

Chapitre 2

Les réseaux de capteurs mobiles

2.1 Introduction

Les réseaux de capteurs mobiles (MWSNs pour Mobile wireless sensor networks) sont une petite société émergente dans le domaine de la recherche à la différence de son prédécesseur, bien établie, le réseau de capteurs statiques. A notre connaissance, la majorité des recherches existantes considèrent des réseaux de capteurs statiques. Un réseau de capteurs est constitué d'un ensemble de nœuds déployés dans une zone géographique (zone d'intérêt) dans le but de surveiller, et de transmettre les informations à la station de base. Un réseau de capteurs statiques ne considère aucune mobilité des nœuds, ni de la station de base, ni de la zone d'intérêt. Dans ce cas, les capteurs sont regroupés pour capter un phénomène physique (exemple la température) dans une région déterminée. Cela exige une mise en place initiale des infrastructures de communication afin de créer le chemin entre la station de base et les nœuds capteurs.

D'autre part, un réseau de capteurs sans fil mobiles (MWSNs) peut être simplement défini comme un réseau de capteurs sans fil (WSN) dans lequel les nœuds de capteurs sont mobiles, Les nœuds peuvent être mobiles en les attachant à un robot, à un être humain, à un animal, véhicule, etc., selon leur domaine d'application. Par exemple dans les applications militaires, les nœuds peuvent être attachés à des soldats ou des camions, ou bien dans d'autres cas, dans les applications de surveillance de l'habitat écologique, ils peuvent être attachés à des animaux pour suivre leurs mouvements.

MWSNs sont beaucoup plus polyvalents que les réseaux de capteurs statiques, car ils peuvent être déployés dans n'importe quel scénario et faire face aux changements rapides de la topologie. Ils peuvent exploiter la mobilité des nœuds pour recueillir le maximum d'informations sur l'environnement. En outre, les nœuds mobiles se déplacent dynamiquement en s'adaptant ainsi à l'évolution de l'environnement.

2.2 Les problèmes rencontrés par les réseaux de capteurs statiques

Au cours de ces dernières années, une grande quantité d'applications liées aux réseaux de capteurs tels que le suivi des objets, la surveillance médicale, et le transport intelligent ont été proposés. Un réseau de capteurs sans fil est généralement déployé avec des nœuds de capteurs statiques pour effectuer des missions de surveillance dans la région d'intérêt. Toutefois, en raison de l'évolution dynamique des événements et l'hostilité de l'environnement, un réseau de capteurs purement statiques pourrait faire face à de nombreux problèmes cités dans ce qui suit :

1. le déploiement initial du réseau ne garantit pas une bonne couverture de la zone d'intérêt et aussi ne garantit pas une bonne connectivité dans l'ensemble du réseau. Souvent les capteurs sont dispersés dans une zone hostile par avion ou en utilisant des robots. Cependant ce déploiement aléatoire des capteurs ne peut pas garantir la couverture de toute la zone surveillée et aussi peut résulter en un ensemble de sous réseaux déconnectés, même si un nombre important de nœuds est déployés. En outre, les changements dynamiques de la région d'intérêt et aussi l'existence d'obstacles rendent ce problème plus difficile à gérer.
2. Les capteurs sont alimentés par des batteries limitées en énergie. Quand certains nœuds meurent à cause de l'épuisement de leurs batteries, une perte de la couverture peut être induite. Aussi la mort d'un ou plusieurs capteurs peut affecter la connectivité du réseau. Cependant, dans beaucoup de scénario il est pratiquement impossible de recharger ou de remplacer ces nœuds par de nouveaux nœuds.
3. Un réseau de capteurs peut prendre en charge plusieurs missions dans diverses conditions. Par exemple, dans une application de suivi d'objet, un nombre suffisant de nœuds de capteurs doit être déployé le long de la piste de l'objet à suivre, tandis que dans une mission de détection dans une zone limitée il devrait y avoir des nœuds adéquats le long du périmètre prédéfini. Ces différentes exigences ne peuvent pas être satisfaites par le déploiement d'un grand nombre de nœuds de capteurs, étant donné

que l'approvisionnement pour toutes les combinaisons possibles des exigences de la mission pourrait ne pas être rentable.

4. Quelques applications des réseaux de capteurs sans fil peuvent nécessiter des capteurs sophistiqués (des capteurs coûteux). Par exemple dans les applications militaires, des capteurs de pression peuvent être déployés le long d'une frontière pour détecter une intrusion de l'ennemi. Toutefois, ces capteurs ne peuvent rapporter que quelques informations, ils ne peuvent pas décrire ce qui se passe réellement. Dans ce cas, des dispositifs de détection plus sophistiqués comme les caméras devraient être utilisés pour obtenir plus d'informations. Néanmoins, il est impossible d'équiper chaque nœud par une caméra du fait qu'ils sont nombreux.

En introduisant la mobilité à certains ou à tous les nœuds d'un réseau de capteurs, nous pouvons améliorer la capacité et la flexibilité du réseau en prenant en charge plusieurs missions et aussi traiter les problèmes mentionnés ci-dessus. Le réseau de capteurs est considéré comme un réseau ad hoc dans lequel les nœuds sont étendus avec des capacités de détection.

Un réseau de capteurs mobiles et un réseau ad hoc mobile (MANET) sont différents. En fait, la mobilité dans un réseau MANET est souvent arbitraire, alors que la mobilité dans un réseau de capteurs mobiles devrait être «intentionnelle». En d'autres termes, dans certaines applications, nous pouvons contrôler le mouvement des capteurs mobiles pour effectuer des missions différentes. Cependant, il existe des réseaux de capteurs mobiles avec une mobilité arbitraire.

2.3 Architectures des réseaux de capteurs mobiles

Les réseaux de capteurs mobiles peuvent être classés en une architecture à une, deux, ou trois couches :

- Architecture à une couche

Le réseau comprend un ensemble de dispositifs hétérogènes qui communiquent d'une manière ad hoc. Les dispositifs peuvent être mobiles ou fixes, mais communiquent tous sur le même réseau. A titre d'exemple les systèmes de navigation de base, tel que le système de localisation et de navigation a une architecture à une couche. Cette architecture est montrée dans la figure 2.1.

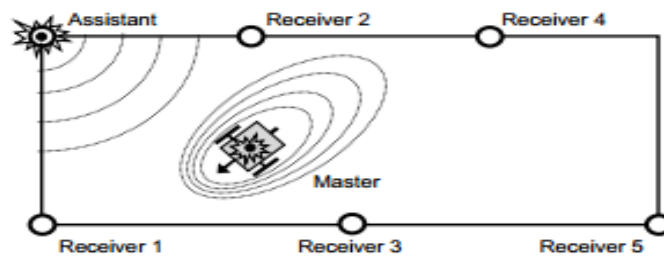


FIG.2.1 – L'architecture du système de navigation et de localisation

La région de détection est constituée d'un ensemble de nœuds récepteurs placés à des positions connues, aussi d'un nœud émetteur assistant fixe. Le nœud mobile, également désigné sous le nom d'émetteur maître, se déplace autour de la zone de détection, comme montré dans la figure ci-dessus.

- Architecture à deux couches

Cette architecture consiste en un ensemble de nœuds stationnaires et un ensemble de nœuds mobiles. Les nœuds mobiles forment un réseau superposé ou agissent comme des mules de données pour transférer les données dans le réseau. Le réseau superposé peut inclure les appareils mobiles qui ont la plus grande capacité de traitement, la plus grande portée de communication, et une large bande passante.

En outre, la densité du réseau superposé doit être de telle sorte que tous les nœuds seront connectés en permanence, sinon le réseau peut devenir disjoint. Quand le réseau est disjoint, les entités mobiles peuvent se positionner dans le but de rétablir la connectivité et assurer que les paquets de données atteignent leurs destinations.

- Architecture à trois couches

Dans cette architecture, un ensemble de nœuds de capteurs fixes passe les données à un ensemble de nœuds mobiles, qui ensuite transmettent ces données à un ensemble de points d'accès.

Ce réseau hétérogène est conçu pour couvrir de larges zones et être compatible, simultanément, avec plusieurs types d'applications. Prenons par exemple une application de réseau de capteurs qui surveille un parking pour savoir s'il y'a un espace disponible pour le stationnement. Le réseau de capteurs (première couche) diffuse la mise à jour des données de

disponibilité aux dispositifs mobiles compatibles (deuxième couche) tel que les téléphones portables ou PDA qui sont de passage. À son tour, le téléphone portable et/ou PDA transmet les données de disponibilités aux points d'accès (troisième couche) tel que les tours cellulaires. Par la suite, les données sont téléchargées dans un serveur de base de données centralisé. Les utilisateurs qui souhaitent trouver un espace de stationnement disponible peuvent alors accéder à la base de données.

La figure 2.2 montre ces trois architectures.

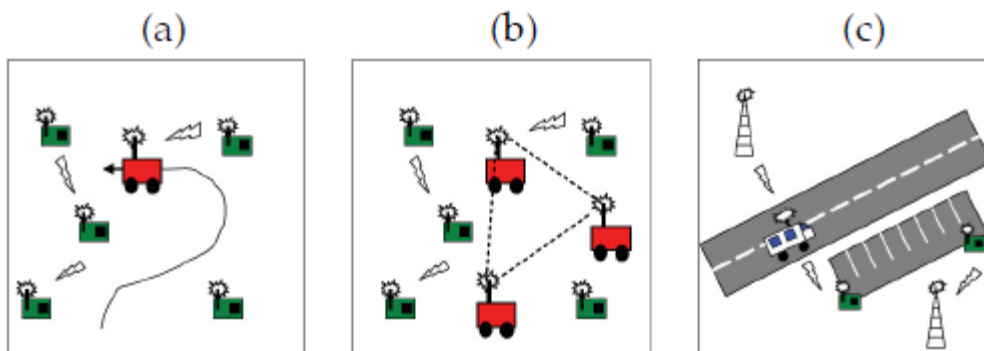


FIG.2.2 – Les différentes architectures d'un réseau de capteurs mobiles : (a) plane, (b) deux couches et (c) trois couches

2.4 Les différents rôles des nœuds dans un réseau de capteurs mobiles

Les réseaux de capteurs peuvent être caractérisés selon les rôles des nœuds dans le réseau :

- **Capteurs mobiles embarqués** : les nœuds mobiles embarqués ne contrôlent pas leurs propres mouvements, mais plutôt leur mouvement est contrôlé par des forces extérieures. Par exemple : quand ils sont attachés à un animal ou à un conteneur.
- **Les capteurs actionneurs mobiles** : les nœuds capteurs peuvent aussi avoir des capacités locomotives, qui leur permettent de bouger dans la région d'intérêt. Avec cette mobilité contrôlée, le déploiement du réseau peut se faire d'une manière exacte. Ainsi la couverture du réseau peut être maximisée et les phénomènes spécifiques peuvent être surveillés et suivis.
- **Les mules de données** : souvent, les nœuds capteurs ne peuvent pas être mobiles, mais ils nécessitent des dispositifs mobiles qui seront chargés de la collecte de leurs données et les ramener à la station de base. Ces entités mobiles sont appelées les mules de données.

Les mules de données n'ont pas généralement de contraintes énergétiques, ils peuvent recharger leurs batteries automatiquement.

- **Points d'accès** : Dans les réseaux clairsemés, ou quand un nœud tombe en panne dans le réseau, les nœuds mobiles peuvent se positionner pour maintenir la connectivité du réseau. Dans ce cas là ils se comportent comme des points d'accès.

2.5 Modèles de mobilité pour les réseaux sans fil mobiles

Dans les réseaux de capteurs mobiles, les nœuds se déplacent d'une manière qui se diffère d'une application à une autre. Afin de simuler les schémas de déplacement des nœuds de capteurs mobiles, les modèles de mobilité sont utilisés. Il est important de considérer le modèle de mobilité adapté à l'application.

Il existe deux types de modèles de mobilités:

1. **Modèles de mobilité entité / individuels** : dans ce type de mobilité, les mouvements des nœuds sont indépendants les uns des autres, tels que les modèles point de cheminement aléatoire (*Random Waypoint*), direction aléatoire (*Random direction*), marche aléatoire (*Random Walk*).
2. **Modèles de mobilité de groupe**: dans ce type de modèle les nœuds mobiles se déplacent dépendant les uns des autres comme les modèles : modèle du point de référence (Reference Point Group Mobility model), colonne, nomade, continue (pursue) et exponentielle corrélée. Le modèle de chemin (pathway), Manhattan, obstacle sont sous le modèle géographique restreint.

2.6 Les avantages de la mobilité

Dans de nombreux déploiements de réseaux de capteurs, une répartition optimale est inconnue jusqu'à ce que les nœuds de capteurs commencent à recueillir et à traiter les données. Avoir un déploiement optimal est souvent impossible sans l'intégration de la mobilité. Dans cette section, quelques avantages de l'ajout de la mobilité sont mentionnés.

- **Une durée de vie plus longue**

Le déplacement des capteurs rend la transmission plus dispersée et la gestion de l'énergie dépensée plus efficace. La mobilité permet d'éviter aux nœuds capteurs qui sont près de la passerelle ou la station de base de perdre vite leurs énergies.

Dans les réseaux clairsemé ou disjoints, ou quand un nœud statique meurt, les nœuds mobiles peuvent manœuvrer pour assurer une bonne couverture et une bonne connectivité dans le réseau. Ceci n'est pas possible avec les réseaux de capteurs statiques, dans lequel les données des nœuds morts ou déconnectés seraient tout simplement perdues. Par ailleurs, lorsque les stations de base du réseau sont stationnaires, les nœuds les plus proches de la station de base épuisent vite leurs énergies, parce qu'ils doivent transmettre plus de messages de données que les nœuds éloignés. En utilisant les stations de base mobiles, ce problème sera éliminé ainsi la durée de vie du réseau sera étendue.

- **Augmenter la capacité du canal**

Des expériences ont démontré que, si le nombre de puits mobiles augmente linéairement avec le nombre de capteurs, les gains de capacité du canal peuvent être de 3 à 5 fois plus que dans les réseaux de capteurs statiques. La mobilité permet également une plus grande capacité du canal de transmission et permet de maintenir l'intégrité des données en créant de multiples voies de communication. Elle permet aussi de réduire le nombre de saut parcouru par le message de données pour atteindre la destination.

- **Améliorer la couverture et le ciblage**

Généralement les réseaux de capteurs sont déployés d'une manière aléatoire, au lieu d'être déployé avec précision, ils sont généralement ramener à se déplacer pour une meilleurs couverture, ou pour être plus proche de la cible à surveiller.

Généralement le déploiement du réseau est déterminé par le type d'application, Les nœuds peuvent être placés dans une grille, au hasard, autour d'un objet d'intérêt, etc.

Dans de nombreuses situations, un déploiement optimal est inconnu jusqu'à ce que les nœuds de capteurs commencent la collecte et le traitement des données. Pour les déploiements dans les zones éloignées ou larges le repositionnement des nœuds est généralement irréalisable. Toutefois, lorsque les nœuds sont mobiles, le redéploiement devient possible. En fait, il a été montré que l'intégration des entités mobiles dans les réseaux de capteurs améliore la couverture et, par conséquent, l'utilité du déploiement des réseaux de capteurs sans fil. Ainsi,

Cela permet aux applications de détections de devenir plus polyvalentes. Par exemple, dans une application de surveillance des feux de forêt, les capteurs mobiles sont capables de maintenir une distance de sécurité du périmètre de feu, ainsi ils peuvent fournir des mises à jour pour les pompiers sur l'état de la zone en feu.

- **Améliorer les performances**

La plupart des réseaux Ad hoc peuvent être améliorés sur plusieurs points : la qualité des communications, la réduction du coût global et le temps nécessaire pour compléter une tâche, avoir une meilleure sécurité, et l'augmentation de la capacité du réseau.

L'aspect de la communication sans fil est de plus en plus important dans les systèmes multi-robots pour améliorer leurs performances globales. Un robot mobile peut avoir besoin des données des autres robots pour décider de son prochain mouvement. Le module de communication ne permet pas seulement la fusion des données recueillies par les robots mobiles, mais contribue également à développer une vue individuelle sur le réseau et l'environnement physique.

- **Une meilleure fidélité des données**

Le dernier avantage peut être obtenu en utilisant un nœud mobile pour transporter des données à un point prédestiné. Il est utile lorsque le canal sans fil est en mauvais état, ou si l'épuisement de l'énergie prématurée est possible (aussi appelé effet d'entonnoir). La réduction du nombre de sauts dus à la mobilité va augmenter la probabilité d'une transmission réussite.

2.7 Défis majeurs de la mobilité

Afin de se concentrer sur l'aspect de la mobilité des réseaux de capteurs sans fil, il est important de comprendre comment les hypothèses communes concernant les réseaux de capteurs statiques changent lorsque les entités mobiles sont introduites.

- **La Localisation**

Dans les réseaux de capteurs statiques, la position du nœud peut être déterminée une fois lors du déploiement initial du réseau. Cependant, dans un réseau de capteurs mobiles les nœuds doivent continuellement obtenir leurs positions puisqu'ils se déplacent dans la zone d'intérêt

, ceci exige plus de temps et plus d'énergie, ainsi que la disponibilité d'un service de localisation rapide.

- **Topologie dynamique**

La topologie est dynamique parce que les nœuds, en général, sont mobiles dans les réseaux de capteurs mobiles (MWSNs). Ainsi, de nouveaux protocoles de contrôle d'accès au support (MAC) et des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs mobiles sont nécessaires. Les Protocoles de routage traditionnels conçus pour les réseaux de capteurs statiques (*WSN*) décrivent la meilleure façon de router les messages à travers le réseau de sorte qu'ils seront plus susceptibles d'atteindre leurs destinations. Ces protocoles s'appuient généralement sur des tables de routage ou sur l'historique récent des itinéraires. Dans les topologies dynamiques, les données de la table deviennent rapidement obsolètes, et la découverte de route doit être réalisée à plusieurs reprises à un coût considérable en termes d'énergie, de temps et de bande passante. Heureusement, il y'a un domaine de recherche actif dédié au routage dans les réseaux mobiles ad hoc (MANET), et les réseaux de capteurs mobiles peuvent emprunter ces travaux.

- **La consommation d'énergie**

Les modèles de consommation d'énergie diffèrent considérablement entre les réseaux de capteurs statiques et les réseaux de capteurs mobiles. Pour les deux types de réseaux, la communication sans fil induit à un coût énergétique important et elle doit être utilisée de manière efficace. Cependant, les entités mobiles nécessitent une énergie supplémentaire pour la mobilité, et ils sont souvent équipés d'une réserve d'énergie beaucoup plus grande, où ils ont la capacité d'auto-chargement qui leurs permet de se brancher dans le réseau électrique pour recharger leurs batteries.

- **Mobilité des puits**

Dans les applications des réseaux de capteurs centralisées, les données sont transmises à une station de base, où elles peuvent être traitées en utilisant des méthodes gourmandes en ressources. Le routage des données et l'agrégation peuvent entraîner une surcharge significative. Certains réseaux de capteurs mobiles utilisent des stations de base mobiles, qui traversent la région de détection pour recueillir les données, ou se positionnent de façon à ce que le nombre de saut de transmission soit minimisé pour les nœuds de capteurs.

2.8 Conclusion

Beaucoup de recherches ont été effectuées dans le domaine des réseaux de capteurs statiques, cependant vu leurs limites ces derniers demeurent inefficaces pour plusieurs types d'applications. L'intégration de la mobilité dans les réseaux de capteurs mobiles peut améliorer la capacité et la flexibilité du réseau pour prendre en charge plusieurs missions et pour traiter les problèmes associés aux réseaux statiques.

La mobilité fait apparaître des problèmes nouveaux par rapport aux réseaux de capteurs fixes comme le changement de topologie, le routage et les conditions de la propagation radio qui sont variables en fonction de la position. Les solutions conçues pour des nœuds fixes ne peuvent pas donc être utilisées directement dans un environnement mobile. Elles engendreraient une consommation d'énergie élevée et une mauvaise qualité de service. De nouvelles solutions doivent être trouvées pour s'adapter aux limitations qui existent, ainsi qu'aux facteurs qui rentrent en jeu lors de la conception. Dans ce chapitre nous avons présenté les architectures proposées pour les réseaux de capteurs mobiles. Nous avons discuté également les modèles de mobilité existantes pour les réseaux de capteurs sans fil et les problèmes rencontrés par ce type de réseau. Et nous avons terminé par la présentation de deux applications proposées pour les réseaux de capteurs mobiles.