

# Collecte et agrégation de données dans un réseau de capteurs sans fil

El hadji Serigne Mamour DIOP  
*Université Gaston Berger de Saint-Louis, Sénégal*  
*Université de Picardie Jules Verne, Amiens, France*  
[serignemamour.diop@gmail.com](mailto:serignemamour.diop@gmail.com)

## Résumé

Du développement fulgurant des systèmes micro-électromécaniques (MEMS) combiné aux récentes avancées des technologies de communication sans fil ont émergé de minuscules dispositifs dotés de faibles ressources en calcul, mémoire et communication : les capteurs sans fil. C'est à travers une collaboration avec plusieurs capteurs, opérant de manière autonome, que s'érige une infrastructure sophistiquée de communication et de traitement connue sous le nom de réseau de capteurs. Notre contribution tout au long de cette thèse consiste à étudier une architecture virtuelle sur le réseau physique avec quelques fonctionnalités associées telles que la formation, la maintenance, le routage, l'agrégation des données, la sécurité, etc.

**Mots clés :** réseau de capteurs sans fil, structuration, clustering, collecte de données, agrégation de données

# Introduction

Du développement fulgurant des systèmes micro-électromécaniques (MEMS)<sup>1</sup> combiné aux récentes avancées des technologies de communication sans fil ont émergé de minuscules dispositifs dotés d'une certaine intelligence : les capteurs sans fil. Un capteur est garni de compétences en calcul, en mémoire et en communication aussi limitées fussent-elles dû en grande partie au facteur taille (la miniaturisation). Ses opérations de base demeurent l'acquisition des données relatives à son environnement de déploiement, leur traitement en local, et leur acheminement pour l'analyse et la prise de décision. Pris individuellement un capteur est peu significatif. C'est à travers une collaboration avec plusieurs capteurs, opérant de manière autonome et communiquant entre eux via des transmissions à faible portée, que s'érige une infrastructure sophistiquée de communication et de traitement connue sous le nom de réseau de capteurs.

Un réseau de capteurs sans fil (en Anglais "Wireless Sensor Network" ou WSN), est composé d'une quantité astronomique d'unités de traitements embarquées, les capteurs, déployés densément dans une région d'intérêt. Son objectif principal est la collecte d'un ensemble de paramètres de l'environnement entourant les nœuds capteurs, telles que la température ou la pression atmosphérique, afin de les acheminer vers des points de traitement. Les WSN ont su attirer un nombre croissant d'industriels, vu leur réalisme et leur apport concret. En effet, le besoin d'un suivi continu d'un environnement donné est assez courant dans diverses activités de la société. Les processus industriels, les applications militaires de tracking, le monitoring d'habitat, ainsi que l'agriculture de précision ne sont que quelques exemples d'une panoplie vaste et variée d'applications possibles du suivi continu offert par les WSN. Grâce à ce potentiel riche en applications, les réseaux de capteurs ont su se démarquer de leur origine ad hoc et attirer de grandes firmes à travers le monde, telles que Sun, IBM, Intel et Philips.

Si leurs perspectives d'utilisation sont claires et attrayantes, les contraintes et propriétés inhérentes à ce type de réseau en font un vaste champ de recherche tant pour la conception que pour la définition de protocoles appropriés. En effet, dans certaines applications, les capteurs sont densément disséminés par largage aéronef dans des zones parfois hostiles : volcans, champ de bataille, au fond des océans, zones radioactives, etc. Par conséquent aucune intervention humaine n'est envisageable et l'unique source d'énergie dont dispose les capteurs – leur batterie – se trouve ainsi irremplaçable. Il devient alors nécessaire de remédier à des mécanismes d'autogestion du réseau afin de maximiser sa durée de vie sans pour autant enfreindre son efficacité. Notre travail consiste ainsi à construire une structure virtuelle sur le réseau physique considéré avec un ensemble de fonctionnalités associées. C'est à travers cette infrastructure qu'on assiste à la mise au point de protocoles ultra légers et efficaces en énergie allant de la formation à la maintenance, du routage à l'agrégation de données.

Le reste de notre document s'articule comme suit. Un premier chapitre est consacré à la description générale des réseaux de capteurs. Il expose l'anatomie d'un capteur, définit le concept de WSN, ses domaines d'applications et les facteurs inhérents à sa réalisation. La position du problème de la structuration dans un WSN et la présentation de l'architecture

---

<sup>1</sup> MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) : « microsystème comprenant un ou plusieurs éléments mécaniques, utilisant l'électricité comme source d'énergie, en vue de réaliser une fonction de capteur et/ou d'actionneur avec au moins une structure présentant des dimensions micrométriques; et la fonction du système est en partie assurée par la forme de cette structure. » Wikipédia

virtuelle constituent notre deuxième partie. Une esquisse des principales contributions envisagées dans cette thèse termine ce document.

## 1. Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

### 1.1 Qu'est ce qu'un capteur?

Un capteur sans fil est un dispositif électronique de taille extrêmement réduite, peu onéreux, autonome et à ressources très limitées : faible capacité de calcul, mémoire, communication et énergie. Sa tâche primordiale est : *i*) la détection d'évènements, donc l'acquisition des données relatives à son environnement de déploiement; *ii*) le traitement sur les informations collectées; *iii*) leur acheminement à travers un réseau. L'existence de plusieurs modèles commercialisés sur le marché n'influe en rien sur l'anatomie d'un capteur, (cf. figure 1) qui se résume principalement en quatre unités [1] :

- ✓ *Unité d'acquisition* (ou de captage): elle assure la collecte des informations de l'environnement local (pression, séisme, intensité de la luminosité, vibrations, humidité, température, etc.) et leur transformation en grandeurs numériques compréhensibles par l'unité de traitement;
- ✓ *Unité de traitement* : elle est composée d'un processeur généralement associé à une unité de stockage (mémoire). Elle est chargée d'exécuter les protocoles de communication, et peut également effectuer des semi traitements sur les données prélevées (compression, filtrage, agrégation, etc.);
- ✓ *Unité de communication* : se fondant essentiellement sur les technologies sans fils à faible portée<sup>2</sup>, ce module est garant des émissions et réceptions de données via un médium sans fil;
- ✓ *Unité d'énergie* : c'est la source d'alimentation de tous les autres composants du capteur. Il s'agit d'une batterie limitée et irremplaçable après déploiement (pour la plupart des applications).

En fonction des applications, des modules supplémentaires peuvent intervenir :

- ✓ *Unité de localisation* : elle permet la détermination des coordonnées exactes de l'emplacement géographique des capteurs après déploiement. Il s'agit généralement d'un système GPS (Global Position System ou système de positionnement par satellite);
- ✓ *Unité de mesure* : elle mesure la distance ou l'angle avec un capteur voisin;
- ✓ *Générateur d'énergie* : par exemple l'utilisation de photopiles permettant de convertir l'énergie lumineuse en courant électrique pour remédier aux limites énergétiques du capteur.

---

<sup>2</sup> Zigbee [IEEE 802.15.4], Bluetooth [IEEE 802.15.1], WiFi [IEEE 802.11]

Pris individuellement un capteur est peu significatif. C'est à travers une collaboration avec plusieurs capteurs que s'érige une infrastructure sophistiquée de communication et de traitement connue sous le nom de réseau de capteurs.

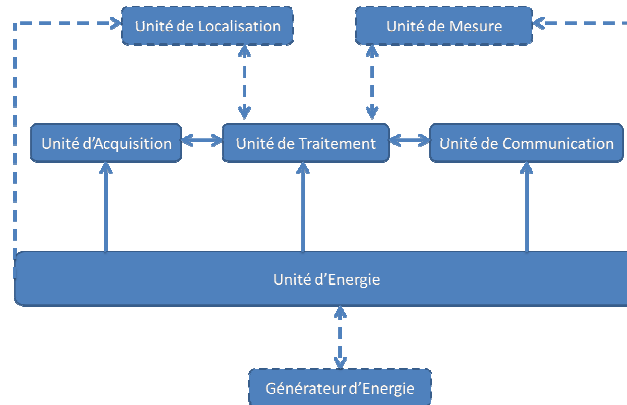


Figure 1 : Anatomie d'un capteur.

## 1.2 Réseau de capteurs

Un réseau de capteurs sans fil (ou WSN pour Wireless Sensor Network), application dérivée des réseaux ad hoc, se compose essentiellement d'un grand nombre de nœuds capteurs – des centaines voire des milliers – et d'un ou plusieurs points de collecte appelés *puits* (ou *sink*). Il est conçu dans le but de prélever, de traiter et de transmettre des données environnementales vers le (ou les) puits par l'intermédiaire d'une architecture multi-sauts et de manière autonome. Les informations collectées sont ensuite acheminées du (ou des) puits à un ordinateur central « Gestionnaire des tâches » via Internet ou par satellite dans le but de les analyser et prendre des décisions. La figure 2 symbolise l'architecture générale d'un réseau de capteurs.

Selon les interactions entre le réseau de capteurs et le (s) puits, une subdivision en quatre classes d'applications s'impose : applications orientées temps (*time driven*), orientées événements (*event driven*), orientées requêtes (*query driven*) et les applications hybrides. Dans la première classe, l'acheminement des données s'effectue périodiquement des nœuds au puits. Cette période peut aller de quelques secondes à quelques heures, voire des jours. Les applications de type “surveillance”, dont l'optique est d'avoir une information régulière de la zone surveillée, en sont la parfaite illustration. Le modèle *event driven*, caractérisé par la communication de données uniquement à la détection d'un événement spécifique, préconise les applications à vocation contrôle d'événements critiques où la rapidité d'acquisition de l'information est capitale. Dans le troisième modèle, destiné aux applications adaptées à l'utilisateur, l'envoi des données ne peut s'effectuer qu'à la demande. En d'autres termes, des requêtes sont adressées du centre de contrôle au réseau avec une précision de l'information d'intérêt. Cependant, les capteurs nécessiteront une mémoire flash beaucoup plus importante que la normale pour le stockage des mesures locales. Enfin, la classe hybride regroupe, à elle seule, toutes les fonctionnalités des modèles précités.

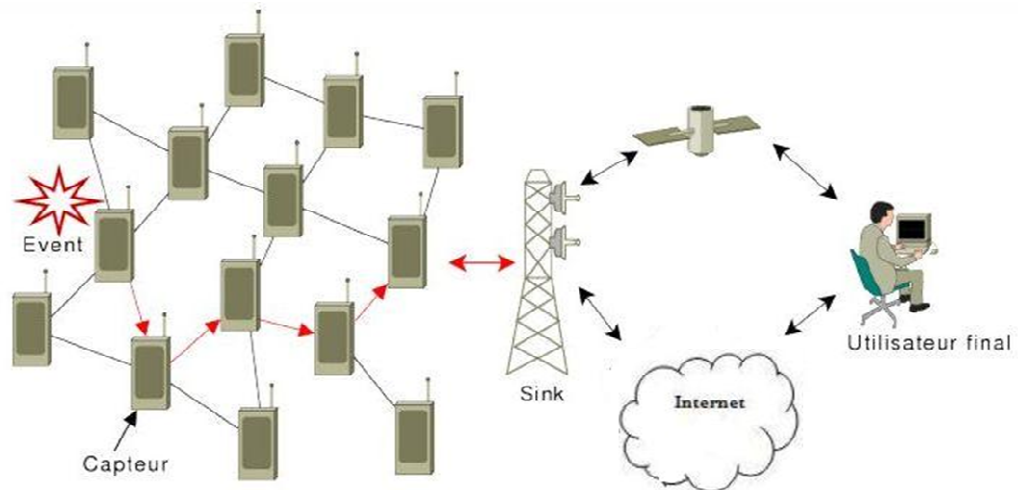


Figure 2 : Architecture générale d'un réseau de capteurs

Afin d'effectuer des analyses sur les données collectées individuellement par les nœuds capteurs et prendre les décisions adéquates, le centre de contrôle a besoin de communiquer avec le réseau de capteurs. Par conséquent, l'interfaçage du réseau avec le monde extérieur devient une nécessité. Pour cela plusieurs techniques peuvent être adoptées dont la plus simple consiste à l'usage d'un ou plusieurs nœuds puits déployés à côté des capteurs, figure 3.a. Dans ce cas de figure, les informations des différents nœuds, optionnellement agrégées, sont transmises par multi-sauts aux nœuds sink faisant office de passerelle et chargés de les acheminer au « gestionnaire des tâches ». D'autres méthodes peuvent être envisagées dans le cas de certaines applications où le déploiement de nœuds puits à l'intérieur du réseau s'avère impossible. Une solution peut être le recours à des passerelles mobiles (par exemple un hélicoptère ou un avion survolant la zone de déploiement, figure 3.b) collectant les informations d'un ensemble de nœuds désignés sous le nom de *nœuds relais* (*reporting nodes*). L'usage de transmission laser à une constellation de satellites constitue une autre clef à ce problème.

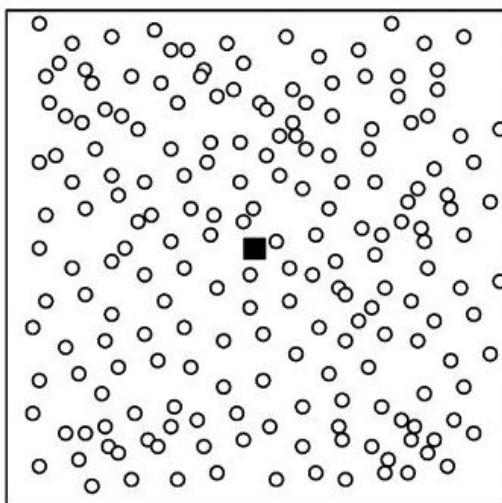


Figure 3.a : Un réseau de capteurs avec passerelle mobile et externe

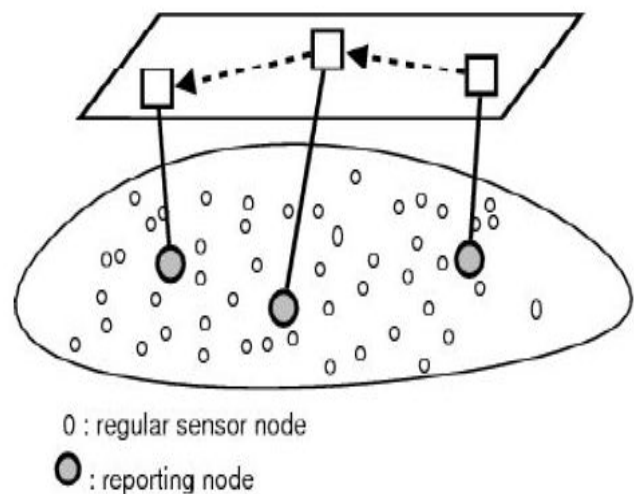


Figure 3.b : Un réseau de capteurs avec une passerelle statique et interne

### 1.3 Domaines d'application

Les avantages procurés par les réseaux de capteurs sans fil – miniaturisation, facilité de déploiement, adaptabilité, faible coût, communication sans fil – ont fait de ces derniers un véritable pôle d'attraction, source d'émergence de plusieurs applications concrètes, différentes les unes des autres en termes de besoins et de caractéristiques [1].

- ✓ *Domaine militaire* : la plupart des applications du domaine militaire favorise l'appui des forces dans les champs de bataille et la prévention contre les attaques. Parmi ces applications figurent la surveillance des déplacements des troupes ennemies, la détection de substances dangereuses (armes chimiques, biologiques ou radiations), la reconnaissance, la communication, la poursuite de cible, etc.
- ✓ *Domaine commercial* : les capteurs sans fil ont également envahi le monde du commerce en procurant des applications telles que le contrôle environnemental des bâtiments (température, humidité, etc.) offrant une meilleure gestion des ressources à moindres frais. A cela s'ajoute l'intégration des capteurs dans les musées scientifiques dans l'optique d'un apprentissage plus rapide de la part des visiteurs.
- ✓ *Domaine environnemental* : le déploiement de capteurs dans la nature peut d'une part contribuer à l'intervention beaucoup plus rapide et efficace lors de la détection de catastrophes naturelles (séismes, inondations, feux de forêt, etc.), et d'autre part à la surveillance de l'état d'un champ agricole (processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches) et à la traque des mouvements d'animaux. En outre, les WSN peuvent être également utilisés dans la prévention des risques industriels tels que la fuite de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.).
- ✓ *Domaine médical* : les capteurs sans fil suscitent un intérêt capital dans le domaine de la médecine. En effet ils peuvent intervenir dans la suivi des données physiologiques d'un patient (tension artérielle, battements du cœur, reconstitution d'un muscle, etc.) pour faciliter le diagnostic de certaines maladies; la détection de comportements anormaux (chute d'un lit, choc, cri, ...) pour des personnes dépendantes; l'aide à la localisation des médecins et patients au sein d'un hôpital.
- ✓ *Domaine architectural* : ce domaine, relevant de la domotique, favorise la transformation des bâtiments en environnements intelligents capables d'automatiser certaines tâches domestiques. Parmi ces tâches nous pouvons citer : extinction de la lumière et arrêt de la musique lorsque la chambre est vide; ajustement de la climatisation et du chauffage en fonction de la température; déclenchement de l'alarme lors de la détection d'une intrusion, etc.

Si leurs perspectives d'utilisation sont claires et attrayantes, les contraintes et propriétés inhérentes à ce type de réseau en font un vaste champ de recherche tant pour la conception que pour la définition de protocoles appropriés.

### 1.4 Contraintes et caractéristiques

Les techniques conçues pour les réseaux *ad hoc* ne sont guère adaptées aux réseaux de capteurs, application à part entière de ces derniers. La conception de WSN passe alors par la

prise en compte des contraintes et propriétés inhérentes à ce type de réseau. Les principaux facteurs et contraintes influençant la conception de protocoles et de techniques pour les WSN, se résument comme suit :

- ✓ *Contraintes matérielles* : De coût minime, les capteurs sont des dispositifs électroniques de taille extrêmement réduite. Par conséquent, ils sont très limités en ressources : faible capacité de traitement, de stockage, de communication et d'énergie. Leur déploiement dans des environnements parfois hostiles (volcans, champ de bataille, au fond des océans, zones radioactives, etc.) nécessite une ténacité et une autonomie manifestes.
- ✓ *Passage à l'échelle* : Un réseau de capteurs peut être constitué de l'ordre d'un million de nœuds capteurs, donc de cardinalité plus importante qu'un réseau *ad hoc*. Cette densité du réseau se traduit par une poussée des transmissions inter-nodales nécessitant ainsi de la part du sink une mémoire suffisante pour le stockage des données collectées.
- ✓ *Tolérance aux fautes* : Au cours du temps, il peut arriver que des capteurs soient dans l'incapacité de réaliser les tâches requises par défaillance ou inhibition. Ce problème peut être dû à un manque d'énergie des nœuds, à un phénomène physique ou à des interférences. Cet état des nœuds ne doit en aucun cas altérer le fonctionnement du réseau, c'est le principe de la tolérance aux fautes. La tolérance aux fautes est l'aptitude à maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruption aucune due aux défaillances éventuelles des nœuds [1].
- ✓ *Dynamacité du réseau* : A la différence des réseaux *ad hoc*, la mobilité des nœuds demeure un facteur négligeable à la dynamique de la topologie d'un réseau de capteurs. Cette dynamique résulte principalement *i)* de l'extinction des capteurs après épuisement de leur batterie; *ii)* de la densification du réseau par ajout de nœuds supplémentaires après déploiement; *iii)* des processus d'économie d'énergie par mise en veille des nœuds.
- ✓ *Consommation d'énergie* : L'unique source d'énergie d'un capteur reste sa batterie, non renouvelable dans la plupart des applications, dû à l'hostilité du milieu et à la cardinalité importante du réseau. Elle alimente, à elle seule, toutes les unités du capteur dont les plus « gourmandes » demeurent les modules de communication et de traitement. Par conséquent, la durée de vie d'un capteur repose essentiellement sur la durée de vie de sa batterie, affectant ainsi celle du réseau. La durée de vie d'un réseau de capteurs est définie comme l'intervalle de temps s'écoulant du déploiement des nœuds à l'expiration de l'énergie du premier nœud.

Appelés à coopérer, à collaborer sans intervention extérieure dans l'optique de produire durant une période étendue les informations acquises, les nœuds capteurs doivent pouvoir s'organiser. Une structuration du réseau s'impose alors.

## 2. Structuration d'un réseau de capteurs

### 2.1 État des lieux

Un WSN est composé d'une forte cardinalité de minuscules dispositifs – les capteurs – disséminés densément de manière déterministe ou aléatoire, dans une zone d'intérêt dans le but de recueillir des informations. Dans le premier cas de figure – déploiement déterministe – les nœuds sont placés à des endroits précis, ainsi le routage s'effectue sur des chemins prédéterminés. Notre attention se focalise plus sur le déploiement aléatoire. En effet, les capteurs sont éparpillés par voie aérienne dans un environnement pour la plupart du temps hostile, donc aucune intervention humaine envisageable. L'unique source d'énergie dont ils disposent, leur batterie, se trouve ainsi non renouvelable. Si la dynamique de la topologie et la tolérance aux fautes caractérisent ce type de réseau, il n'en demeure pas moins que la mort d'un nombre important de nœuds, par manque d'énergie, ne pourrait qu'engendrer des pertes de communication, et par la suite l'annihilation du réseau. Il reste alors nécessaire de remédier à des mécanismes de conservation d'énergie pour la maximisation de la durée de vie du réseau tout en préservant l'efficacité de ce dernier. En outre, la faible portée du médium de communication impose aux nœuds de procéder par multi-sauts pour l'acheminement des données vers le puits. Cependant l'absence d'infrastructure établie, l'ignorance de la structure globale du réseau et les exigences inhérentes aux réseaux de capteurs font défaut quant à la conception d'algorithmes efficaces en énergie, avec une faible complexité en délai, en espace mémoire occupé et en nombre de messages échangés. Ainsi, face à ce problème, quelle est la meilleure solution à envisager ? L'auto-organisation (ou encore structuration).

Dans le sens commun du terme, un réseau auto-organisé fait allusion à la capacité d'adaptation d'un réseau face à la dynamique de la topologie de manière localisée ou distribuée. La littérature regorge de publications faisant état de ce point de vue. Directed Diffusion [2] est un protocole de propagation de données, favorisant l'usage d'un ensemble de chemins pour le routage d'information, avec possibilité d'agrégation des données à travers ces chemins. Le puits diffuse un intérêt sous forme de requête, afin d'interroger le réseau sur une donnée particulière. Ces routes, établies de façon dynamique, peuvent être apparentées à une infrastructure de routage et d'agrégation de données. Une autre illustration est proposée dans [3] où les capteurs, par usage de mécanismes de découverte, établissent dynamiquement des liens de communication sécurisés avec leur voisinage. Pris dans leur ensemble, ces liens définissent une infrastructure de communication sécurisée. Cependant, les méthodes proposées ne sont appropriées qu'à un protocole spécifique, par exemple la découverte de routes, et ne proposent aucune solution quant à l'extension pour d'autres protocoles.

Notre vision de l'auto-organisation est plus vaste. La notion d'auto-organisation fait référence à l'organisation d'un réseau, sans intervention avec une entité extérieure, s'appuyant uniquement sur les interactions locales, et de manière complètement distribuée en vue d'émerger une structure globale virtuelle. C'est sur la base de cette structure logique que des protocoles efficaces de communication ultralégers allant de l'auto-configuration au routage, de la collecte et l'agrégation de données à la sécurité, etc. peuvent être développés, tirant ainsi partie de l'auto-organisation fournie. Notre étude se fonde essentiellement sur l'architecture virtuelle proposée dans [4, 5], véritable illustration de cette définition.



## **2.2 Architecture virtuelle de réseaux de capteurs**

### **2.2.1 Hypothèses**

Le modèle de réseau envisagé dans cette étude est composé d'un unique nœud puits et d'une quantité astronomique de capteurs anonymes et asynchrones (une dizaine de milliers) déployés densément et aléatoirement dans la gamme de transmission du sink. Aucune intervention humaine n'est considérée après le déploiement et aucun capteur n'a initialement connaissance ni de sa propre position, ni de la structure du réseau. Afin de remédier aux contraintes énergétiques des capteurs, donc maximiser la durée de vie du réseau, deux moyens ont été utilisés. Le premier consiste à doter les capteurs d'un générateur d'énergie puisant les ressources de l'environnement de déploiement grâce à la lumière, aux champs magnétiques, etc. La mise en veille des nœuds capteurs la plupart du temps et leur réveil pendant un court intervalle de temps sous le contrôle d'une horloge locale caractérisent la seconde solution. C'est durant sa période d'activation qu'un capteur s'engage dans l'exécution des différentes opérations de base telles que la détection, le traitement et la communication. Alors que le mode veille ne fournit aucun bilan énergétique (quantité nulle), chaque opération exécutée par un capteur consomme une quantité d'énergie connue et fixe.

Seul un nombre restreint de nœuds capteurs comptent le sink dans son voisinage à un saut, d'où le recours au routage multi-sauts pour l'acheminement des données collectées. Pour des raisons de simplicité le sink considéré est un nœud central, bien qu'en réalité cette supposition ne demeure pas nécessaire. Il demeure l'unique équipement à disposer suffisamment d'énergie et de puissance de transmission pouvant atteindre l'ensemble des capteurs répartis dans la zone d'intérêt. En sus de son rôle de passerelle avec le monde extérieur, le puits reste garant de l'exécution des opérations nécessaires de formation et de maintenance du réseau. Ce modèle fait du puits un point de défaillance puisque toutes les opérations nécessaires à la formation du réseau sont commanditées par ce dernier. Nous suggérons, dans la pratique, l'usage d'une collection de nœuds sink dans le réseau pour la tolérance aux fautes. C'est sur la base de ces hypothèses qu'a émergé une architecture virtuelle sur le réseau physique. Cette dernière renferme un système de coordonnées dynamiques, une structure en grappes (clustering) et un modèle de communication pour l'acheminement des informations collectées individuellement par les nœuds capteurs.

### **2.2.2 Le système de coordonnées dynamiques**

Quelques applications des réseaux de capteurs requièrent, hormis les données brutes récoltées par les capteurs, la position géographique exacte de ces derniers dans l'environnement de déploiement. Les applications de surveillance d'incendie, où la connaissance du point de départ d'un feu est un atout majeur pour les secouristes, en sont une parfaite illustration. Ce phénomène de positionnement, plus connu sous l'appellation de *localisation*, définit l'aptitude des nœuds capteurs à déterminer leur position géographique une fois disséminés dans une région d'intérêt. Une solution triviale revient à doter tous les capteurs d'un système de localisation, en l'occurrence le seul à être entièrement opérationnel de nos jours : le GPS (Global Positioning System). Cependant, face à la taille extrêmement réduite des nœuds capteurs, à leur coût par unité, à leur budget énergétique et à leur forte cardinalité dans le réseau, cette voie semble semer d'embûches. D'autres issues plus prometteuses assaillent la littérature. Ces dernières se fondent sur l'existence de quelques nœuds ancres ayant une parfaite connaissance de leur position grâce notamment au système

GPS. Ainsi, tout nœud parvient à déterminer, de manière approximative, ses coordonnées géographiques à la réception de messages de position d'au moins trois nœuds ancres.

D'autres applications, par contre, ne nécessitent guère de connaissance sur les coordonnées exactes des nœuds dans le réseau. Néanmoins, la plupart s'appuient sur des coordonnées virtuelles pour parvenir à l'auto-structuration du réseau. C'est en sens que notre architecture virtuelle adopte un système de coordonnées sur le réseau physique. Le puits, comme énoncé dans les hypothèses de départ, constitue le seul nœud à disposer d'une puissance de transmission pouvant couvrir l'ensemble de la zone d'intérêt. Cette habileté est en partie assurée par les antennes du sink, pouvant effectuer des transmissions directionnelles et omnidirectionnelles. Dans notre étude, nous supposons que le puits est à même de réaliser  $m$  diffusions omnidirectionnelles et  $n$  directionnelles. Le résultat du système de coordonnées dynamiques est alors une subdivision de la région d'intérêt en  $m$  couronnes (*coronas*) et  $n$  secteurs (*wedges*) définis comme suit :

- ✓ **Couronnes** : elles déterminent les  $m$  cercles concentriques centrés au nœud sink, de rayon  $r_1 < r_2 < \dots < r_m$ , conséquence des  $m$  émissions omnidirectionnelles.
- ✓ **Secteurs** : ce sont les  $n$  quartiers d'angles également centrés au nœud puits, résultante des  $n$  transmissions directionnelles.

L'adoption du système de coordonnées dynamiques conduit à une topologie structurée où le réseau physique se trouve partitionné en groupes de nœuds appelés *clusters*.

### 2.2.3 La structure en grappes ou clustering

Une des importantes approches pour traiter la structure d'un réseau de capteurs est le clustering. Il permet la formation d'un backbone virtuel qui améliore l'utilisation des ressources rares telles que la bande passante et l'énergie. L'agrégation de nœuds en clusters permet de réduire la complexité des algorithmes de routage, d'optimiser la ressource medium en la faisant gérer localement par un chef de cluster (le clusterhead), de faciliter l'agrégation des données, de simplifier la gestion du réseau, d'optimiser les dépenses d'énergie, et enfin de rendre le réseau plus scalable. La littérature fourmille de protocoles de clustering vue l'intérêt vital de cette méthode dans les réseaux de capteurs. Cependant, il est important de souligner que tous ces protocoles impliquent virtuellement d'identifier de manière implicite ou explicite chaque nœud dans le réseau.

Notre structure en grappes, émergeant de la formation des  $m$  couronnes et  $n$  secteurs du sink, définit un ensemble de  $m \times n$  clusters. Un cluster, dans notre étude, désigne l'intersection d'une couronne et d'un secteur, d'où plusieurs capteurs peuvent appartenir à un même cluster. Aidé par le nœud puits, chaque capteur a mémorisé ses coordonnées durant la formation du réseau logique. Les capteurs d'un cluster donné partagent les mêmes coordonnées  $(x, y)$ , en d'autres termes la couronne  $x$  et le secteur  $y$ . Notre protocole de clustering, émanant de l'adoption du système de coordonnées dynamiques sur le réseau, demeure alors ultra léger. Il n'exige ni identifiant (capteurs anonymes), ni échange de messages, ni synchronisation de la part des capteurs : gain énergétique considérable. La figure 4 est une illustration de notre architecture virtuelle sur un notre réseau considéré.

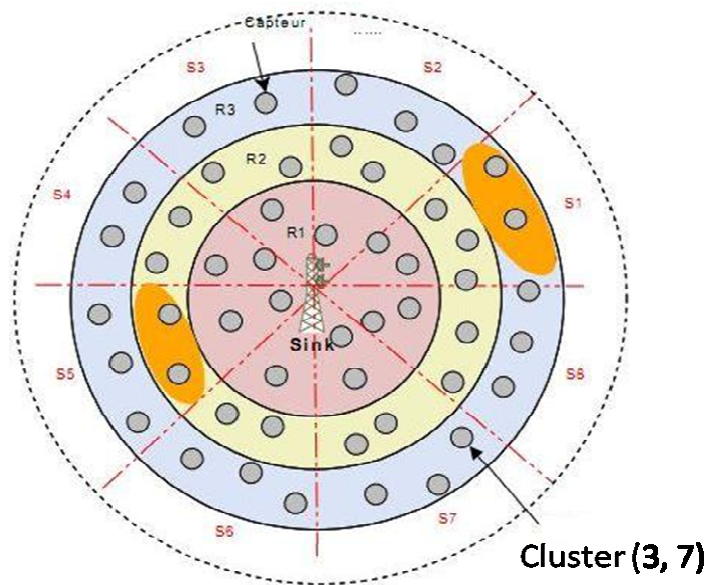


Figure 4 : Structure virtuelle

Notre architecture virtuelle adoptée sur le réseau physique procure de manière simple et naturelle un support de routage efficace en énergie pour l'acheminement des données des clusters au nœud sink et inter-clusters (cf figure 5). Elle fournit également un mécanisme d'agrégation de données destiné à augmenter la durée de vie du réseau en réduisant la consommation de ressources des capteurs telles que batterie d'énergie. Cependant, dans la réalité, il peut arriver que des clusters soient vides. Ce concept est inconcevable par considération de l'hypothèse non réaliste dans [4, 5] : la densité de déploiement assure la connectivité du réseau.

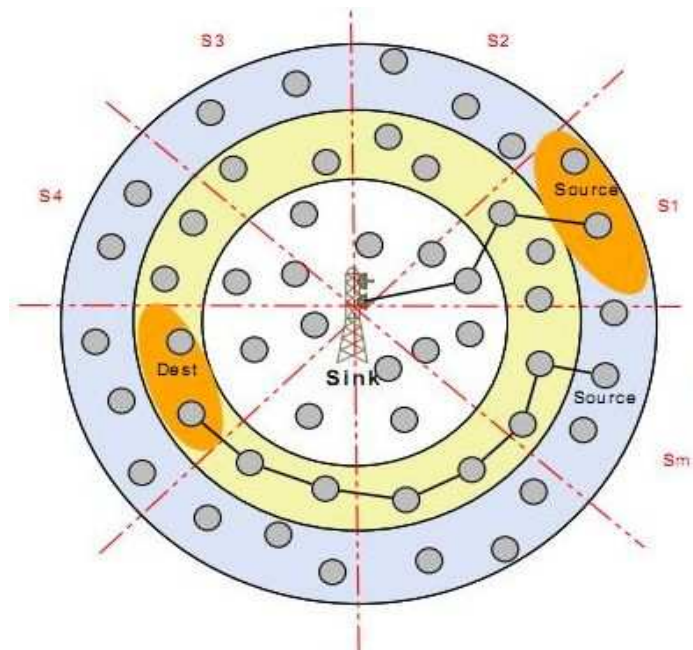


Figure 5 : Illustration du routage des données

### 3. Contributions

Partant de l'hypothèse réaliste pour définir l'architecture virtuelle et que chaque capteur y apprenne ses coordonnées, nous nous apercevons que des clusters peuvent alors être vides : dépourvus de capteurs. Le cluster (1, 1) de la figure 6 en est une parfaite illustration. Comment alors router les données collectées vers le sink ? Cette constatation rend le modèle caduc, par conséquent les supports de routage et d'agrégation de données également.

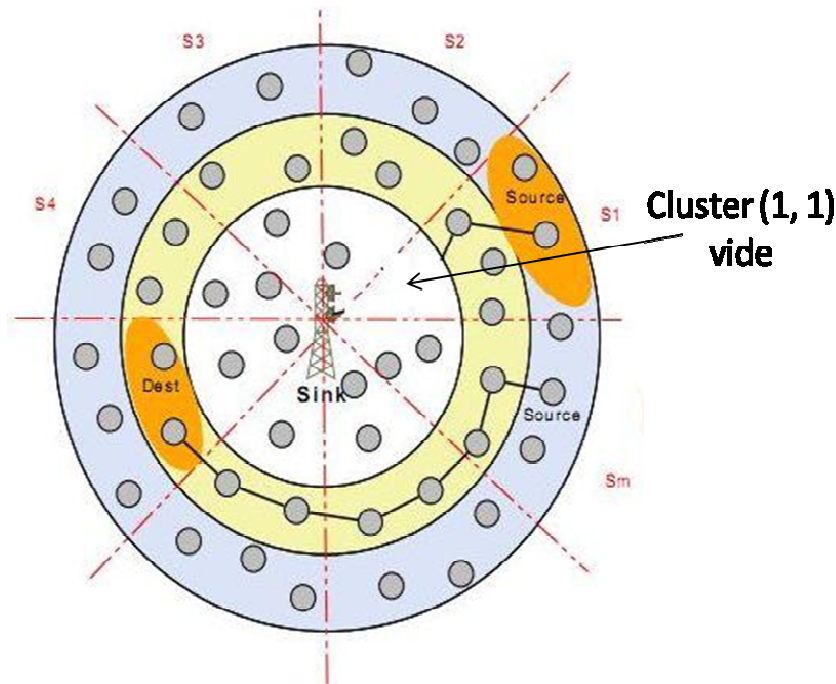


Figure 6 : Détection de clusters vides

Notre contribution s'élabore comme suit :

- ✓ Définir un algorithme de détection de clusters vides permettant au puits de prendre conscience des zones dénuées de capteurs.
- ✓ Considérer un réseau hétérogène de capteurs-actionneurs afin d'y définir des protocoles qui pourraient guider les actionneurs vers les clusters vides.
- ✓ Redéfinir les protocoles de routage des données collectées.
- ✓ Redéfinir les mécanismes d'agrégation des données.
- ✓ Mettre au point des protocoles simples pour sécuriser les communications et les données.
- ✓ Envisager des techniques de cryptographie pour la sécurisation du réseau?

Pour la validation des protocoles qui auront été mis au point, nous prévoyons beaucoup de simulations avec OMNET++.

## Références

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramanian, E. Cayirci. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4): 393-422, 2002; *IEEE Wireless Communications*, 9(1): 40-48, 2002.
- [2] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, F. Silva. Directed diffusion for wireless sensor networking. *IEEE/ACM Transaction on Networking*, 11(1): February, 2003.
- [3] K. H. Chan, A. Perrig, D. Song. Random key pre-distribution schemes for sensor networks. *In Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy*, Berkeley, California, May 2003.
- [4] S. Olariu, A. Wadaa, L. Wilson, M. Eltoweissy. Wireless sensor networks: Leveraging the virtual infrastructure. *IEEE Network*, 18(4):51-56, 2004.
- [5] A. Wadaa, S. Olariu, L. Wilson, M. Eltoweissy, K. Jones. Training a Wireless Sensor Network. *Mobile Networks and Applications* 10, 151-168, 2005.