateur sera obligé de reconstruire le chemin d'accès et de briser l'ancien. Dans ce cas l'observateur a intérêt à construire plusieurs chemins entre lui et les nœuds et à choisir le plus bénéficiaire. Comment un nœud peut-il être mobile ? Il peut être attaché à un robot, à un être humain, véhicule, etc.

L'objectif des réseaux de capteurs mobiles est de recueillir plus d'informations sur un environnement en utilisant moins de nœuds capteurs, et de permettre au réseau d'organiser lui-même ses nœuds. En outre, il devient capable de déplacer ses capteurs dynamiquement selon les changements environnementaux, ce qui le rend adaptable à l'évolution de son environnement.

La mobilité est une question clé pour les réseaux de capteurs. Lorsque la mobilité est trop fréquente, elle ne peut être considérée comme un problème secondaire. Ainsi, la détection des voisins et la reconfiguration du réseau exige habituellement un nombre important de messages de contrôle de la topologie, donc une dépense importante d'énergie. En outre, un autre type de mobilité pourrait être pris en compte, qui est la

mobilité de la station de base ou les deux types de dispositifs peuvent être mobiles simultanément.

1.7 Architecture protocolaire

Une pile protocolaire est utilisée par tous les nœuds capteurs, elle combine routage et gestion d'énergie et intègre les données avec les protocoles réseaux. Elle favorise les efforts de coopération entre les nœuds capteurs, et communique de façon efficace (en terme d'énergie) à travers le support sans fil.

Cette pile comprend plusieurs couches :

- **Couche application** : selon les tâches de détection, différents types de logiciels d'application peuvent être construits et utilisés dans cette couche.
- **Couche transport** : qui contribue au maintien du flux de données si l'application du réseau de capteurs l'exige.
- **Couche réseau** : qui s'occupe de l'acheminement des données fournies par la couche transport.
- **Couche liaison de données** : comme l'environnement est sujet au bruit et que les nœuds-capteurs peuvent être mobiles, le protocole MAC doit tenir compte de la consommation d'énergie et doit être en mesure de réduire les collisions entre les nœuds voisins lors d'une diffusion par exemple.
- **Couche physique** : qui répond aux besoins d'une modulation simple mais robuste, et de techniques de transmission et de réception.

En outre cette pile comporte trois plans :

- **Plan de gestion d'énergie** : gère la consommation de l'énergie.
- **Plan de gestion de mobilité** : gère les mouvements.
- **Plan de gestion des tâches** : pour la répartition des tâches entre les nœuds capteurs.

Ces plans aident les nœuds-capteurs à coordonner les tâches de détection et à réduire l'ensemble de la consommation d'énergie. La figure 1.4 montre les différentes couches et plans de cette pile.

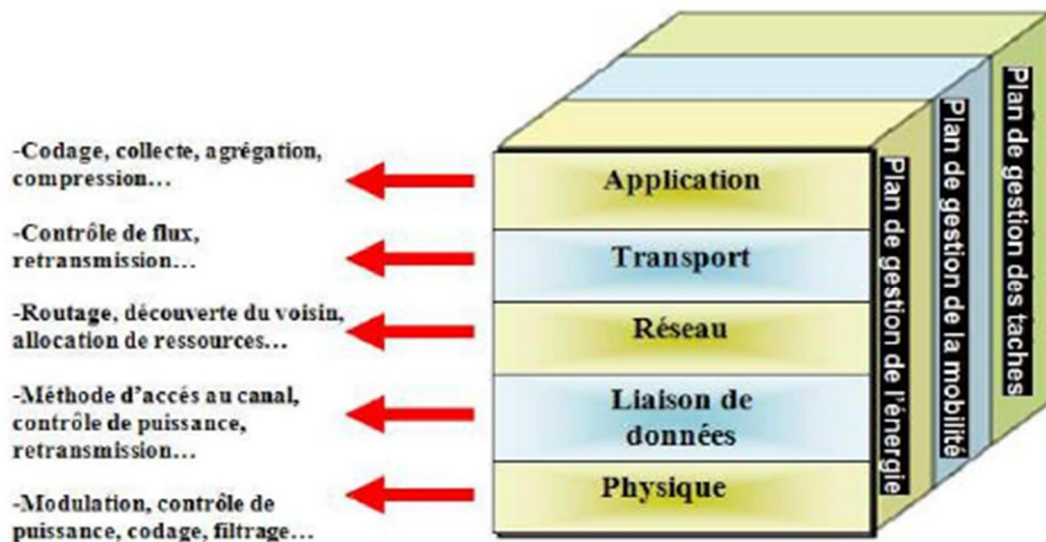


Figure 1.4 pile protocolaire [8]

1.8 Protocoles

Il existe plusieurs algorithmes et protocoles de diffusion dans les réseaux de capteurs, ces derniers représentent la partie la plus consommatrice d'énergie puisque le coût de communication entre les capteurs et la station de base ou bien l'envoi d'une requête à tous les capteurs par la station de base est élevé, en plus ils ne sont pas toujours efficaces.

Dans cette section, nous présentons et nous analysons les différentes approches liées à ce problème ainsi que les protocoles sous-jacents à ces approches pour tirer profit de leurs avantages et d'éviter leurs limitations.

1.8.1 Performance d'un protocole de diffusion

Afin d'assurer à la fois la mobilité et l'économie d'énergie deux objectifs primordiaux des réseaux de capteurs, il faut que la technique ou bien le protocole de diffusion soit efficace, et pour assurer cette efficacité nous devons suivre certains critères [5] parmi ces derniers nous trouvons :

- **Extensibilité** : il supporte le passage à l'échelle sans présenter de goulots d'étranglement.
- **Accessibilité** : cette propriété reflète le taux de nœuds recevant le message de diffusion par rapport au nombre total de nœuds accessibles à partir du nœud source. Un protocole est dit parfait si tous les nœuds sont accessibles à partir de la source (RE=100%). Si le taux d'accessibilité d'un protocole est inférieur à 90%, le protocole est considéré comme invalide. Notons qu'il existe des

protocoles qui fonctionnent en meilleur effort (best effort), et qui ont un taux d'accessibilité de l'ordre de 90% et plus.

- **Rediffusion économisée (Saved ReBroadcast ou SRB) :** SRB représente le pourcentage de nœuds recevant le message de diffusion et ne le réémettant pas. Soit N_r le nombre de nœuds recevant le message de diffusion et N_t le nombre de nœuds qui le transmettent, alors le taux de la rediffusion économisée est : $SRB = (N_r - N_t)/N_r$.
- **Consommation énergétique :** l'énergie est considérée comme une ressource précieuse dans les réseaux de capteurs, sa conservation est indispensable pour garantir une longue durée de vie aux réseaux puisqu'il est généralement impossible de recharger les batteries des capteurs. Cette consommation est optimisée quand le nombre de messages retransmis et le nombre de réceptions redondantes sont réduits.
- **Consommation de la bande passante :** la minimisation du nombre de messages redondants optimise la consommation de la bande passante.
- **Latence :** délai entre l'émission par la source et la dernière réception du message de diffusion. C'est un critère déterminant dans les réseaux de capteurs car il permet à l'utilisateur d'intervenir rapidement à l'occurrence d'événement.

La chose la plus importante dans un réseau de capteurs c'est qu'il faut garantir la fidélité du routage, c'est-à-dire il devrait exister au moins un chemin entre tous les capteurs du réseau et la station de base. En plus il faudrait assurer la fidélité de surveillance c'est-à-dire il existe au moins un capteur qui détecte un événement sur la zone d'intérêt.

1.8.2 Mécanismes utilisés pour atteindre les caractéristiques requises des WSNs (Wireless Sensor Network)

Afin de réaliser les caractéristiques précédentes, des nouveaux mécanismes de communications, d'architectures et de protocoles doivent être développés. Les mécanismes typiques considérés dans les réseaux de capteurs sans fil sont : [8]

a) Communication multi-sauts

Pour les communications à longue distance, l'utilisation des nœuds intermédiaires pour transmettre les paquets, peut induire une réduction de l'énergie exigée.

b) Utilisation efficace d'énergie

C'est là un mécanisme clé pour offrir et soutenir sur une durée longue l'opérationnalité du réseau.

c) Auto-configuration

Ce mécanisme est employé dans différents aspects des WSNs. Le nœud capteur devrait être capable d'adapter ses paramètres de service pour tenir compte des défaillances des autres nœuds, des obstacles et de l'ajout de nœuds au réseau.

d) Collaboration et traitement dans le réseau

Selon l'application, il est parfois exigé qu'un groupe de nœuds de capteurs interagissent afin de détecter un événement ou faire un traitement plus complet d'informations. La considération des approches des offres de traitement dans le réseau comme l'agrégation de données, qui réduisent la quantité de données transmises et par conséquent améliore l'efficacité énergétique du réseau.

e) Data-centrique

Dans des applications communes, les nœuds de capteurs sont déployés d'une manière redondante, pour protéger le réseau contre des défaillances de nœuds. Dans une approche « data-centric », l'identité d'un nœud particulier fournissant des données devient non pertinente. Le plus important, ce sont les réponses générales que le WSN offre à l'utilisateur.

1.8.3 Clustering

L'approche de Clustering consiste à partitionner le réseau en un certain nombre de clusters, plus homogènes selon une métrique spécifique ou une combinaison de métriques, et former une topologie virtuelle. Les clusters sont généralement identifiés par un nœud particulier appelé cluster-Head. Ce dernier permet de coordonner entre les membres de son cluster, d'agréger leurs données collectées et de les transmettre à la station de base. Il est sélectionné pour jouer ce rôle selon une métrique bien particulière ou une combinaison de métriques. (Figure 1.5)

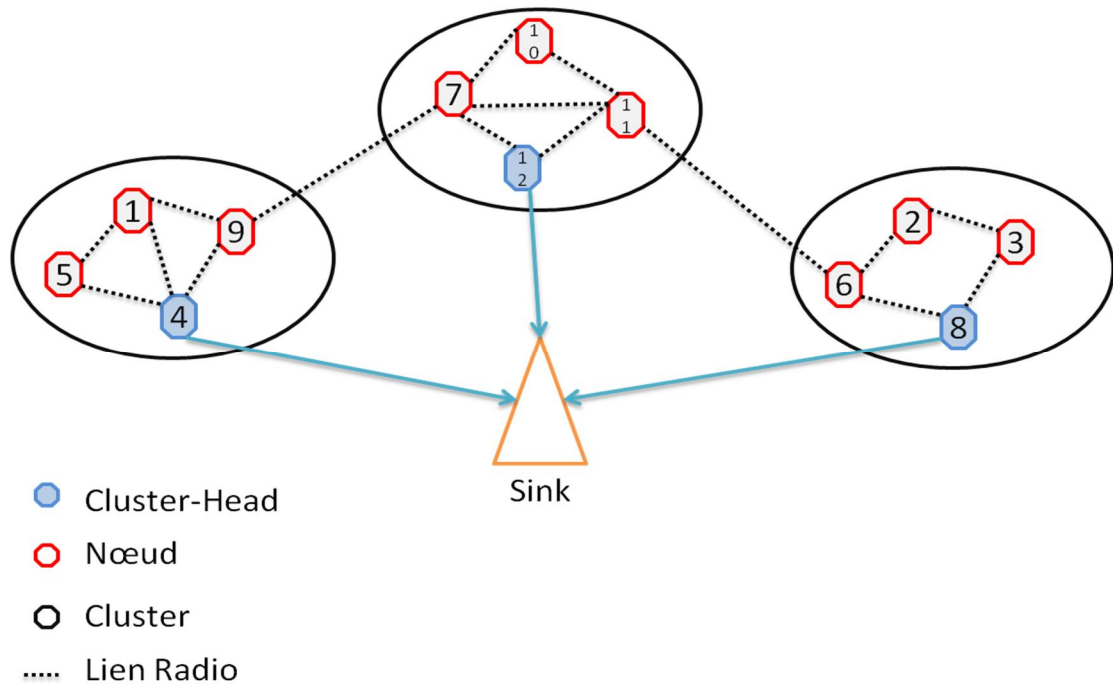


Figure 1.5 Clustering [5]

1.8.4 Classification des protocoles de routage des RCSF

Les protocoles de routage pour les RCSF ont été largement étudiés, et différentes études ont été publiées. Les méthodes employées peuvent être classifiées suivant plusieurs critères comme [8]:

- Hiérarchique ou plat : dans plat tous les nœuds sont du même niveau, type et capacité, hiérarchique certains sont plus puissants que d'autres, certains peuvent avoir des tâches que les autres n'ont pas. On parle de cluster dans hiérarchique et chef de cluster (agrégation des données provenant d'un même cluster).
- Data centric : requête de collecte d'un type de données.
- Location aware : notion de position et de région, dépendance GPS.
- Basé sur la QoS : taux de perte, délai, latence, consommation.

a) *Protocoles Data-centric*

Ces protocoles supposent qu'il est difficile d'avoir des identifiants comme les adresses MAC ou IP pour pouvoir communiquer entre les nœuds capteurs. Ne demandent pas un mécanisme d'adressage. Les informations sont propagées de proche en proche.

Envient une annonce des données avant d'envoyer les données elles-mêmes, les voisins intéressés demandent les données annoncées, les données sont ensuite envoyées.

Chapitre I : Réseaux de capteurs sans fil (RCFS)

- **SPIN** (Sensor Protocol for Information via Negotiation). Annonce les données par des paquets ADV(ADVERTISE), les nœuds intéressés répondent par une REQ (REQUEST) et ensuite les données sont envoyées. Le Point fort est que la connaissance se limite au voisinage à un saut. Ne garantit pas la réception des données : si le nœud destinataire ne se trouve pas à portée d'un nœud qui annonce l'envoi, les données ne seront jamais transmises.

- **Direct Diffusion** C'est l'inverse de SPIN : les nœuds intéressés par une donnée diffusent une requête. Les nœuds voisins prennent en compte cette requête, répondent en fonction et rediffusent à leur tour la requête.

b) Protocoles hiérarchiques

Construction de clusters (groupe de nœuds) avec un chef par cluster qui se chargera de transmettre les messages générés par son cluster aux autres chefs de clusters pour atteindre la destination finale. Le choix du chef de cluster (cluster Head) est fait soit à tour de rôle, soit selon le nombre de voisins en considérant comme cluster Head le nœud avec le plus de voisins, soit selon le niveau de l'énergie résiduelle. Comme exemple de ces protocoles on trouve LEACH et TEEN

c) Protocoles basés sur la position

Dans les réseaux de capteurs, on considère que la position du nœud est plus importante que son identité (adresse). Ce type de protocoles considère que les nœuds connaissent leur position respective et sont capables de connaître la position des autres nœuds. Ainsi, cette information est utilisée pour diriger les messages vers la région dans laquelle se trouve la destination.

- **GEAR** (Geographic and Energy Aware Routing). Ce protocole de routage découpe le réseau en régions. Chaque nœud connaît le cout pour atteindre chaque région. L'acheminement des paquets suit les étapes suivantes :
 - Acheminer le paquet jusqu'à la région, en envoyant le paquet au nœud le plus proche de la région parmi ses voisins et ayant le niveau d'énergie résiduelle le plus élevé (fonction de distance et d'énergie),
 - Acheminer le paquet dans la région de destination par une sorte de diffusion si le nombre de nœuds n'est pas élevé, sinon la région est découpée en sous-régions et le paquet est transmis individuellement à chaque sous-région. Chaque paquet contient la région destination. Chaque nœud connaît sa position, son énergie résiduelle, la position et

Chapitre I : Réseaux de capteurs sans fil (RCFS)

l'énergie résiduelle de ses voisins (à la demande). Un lien existe entre deux nœuds quand ils sont à portée et leur niveau d'énergie leur permet d'effectuer l'envoi.

d) Protocoles basés sur la QoS

Dans ce type de protocoles, les performances du réseau sont prises en compte pour garantir un délai de bout-en-bout raisonnable qui répond aux besoins de l'application. C'est surtout le cas des applications industrielles et militaires.

- **SAR** (Sequential Assignment Routing). Basé sur la construction d'arbre à partir des voisins du puits. Les liens de chaque arbre sont choisis en fonction du délai observé et de l'énergie résiduelle des nœuds. Les données sont associées à un niveau de priorité. La création des arbres est assez lourde.
- **SPEED** Une métrique supplémentaire par rapport à GEAR : le délai. Se base sur une table de positions. Il estime le délai sur chaque saut en calculant le délai d'aller-retour (en retranchant le temps de traitement coté récepteur). Le prochain saut est choisi parmi les voisins qui sont plus proches de la destination que le nœud. [21]

1.9 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous nous sommes focalisés sur les réseaux de capteurs sans fil de manière générale.

Nous avons d'abord défini ce qu'est un capteur; nous avons ensuite établi la composition des réseaux de capteurs, les architectures adoptées par ces derniers, leurs principales caractéristiques, et les principaux domaines d'application de ce type de réseaux. Nous sommes ensuite passés à la définition des BAN (Body Area Network) qui représentent notre cas d'étude.

Ce premier chapitre traite en plus l'économie d'énergie des capteurs qui est l'un des objectifs majeurs, la mobilité, et les différentes topologies des réseaux de capteurs. Nous avons également vu quels étaient les principaux mécanismes qui permettaient d'atteindre les caractéristiques requises pour les WSN (Wireless Sensor Network).

Nous avons conclu ce chapitre par la technique de Clustering.

Il est indispensable de présenter l'état de l'art dans le second chapitre basé sur plusieurs travaux de recherches afin de pouvoir proposer notre propre modèle.

2 Etat de l'art

2.1 Introduction

Les objectifs majeurs des travaux de recherche sur les réseaux de capteurs sont : minimiser la consommation d'énergie, tenir compte de la mobilité de certains capteurs composant le réseau, et optimiser le routage des informations.

Dans le domaine médico-sportif, les réseaux de capteurs sans fils sont utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau, dans le but de faciliter les études biomécaniques, la physiologie sportive et le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que : la tension artérielle, les battements du cœur, ... à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière.

De nombreuses études de recherche ont été menées dans ce domaine ; nous citons dans le chapitre actuel les principales.

2.2 Travaux de recherche sur les réseaux de capteurs sans fil

2.2.1 MOBINET

Damien Roth et al. [9] ont abordé la notion de mobilité dans les réseaux de capteurs sans fils, mais pas seulement. Bien que cette dernière soit un thème assez récent, ils peuvent déjà entrevoir la prochaine étape : un capteur mobile pourra transiter à travers différents réseaux. Cependant, il est très probable que le protocole de routage supporté dans un réseau visité ne soit pas compatible avec celui supporté par le capteur mobile. Sans support spécifique, il suffirait au capteur mobile de diffuser ses messages pour qu'ils soient acheminés jusqu'au puits du réseau visité. Néanmoins, cela peut entraîner des duplications de messages et donc une augmentation du trafic. Ils proposent Mobinet dont l'objectif est de permettre à des capteurs mobiles de sélectionner leurs prochains sauts au sein du réseau visité sans devoir participer au routage.

2.2.2 Un capteur pour sportifs

Des capteurs mis au point dans le laboratoire de traitement de l'information visuel du professeur Guang ZhongYang [10] ont été placés derrière l'oreille des athlètes et ont permis d'enregistrer une multitude de données physiologiques telles que la posture, l'accélération, la réaction du corps à des chocs. L'avantage qu'offrent ces capteurs est leurs positions derrière l'oreille qui n'est pas gênante et qui ne trouble pas l'aérodynamique du corps. Ils transmettent leurs données en temps réel à un ordinateur portable, ce qui permet à l'entraîneur de modifier sa tactique et ses conseils en fonctions des informations qui s'affichent.

2.2.3 Xtremlog

Un projet de l'institut national de recherche en informatique et en automatique mené par l'équipe D-NET de l'INRIA Grenoble Rhône-Alpes [11] a été mené dans le but de mettre au point des méthodes de traitement et d'analyse automatique de grandes quantités de données. Les données acquises durant les sept jours de course constitueront une source d'informations inédite. Le choix du type et du positionnement des capteurs doit permettre de recueillir des éléments pertinents en termes d'étude du mouvement humain, des performances sportives et des adaptations à l'environnement, aux conditions climatiques et à la fatigue.

2.2.4 Des capteurs de pression ultra souples

Des chercheurs de l'Institut Fraunhofer ISC ont développé des capteurs de pression souples. Ils sont réalisés avec un matériau stretch capable de se déformer de 100% [12]. Ces matériaux intelligents pourraient être intégrés dans les vêtements pour analyser des séquences de mouvements, ce qui aiderait les athlètes à optimiser leur entraînement. Tout en restant à peine perceptibles à tous.

D'autres travaux ont été réalisés dans le but d'économiser au maximum l'énergie consommée par ces capteurs. Beaucoup de ces techniques sont résumées dans « Conception et Évaluation des Performances d'un Protocole de routage pour les Réseaux Ad hoc (TPA) » [13].

2.2.5 Limites sur la Durée de vie de Réseau

Dans le projet « Limites sur la Durée de vie de Réseau », [14] les auteurs ont cherché les bornes supérieures de l'extension de la durée de vie d'un réseau. Ils ont illustré le compromis entre la densité des nœuds et la durée de vie du réseau pour une technique de conservation d'énergie dans les réseaux ad hoc sans fils.

Bharadwaj et al. [15,16] ont étudié également la borne supérieure de la durée de vie des réseaux de capteurs de type collecte de données (data-gathering sensor networks). Ils supposent une source de données distribuée de façon aléatoire dans une région avec une certaine densité de probabilité, et le puits (Station de Base) est situé en un point fixe. Ils calculent la puissance minimale requise pour transmettre un bit de la source au puits, puis ils calculent la borne supérieure de la durée de vie du réseau sur la base de cette consommation minimale d'énergie.

Coleri et al. [17] ont étudié la durée de vie des réseaux de capteurs. Les réseaux qu'ils considèrent dans leur étude sont organisés en arbres multi-sauts. Ils ont utilisé les

automates à états finis pour analyser la durée de vie des nœuds. Ils ont séparé les nœuds en quatre groupes en fonction de leur distance au puits de données. Toutefois, leur analyse est principalement axée sur la durée de vie des délégués nœuds au lieu de celle du réseau.

2.2.6 Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs

L'une des solutions communément proposées pour la diffusion et la couverture de zone dans les réseaux de capteurs sans fil est d'utiliser une architecture hiérarchisée appelée encore Clustering [5]. Cette architecture permet de regrouper les capteurs proches géographiquement en clusters et d'utiliser des schémas de routage différents au sein des clusters et entre les clusters. Ainsi un tel capteur au sein d'un cluster stocke la totalité des informations des capteurs qui font partie de son cluster et seulement une partie des informations qui concernent les autres clusters. Dans cette architecture, seulement les cluster-Head et les nœuds passerelles sont responsables du cheminement de l'information captée par un capteur à la station de base.

2.2.7 Étude Comparative des Protocoles de communication sans fil

Jin-Shyan Lee et al. Sont arrivés à faire une étude comparative entre les protocoles de communication sans fil à courte distance, l'étude a donné un tableau comparatif entre quatre en montrant les caractéristiques de ces derniers. La comparaison était faite en prenant en considération plusieurs critères importants parmi eux on trouve besoin de mémoire, durée de vie, nombre de nœuds et la portée, les résultats de cette étude se résume dans le tableau 1.1 ci-dessous où on va comparer entre trois protocoles : Bluetooth, Wifi et ZigBee [18] :

Protocoles\ Critères	Bluetooth	Zigbee	Wifi
IEEE	802.15.1	208.15.4	802.11a/b/g
Besoin mémoire	+250kb	4-32kb	+1mb
Durée de vie	Jours	Années	Heures
Nbr de nœuds	8	+65000	32
Vitesse de transfert	1mb/s	250kb/s	54mb/s
Portée	10m	100m	100m

Tableau 2.1 Comparaison entre les protocoles de communication [18]

2.3 Estimations des distances dans les RCSF

Parmi les méthodes de localisation dans les réseaux de capteurs il existe deux catégories, les méthodes qui ne sont pas basées sur la distance inter-nœuds et d'autres qui y sont. Les premières sont celles qui ne calculent pas de distances entre voisins. Elles utilisent d'autres informations telles que la connectivité pour estimer la position des nœuds.

Les deuxièmes sont des méthodes qui estiment les distances entre les nœuds pour calculer les positions. Plusieurs techniques sont développées pour les estimations des distances entre les nœuds voisins. Parmi lesquelles nous trouvons celles qui sont basées sur les dispositifs radio ,comme la méthode de la force du signal reçu « Received Signal Strength Indication (RSSI) »Pour simplifier, dans la suite ce dispositif sera appelé une radio et la technique d'estimation de la distance par le nombre de sauts radios « Radio hop count » ;et celles qui sont fondées sur l'utilisation d'autres matériels (microphones, etc.) comme la technique de la différence entre les temps d'arrivée de deux signaux « Time Difference of Arrival (TDoA) » et celle qui estime l'angle d'arrivée du signal« Angle of Arrival (AoA) ».[7]

2.3.1 RSSI (Received Signal Strength Indicator)

Il faut savoir que plus le signal ne se propage, plus sa puissance ne s'affaiblit. La perte de puissance entre un émetteur et un récepteur est proportionnelle à la distance parcourue. Si le nœud récepteur connaît la puissance du signal émis, il peut déterminer la dégradation du signal reçu.

Le RSSI est une sortie du récepteur du signal radio. Cette sortie fournit un signal lié à l'intensité du signal reçu (le RSSI est une tension). La tension RSSI (Received Signal Strength indicator) est en relation directe avec le niveau RSL (niveau du signal reçu) par exemple une tension RSSI de $0.25V_{cc}$ est relative à un RSL de -10 dB. Comme il est communément admis, on utilisera le terme RSSI pour indiquer la puissance du signal reçu en dB en référence à une tension. [19]

En pratique, les mesures par RSSI contiennent des erreurs. Ce bruit se produit parce que la propagation des ondes radio tend à être fortement non uniforme dans des environnements réels. Par exemple, la radio se propage différemment sur l'asphalte que sur l'herbe. Des obstacles physiques tels que les murs, meubles, etc., reflètent et absorbent les ondes radio. Par conséquent, la précision sur la distance en utilisant la force du signal n'est pas bien démontrée par rapport à d'autres techniques comme la «TDoA».

2.3.2 Time Difference of Arrival (TDoA)

La technique « TDoA » requiert d'autres matériels et elle n'est pas basée sur le signal radio seulement. En effet, chaque nœud devrait être équipé d'un haut-parleur et d'un microphone.

Certains systèmes utilisent les ultrasons alors que d'autres utilisent des fréquences audibles. Toutefois, la technique mathématique est indépendante du matériel particulier.

L'émetteur envoie tout d'abord un message radio. Il attend un intervalle de temps fixe, t_{delai} (qui peut être zéro), et ensuite produit un « chirp 2 » fixe sur son haut-parleur. Un nœud écouteur entend le signal radio, il enregistre l'heure actuelle, t_{radio} , puis il allume son microphone. Lorsque son micro détecte le « chirp », le nœud garde de nouveau l'heure actuelle, t_{son} . Une fois il a les trois instants t_{delai} , t_{radio} et t_{son} , le nœud écouteur calcule sa distance d à l'émetteur en se basant sur le fait que les ondes radio propagent beaucoup plus rapidement que le son dans l'air.

$d = (v_{\text{radio}} - v_{\text{son}}) \times (t_{\text{son}} - t_{\text{radio}} - t_{\text{delai}})$ où v_{radio} et v_{son} désignent les vitesses de propagation des ondes radio et du son dans l'air.

La méthode « TDoA » est très précise dans des conditions de propagation en ligne droite et sans obstacles. Elle est plus performante dans des endroits sans écho, et quand les hautparleurs et microphones sont bien calibrés les uns aux autres. Dans certains cas la précision de « TDoA » peut être de l'ordre de quelques centimètres pour une distance supérieure à dix mètres sans aucun calibrage.

L'inconvénient de la technique « TDoA » est qu'elle exige inévitablement des matériels spéciaux en particulier un haut-parleur et un microphone, où leur calibrage influence la précision. De plus, la vitesse du son dans l'air varie avec la température de l'air et l'humidité qui introduit une inexactitude dans l'équation précédente.

Finalement, plusieurs algorithmes utilisent la technique « TDoA » tout simplement parce qu'elle est beaucoup plus précise par rapport aux autres méthodes qui sont basées sur la radio. 2« Chirp » est un signal pseudopériodique dont sa fréquence augmente ou diminue avec le temps. [7]

2.3.3 Angle of Arrival (AoA)

Cette méthode consiste à définir une direction entre deux nœuds. La direction (l'angle) est généralement recueillie par la radio et un ensemble de microphones, qui permettent à un nœud écouteur de déterminer sa direction par rapport à l'émetteur. Il est également possible de la recueillir par le moyen d'une communication optique.

Dans cette technique, on a besoin de plusieurs (3-4) microphones spatialement séparés qui entendent un seul signal transmis. En analysant la phase ou la différence entre les temps d'arrivée du signal aux différents microphones, il est possible de découvrir l'angle d'arrivée du signal.

Ces méthodes peuvent obtenir une précision de l'ordre de quelques degrés. Malheureusement, elles exigent plus de matériels (un haut-parleur et plusieurs microphones) que la technique « TDoA », donc elle est plus coûteuse et les nœuds tendent à être plus volumineux.

Il existe peu d'algorithmes de localisation qui sont basés sur la technique « AoA », même si plusieurs d'entre eux sont capables de l'utiliser quand elle est présente. [7]

2.3.4 Time Of Arrivals

Le TOA (Time Of arrival) est un système de localisation basé, sur le temps mesure, sur les points d'accès l'instant d'arrivée du signal émis par le mobile. Si les horloges du mobile et du point d'accès ne sont pas synchronisées, il faut ajouter une inconnue de temps à l'équation.

Contrairement aux équipements de localisation utilisant la puissance, la précision du système peut être améliorée en augmentant le rapport signal sur bruit ou la largeur effective de la bande. Comme il est possible d'atteindre une très grande précision de localisation, par exemple 2 à 3cm avec une largeur de bande de 1.5 GHz et un SNR de 0 dB, la qualité de la mesure du temps et la synchronisation de tous les nœuds influent fortement sur les performances.

Il est possible de s'affranchir du problème de synchronisation des horloges entre le mobile et les points d'accès en travaillant avec des différences de temps d'arrivée (TDOA). Dans ce cas, la différence de temps d'arrivée d'un signal émis par un mobile sur deux points d'accès est calculée. Dans l'espace, le lieu géométrique des positions possibles du mobile est décrit par un hyperboloïde dont les foyers sont les deux points d'accès utilisés.

Trois mesures de TDOA, résultant de la réception simultanée du signal sur trois points d'accès distincts, sont nécessaires pour calculer la position du mobile. Etant donné la complexité de l'environnement construit, seule une très forte densité de points d'accès, permet d'envisager une telle configuration. [20]

2.4 Synthèse

Nous avons choisi comme protocole de communication le protocole ZigBee en se basant sur la comparaison faite par Jin-Shyan Lee et al. Qui a prouvé l'avantage de ce protocole par rapport à d'autres comme le wifi et le Bluetooth surtout en termes d'autonomie.

En ce qui concerne l'emplacement des capteurs, nous nous sommes inspirés du projet du professeur Guang Zhong Yang [10] qui a décidé de les placer derrière l'oreille des athlètes ; l'avantage qu'offre cette solution est le fait que sa position ne gêne pas l'aérodynamique du sportif. D'après les travaux des chercheurs de l'institut Fraunhofer ISC [12] ils ont réussi à développer des capteurs de pression souple avec des matériaux stretch qui peuvent être intégrés sous les vêtements, c'est pourquoi nous avons choisi comme emplacement d'un des capteurs le torse du sportif.

Chapitre II : Etat de l'art

Les avantages qu'offrent ces emplacements sont:

- La stabilité du capteur qui est meilleure que les autres emplacements (par exemple la tête ne bouge pas trop par rapport aux mains et aux pieds).

Dans ce cas (derrière l'oreille ou sur le torse) le capteur sera dans un environnement moins agressif.

- L'emplacement n'est pas gênant et ne trouble pas l'aérodynamique du corps.

Pour ce qui est de la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil, qui a été étudiée dans les travaux de Manish Bhardwaj et al. [15,16] Où Ils supposent une source de données distribuée de façon aléatoire dans une région avec une certaine densité de probabilité, et le puits (Station de Base) est situé en un point fixe. Ils calculent la puissance minimale requise pour transmettre un bit de la source au puits, puis ils calculent la borne supérieure de la durée de vie du réseau sur la base de cette consommation minimale d'énergie. De notre part nous allons utiliser cette solution pour connaître la limite de notre réseau afin de l'utiliser le plus possible.

Restant sur le même concept, dans la thèse de doctorat de monsieur LEHSAINI Mohamed qui a étudié la diffusion et la couverture de zone basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs sans fil, dans laquelle il a expliqué l'une des solutions communément proposées pour ce problème qui est d'utiliser une architecture hiérarchisée appelée clustering. Cette architecture permet de regrouper les capteurs proches géographiquement en clusters et d'utiliser des schémas de routage différents au sein des clusters et entre les clusters. Ainsi un tel capteur au sein d'un cluster stocke la totalité des informations des capteurs qui font partie de son cluster et seulement une partie des informations qui concernent les autres clusters. Dans cette architecture, seulement les cluster-Head et les nœuds passerelles sont responsables du cheminement de l'information captée par un capteur à la station de base. Nous nous sommes inspirés de cette technique pour notre modèle car elle offre l'avantage de l'économie d'énergie (il n'y a pas trop de transmissions) et aussi il sera plus facile de planifier en utilisant quelques membres du réseau (cluster-Head) qui sont responsables et qui contrôlent la totalité du réseau sur tout l'acheminement de l'information vers la station de base.

2.5 Conclusion

L'un des principaux objectifs des réseaux de capteurs sans fils est de trouver le meilleur chemin pour l'envoi des paquets c'est pourquoi nous avons consacré toute une partie aux protocoles de routage .Nous avons cité les principales classes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil.

Nous avons exploré à travers ce chapitre les différents objectifs des travaux de recherches sur les réseaux de capteurs sans fils, ceci à partir de plusieurs études déjà établies ; ainsi que les différentes méthodes pour estimer les distances dans ce type de réseaux. Nous pourrons alors dans le troisième chapitre faire nos choix et créer notre propre modèle.

3 Conception du Modèle DREEM

3.1 Introduction

Suivre l'état d'un sportif est un travail qui demande plusieurs investigations, en effet l'interaction de plusieurs disciplines entre en jeu. En implantant des capteurs sur l'athlète, ces capteurs doivent être placés de manière intelligente dans le but de ne pas le gêner lors de son activité physique. Ces capteurs pourront communiquer entre eux pour ensuite reléguer les informations collectées à la station de base.

L'un des problèmes majeurs de ces réseaux de capteurs est de trouver le protocole de routage le mieux adapté afin de consommer le moins d'énergie possible.

Effectivement, la plupart des recherches actuelles se focalisent soit sur des protocoles d'accès au médium, soit sur des protocoles de routage sans tenir compte de la possibilité que certains des capteurs composant le réseau soient mobiles (des capteurs positionnés sur les bras et/ou pieds) ce qui implique un changement momentané de la topologie. Dans ce chapitre nous proposons de nouveaux mécanismes, basés sur l'intelligence artificielle permettant d'une part de répondre au souci de mobilité dans un réseau à fortes contraintes, et d'autre part d'économiser l'énergie des capteurs et ainsi celle du réseau. Ceci, à travers le modèle « **DREEM** » composé d'une stratégie de mise en veille des capteurs que nous proposons, un algorithme de localisation et un protocole de routage. La solution est faite de telle sorte à ce que la qualité du monitoring ne soit pas affectée et que le routage des informations soit optimale.

3.2 Dynamic Routing Energy Efficient Model (DREEM)

Afin de répondre au mieux à la problématique posée au début de ce mémoire nous avons proposé le modèle DREEM, cette solution permet non seulement d'économiser l'énergie mais aussi d'assurer la qualité des données en assurant la qualité des liens par lesquels passent ces dernières. L'architecture de notre modèle est décrite dans la figure3.1.

3.2.1 Architecture du modèle DREEM

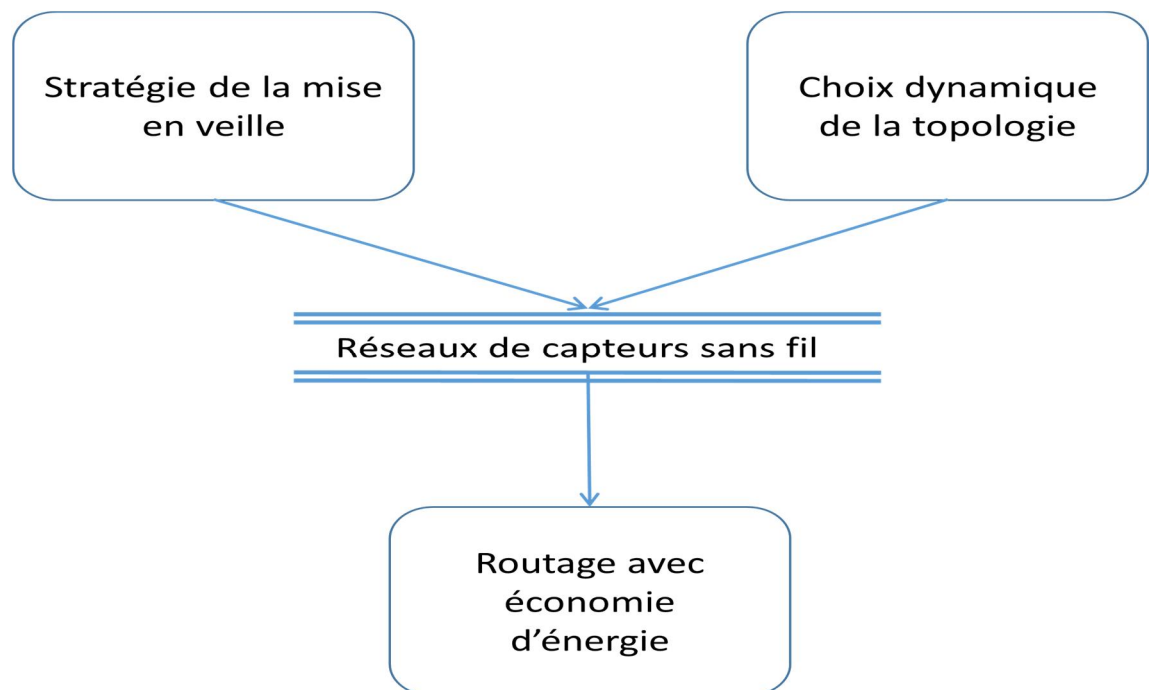


Figure 3.1 Architecture du modèle DREEM

Notre modèle se compose de trois principaux modules (Stratégie de la mise en veille, choix dynamique de la topologie, et routage avec économie d'énergie) qui sont appliqués sur le réseau de capteurs sans fil. Les sections suivantes décrivent chacun des composants du modèle **DREEM**.

3.2.2 Réseau de capteurs sans fil

Notre réseau est constitué des différents capteurs qui seront fixés sur le corps de l'athlète. Dans ce réseau chaque nœud capteur représente une source de données ;celles-ci devront être stockées, en les acheminant vers la station de base.

a) *Emplacement des capteurs*

Nous avons choisi les emplacements des capteurs, en nous inspirant notamment de quelques travaux cités dans l'état de l'art. Ceci est réalisé via l'utilisation de 18 capteurs et une station de base qui sont disposés d'une manière à se trouver à une distance inférieure à 0.52 m de son plus proche voisin. La figure 3.2 montre l'emplacement de chaque capteur sur le corps de l'athlète.

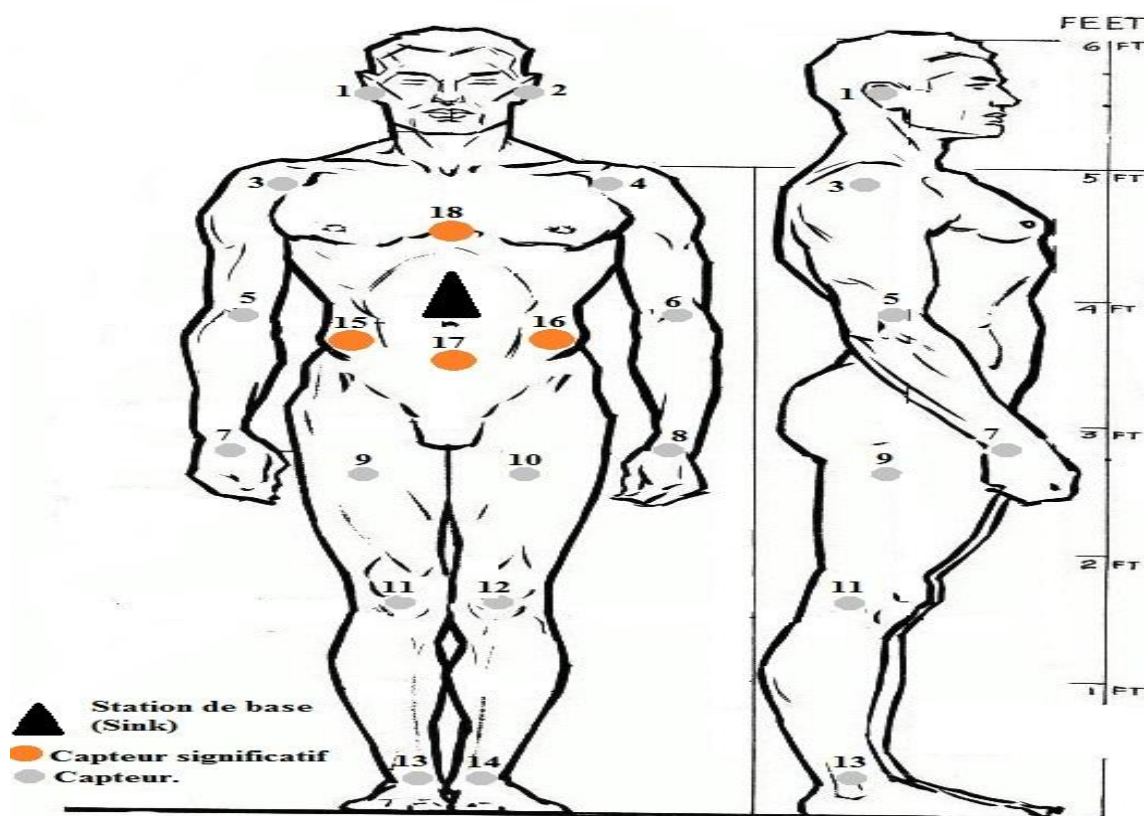


Figure 3.2 Emplacement des capteurs sur le corps de l'athlète

b) *Etats du sportif et topologies*

Nombreuses études sont faites sur les athlètes, notamment sur les mouvements de ces derniers ; afin d'améliorer leurs rendements et préserver leur santé ou encore pour créer des produits adéquats.

Nous nous sommes basés sur quelques études ; plus particulièrement sur l'étude biomécanique de la course à pied [22], afin de pouvoir déterminer les différents états sur lesquels nous travaillerons. Ces mouvements sont particulièrement réguliers et sont conditionnés par deux paramètres qui sont la morphologie de l'athlète et le type du sport.

Pour notre étude nous avons pris comme exemple d'activité sportive « la course à pied » et nous avons choisi les états essentiels d'un athlète ayant une morphologie

Chapitre III : Conception de DREEM

normal (1.80m). Cette étude s'inscrit dans le domaine médical sportif. Elle consiste en une surveillance permanente des mouvements d'un athlète.

C'est pour cela qu'il faut commencer par déterminer les différents états du sportif, nous en avons défini quatre : L'état repos, à vos marques, prêts et partez, nous associons à chaque état la topologie adéquate suivant l'emplacement des capteurs déjà défini précédemment. Les points essentiels du départ impliquent trois ordres : «à vos marques», « prêts » et « partez ».

- Etat « À vos marques »

L'ordre « à vos marques » est utilisé pour indiquer à l'athlète de s'approcher de la ligne de départ pour commencer la course. Se tenir derrière la ligne de départ, en position décontractée, le pied d'appui devant. Placer le bout du pied arrière derrière le talon du pied avant, à environ 20-30 cm. Lever légèrement les yeux en fixant le regard devant soi [23]. La figure 3.3 montre la topologie que nous avons définie et les différents liens de communication. Avec :

OD, OG: oreille droite, Gauche.||MD, MG : main droite, gauche. ||PD, PG : pied droit, gauche
CoD, CoG : Coude droit, gauche.||GD, GG : genoux droit, gauche.||CD, CG : cuisse droit, gauche

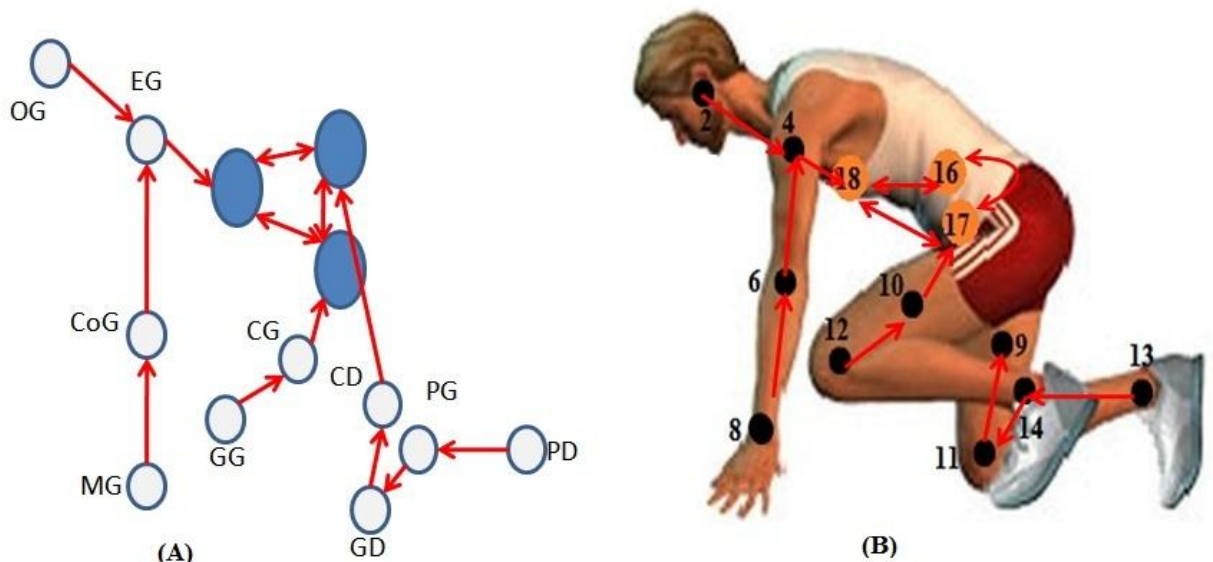


Figure 3.3 Emplacement des capteurs et topologie pour l'état à vos marques

Dans la figure 3.3(A) le côté droit (MD, CoD, ED, OD) n'est pas visible puisque nous travaillons dans le 2D (dans le plan) ; mais il a le même comportement du côté gauche où le capteur de l'oreille droite va envoyer ses paquets au capteur de l'épaule droite et ce dernier va les transférer avec ses paquets au capteur significatif, qui se

Chapitre III : Conception de DREEM

trouve au niveau du torse de l'athlète. La figure 3.3 (B) montre la disposition des capteurs sur le corps de l'athlète.

- Etat « Prêts »

À « prêts », l'athlète doit rester le plus immobile possible. Fléchir légèrement le genou avant, à environ 120 degrés, en reportant le poids du corps sur la pointe du pied avant (pied d'appui).

Plier le bras opposé au pied avant et le tenir devant soi. Reculer l'autre bras, la main légèrement fermée près de la hanche. Rester le plus immobile possible [23]. Cela est illustré dans la figure 3.4 (B) ainsi que la topologie associée à l'état figure 3.4 (A).

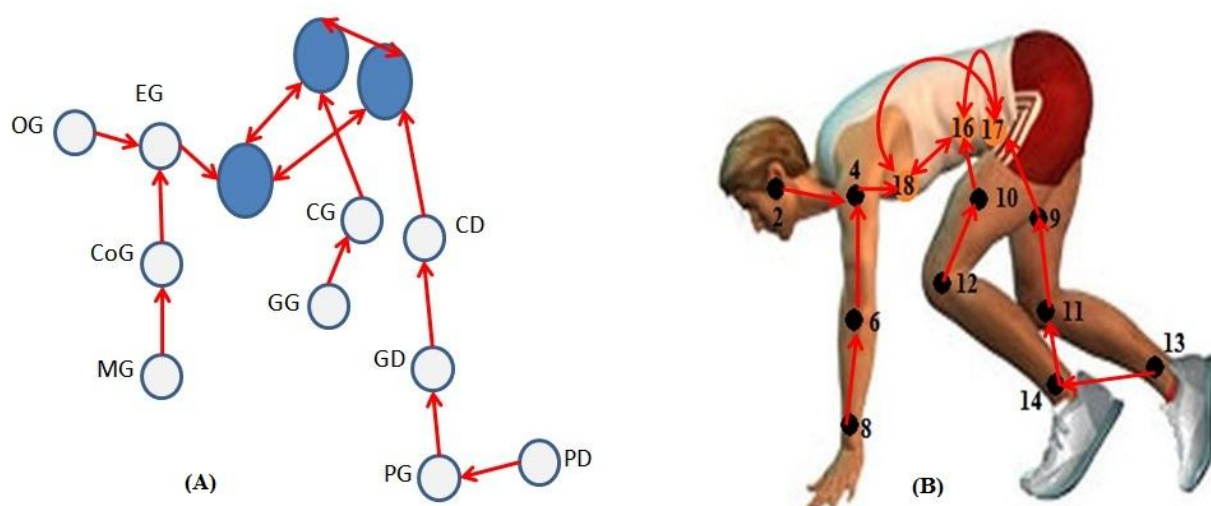


Figure 3.4 Emplacement des capteurs et topologie pour l'état prêts

Même remarque pour le côté droit, il se comporte comme le côté gauche en ce qui concerne le transfert des paquets de l'oreille vers le nœud significatif.

- Etat « Partez »

L'ordre « partez » indique à l'athlète de commencer à avancer figure 3.5 (B). En général, cet ordre est donné par le son d'un pistolet de starter ou d'un autre dispositif, comme un sifflet. Avancer la jambe arrière, le genou en premier, en balançant le bras avant en arrière. Pousser fortement sur la pointe du pied avant (pied d'appui) en balançant énergiquement le bras arrière en avant. Rester baissé et utiliser les bras pour

Chapitre III : Conception de DREEM

tirer le corps en avant [23]. La topologie de cet état est illustrée dans la figure 3.5 (A)

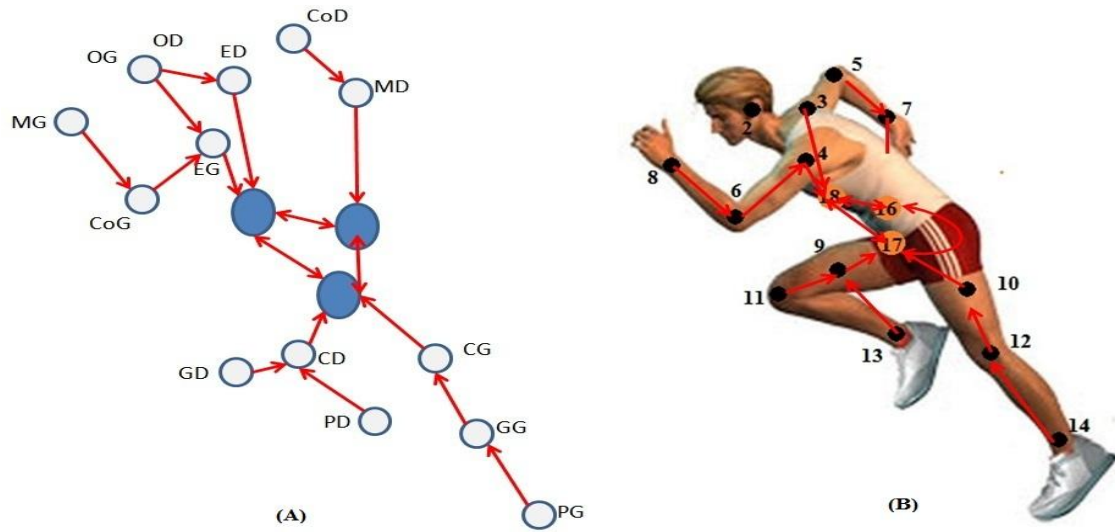


Figure 3.5 Emplacement des capteurs et topologie pour l'état partez

Même remarque pour le côté droit, il se comporte comme le côté gauche en ce qui concerne le transfert des paquets de l'oreille vers le nœud significatif.

- Etat «Repos »

La topologie associée à l'état repos est illustrée dans la figure 3.6 (B)

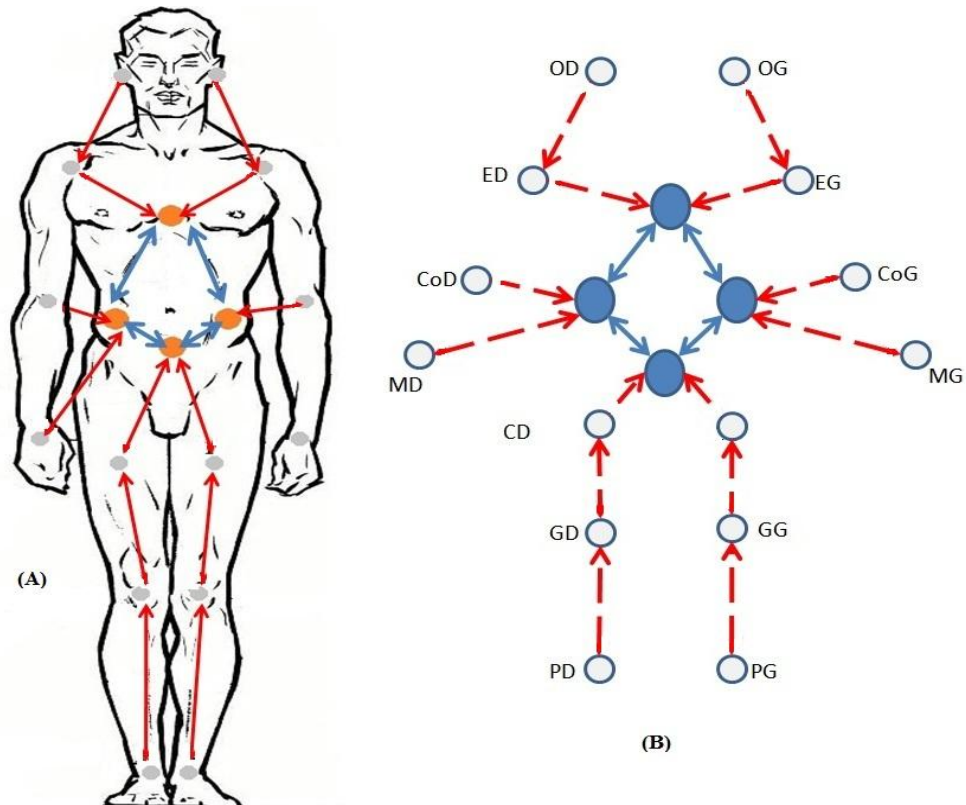


Figure 3.6 Emplacement des capteurs et topologie pour l'état repos

c) Détection de l'état de l'athlète

Afin d'identifier l'état de l'athlète nous avons fait appel à deux types de paramètres, le premier est utilisé pour assurer la qualité du lien, en utilisant les LQE (Link quality estimators) [24] plus précisément le ETX (Expected Transmission Count) qui est d'ailleurs basé sur le PRR (Packet Reception Ratio) et le Four-bit qui est basé sur le ETX, jugés les meilleurs selon l'étude comparative faite par Nouha Baccour et al. [24].

Le deuxième type de paramètre permet de localiser le capteur en question, afin d'identifier l'état dans lequel se trouve l'athlète. Parmi les méthodes de localisation dans les réseaux de capteurs nous distinguons deux catégories, les méthodes qui ne sont pas basées sur la distance inter-nœuds et d'autres qui y sont. Les premières sont celles qui ne calculent pas les distances entre voisins. Elles utilisent d'autres informations telles que la connectivité pour estimer la position des nœuds. Les deuxièmes sont des méthodes qui estiment les distances entre les nœuds pour calculer les positions [7]. Plusieurs techniques sont développées pour les estimations des distances entre les nœuds voisins. Pour notre cas nous avons choisi d'utiliser ce type de méthode avec comme technique d'estimation des distances la méthode de la force du signal reçu « Received Signal Strength Indication (RSSI) » [7]. La méthode RSSI nous semble adéquate car elle ne nous oblige pas à intégrer de nouveaux équipements autres que ceux qui existent par défaut dans chaque capteur (leurs radios).

Pour identifier les états de l'athlète, nous nous sommes également basés sur les distances entre certains capteurs :

- Les capteurs choisis pour vérifier l'état « à vos marque » sont :
 - Le capteur numéro 16 situé sur la hanche gauche et le numéro 14 situé sur le pied gauche. $\text{Dist}(14, 16) \leq 0.5\text{m}$
 - Les capteurs 7, 3 du bras droit et 8, 4 du bras gauche doivent avoir la même distance entre eux, $\text{Dist}(3, 7) = \text{Dist}(4, 8) \leq 0.6\text{ m}$
- Les capteurs choisis pour vérifier l'état « prêts » sont :
 - Les capteurs 10 et 14 de la jambe gauche. $0.3 \leq \text{Dist}(10, 14) \leq 0.5\text{ m}$.
 - Le capteur 16 sur la hanche gauche et le capteur 14 sur le pied gauche, $\text{Dist}(14, 16) > 0.5\text{m}$

Chapitre III : Conception de DREEM

- Les capteurs choisis pour l'état « partez » sont :
 - Les capteurs 10 et 14 de la jambe gauche. $\text{Dist}(10, 14) \geq 0.5 \text{ m}$.
 - Les capteurs 7, 3 du bras droit et 8, 4 du bras gauche. $\text{Dist}(3, 7) \leq 0.4 \text{ m}$,
 $\text{Dist}(4, 8) \leq 0.4 \text{ m}$
- Les capteurs choisis pour l'état « repos » sont :
 - Les capteurs 10 et 14, 11 et 9 où $\text{Dist}(10,14) = \text{Dist}(11,9) \geq 0.7 \text{ m}$
 - Les capteurs 7, 3 du bras droit et 8, 4 du bras gauche doivent avoir la même distance entre eux, $\text{Dist}(3, 7) = \text{Dist}(4, 8) > 0.64 \text{ m}$

3.2.3 Stratégie de mise en veille

L'utilisation dominante de la radio est souvent pour les communications multi-saut qui correspondent, en général, à l'envoi des données des nœuds vers une ou plusieurs stations de base. Pour conserver l'énergie d'un nœud capteur, l'idéal est de pouvoir éteindre sa radio si ce dernier n'est pas une source de donnée ni un relais de routage dans la communication multi-saut. Éteindre les radios, cependant, rend les nœuds indisponibles pour la communication multi-saut [7].

Pour notre modèle nous avons décidé de mettre en place une horloge pour déterminer parmi le réseau de capteur, quel capteur doit être actif et quel est celui qui doit être en veille. Ceci suivant certaines règles :

- ✓ L'ordre selon l'importance d'un rôle de capteur.
- ✓ La procédure se répète périodiquement.
- ✓ Au moment où les capteurs d'un type sont actifs, les autres sont en veille.

N°	Rôle	Durée	Nœuds responsable
1	Pression artérielle	10minutes	5, 8, 17, 11
2	ECG	5minutes	6, 7, 15, 14
3	Circulation du sang et de l'oxygène	10minutes	16, 9, 10, 13
4	Respiration	10minutes	18, 12, 4
5	Température	5minutes	1, 2, 3

Tableau 3.1 Rôle des capteurs

Afin de pouvoir mettre en veille les capteurs selon leurs types dans le tableau 3.1 ci-dessus, nous proposons l'algorithme illustré dans le tableau 3.2, nous commençons d'abord par la définition de quelques variables et fonctions comme suit:

- ✓ [Clock seconds] permet d'obtenir le temps actuel en secondes, Tous les capteurs seront en mode veille au lancement de l'algorithme.

Chapitre III : Conception de DREEM

- A. Nous mettons Set **IT** [clock seconds] au début de l'algorithme pour garder le temps initial de lancement, juste après nous réveillerons les capteurs de type1 avec la fonction « Réveille-toi ». Il faut aussi une variable E pour l'état de l'énergie d'un capteur, cette variable va être parmi les conditions de la boucle.
- B. Nous définissons les différents types de capteurs dans une variable « **Type** » qui est initialisée a type(1), mais d'abord nous commençons par la création de ces types, exemple Set type(1) [N5, N8, N11, N18] pour la tension artérielle...etc. Une variable Type(i) est nécessaire avec i initialisé a 1.
- C. Nous allons mettre une variable **TE** pour le temps écoulé pour chaque type afin de connaître le type suivant qui va être réveillé. On initialise **TE** à 0.

```
Tant que (e>10)
Si (type==1|type==3|type==4) Durée=600 ; Finsi
Si (type= =2|type= =5) Durée=300 ; Finsi

Tant-que (TE<=durée) {TE= [clock seconds]-TI} Ftq
    Envoie msg « Sommeille » aux capteurs Type ;
    Si (type==type(5)) i=0; Finsi
    Type = Type (i+1);
    TI= [clock seconds] ;
    Envoie msg « Réveille-toi » aux capteurs Type ;
    TE=0;
```

Tableau 3.2 Proposition d'une stratégie de mise en veille

3.2.4 Choix dynamique de la topologie

Avant d'acheminer les informations vers la station de base, nous avons besoin de connaître quelle route nous devons suivre, cette route est choisie selon les différentes positions des nœuds capteurs ; pour cela nous utiliserons un algorithme de localisation.

a) Algorithme CTA (Closer tracking Algorithm)

Yu-Tso Chen et al. [27], ont proposé l'algorithme CTA basé sur la métrique RSSI (Received signal Strength Indication). Cet algorithme permet de localiser les nœuds mobiles en se basant sur la fusion de deux algorithmes qui sont le Real Time Tracking (RTT) et une version améliorée de Fingerprinting (FPT) appelée Approximately Closer Approach (ACA). L'algorithme est décrit comme suit :

Chapitre III : Conception de DREEM

Les variables utilisées dans cet algorithme figurent sur les tableaux (3.3, 3.4 et 3.5):

Les termes primitifs

- $N_{neighbor}$: Le nombre des nœuds références dans un saut de «blind node ».
- BID : une identification prédéfinie du «blind node » (objet mobile).
- RID : une identification prédéfinie d'un nœud référence où $1 \leq RID \leq N_{neighbor}$
- $R_{Seuil}[RID][d]$: Le RSSI d'un RID dans un seuil prédéfini selon la distance d
- M_{ACA} : Pour indiquer que la méthode utilisée est Approximately Closer Approach
- M_{RTT} : Pour indiquer que la méthode utilisée est Real Time Tracking

Tableau 3.3 Les termes primitifs de l'algorithme CTA

La valeur du seuil RSSI pour RID dans une distance d est stockée dans une base de données, ces valeurs sont obtenues après une phase d'apprentissage. Les arguments physiques obtenus de ZigBee « blind node » sont dans le tableau 3.4 suivant:

Les termes physiques

- $R_{now}(x)$: La valeur actuelle de RSSI mesuré de x, où x se réfère à RID
- rid : un index de R_{now} où $rid < N_{neighbor}$

Tableau 3.4 Les termes Physique de l'algorithme CTA

Les termes dérivés sont calculés à partir des termes primitifs et physiques, ils sont cités dans le tableau 3.5:

- CloseList[x] : une liste RID de tri par $R_{now}(x)$, avec $R_{now}(x) \in R_{Seuil}[x][d]$ et $R_{now}(x) \leq R_{now}(x-1)$, $1 \leq x \leq N_{neighbor}$
- SortedList[x] : une liste RID de tri par $R_{now}(x)$
Avec $R_{now}(\text{SortedList}[x]) \leq R_{now}(\text{SortedList}[x-1])$.
- ClosestRID : un rid se réfère à RID, qui représente le nœud le plus proche du « Blind node BID » avec $R_{now}(\text{ClosestRID}) \in R_{Seuil}$.
- C_R : un enregistrement pour suivre le nœud mobile.
- M_C : Mode de localisation utilisé actuellement (c=ACA ou c= RTT)

Tableau 3.5 Les termes drivés de l'algorithme CTA

Chapitre III : Conception de DREEM

Le style de localisation de FTP ainsi que celui de RTT, possèdent des avantages et des inconvénients. Les deux algorithmes sont complémentaires, c'est pour cela que les développeurs de l'algorithme CTA ont combiné les deux, en choisissant le bon moment pour exécuter chacun. L'algorithme passe par quatre étapes :

- Etape 1 construire la liste des voisins.
- Etape 2 choisir le mode d'exécution.
- Etape 3 adapter une liste pour aider à la localisation.
- Etape 4 utiliser l'algorithme fingerprinting amélioré ACA (Approximately Closer Approach).

Le pseudo code de l'algorithme CTA est décrit dans les tableaux 3.6 et 3.7 suivants:

```
Algorithm_Closer_Tracking (int * $R_{now}$ )
{/////Initial/////}
Short CloseList [8] = {-1};
Int k=0;
Const int row=3;
Const int col=2;
///// Etape 1 (Construire la liste des voisins)/////
01 for (dis = 0.5; dis <= 2.0; dis += 0.5) {
02     for (rid = 1; rid <=  $N_{neighbor}$  ; rid++) {
03         if ( $R_{now}[rid]$  within  $R_{Seuil}$  [rid] [dis]) {
04             CloseList[k] = rid;
05             k++;
06         } //end if
07     } //end for
08 } //end for loop
///// Etape 2 (choisir le mode d'exécution)/////
09 if (k == 0) { // No record in the CloserList
10      $M_C = M_{RTT}$ 
11     break; //Change to Real-Time Tracking Mode12}
//end if
///// Etape 3 (adapter l'aider de position)/////
/////seulement ClosestRID dans le CloseList/////
13 if (k == 1) {
14     for (int x = 1; x <  $N_{neighbor}$ ; x++) {
15         CloseList[x] = SortedList[x-1];
16     } //end for
17     k =  $N_{neighbor}$ ;
18 } // end if
```

Tableau 3.6 Pseudo Code CTA (1) [27]

```

//////Etape 4 (Approximately Closer Approach)////////////////////////////////////
19 ClosestRID = CloseList [0];
20 for (int s = 0; s < k; s++) { //FPT
21     switch (CloseList[s+1] - ClosestRID) {
22         case 1:
23             CR [s] = R2;    break;
24         case -1:
25             CR [s] = R4;    break;
26         case col:
27             CR [s] = R3;    break;
28         case -col:
29             CR [s] = R1;    break;
30         default: //other 4 direction
31     } //end switch
32 } //end for
33 MC = MACA
} //end Closer Tracking Algorithm
    
```

Tableau 3.7 Pseudo Code CTA (2) [27]

b) Nos modifications

Afin de pouvoir fusionner cet algorithme et l'adapter à notre modèle, nous avons injecté quelques instructions. Ces instructions sont faites au niveau de la première étape en rouge.

Les modifications sont présentées dans le tableau 3.8 où nous avons ajouté une colonne afin de sauvegarder non seulement le nœud référence mais aussi sa distance par rapport au nœud mobile. Pour la même raison nous avons fait presque les mêmes modifications dans l'étape 4 tableau 3.9 mais en les appliquant sur ClosestRID:

```

//////Etape 1 (Consteruir la liste des voisins)////////////////////////////////////
01 for (dis = 0.5; dis <= 2.0; dis += 0.5) {
02     for (rid = 1; rid <= Nneighbor ; rid++) {
03         if (Rnow[rid] within RSeuil [rid] [dis]) {
04             CloseList[k].RID = rid;
05             CloseList[k].d= dis;
06             k++;
07         } //end if
08     } //end for
09 } //end for loop
    
```

Tableau 3.8 Modifications sur étape 1 de CTA

```

//////Etape 4 (Approximately Closer Approach)////////////////////////////////////
19 ClosestRID.RID = CloseList [0].RID;
34 ClosestRID.d = CloseList [0].d;
20 for (int s = 0; s < k; s++) { //FPT
21     switch (CloseList[s+1].RID - ClosestRID.RID) {
22         case 1:
23             CR [s] = R2; break;
24         case -1:
25             CR [s] = R4; break;
26         case col:
27             CR [s] = R3; break;
28         case -col:
29             CR [s] = R1; break;
30         default: //other 4 direction
31     } //end switch
32 } //end for
35     TBid [BID].ID=BID;
36     TBid [BID].RID=ClosestRID.RID;
37     TBid [BID].distance=ClosestRID.d;
33 MC = MACA
} //end Closer Tracking Algorithm

```

Tableau 3.9 Modifications sur étape 4 de CTA

Dans notre modèle tous les nœuds capteurs possèdent un id selon les positions. Suivant cette position, nous avons pris en plus du nœud référence « RID » le plus proche, sa distance par rapport au nœud mobile. Nous avons également ajouté à l'algorithme CTA le tableau des nœuds mobiles TBid. Nous pouvons ainsi détecter les différents états de l'athlète proposés précédemment suivant les conditions associées à chaque état par le calcul des différentes distances entre les capteurs concernés.

Après une communication entre les nœuds références, chacun de ces derniers va mettre à jour son tableau TBid.

3.2.5 Routage avec économie d'énergie

Afin de prolonger la durée de vie du réseau de capteurs et d'assurer la qualité des liens radios entre eux, nous avons choisi le protocole de routage ELQR (Energy and Link Quality based Routing tree).

c) Algorithm de routage ELQR (Energy and Link Quality based Routing tree).

A. Sivagami et al. Ont développé le protocole de routage (ELQR) [28], qui prend en considération la qualité des liens et l'économie d'énergie. Pour les réseaux qui possèdent une contrainte d'énergie comme les réseaux de capteurs sans fil, la retransmission des paquets joue un rôle important dans la durée de vie du réseau ; afin d'améliorer cette durée les retransmissions seront minimisées en envoyant les paquets via des canaux qui possèdent une bonne qualité. En plus la durée de vie du réseau va être augmentée en équilibrant les charges sur les nœuds qui possèdent la meilleure qualité de lien. La figure 3.7 de [28] montre l'architecture de cet algorithme.

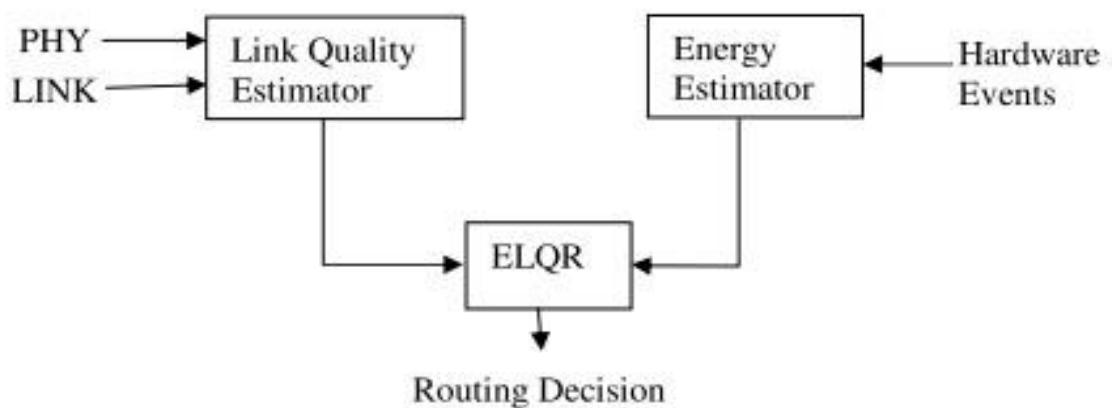


Figure 3.7 Architecture d'ELQR [28]

Dans l'algorithme ELQR, la table de routage possède une entrée additionnelle qui contient l'énergie résiduelle des nœuds voisins. L'algorithme cherche le nœud avec l'énergie résiduelle la plus élevée et le minimum ETX, ce nœud sera choisi comme nœud parent. Si les nœuds ne satisfont pas ces deux conditions alors le nœud qui possède la plus grande énergie avec un ETX inférieur au seuil β sera considéré comme le saut suivant, sinon nous prenons le nœud avec le minimum ETX et une énergie supérieure au seuil α . Dans le cas où aucune de ces conditions n'est satisfaite le nœud optimal suivant sera considéré en vérifiant la table de routage à nouveau. Le nœud avec un max d'énergie et une mauvaise qualité de lien ou avec une bonne qualité de lien et un minimum d'énergie sera éliminé de la liste de transmission. L'algorithme ELQR est donné dans le tableau 3.10 ci-dessous :

```

//////////////////////////////// 1. Initialize ()////////////////////////////////
MaxEnergy =0
MinETX= 0xFFFF
β=50
//////////////////////////////// 2. RouteSearch ()////////////////////////////////
Switch (etat) {
    Case 1:
RoutingTable = Table1; break;
    Case 2:
RoutingTable = Table2; break;
    Case 3:
RoutingTable = Table3; break;
    Case 4:
RoutingTable = Table4; break;
    Case 5:
RoutingTable = Table5; break;
    Default: // RoutingTable = Table5;
} //end switch
For RoutingTable[i]
    If ((maxEnergy < RoutingTable[i].energy) & (RoutingTable[i].valid))
        maxEnergy= RoutingTable[i].energy
        BestEnergyRoute=RoutingTable[i].nodeid
    If (minETX > RoutingTable[i].ETX) & (RoutingTable[i].valid)
        MinETX =RoutingTable[i].ETX
        BestETXRoute= RoutingTable[i].nodeid
//////////////////////////////// 3. ParentSelection ()////////////////////////////////
//Choose the link with high energy and good quality link
    If (bestETXRoute == bestEnergyRoute) {
Parent = bestEnergyRoute.nodeid ;}
//Choose the best ETX path
elseif (bestETXRoute.Energy >α)
    Parent=bestETXRoute.nodeid
//Choose the best Energy path
elseif (bestEnergyRoute.ETX < (minETX +β))
    Parent β bestEnergyRoute.nodeid
β = β + β * Round/ 100
// search for the next alternative parent
elseif
    bestEnergyRoute.valid = 0;
    bestETXRoute.valid = 0;
Repeat step 1

```

Tableau 3.10 Modifications sur étape 2 d'ELQR

Les modifications que nous avons faites sont en rouge. Grace à celles-ci nous allons d'abord choisir la topologie adéquate (suivant l'état de l'athlète) ensuite nous lancerons l'algorithme ELQR.

3.2.6 Fonctionnement du modèle

En plus des variables utilisées dans les algorithmes cités précédemment et pour mieux comprendre le fonctionnement de notre modèle nous avons défini les notions suivantes:

- Chaque capteur possède :
 - Une variable **E** pour indiquer son énergie résiduelle, celle-ci est calculée en utilisant les mêmes méthodes logicielles que ELQR[28].
 - Un entier **type** qui indique sa tâche selon les numéros définis dans le tableau 3.1 de rôles des nœuds.
 - Un **ID** afin de l'identifier
 - Une variable booléenne **ETAT** qui indique son état : actif (vrai), en veille (faux). Cette variable est initialisée à faux.
- Une fonction **Signal()**, pour réveiller ou mettre les capteurs en veille. `Nœud.Signal()` {Si (node.ETAT==true) node.ETAT=false
Else node.ETAT= true ; Return node.ETAT}, nous commençons par réveiller les nœuds références (Si (node.id==RID) node.Signal()) .
- Une fonction **Dist()**, qui calcule la distance entre deux noeuds en utilisant le tableau **TBid** de l'algorithme de localisation. Cette fonction a comme argument les identifiants des nœuds.
- Une variable **Topo** pour indiquer quelle topologie nous devons suivre. Ceci est fait selon l'état de l'athlète en utilisant les conditions associées à chaque état.
- Dans le cas d'un routage qui passe par des nœuds en veille, nous allons réveiller ces derniers afin d'accomplir la tâche de routage et nous allons les mettre en veille à nouveau une fois cette tâche terminée.

Le pseudo code de l'algorithme général du modèle **DREEM** se trouve dans les tableaux(3.11 3.12 et 3.13)

```
Début DREEM
///// Etape 1 Initialisation/////
Ti= [Clock secondes];
TE=0;
Type=1;
Short CloseList [8] = {-1};
Int k=0;
Const int row=3;
Const int col=2;
///// Etape 2 Stratégie de veille/////
Tant-que (node.E> $\alpha$ )
{
  MaxEnergy =0 ;
  MinETX= 0xFFFF ;
   $\beta$ =50;
  Si (node.type= =1| node.type= =3| node.type= =4) Durée=600 ;Finsi
  Si (node.type= =2| node.type= =5) Durée=300 ;Finsi
  Si (node.type= =Type && node.id !=RID) node.Signal();Finsi
  Tant-que (TE<= durée)
  {
    TE= [clock seconds]-TI;
    ///// Etape 3 localisation (Consterner la liste des voisins)/////
    Pour (dis = 0.2 ; dis <= 1.0 ; dis += 0.4) {
      Pour (rid = 1 ; rid <= N_neighbor ; rid++) {
        Si (R_now[rid] appartient R_Seuil [rid][dis]){
          CloseList[k].RID= rid;
          CloseList[k].d= dis;
          K++;
        } Finsi
      } Fin pour
    } Fin pour
    ///// Etape 4 (choisir le mode d'exécution)/////
    Si (k == 0) { // Aucun enregistrement dans CloseList
      M_C= M_RTT;
      Break; //Aller vers le mode Real-Time Tracking
    } Finsi
  }
}
```

Tableau 3.11 Algorithme du modèle DREEM (1)

```

///// Etape 5 (adapter l'aider de position)/////
/////seulement ClosestRID dans le CloseList/////
    Si (k == 1) {
        Pour (int x = 1; x < N_neighbor; x++) {
            CloseList[x] = SortedList[x-1];
        } Fin pour
        k = N_neighbor;
    } Finsi
/////Etape 6 (Approximately Closer Approach)/////
ClosestRID.RID = CloseList[0].RID;
ClosestRID.d = CloseList[0].d;
Pour (int s = 0; s < k; s++) {
    Switch (CloseList[s+1] .RID - ClosestRID.RID) {
        Case 1: C_R [s] = R2; break;
        Case -1: C_R [s] = R4; break;
        Case col: C_R [s] = R3; break;
        Case -col: C_R [s] = R1; break;
        Default: //les 4 autres directions
    } Fin switch
} Fin pour
TBid[BID].ID=BID;
TBid[BID].RID=ClosestRID.RID;
TBid[BID].distance=ClosestRID.d;// on lance une communication entre les
//noeuds références pour la mise à jour de leurs tables TBid
M_C= M_ACA;
Fin Closer Tracking Algorithm
///// Etape 7 Choix de la topologie /////
///// Fait au niveau des nœuds références après la mise à jour de leurs tables Tbid/////
Si (node.id==RID){ //nous avons déjà indiqué que les RID sont les
//identifiants des nœuds références
Si (Dist(14,16)<=0.5 && Dist(7,3)<=0.6) topo=1; Finsi //avosmarques
Si (0.3<=Dist(14,16)<=0.5 && Dist(14,16)>0.5) topo=2; Finsi //pret
Si (Dist(10,14)>=0.5 && 0.35<=Dist(4,8)<=0.4) topo=3; Finsi //partez
Si (Dist(10,14)==Dist(11,9)&& Dist(11,9)>=0.7 && Dist(7,3)>0.64)
topo=4; Finsi //repos
}Finsi
} Fintq
Switch (Topo) {
    Case 1: RoutingTable = Table1; break;
    Case 2: RoutingTable = Table2; break;
    Case 3: RoutingTable = Table3; break;
    Case 4: RoutingTable = Table4; break;
    Case 5: RoutingTable = Table5; break;
    Default: RoutingTable = Table5 ;}
Fin switch

```

Tableau 3.12 Algorithme du modèle DREEM (2)

```

///// Etape 8 chercher la route/////
  Pour RoutingTable[i] {
Si ((maxEnergy < RoutingTable[i].energy) & (RoutingTable[i].valid)) {
    maxEnergy=RoutingTable[i].energy;
    bestEnergyRoute=RoutingTable[i].nodeid } Finsi
Si (minETX > RoutingTable[i].ETX) & (RoutingTable[i].valid) ){
    minETX=RoutingTable[i].ETX ;
    bestETXRoute= RoutingTable[i].nodeid } Finsi
  }Fin pour
///// Etape 9 Sélectionné les parent/////
//choisir le lien avec le plus d'énergie et la meilleure qualité
Si (bestETXRoute == bestEnergyRoute){
    Si (node[bestEnergyRoute].type !=Type) node[bestEnergyRoute].signal();finsi
    Parent = bestEnergyRoute.nodeid  }
//Choisir la meilleure route ETX
Sinon si (bestETXRoute.Energy >α) {
    Si (node[bestETXRoute].type !=Type) node[bestETXRoute].signal();finsi
    Parent=bestETXRoute.nodeid}
//Choisir la route avec la meilleur Energie
Sinon si (bestEnergyRoute.ETX < (minETX +β)) {
    Si (node[bestEnergyRoute].type !=Type) node[bestEnergyRoute].signal();finsi
Parent =bestEnergyRoute.nodeid
    β = β + β * Round/ 100}
// Chercher le parent alternative suivant.
Sinon {    bestEnergyRoute.valid = 0;
           bestETXRoute.valid = 0;
           MaxEnergy =0;
           MinETX= 0xFFFF;
           β=50;
           Repeat etape 8}
Si (node[parent].type !=Type) node[parent].signal();finsi
node.Signal();
    Si (node.type== 5) Type=0; Finsi
Type = Type+1;
    TI= [clock seconds];
    TE=0;
  }Fintq
Fin DREEM

```

Tableau 3.13 Algorithme du modèle DREEM (3)

3.2.7 Schématisation du Modèle DREEM

Ici nous allons présenter un exemple pour clarifier l'idée de notre modèle, nous allons prendre comme état « l'état repos » ou tous les nœuds sont visibles. Nous choisissons le rôle « ECG » dont les capteurs 6, 7, 14 et 15 sont responsables.

L'algorithme commence par la localisation des nœuds mobiles nous prenons le nœud 7 placé sur la main droite pour cet exemple. Le $N_neighbor$ de ce dernier est 2 puisqu'il a 2 nœuds références à un saut (RID : 15, 17) le $closestRID$ est le 15, en appliquant la dernière étape de CTA nous voyons que le choix est fait sur le R3 (la zone du nœud 7) comme montré dans la figure 3.8 (B).

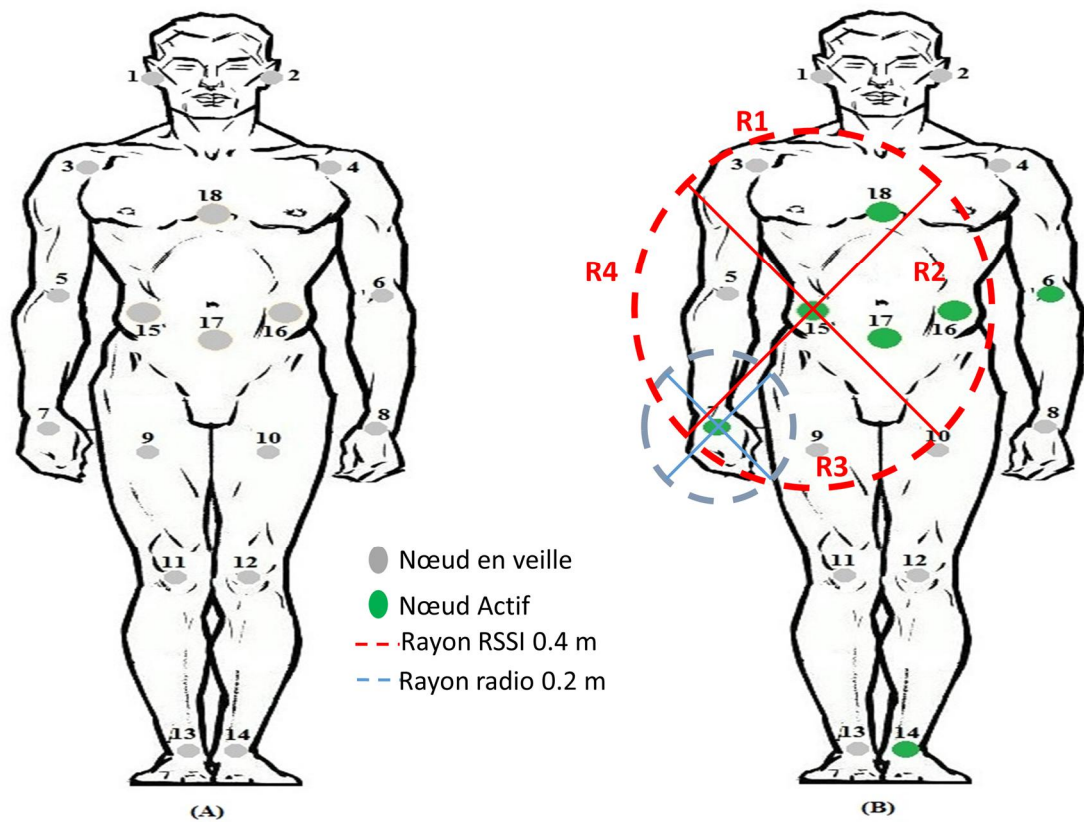


Figure 3.8 Localisation de la main droite

Maintenant nous voulons passer les informations captées par le nœud capteur n°14 vers la station de base comme montré dans la figure 3.9, si nous prenons en considération que les capteurs entre la source et la destination sont en veille et que l'utilisation d'une fréquence radio élevée va affecter la durée de vie de réseau, dans ce cas il faut réveiller les parents (en utilisant l'algorithme de routage inclus dans DREEM), une fois que la

Chapitre III : Conception de DREEM

processus du routage est fini nous remettons en veille le parent si son type est différent de celui de la source.

Le parent va être sélectionné selon le rapport ETX/Energie (section 3.2.5), par exemple si nous trouvons que le capteur n°13 possède un ETX plus grand que le capteur n°12 avec la même énergie malgré que ce le 13 est plus proche au capteur n°14, l'algorithme va automatiquement choisi celui avec le minimum ETX qui est n°12. Sans oublié qu'il y a une topologie à suivre.

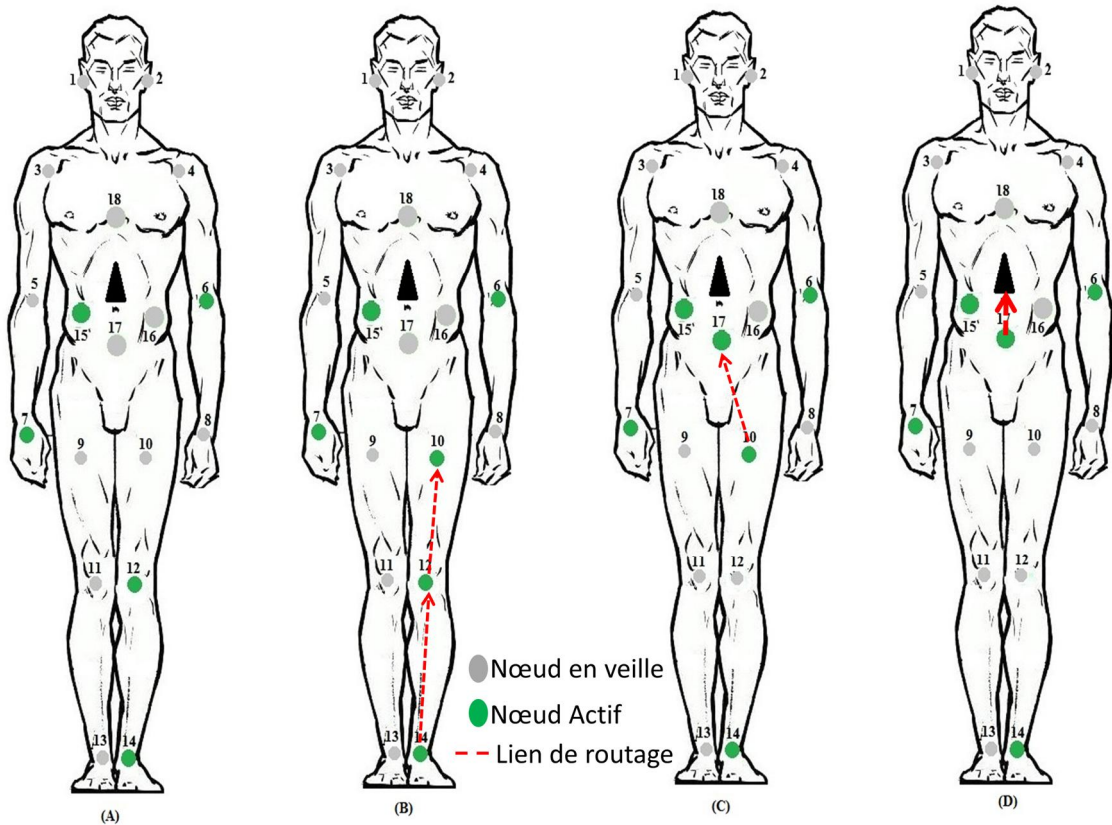


Figure 3.9 Routage avec DREEM

3.3 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons conçu notre propre modèle, que nous avons baptisé « DREEM ». La nouveauté et l'originalité de ce modèle réside dans la fusion de trois techniques minutieusement choisies et adaptées au cas médico-sportif.

Nous avons tout d'abord créé une stratégie de mise en veille propre à notre modèle dans le but d'économiser au maximum l'énergie du réseau. Dans le même but (économie d'énergie), nous avons intégré deux autres algorithmes : le premier spécifique à la localisation et le second pour le routage. La fusion des trois a permis une complémentarité visant une économie significative d'énergie pour notre modèle.

Conclusion générale et perspectives

Notre mémoire a commencé par une étude générale sur les réseaux de capteurs sans fils, qui a éclairé les différentes facettes des réseaux de capteurs ainsi que leurs caractéristiques essentielles (limitation en énergie, topologie dynamique, mobilité, etc.). Nous avons également parlé de la dimension applicative (médicale, domotique, militaire, etc.) des réseaux de capteurs en raison du lien étroit qui les lie. En effet, avec la grande variété des applications liées aux réseaux de capteurs sans fil, il est compliqué de mettre en œuvre des solutions (protocoles, algorithmes, etc.) génériques dont les spécifications sont totalement indépendantes des applications.

Dans la seconde partie de ce mémoire, nous nous sommes intéressés aux travaux déjà réalisés dans le domaine des réseaux de capteurs sans fils ; des protocoles et algorithmes déjà conçus pour pallier aux problèmes majeurs de ce type de réseaux qui est le manque d'énergie, et la mobilité des nœuds capteurs. Cette partie comprend également d'autres travaux spécialement dédiés au domaine médical-sportif.

Dans le troisième chapitre, nous avons décrit notre modèle « DREEM » qui se compose :

1. D'une stratégie de mise en veille, où nous avons proposé un algorithme pour la réaliser.
2. D'une technique de localisation effectuée en utilisant l'algorithme **CTA**.
3. D'un mécanisme de routage optimal en minimisant au maximum les retransmissions de paquets ,en choisissant d'abord la topologie adéquate à l'état de l'athlète a un moment T donné ensuite en envoyant les paquets aux voisins ayant le taux d'énergie le plus élevé et une très bonne qualité de liens, ceci en utilisant l'algorithme ELQR .

Cette combinaison qui constitue notre modèle a fait de lui une des premières solutions dédiées spécialement au WBAN (Wireless body area network) dans le domaine médico-sportif où le nombre de capteurs est réduit et le mouvement de l'athlète est fréquent.

Dans la continuité de nos travaux, nous envisageons en termes de perspectives:

- Une évaluation de notre modèle via une simulation suivie d'une comparaison avec les solutions classiques (CTP, ELQR, AODV...etc.).
- Une utilisation des métriques F-LQE (Fuzzy Link Quality Estimators):qui sont basées sur la logique floue (utilisation d'un langage naturel et d'opérateurs

Conclusion Générale

logiques) afin d'obtenir plus de précision dans l'estimation de la qualité des liens.

- Une amélioration des performances du protocole de routage ELQR en améliorant l'algorithme RTT (Real Time Tracking) pour avoir plus de précision en ce qui concerne la localisation des nœuds.
- Un routage externe, en utilisant le protocole MOBINET, qui règle les problèmes d'hétérogénéité entre les différents protocoles de routage réseaux.

Annexe A

Annexe B

Annexe C

Annexe D

Références

Références

- [1] :I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks (Elsevier)*, vol.38, no.4, pp.393-422, March 2002.
- [2]:I.F. Akyildiz, T. Melodia, and K.R. Chowdhury. A survey on wireless multimedia sensor networks. *Computer Networks*, N°51, pp : 921-960., 2007.
- [3]: juillet 2009, réseaux de capteurs sans fil, mise à jour 2012, wikipedia.org/wiki/Réseau_de_capteurs_sans_fil.
- [4] : DHIB Eya, 2007, Routage avec QoS temps réel dans les réseaux de capteurs, RAPPORT DE PROJET DE FIN D'ÉTUDES, École supérieure des communications, Tunis.
- [5] : LEHSAINI Mohamed, 2009, Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique, thèse de Doctorat, Université A.B Tlemcen et Université de Franche-Comté, Tlemcen.
- [6] : Cheick Tidjane KONE, 2011, Conception de l'architecture d'un réseau de capteurs sans fil de grande dimension, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, NancyI.
- [7] : Abdallah Makhoul, 2008, Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données, thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, FRANCHE-COMTE.
- [8] : Boudjaadar Amina, 2010, Plateforme Basée Agents Pour l'Aide à la Conception et la Simulation des Réseaux de Capteurs Sans Fil, Mémoire Pour l'Obtention du Diplôme de Magistère en Informatique, UNIVERSITE 20 AOUT 55 DE SKIKDA, SKIKDA.
- [9] : Damien Roth, Julien Montavont, Thomas Noël, 2010, MOBINET : gestion de la mobilité à travers différents réseaux de capteurs sans fil, 12èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques de Télécommunications (AlgoTel).
- [10] : Rémi Sussan, 25/09/07, un capteur pour sportifs, internet Actu, technologyreview, <http://www.internetactu.net/2007/09/25/un-capteur-pour-sportifs>
- [11] : projet, x-trem-log, INRIA, [http : //www.inrialpes.fr/Xtremlog/ ?page_id=23](http://www.inrialpes.fr/Xtremlog/?page_id=23), 2010

Références

- [12] : Ridha Loukil, 16 mai 2011, Des capteurs de pression ultra souples, industrie et technologies, [http : //www.industrie.com/it/des-capteurs-de-pression-ultra-souples.11480](http://www.industrie.com/it/des-capteurs-de-pression-ultra-souples.11480)
- [13]: Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco, Andrea Passarella, “Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: a Survey”, Elsevier Ad Hoc Networks Journal, Vol. 7, No. 3, pp. 537-568, May 2009
- [14]: Douglas M. Blough and Paolo Santi. Investigating upper bounds on network lifetime
- [15]: Manish Bhardwaj and Anantha Chandrakasan. Upper bounds on the lifetime of wireless sensor networks. In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'01), Helsinki, Finland, 2001.
- [16]: Manish Bhardwaj and Anantha P. Chandrakasan. Bounding the lifetime of sensor network via optimal role assignments. In Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '02), volume 3, pp 1587_1596, New York, USA, June 2002.
- [17]: Coleri Sinem, Ergen Mustafa, and Koo T. John. Lifetime analysis of a sensor network with hybrid automata modelling. In Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02), pp 98_104, New York, NY, USA, 2002. ACM. 87
- [18] : Jin-Shyan Lee et al., A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi In Proceedings of the 33rd Annual conference of the IEEE industrial Electronique Society (iecon),pages 46_51 , taipei, taiwan, Nov 5-8, 2007
- [19]: BOUKOURA Tayeb, BEKKAT-BERKANI Walid, 2010, Le routage des données vidéo dans un réseau de capteurs sans fil multimédia, Mémoire du Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en Informatique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, 87
- [20] : L.Daumas, O.Uberti, 2008, Implémentation d'un protocole de routage dans un réseau de capteurs sans-fils, master 1 informatique, Université d'Avignon, Avignon ,38
- [21] : Gérard Chalhoub, 2010, Routage et MAC dans les réseaux de capteurs sans fil, Clermont Université, Clermont Ferrand ,45
- [22] : F. Lebœuf et al. Etude biomécanique de la course à pied, Université Poitiers, France, 2006.

Références

- [23]: <http://sports.specialolympics.org/specialo.org>,
- [24]: Nouha Baccour et al., A Comparative Simulation Study of Link Quality Estimators in Wireless Sensor Networks, in Modeling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems, 2009. MASCOTS '09. IEEE International Symposium on, ReDCAD Res. Unit, Nat. Sch. of Eng. of Sfax, Sfax, Tunisia
- [26]: Omprakash Gnawali and Rodrigo Fonseca and Kyle Jamieson and David Moss and Philip Levis, "Collection Tree Protocol," in Proceedings of the 7th ACM Conference: Embedded Networked Sensor Systems, New York, NY, USA, 2009, pp.1-14.
- [27]: Yu-Tso Chen, Chi-Lu Yang, Yeim-Kuan Chang and Chih-Ping Chu, "A RSSI-based Algorithm for Indoor Localization Using ZigBee in Wireless Sensor Network," in Proceedings of the 15th International Conference on Distributed Multimedia Systems (DMS 2009) , San Francisco, USA, Sep. 2009, pp. 70-75.
- [28]: K. Pavai, D. Sridharan, S.A.V. Satya Murthy A. Sivagami, "Energy and Link Quality Based Routing for Data Gathering Tree in Wireless Sensor Networks Under TINYOS - 2.X," International Journal of Wireless & Mobile Networks, vol. 2, no. 2, pp. 47-60, 2010.