

Chapitre 3

Les techniques de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

3.1 Introduction

Durant ces dernières décennies, les réseaux de capteurs ont bouleversé le monde. Le besoin d'un suivi continu des phénomènes naturels et aussi la surveillance dans différents domaines, ont renforcé l'intérêt pour cette nouvelle ère de l'informatique embarquée. En revanche, les réseaux de capteurs souffrent de leurs fragilités et de leurs énergies limitées. Les nœuds capteurs sont alimentés par des batteries limités en énergie. Par ailleurs, le remplacement des batteries n'est pas une solution envisageable pour ces derniers, soit à cause du déploiement aléatoire des capteurs, ou à cause de l'hostilité de l'environnement où ils sont placés. Toutefois, la mort d'un ou plusieurs nœuds capteurs interrompt partiellement la communication dans le réseau. De ce fait, une partie des données collectées sera perdue ce qui en résulte à la mort partielle du réseau.

Maximiser la durée de vie du réseau constitue l'un des défis majeurs. La maximisation de la durée de vie d'un réseau de capteurs revient à minimiser les différentes sources d'énergies. En fait, un nœud capteur consomme de l'énergie pour accomplir son objectif dans le réseau. Son rôle principal est la collecte, le traitement et la transmission d'un ensemble de grandeurs physiques sur l'environnement qui l'entoure. Ces trois opérations constituent les principaux facteurs de consommation d'énergie. À partir de là, réduire l'énergie consommée par un nœud capteur revient à optimiser ces trois tâches. Dans ce contexte, plusieurs techniques de conservation d'énergie ont été proposées dans la littérature.

3.2 Notion de durée de vie du réseau

La durée de vie du réseau dépend fortement de la durée de vie nodale. Cette dernière représente une métrique d'évaluation des performances très importante aussi bien dans les réseaux de capteurs que les réseaux Ad Hoc. La vie nodale correspond à la durée de vie d'un des nœuds du réseau. Cette durée de vie dépend essentiellement de deux facteurs : l'énergie consommée en fonction du temps et la quantité d'énergie qui lui reste. La durée de vie moyenne \bar{E} d'un nœud continuellement actif est calculée comme suit :

$$\bar{E} = \frac{E}{P} \quad (3.1)$$

Tel que P est la puissance de transmission et E est l'énergie résiduelle du nœud.

3.3 Formes de dissipation d'énergie

3.3.1 L'énergie de captage

L'unité de détection a pour rôle la collecte de mesures physique de l'environnement surveillée. Cette dernière dépense son énergie dans la réalisation des opérations suivantes :

- 1) l'échantillonnage de données et la conversion en un signal électrique,
- 2) le traitement du signal, et
- 3) la conversion du signal de l'analogique au numérique.

La plupart des chercheurs partent de l'idée que l'énergie consommée par l'échantillonnage des données est négligeable comparant à la communication. En revanche, dans certain cas, l'énergie dépensée pour l'échantillonnage peut être dans le même ordre de grandeur ou supérieure à l'énergie consommée lors de la communication. A titre d'exemple : l'utilisation d'un capteur gourmand en énergie, des capteurs actifs, tels que les capteurs d'image ou aussi dans le cas où le temps d'échantillonnage est long.

3.3.2 L'énergie de traitement (calcul)

Cette unité est constituée d'un microcontrôleur (microprocesseur) et une mémoire. L'énergie résiduelle de cette unité est dépensée lors de la commutation et aux fuites. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au

niveau logiciel (en exécutant un logiciel). Par contre, l'énergie de fuite désigne l'énergie consommée par l'unité de calcul dans le cas où aucun traitement n'est effectué.

3.3.3 L'énergie de communication

L'unité de communication qui a pour rôle l'envoi et la réception de données, est l'unité la plus consommatrice en énergie. L'énergie de communication est déterminée par trois facteurs:

- La quantité des données échangées.
- La distance entre les nœuds.
- La puissance de la radio, quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée

3.4 Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie

Il existe des facteurs qui induisent une consommation inutile de l'énergie (surconsommation).

3.4.1 Etat du module radio

Le module radio est le composant du nœud capteur le plus consommateur en énergie puisque c'est lui qui assure la communication entre les nœuds. Le module radio opère dans quatre modes de fonctionnement : idle, transmission, réception et sommeil.

- Dans l'état *idle* : la radio est allumée, mais elle n'est pas employée. En d'autres termes, le nœud capteur n'est ni en train de recevoir ni de transmettre.
- Dans l'état transmission : la radio transmet un paquet.
- Dans l'état réception : la radio reçoit un paquet.
- Dans l'état sommeil : la radio est mise hors tension.

3.4.2 Accès au support de transmission

La couche MAC a un rôle très important pour la minimisation de l'énergie consommée. Un protocole MAC économe en énergie essaie d'utiliser le moins souvent possible le module radio. L'utilisation inutile du module radio provient de six sources essentielles : la retransmission, l'écoute passive, l'écoute abusive, la surcharge, la surémission et la taille des paquets.

- **la retransmission**

Les nœuds capteurs utilisent généralement une seule antenne radio, cependant ils partagent le même canal de transmission. La transmission simultanée des paquets par les nœuds voisins peut engendrer des collisions. Ainsi une quantité des données transmises sera perdue. La retransmission de ses données perdues générera une perte significative de l'énergie.

- **L'écoute passive (*idle listening*)**

L'écoute passive du canal radio dans l'attente d'une éventuelle réception (le mode idle décrit précédemment) engendre une perte importante des capacités des nœuds en termes d'énergie. Ceci est coûteux et inutile dans le cas des réseaux à faible charge de trafic. De ce fait, basculer les nœuds capteurs en mode sommeil est une solution mais la transition entre les modes consomme également de l'énergie. Pour cette raison la fréquence de transition entre les modes doit rester raisonnable.

- **L'écoute abusive (*overhearing*)**

L'écoute abusive se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés. Le coût de l'écoute abusive peut être important dans le cas d'un réseau dense et avec une charge de trafic importante.

- **La surcharge (L'*overhead*)**

Plusieurs protocoles de la couche MAC, utilisent les paquets de contrôle pour maintenir une bonne communication entre les nœuds (signalisation, connectivité, établissement de plan d'accès et évitement de collisions). L'échange de paquets de contrôle nécessite une énergie additionnelle. Par ailleurs, comme ces paquets ne transportent pas directement des données, ils réduisent également le débit utile effectif.

- **La surémission (*Overemitting*)**

Le phénomène de surémission est produit quand des nœuds envoient des messages à des destinations qui ne sont pas prêtes à les recevoir, en effet ces messages sont considérés inutiles et consomment d'avantage de l'énergie.

- **La taille des paquets**

La taille des paquets a un effet sur la consommation d'énergie. En effet, si la taille des paquets est réduite, le nombre de paquets de contrôle échangés augmente ce qui génèrera un overhead. Dans le cas contraire, une taille grande des paquets nécessite l'utilisation d'une grande puissance de transmission.

3.4.4 Routage des données

Le routage des données peut avoir un impact sur la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs multi-sauts. L'acheminement des paquets d'une source à une destination se fait à travers des nœuds intermédiaires. Ainsi, un nœud capteur consomme de l'énergie soit pour transmettre ou relayer les données des autres nœuds. Dans ce sens, une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau.

3.5 Les méthodes de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Les trois tâches principales, d'un nœud capteur, qui consomment de l'énergie sont: la capture, le traitement et la communication.

Plusieurs approches ont été proposées afin d'optimiser l'énergie au niveau de ces trois tâches. Par ailleurs, plusieurs classifications de ces dernières ont été proposées dans la littérature. Nous avons choisi la classification montrée dans la figure 3.1, nous avons également partagé les méthodes de hiérarchisation en deux classes.

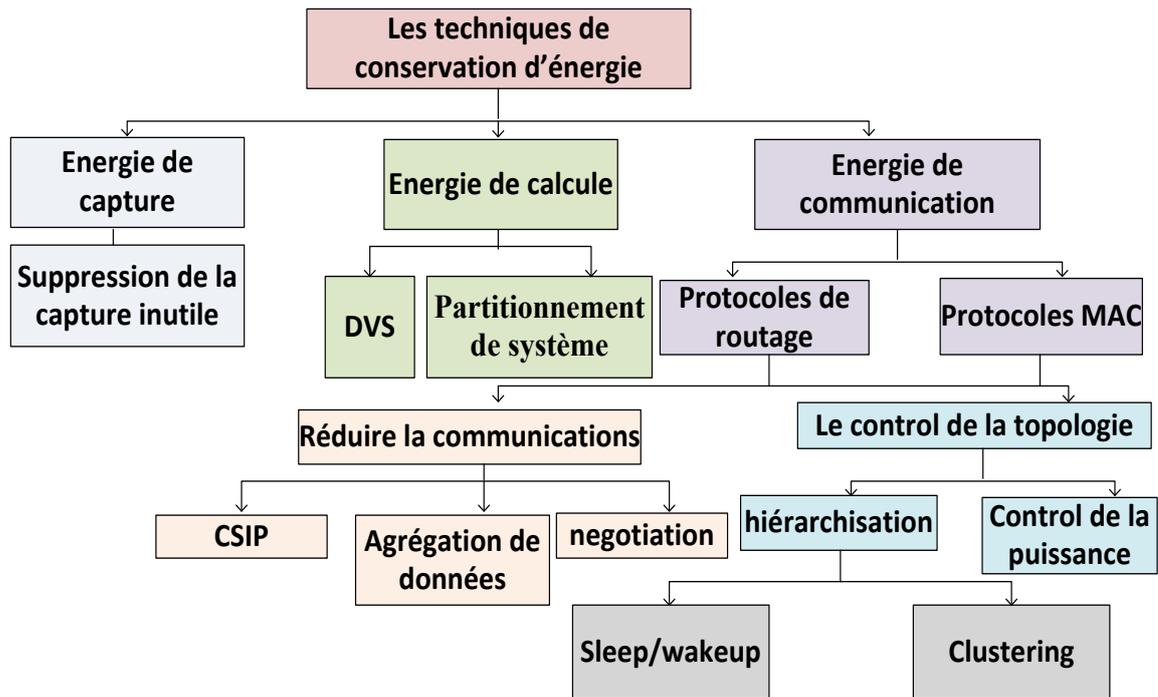


FIG. 3.1 – Les méthodes de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

3.5.1 Les méthodes proposées pour optimiser l'énergie de capture

Le module de détection affecte la consommation d'énergie de deux manières :

- **L'échantillonnage inutile** : Vu la densité du réseau de capteurs, les données échantillonnées ont souvent de fortes corrélations spatiales et/ou temporelles. Il est donc inutile de communiquer les informations redondantes à la station de base. En fait, même si le coût de la détection est négligeable, la communication des données redondante implique une surconsommation d'énergie.
- La consommation électrique du module de détection dans le cas des capteurs gourmands en énergie

Des techniques visant à réduire l'échantillonnage inutile ont été conçues pour minimiser l'énergie dépensée par le module de détection.

3.5.1.1 Enlever l'échantillonnage inutile

Il existe trois principales techniques : échantillonnage adaptatif, échantillonnage hiérarchique et l'échantillonnage actif fondé sur un modèle (Model-based active sampling).

1) Echantillonnage adaptatif

Les approches proposées pour l'échantillonnage adaptatif exploitent les corrélations spatiales et temporelles des données pour réduire la quantité de données à acquérir par le module de détection. A titre d'exemple, les données intéressantes peuvent changer lentement dans le temps, dans ce cas, des corrélations temporelles peuvent être exploitées pour réduire l'échantillonnage inutile. Tandis que, la corrélation spatiale peut être utilisée quand le phénomène étudié ne change pas brusquement entre les régions couvertes par des nœuds voisins.

2) *Echantillonnage hiérarchique*

Le but de ce type d'approches consiste à trouver un compromis entre la consommation d'énergie et la précision. Étant donné que les capteurs qui donnent de très bonne précision sont gourmands en énergie, l'idée est d'utiliser différents types de capteurs avec des caractéristiques de puissance différentes.

3) *l'échantillonnage actif fondé sur un modèle (Model-based active sampling)*

Ces approches utilisent un mécanisme similaire à la prédiction de données. Un modèle du phénomène mesuré est construit à base des données échantillonnées. Ce modèle est ensuite utilisé pour prédire les données futures avec une certaine précision en réduisant ainsi le nombre d'échantillonnage.

3.5.2 Méthodes proposées pour minimiser l'énergie de calcul

3.5.2.1 techniques d'adaptation dynamique de la vitesse et de la tension du processeur (DVS)

Comme mentionné précédemment, l'énergie dépensée par l'unité de calcul dépend très fortement de la tension d'alimentation (le voltage). De ce fait, minimiser la dépense énergétique du calcul est liée à la minimisation du voltage. C'est dans ce sens que le DSV a été proposé et déployé dans des microprocesseurs. Le DVS permet aux processeurs de changer leur voltage et d'ajuster leur fréquence selon la demande de l'application sans pour autant dégrader les performances de ces derniers. De cette manière, la technique DVS aide les capteurs à bien conserver leurs énergies. L'idée de base consiste à régler la tension d'alimentation de sorte que le processeur fonctionne à un rythme long quand la charge du travail du processeur est faible. Par contre, si la charge du travail est grande, alors le DVS contrôle le processeur pour qu'il travaille à une grande vitesse.

3.5.2.2 Techniques de partitionnement du système

Les techniques de partitionnement du système peuvent être utilisées pour réduire l'énergie dépensées dans le sous système de calcul. Deux techniques sont utilisées, la première consiste à transférer un calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul. Tandis que, la deuxième partage le calcul entre les nœuds au lieu de placer des centres de calcul.

3.5.3 Méthodes proposées pour minimiser l'énergie de communication

Des mesures expérimentales ont montré que généralement c'est la transmission des données qui consomme le plus d'énergie. Comme cité précédemment cette dernière est influencé par plusieurs facteurs qui ont un lien très étroit avec la couche MAC et la couche réseau.

De ce fait la conception des protocoles de conservation d'énergie doit prendre en considération les contraintes liées à la couche MAC et réseau.

La minimisation de l'énergie dépensée côté MAC et réseau peut être atteinte soit en réduisant le nombre d'émission / réception des messages ou par le contrôle de la topologie.

3.5.3.1 Réduire le nombre de communication

1) Agrégation de données

Les nœuds voisins dans les réseaux de capteurs, étant donné qu'ils sont très corrélés spatialement et temporellement, peuvent générer les mêmes données qui seront ensuite transférées à la station de base (sink), à un moment donné les nœuds intermédiaires peuvent avoir les mêmes données reçues des nœuds sources. Pour éliminer cette redondance et minimiser ainsi la quantité de données transférées à la station de base, des techniques d'agrégation de données sont utilisées.

Généralement les méthodes d'agrégation de données visent à éliminer la duplication des données, en les agrégeant au niveau des nœuds intermédiaires. Ceci, minimisera l'énergie dépensée pour la transmission des données qui représente 70% de l'énergie consommée par le nœud capteur.

PEGASIS et l'approche « A Data Agregation Algorithm Based on Splay Tree for Wireless Sensor Networks » sont deux protocoles d'agrégation de données dédiés pour les réseaux de capteurs sans fil.

2) CSIP (Collaborative Signal and Information Processing)

Les méthodes de CSIP visent à combiner entre plusieurs disciplines : la communication et le calcul à basse fréquence, traitement de signal, algorithmes distribués et tolérance aux fautes, systèmes adaptatifs et théorie de fusion des capteurs et des décisions. Les modèles de calcul pour le CSIP déjà utilisés pour les réseaux de capteurs peuvent être divisés en deux catégories : des modèles client-serveur et les modèles basés sur les agents mobiles.

Dans les modèles client-serveur les nœuds capteurs représentent les clients et la station de base (le sink), le serveur. Dans ce modèle, les données sont transférées à la station de base pour être traitées. Les modèles basés sur des agents mobiles sont une autre alternative pour supporter le calcul distribué. Dans ce type de modèle, la station de base (le serveur) envoie des agents mobiles contenant les méthodes nécessaires pour le traitement des données. Les agents mobiles migrent vers les nœuds capteurs (les clients) et ainsi traitent les données des capteurs localement. Les agents mobiles migrent d'un nœud à un autre en effectuant ainsi la fusion de données.

3) La négociation (SPIN)

Cette famille de protocole est adaptée aux réseaux de capteurs. Ce type de protocoles a été proposé dans le but de remédier aux limites des protocoles de dissémination de données existants tel que l'inondation classique (*classic flooding*).

Un nœud implémentant SPIN négocie avec les autres nœuds avant de transmettre les données afin d'assurer que seulement les données utiles sont transférées. Pour une négociation réussie entre les nœuds chacun d'eux doit décrire les données qu'il observe, cette description est appelée métadonnées.

Deux protocoles dans la famille SPIN ont été proposés SPIN-1 et SPIN-2.

3.5.3.2 Le contrôle de topologie

Pour le contrôle de topologie nous avons deux mécanismes : le contrôle de puissance et la hiérarchisation.

1) Le contrôle de puissance

Les techniques de contrôle de puissance visent essentiellement à optimiser la puissance utilisée de la radio, elles permettent aux nœuds d'ajuster leurs puissances radio dans le but

de minimiser la consommation d'énergie. Les techniques de contrôle de puissance n'ont pas seulement un effet sur la consommation énergétique des nœuds capteurs mais aussi influent la connectivité du réseau. En outre, ils doivent assurer une transmission avec succès des paquets de données vers une destination. Les protocoles ATPC (Adaptive Transmission Power for Wireless Sensor Networks), LMA et LMN (Local Mean Algorithm and Local Mean of Neighbours Algorithm) font partie de cette catégorie.

2) Hiérarchisation

Les méthodes de l'hiérarchisation consistent à organiser le réseau en structures à plusieurs niveaux. Nous trouvons dans cette catégorie deux grandes familles : les méthodes du groupement (*clustering*) et les méthodes sommeil/réveil (*sleep/wakeup*)

- ***Les méthodes du groupement (clustering)***

Les Algorithmes du groupement (*clustering*) organisent le réseau en sous réseaux (clusters), plus homogènes selon une métrique ou une combinaison de métriques, formant ainsi une topologie virtuelle. Chaque cluster identifie un nœud particulier appelé cluster-head. Le cluster-head, permet de coordonner entre les nœuds membres de son cluster, d'agréger leurs données collectées et de les transmettre par la suite à la station de base. De ce fait, seulement les nœuds leader seront responsables de l'acheminement de l'information collectée vers la station de base. Minimisant ainsi l'énergie consommée par les nœuds capteurs. Parmi les protocoles proposés dans cette catégorie : LEACH et TEEN.

- ***Les méthodes du sommeil/ réveil (sleep/wakeup)***

Les méthodes du *sommeil/ réveil (sleep/wakeup)* exploitent la redondance des nœuds, ce qui est typique dans les réseaux de capteurs, et d'une manière adaptative sélectionnent seulement un sous-ensemble de nœuds qui doivent rester actifs pour le maintien de la connectivité. Les Nœuds qui ne sont pas actuellement nécessaires pour pouvoir assurer la connectivité peuvent se mettre en mode sommeil et ainsi économiser de l'énergie. Dans ce type de méthodes, les nœuds coordonnent leurs périodes de sommeil et de réveil, ils se mettent d'accord sur les dates auxquelles ils doivent basculer entre l'état actif et l'état sommeil, de sorte que les nœuds voisins soient actifs en même temps. Ce qui rendra possible l'échange de paquets, même si les nœuds dorment la plus part du temps.

Les protocoles du sleep/wakeup peuvent être subdivisés en trois catégories principales : à la demande (On demand), rendez-vous programmés (Scheduled rendez-vous) et les régimes asynchrones.

a) Les protocoles à la demande (On demand)

Ces régimes sont fondés sur l'idée qu'un nœud devrait être réveillé au moment où il doit recevoir un paquet d'un nœud voisin. Cela permet de minimiser la consommation énergétique et, par conséquent, ce type de régimes est approprié pour des applications de réseaux de capteurs à très faible cycle d'utilisation (par exemple, détection incendie, la surveillance des défaillances des machines...etc.). Ce type de régime vise à réduire la consommation d'énergie par le contrôle de l'Etat de la radio tout en assurant un temps de retard limité pour la transition d'Etat. L'implantation de tels systèmes nécessite en général deux canaux différents: *un canal de données* pour la communication des données normales et un *canal de réveil* pour réveiller les nœuds en cas de besoin. Cela permet de réduire le retard du réveil. STEM, STEM-T et PTW sont des exemples de ce type de protocole.

b) Les régimes de rendez-vous programmés (Scheduled rendez-vous)

Les protocoles du rendez-vous programmés exigent que tous les nœuds voisins se réveillent en même temps. Le principal avantage de ces régimes est quand un nœud est réveillé, tous ses voisins seront réveillés aussi. Typiquement les nœuds voisins se réveillent suivant un ordonnancement de réveil et demeurent actifs durant un intervalle de temps bien précis pour l'échange de données ensuite ils se redorment jusqu'au prochain rendez-vous

Les protocoles du rendez-vous programmés proposés dans la littérature diffèrent dans la manière dont les nœuds du réseau se réveil et dorment pendant leurs durées de vie. Le plus simple est l'utilisation d'un modèle entièrement synchronisé. Dans ce cas, tous les nœuds du réseau se réveillent en même temps, selon un schéma périodique (periodic pattern). Un régime de réveil entièrement synchronisé est également utilisé dans des protocoles MAC tels que S-MAC, T-MAC et D-MAC.

c) Les régimes asynchrones

Un protocole sleep/wakeup asynchrone permet à chaque nœud de se réveiller indépendamment des autres, en garantissant que les voisins se chevauchent toujours dans les périodes actives au sein d'un nombre de cycles spécifiés. Aucun échange d'information n'est

alors nécessaire entre les nœuds. RAW (Random Asynchronous Wakeup), AWP (Asynchronous Wakeup Protocol) sont des régimes sleep/wakeup asynchrones.

3.6 Conclusion

La durée de vie d'un réseau de capteur est étroitement liée à la vie nodale. Cette dernière dépend fortement de la consommation d'énergie du nœud capteur. Dans ce dernier, l'énergie est consommée en assurant les fonctions suivantes : la capture, le calcul (traitement) et la communication. La communication représente une grande portion de l'énergie totale consommée. Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques approches de conservation d'énergie, proposée dans la littérature, pour les réseaux de capteur sans fil. Après avoir souligné les principaux facteurs de consommation d'énergie.

La première classe des méthodes de conservation d'énergie vise à réduire l'énergie dépensée dans la capture des données, cela se traduit par la suppression des captures inutiles.

La deuxième classe s'intéresse à l'énergie de calcul. Il était montré que l'énergie de calcul peut être réduite par les deux méthodes : DVS et le partitionnement du système.

Dans la troisième classe, nous avons évoqué les méthodes visant à réduire l'énergie consommée en phase de communication.

Il reste bien évidemment d'autres techniques de conservation d'énergie. Par exemple les méthodes centrées sur la mobilité des nœuds relais ou bien des puits de données. Il existe un intérêt croissant pour ce type d'approche car si certaines applications pratiques envisagent des déploiements moins denses, alors pour des raisons d'efficacité et de robustesse, les protocoles de communication peuvent exploiter de façon appropriée la mobilité des nœuds.