

# **CHAPITRE 1 :**

## **Généralité sur**

### **les réseaux de capteurs sans fils**

#### **1.1. Introduction:**

Les développements récents des technologies dans le domaine des communications sans fil, ont engendré l'apparition des réseaux de capteurs sans fil (RCSF ou Wireless Sensor Network). Un tel réseau est constitué d'un grand nombre de dispositifs physiques appelés capteurs ou nœuds capables de relever, de traiter et de transmettre des informations de l'environnement, dans lequel ils sont déployés, à un ou plusieurs points de collecte.

#### **1.2. Historique d'évolution des réseaux de capteurs sans fil :**

La technologie des réseaux de capteurs sans fil est devenue l'une des merveilleuses technologies dans le 21ème siècle ; les réseaux de capteurs ont montré leur impact sur notre vie quotidienne. CHONG, et al [07] ont parlé de trois générations des noeuds de capteurs.[1]

le 1ere generation 1800/1900 : de taille d'une grande boite de chaussure avec Quelques Kg et la duree de vie de batterie Grosse .

la 2eme generation 2000/2003: de taille de Taille d'une boite de cartes avec Quelques grammes de poids et la duree de vie batterie est faible .

la 3eme generation a partir de 2010 : de taille de particule de poussière avec un poids Négligeable et le batterie solaire .

Les capteurs traditionnels mesurant une grandeur physique, sont présents depuis des décennies dans des domaines comme l'industrie, l'aéronautique ou l'automobile. Ils sont en général reliés à la base de traitement filaire mais la nouveauté des nouveaux réseaux de capteurs est qu'ils ont la possibilité de communiquer par ondes radio (Wifi ou Zig Bee) avec d'autres capteurs proches.

La miniaturisation du matériel et la multiplication des moyens de connexions associées à l'augmentation des capacités de calcul et de mémoire en informatique ont permis aux réseaux de capteurs d'exister, et cela à une échelle très large au point d'accomplir les tâches les plus complexes pour l'humain. Ainsi, on peut les retrouver désormais dans l'armement, le nucléaire, le sauvetage, la sauvegarde de l'environnement, la médecine, etc.

La recherche continue pour perfectionner le fonctionnement des futurs réseaux de capteurs. De nombreux travaux sont effectués pour résoudre les trois difficultés majeures auxquelles sont confrontés les capteurs : l'énergie, la puissance d'émission, la capacité de stockage et de calcul.

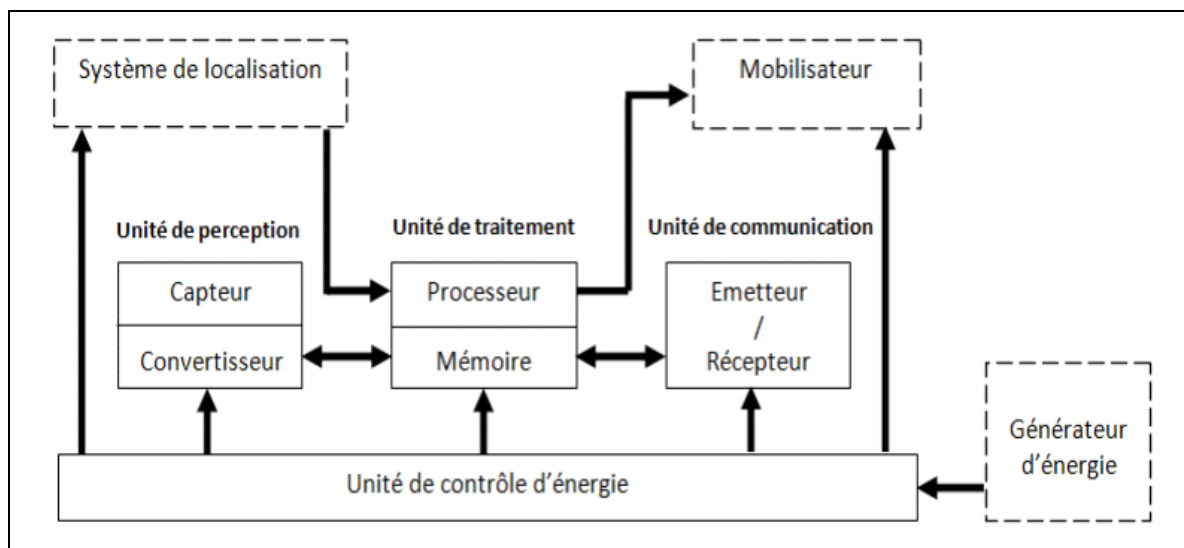
### 1.3. Généralités sur les RCSFs

#### 1.3.1. Définition et architecture d'un nœud capteur

Un capteur est un petit appareil autonome capable d'effectuer de simples mesures sur son environnement immédiat, telles que la température, les vibrations et la pression. Cet appareil est augmenté de capacités de calcul et de communication ainsi que de batteries lui conférant une autonomie[1].

#### 1.3.2. Architecture matérielle

Un capteur est composé de quatre éléments de base : une unité de perception, de traitement, de communication et une unité de contrôle d'énergie (batterie)[2].



**Figure 1.1.** Architecture d'un nœud capteur sans fil.

- **L'unité de perception (unité de captage) :**

L'unité de perception est composée généralement de deux sous-unités : le capteur lui-même et un convertisseur Analogique/Numérique (ADC pour Analog to Digital Converter). Les signaux analogiques mesurés par le capteur sont convertis en signaux numériques (digitaux) et sont transmis à l'unité de traitement [2].

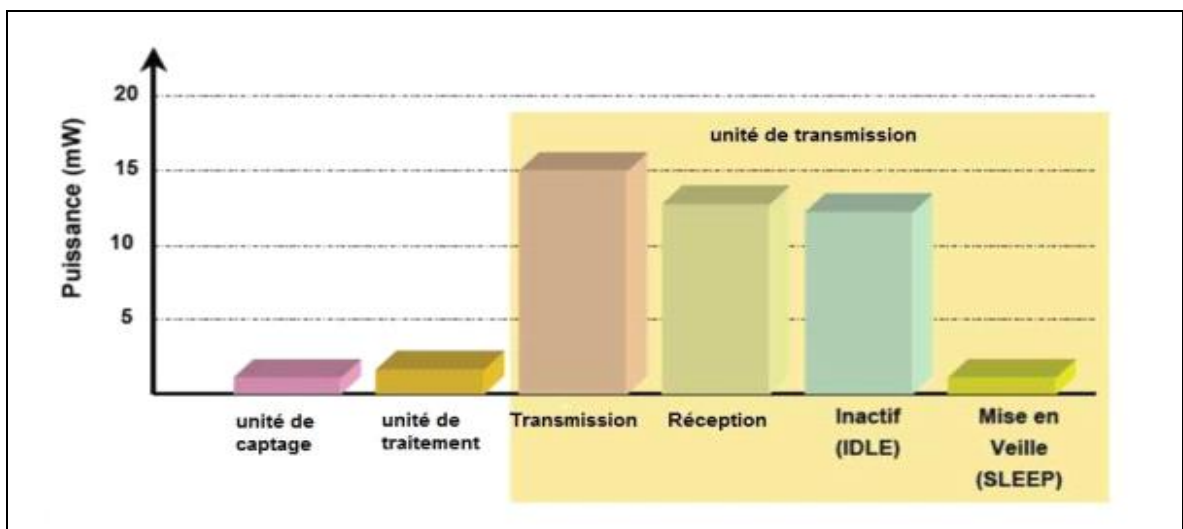
- **L'unité de traitement**

L'unité de traitement, comprend un processeur associé généralement à une petite unité de stockage et fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les

micro-capteurs (TinyOS [3], par exemple). Cette unité est chargée d'exécuter les protocoles de communication qui permettent la collaboration entre les capteurs du réseau. Elle peut aussi analyser les données captées pour alléger la tâche des stations puits. De plus, l'unité de traitement nécessite un stockage pour minimiser la taille des messages transmis et cela en appliquant un traitement local et une agrégation de données [4].

- **Unité de contrôle d'énergie**

Elle constitue l'un des systèmes les plus importants. Elle est responsable de répartir l'énergie disponible entre les différentes unités et de réduire les dépenses, par exemple en mettant en veille les composants inactifs. La figure 1.2 résume la consommation d'énergie dans les différentes unités d'un capteur [5,6].



**Figure 1.2.** Consommation d'énergie dans un nœud capteur .

On remarque que l'unité de transmission est très gourmande en consommation d'énergie. En effet la transmission d'un seul bit sur une distance de 100m consomme approximativement la même énergie que l'exécution de 3000 instructions. Toutefois, la mise en veille de la radio réduit de manière significative cette consommation. Dépendant du domaine d'application, un capteur peut contenir des modules supplémentaires [7]; notamment :

- Un système de localisation (GPS).
- Un générateur d'énergie : panneau solaire, éolienne.
- Un mobilisateur.

### 1.3.3. Architecture logicielle

Afin qu'un capteur puisse récolter et transmettre des données environnementales, il doit disposer de cinq sous-systèmes software de base:

- **Le système d'exploitation**

Le système d'exploitation open source TinyOS [9, 4], basé sur le langage NesC , est conçu spécialement pour les capteurs sans fil. Ce système respecte une architecture reposant sur une association de composants. La bibliothèque de composants de TinyOS est particulièrement complète puisqu'elle inclut des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données. En s'appuyant sur un fonctionnement évènementiel, TinyOS propose à l'utilisateur une gestion très précise de la consommation du capteur et permet de mieux s'adapter à la nature aléatoire de la communication sans fil entre les interfaces physiques.

- **les drivers de perception**

Ce sont les modules software qui contrôlent les fonctions de base de perception du capteur. Les configurations appropriées doivent être chargées dans le capteur [1].

- **les drivers de communication**

Ce module software contrôle la synchronisation, l'encodage du signal, la modulation. Ce code est implémenté dans la couche physique [1].

- **Processeur de communication**

Ce code contrôle les fonctions de communication: le routage, la maintenance de topologie, l'accès au média radio, décryptage...[1].

- **Intergiciel de traitement de données**

Ce code englobe le traitement des données et toutes les applications de base qui sont supportées au niveau du nœud (perception, sauvegarde de donnée...) [1].

#### **1.4. Différent types de capteurs**

Une large gamme de plateforme de micro capteurs est disponible. Leurs architectures et leurs tailles différentes selon les types d'applications auxquelles elles sont destinées. Parmi les modèles les plus courants, on trouve les capteurs commercialisés par Crossbow[10] : MICA2, TelosB, MICAz, Imote2 ,IRIS ,et autres. Les différents composants de chaque modèle ainsi que leurs caractéristiques sont décrits dans le tableau 1.1.

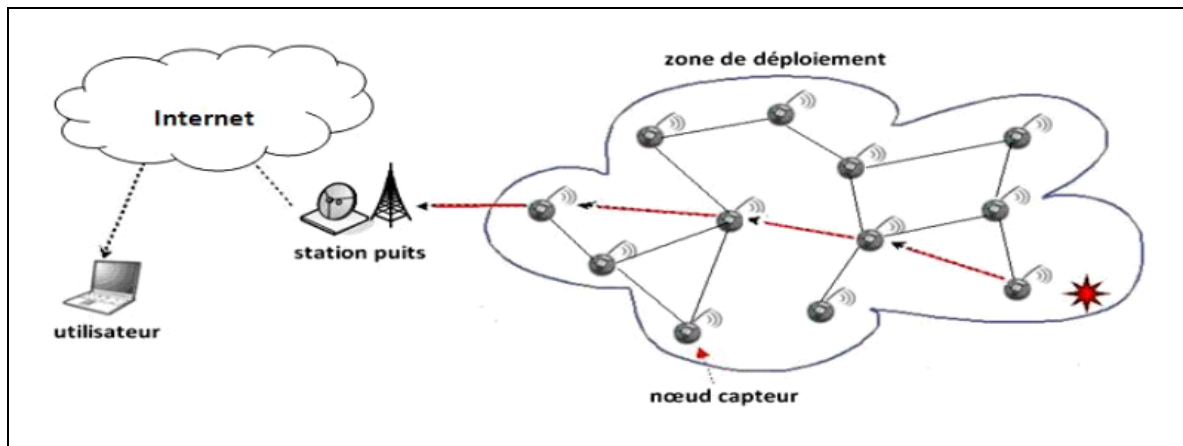
Propriété type	Module radio	Processeur	RAM	Flash	EEPROM	Taille	Batterie
Telos B	<ul style="list-style-type: none"> <li>•TPR 2420CA</li> <li>•IEEE 802.15.4</li> <li>•250KB/S</li> <li>•Bande de 2.4MHz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TI MSP430</li> <li>• 8Mhz</li> </ul>	10KB	48 KB	16KB	65x 1 x6 (mm <sup>3</sup> )	2x AA
Imote 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>•TI CC 2420</li> <li>•IEEE 802.15.4</li> <li>•250 KB/S</li> <li>•16 Canaux sur une bande 2.4-2.48 GHz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intel PXA 271</li> <li>• Fréquence variable :13 a 416</li> </ul>	256 KB	32MB	32KB	36 x48x9 (mm <sup>3</sup> )	3xAAA 3.2a 3.3 V
MICA2	<ul style="list-style-type: none"> <li>•IEEE 802.15.4</li> <li>•38.4KB/S</li> <li>•4-50 Canaux sur une bande 868-916MHz</li> </ul>	AT mega 128L MPR400 CB	4KB	128KB	4KB	58x32x7 (mm <sup>3</sup> )	2x AA 2.7a 3.3 V
IRIS	<ul style="list-style-type: none"> <li>•IEEE 802.15.4</li> <li>•250Kb/s</li> <li>•Bande 2.4-2.48 GHz</li> </ul>	AT mega 1281 XM 2110CA	8KB	128KB	4KB	58x32x7 (mm <sup>3</sup> )	2x AA 2.7a 3.3 V
MICAz	<ul style="list-style-type: none"> <li>•250 Kb/s</li> <li>•Bande 2.4-2.48 GHz</li> </ul>	AT meaga 128L	4KB	128KB	4KB	58x32x7 (mm <sup>3</sup> )	2x AA 2.7 a 3.3 V

Tableau 1.1 :Les Différents types de capteurs.

## 1.5. Définition et classification d'un RCSF

### 1.5.1. Définition d'un RCSF

Un RCSF est un type spécial de réseau ad-hoc défini par un ensemble coopérant de capteurs déployés dans une zone géographique appelée zone de captage ou zone d'intérêt, afin de surveiller un phénomène quelconque et de récolter des données d'une manière autonome. Les capteurs utilisent une communication sans fil (Zig Bee ou Wifi) pour acheminer les données captées avec un routage multi-sauts vers un nœud considéré comme "point de collecte", appelé station de base ou nœud puits. Cette dernière peut être connectée à une machine puissante via internet, réseaux GPRS ou par satellite (Figure 1.3). L'utilisateur peut adresser ses requêtes aux capteurs en précisant l'information d'intérêt [10].



**Figure 2.3.** Architecture d'un réseau capteur sans fil

Le tableau suivant montre une comparaison entre les réseaux de capteurs et les réseaux Ad-Hoc :

Réseaux de capteurs sans fil	Réseaux Ad-hoc
Objectif bien ciblé	Objectif général en communication
Noeuds en collaboration	Chaque noeud a son propre objectif
Flot de données « many to one »	Flot «any to any»
Très grand nombre de nœuds	Nombre limité de noeuds avec notion de ID
Energie comme facteur déterminant	Nombre limité de noeuds avec notion de ID
Communication broadcast	Communication point à point

**Tableau 1.2.** Comparaison entre capteurs et A-hoc.

### 1.5.2. Classification des RCSFs

La conception d'un réseau de capteurs sans fil est orientée application. En conséquence, les architectures et les protocoles de ces réseaux varient selon leur utilité. Cependant, les réseaux de capteurs ont des propriétés en commun et peuvent être classifiés en catégories basées sur plusieurs critères.

Selon la distance d'un nœud à une station de base, le réseau de capteurs peut être à un seul saut ou à multi-sauts. Dans un réseau à un seul saut, tous les capteurs transmettent leurs données directement vers une station de base. Tandis que dans un réseau à multi-sauts, les données envoyées transitent par des nœuds intermédiaires qui exécutent alors une fonction de routage.

En se basant sur la densité des capteurs, un réseau peut être classifié en réseau agrégeant ou non agrégeant. Dans ce dernier, toutes les données d'un nœud seront envoyées à une destination, le volume des calculs au niveau des nœuds intermédiaires est alors relativement

petit. Cependant, la charge du trafic dans le réseau entier peut augmenter, ce qui engendre plus de consommation d'énergie dans les communications. Dans un réseau agrégeant, les nœuds ont moins de densité et suffisamment de capacité, ils sont organisés en clusters (groupes) dont chacun est géré par un cluster head (chef de groupe). Ce dernier recevra des informations à partir de ses voisins et les transmettra vers une station de base.

Un réseau de capteurs peut être statique ou dynamique. Ce dernier est constitué d'un ensemble de capteurs mobiles évoluant dans un environnement statique. Dans la plupart des cas, le but d'un tel réseau est l'exploitation de zones inaccessibles ou dangereuses[12], et les nœuds jouent à la fois le rôle de capteurs et d'actionneurs. Un réseau statique est constitué de capteurs fixes servant à la surveillance d'occurrence des événements sur une zone géographique [13, 14]. Dans ce cas, le réseau n'effectue que la surveillance, les données mesurées sont transmises aux stations puits qui sont chargées de mettre en œuvre les actions nécessaires. Ces stations peuvent être reliées, à l'aide d'une connexion filaire par exemple, à un autre réseau [12].

Un réseau de capteurs peut être homogène ou hétérogène. Dans la classe hétérogène, les nœuds du réseau ont des caractéristiques distinctes telles que la capacité de calcul, la portée de transmission, le rayon de capture et autres[15]. Par contre, dans un réseau homogène tous les capteurs sont identiques en termes de ressources énergétiques et de complexité matérielle et logicielle [7]. Il existe des nœuds avec une faible complexité matérielle et d'autres avec une grande complexité. Comme dans le cas des clusters, les nœuds dans un cluster ont le même niveau d'énergie et ils transmettent des données vers leur cluster head. Ce dernier doit agréger les données avant de les transmettre vers une station distante.

## 1.6. Les domaines d'application

La miniaturisation, l'adaptabilité, le faible coût et la communication sans fil permettent aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs domaines d'applications. Ils permettent aussi d'étendre le domaine des applications existantes. Parmi ces domaines où ces réseaux se révèlent très utiles et peuvent offrir de meilleures contributions, on peut noter la surveillance, le militaire, la santé, le scientifique, l'industriel, le médical, le climatique, l'environnemental etc. Voici quelques exemples d'applications potentielles dans ces différents domaines :

- **Applications militaires**

Comme dans le cas de la majorité des technologies, le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques

qui rendent ce type de réseaux un outil adéquat dans un tel domaine. Comme exemple d'application dans ce domaine, on peut penser à un réseau de capteurs déployé sur un endroit stratégique ou difficile d'accès, comme les zones infectées.

- **Application à la surveillance**

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure. Le déploiement d'un réseau de capteurs de mouvement peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance.

- **Application environnementale**

Les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour surveiller les changements environnementaux. Ils servent à déterminer les valeurs de certains paramètres à un endroit donné, comme par exemple : la température, la pression atmosphérique, etc. En dispersant des noeuds capteurs dans la nature, on peut détecter des événements tels que des feux de forêts, des tempêtes ou des inondations. Ceci permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours. Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques, par exemple en déclenchant le processus d'arrosage lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole.

- **Applications médicales**

Dans le domaine de la médecine, les réseaux de capteurs peuvent être 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 (surveillance de la glycémie, détection de cancers, etc.). Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que : la tension artérielle, battements du coeur, à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière. Les données physiologiques collectées par les capteurs peuvent être stockées pendant une longue durée pour le suivi d'un patient pour une ultérieure décision médicale.

- **La domotique**

Le déploiement des capteurs de mouvement et de température dans les futures maisons dites intelligentes permet d'automatiser plusieurs opérations domestiques telles que : la lumière qui s'éteint et la musique qui se met en état d'arrêt quand la chambre est vide, la



climatisation et le chauffage s'ajustent selon les points multiples de mesure, le déclenchement d'une alarme par le capteur anti-intrusion quand un intrus veut accéder à la maison.

- **Applications commerciales**

Il est possible d'intégrer des noeuds capteurs au processus de stockage et de livraison. Le réseau pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison. Il devient alors possible pour un client qui attend la réception d'un paquet, d'avoir un avis de livraison en temps réel et de connaître la position actuelle du paquet. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs.

- **Applications dans le domaine sportif**

L'évolution des réseaux de capteurs est utilisée de plus en plus dans le domaine sportif, à savoir les systèmes de surveillance, les systèmes de calcul de trajectoires (comme dans le tennis), systèmes de détection d'erreurs d'arbitrage (comme dans le football indiquent si le ballon a franchi la ligne de but) .

## 1.7. Caractéristique et contraintes des RCSF

La conception des réseaux de capteurs est influencée par de nombreux facteurs et représentent la base de la conception de protocoles ou d'algorithmes pour les réseaux de capteurs. Il existe plusieurs caractéristiques dans les RCSF dont nous citons les plus importantes [11] :

- **Durée de vie du réseau**

C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où l'énergie du premier nœud s'épuise. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années.

- **Bande passante limitée**

Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les noeuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s. Un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes.

- **Média du transport**

Dans un réseau de capteurs, la communication multi sauts entre les noeuds est réalisée avec des liens sans fil à l'aide de media optique, infrarouge ou radio. La plus part des réseaux de capteurs utilisent des circuits de communication à radio fréquence grâce à leur faible coût ainsi que leur facilité d'installation [12].

- **La topologie du réseau**

Elle est en constante évolution à cause du changement de l'état d'activité des capteurs (actif, mise en veille et passif). Il faut que les capteurs soient capables d'adapter leur fonctionnement afin de maintenir la topologie souhaitée. On distingue généralement trois phases dans la mise en place et l'évolution d'un réseau :

- **Déploiement**

Les capteurs sont soit répartis de manière déterministe soit de manière aléatoire lancés en masse depuis un avion, par exemple.

- **Le passage à l'échelle**

La plupart des protocoles sont conçus pour des réseaux de capteurs d'une grande taille. Cependant, ces protocoles sont dits efficaces si les performances des réseaux ne doivent pas chuter d'une manière drastique quand le nombre de capteurs augmente dans le réseau.

- **La consommation d'énergie**

L'économie d'énergie est une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. En effet, la recharge des sources d'énergie est souvent trop coûteuse et parfois impossible. Il faut donc que les capteurs économisent au maximum l'énergie afin de pouvoir fonctionner.

- **L'auto-configuration**

Les réseaux de capteurs sont généralement déployés aléatoirement dans des zones d'intérêt hostiles. Par conséquent, aucune intervention humaine ne peut être requise pour assurer leur organisation. L'auto-configuration de ces réseaux s'avère nécessaire pour leur bon fonctionnement.

- **Topologie dynamique**

Les capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire et le changement d'état des capteurs entre actif et veille rendant ainsi, la topologie du réseau fréquemment changeante.

## **1.8. problème de la couverture dans les RCSFs**

Le problème de couverture est centré autour d'une question fondamentale : " comment un certain nombre de capteurs assurent la surveillance d'une zone d'intérêt donnée?" [16,17]. La couverture est une mesure de la qualité du service (QoS) de la fonction de surveillance fournie par un réseau de capteurs [18,19]. Le but est d'avoir tout les points physiques de la zone d'intérêts dans le rayon de capture d'au moins un capteur [19].

### **1.8.1. Couverture de zone d'intérêt**

La couverture de la zone d'intérêt est composée de l'union de toutes les zones de couverture des nœuds du réseau [19].

### 1.8.2. Degré de couverture

selon les exigences et l'importance des applications implantées dans WSN, le degré (niveau) de couverture peut se diviser en deux types: couverture simple (1- couverture) et couverture multiple (k-couverture).

#### 1.8.2.1. Couverture simple

Dans les applications les moins sensibles telles que la surveillance des champs agricoles, nous pouvons concevoir des protocoles de couverture tels que chaque point dans la zone d'intérêt soit surveillé par un seul capteur, dans ce cas on parle de la 1-couverture ou de couverture simple [20].

#### 1.8.2.2. Couverture multiple

Dans les applications sensibles telles que les applications militaires ou liées à la sécurité, il est nécessaire d'assurer la couverture de chaque point dans la zone d'intérêt par plus d'un capteur pour permettre la tolérance aux fautes. Dans ce cas, on parle de la k-couverture ou de couverture multiple [21,22,23].

### 1.8.3. Type de problème de couverture dans RCSF

A la base de la nature de l'objet à surveiller, on distingue trois classes de couverture dans les réseaux de capteur [24], ces sont :

#### 1.8.3.1 Couverture de zone

S'appelle aussi la couverture de surface où l'objectif principal du réseau est de surveiller une région donnée [25,26], c.à.d la zone d'intérêt représente comme une région tel que tout point de cette région est couvert par au moins un capteur. La figure 1.4 montre un exemple où des capteurs sont déployés aléatoirement sur une zone rectangulaire pour la couvrir. Les cercles représentent les rayons de surveillance des capteurs, tout point de la zone est couvert par au moins un capteur.

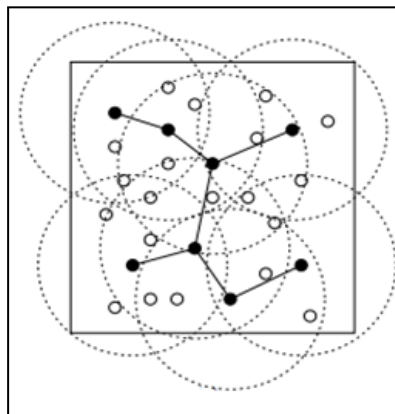


figure 1.4. la couverture de zone

### 1.8.3.2. Couverture de point

S'appelle aussi couverture de cible .dans ce type de couverture, on déploie des capteurs pour surveiller un ensemble de points spécifiques (cibles), dont la position géographique est connue [27,28,29]. Comme la figure 1.5 montre qu'un ensemble de cibles (carre) couvert par des capteurs (point noir).

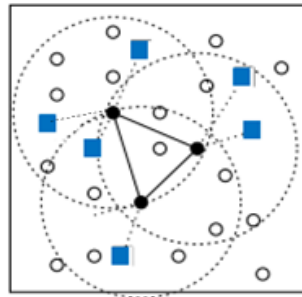


figure 1.5. la couverture de point

### 1.8.3.3. Couverture de frontière

Pour couvrir une partie de la zone d'intérêt (région protégée), il n'est pas nécessaire d'avoir tous les points de la zone du déploiement couverts, on a besoin seulement de couvrir le périmètre de cette région pour diminuer des intrus par exemple, c'est le problème de la couverture de frontière (barrière) [30]. Il existe plusieurs protocoles pour ce type de couverture [31,32]. Comme la figure 1.6.

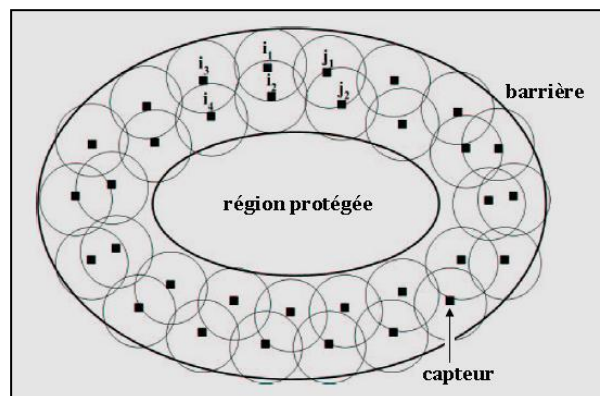


figure 1.6. la couverture de frontiere

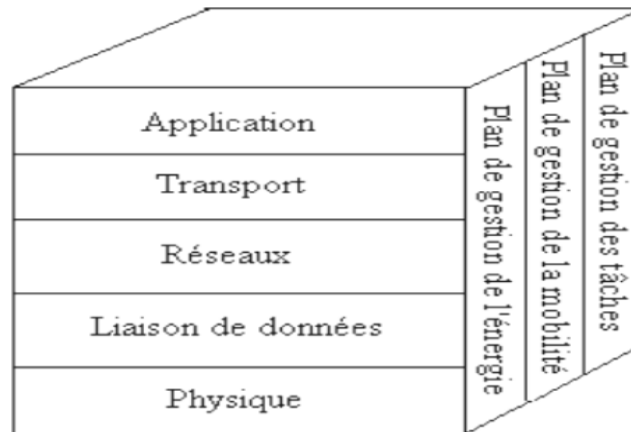
## 1.9.Communication dans les RCSFs

Dans les réseaux de capteurs, les nœuds sont déployés dans un environnement sans infrastructure, n'ayant aucune information sur la topologie globale même locale du construit. Pour cela, les capteurs doivent graduellement établir l'infrastructure de communication durent une phase d'initialisation. Cette infrastructure doit leurs permettre de

répondre aux requêtes venant des sites distants, d'interagir avec l'environnement physique et de transmettre les données captée via une communication multi-sauts.

### La pile protocolaire

La pile protocolaire utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs du réseau comprennent cinq couches est illustrée par la figure (1.7)[12].



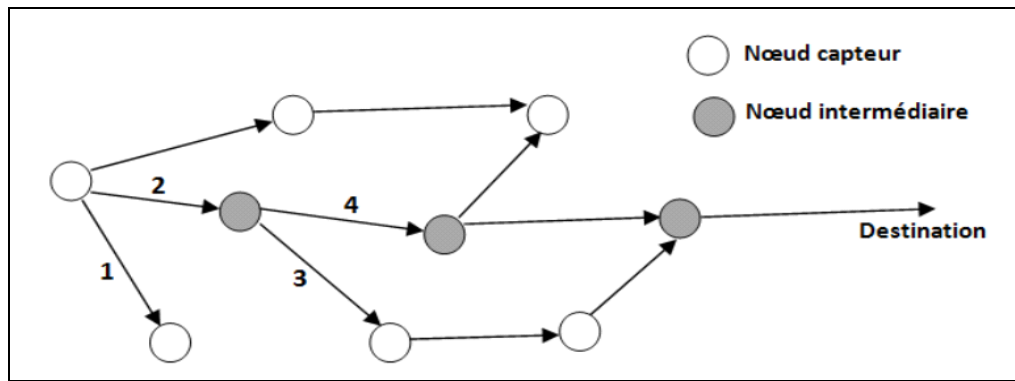
**Figure 1.7.** La pile protocolaire d'un réseau de capteurs.

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

## 1.10. Types de communication

En général, deux types de nœuds sont identifiés logiquement ; les nœuds qui principalement transmettent leurs propres données capturées (nœuds capteurs) et les nœuds qui transmettent les messages aux autres nœuds du réseau (nœuds de relais). Les données captées sont acheminées depuis les nœuds sources jusqu'aux nœuds destinataires à travers les nœuds intermédiaires, créant ainsi une topologie multi-sauts.

Comme illustré dans la figure1.8, cette organisation logique implique quatre types de communication :



**Figure.1.8.** Les types de communication dans un réseau de capteurs.

La communication d'un nœud capteur avec un autre nœud capteur : ce type de communication directe est employé pour des opérations locales, par exemple pendant le processus de clusterisation (c'est l'organisation du réseau en groupes de capteurs) [35].

La communication d'un nœud capteur avec un nœud intermédiaire : les données captées sont transmises d'un nœud capteur à un nœud intermédiaire. Ce type de communication est souvent unicast.

La communication d'un nœud intermédiaire avec un nœud capteur : les requêtes et les messages de signalisation sont souvent multicast. Ils sont diffusés par les nœuds intermédiaires pour atteindre immédiatement un sous-ensemble de nœuds.

La communication d'un nœud intermédiaire avec un nœud intermédiaire : la communication entre ces nœuds est dans la plupart du temps unicast [36].

Dans les quatre types de communication, l'énergie est une ressource critique qui fait de la consommation une métrique primaire à considérer. De nombreuses techniques d'optimisation, parfois en opposition les unes aux autres, sont étudiées pour minimiser les dépenses énergétiques et augmenter la durée de vie du réseau.

## Conclusion

Les progrès connus récemment dans le domaine des technologies sans fil, ont permis l'apparition des réseaux de capteurs. Les propriétés de ce type de réseaux en terme de flexibilité, coût réduit, et facilité de déploiement offrent de nombreuses possibilités de développement dans divers domaines. Par ailleurs, l'un des problèmes majeurs des réseaux de capteurs est la couverture qui a pour objectif de surveiller une zone ou un ensemble de cibles le plus longtemps possible. Ce chapitre a été axé sur la présentation des concepts fondamentaux de ce type de réseaux et du problème de la couverture.



## CHAPITRE2

### Etat de l'art sur les travaux existants

#### Introduction :

La couverture est un problème fondamental dans les réseaux de capteurs sans fil dans la mesure où elle détermine la façon dont un ensemble de capteurs assurent la surveillance d'une zone géographique.

Il existe deux types de couverture; la couverture de surface où l'objectif est de surveiller une zone donnée et la couverture de point dont la tâche du réseau consiste à couvrir un ensemble de cibles.

Les protocoles de couverture visent à mettre dans l'état passif les capteurs redondants, Tout en préservant la couverture totale (de la zone ou des cibles) par les nœuds qui restent actifs.

Plusieurs protocoles de couverture de surface ont été proposés dans la littérature. Bien que, ces protocoles peuvent être classés en deux types; ceux basés sur les positions et ceux indépendants des positions de capteurs. Cependant, une classification récente[26]a ajouté un troisième type basé sur la distance entre les nœuds. Dans cette étude, on s'intéressera en particulier aux algorithmes de couverture de surface. C'est pourquoi, dans ce qui suit, on fera une présentation plus ou moins détaillée de certains de ces algorithmes.



## 2.2 Classification des protocoles de la couverture de surface

Dans la littérature, il existe plusieurs classifications des protocoles de couverture, basées sur la connaissance de positions des capteurs, la coordination entre les nœuds capteurs ou bien le type du protocole utilisé. Cette dernière inclut les protocoles centralisés et distribués. Dans les approches distribuées, chaque capteur collecte des informations de ses nœuds adjacents. Puis, il détermine son statut de manière autonome. Alors que dans les approches centralisées, une entité centrale appelée station de base recueille les informations des nœuds et décide de l'état de chacun d'entre eux. De plus, [37] suggère une autre classification ; protocoles coordonnés ou non coordonnés. Dans le premier type, les capteurs décident de leur état en se basant sur la collaboration avec leurs voisins. Tandis que, dans le deuxième type, chaque capteur agit indépendamment des autres sans qu'il n'y est de communication entre les nœuds.

En se basant sur la connaissance de positions géographiques des capteurs dans un réseau, les protocoles de couverture peuvent être classés en deux types [38] ; basés sur les positions et indépendants des positions de nœuds capteurs. Toutefois, Wang et al. [35], ont ajouté un troisième type basé sur la distance entre les capteurs. Dans le premier type, chaque nœud est supposé connaître son propre emplacement géographique. Dans le deuxième, la conception des protocoles ne nécessite pas la connaissance des positions. Enfin, dans le troisième seulement la distance séparant les nœuds du réseau est exigée.

### 2.2.1 Protocoles basés sur la connaissance des positions

La position d'un capteur dans une zone géographique peut être aisément obtenue en l'équipant d'un dispositif appelé GPS (pour Global Position System) [39]. Néanmoins, ce dispositif rend les capteurs plus coûteux. Comme les ressources sont limitées dans un réseau de capteurs, et afin d'éviter l'utilisation du GPS, plusieurs algorithmes de localisation ont été proposés. La localisation est utilisée pour estimer les positions géographiques des nœuds. Dans un réseau de capteurs dense, en général, un certain nombre de nœuds appelés ancres sont supposés connaître leurs propres coordonnées (via le GPS par exemple), les coordonnées des autres nœuds sont obtenues en se basant sur celles des nœuds ancres et en utilisant des techniques de localisation. De nombreuses techniques de localisation ont été proposées pour les réseaux de capteurs, nous renvoyons le lecteur à [40] pour plus de détails.

En se basant sur les positions des capteurs, plusieurs protocoles de couverture ont été proposés, afin d'ordonnancer l'activité en se basant sur un test de redondance de la couverture. Dans ce qui suit nous présenterons quelques-uns de ces protocoles.

#### **2.2.1.1 Protocole utilisant des relais de couverture de surface**

Carle et al. [41], ont proposé un protocole localisé basé sur une sélection des relais de couverture, nommé SCR-CADS (pour Surface Coverage Rely Connected Area Dominating Set). Ce dernier est directement inspiré du protocole MPR-CDS [42] (pour Multipoint Relay Connected Dominating Set) qui permet de construire des ensembles dominants connectés à l'aide de relais multipoints dans les réseaux Ad-hoc.

L'algorithme MPR-CDS repose sur trois phases successives ; une découverte du voisinage direct, suivi du calcul de l'ensemble des relais multipoints (MPR), et la décision d'activité. L'ensemble MPR d'un nœud permet d'atteindre la totalité de ses voisins à deux sauts, cet ensemble est ensuite envoyé aux voisins. La décision d'activité est basée sur une règle simple qui permet à tout nœud de choisir son état.

#### **Description du protocole SCR-CADS**

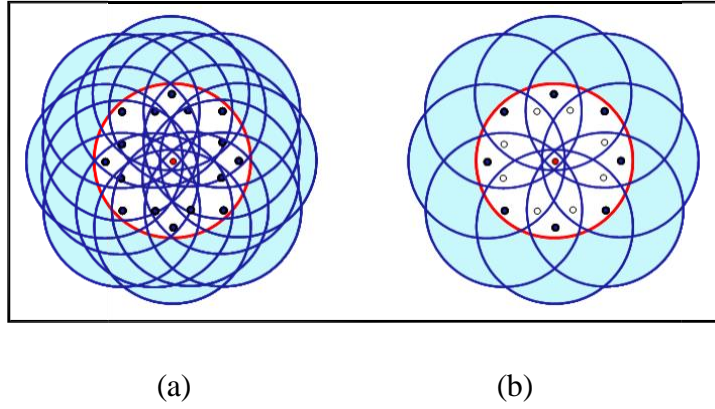
Dans le but de conserver la connexité et la couverture de zone, MPR-CDS a été adapté en modifiant la phase de sélection des relais MPR. Ces derniers doivent à présent couvrir une zone aussi large que celle couverte par l'ensemble des voisins. Aucune connaissance à deux sauts n'est nécessaire, réduisant ainsi le nombre de messages requis à l'initialisation du protocole. Les phases du protocole SCR-CADS sont :

##### *La découverte du voisinage*

Dans un premier temps, les nœuds doivent découvrir leur voisinage à un saut. Ils procèdent pour ce faire, à l'émission de messages Hello. Ces messages contiennent des informations propres au nœud émetteur : sa position et une priorité supposée unique. Cette phase est régulièrement répétée en fonction de la nécessité de mise à jour des informations de voisinage inhérentes à l'application de surveillance.

##### *La sélection des relais*

Pour étendre MPR-CDS à la couverture de surface, la sélection des relais MPR est modifiée : chaque nœud du graphe calcule un sous ensemble de ses voisins directs, appelé ensemble SCR, couvrant la même surface que celle couverte par la totalité des voisins à un saut (voir figure 2.1). Puis, cet ensemble est envoyé à ses voisins directs.



**Figure 2.1 :** Principe du protocole SCR-CADS.

(a) : Un nœud et ses voisins.

(b) : Un nœud et son ensemble SCR.

Chaque nœud doit pouvoir calculer son ensemble de relais SCR. Or, ce problème est équivalent à celui du plus petit ensemble couvrant (ou minimum set cover problem) qui est NP-complet [43]. C'est pourquoi des heuristiques sont utilisées pour le résoudre. Chaque nœud  $u$  commence avec un ensemble de relais  $SCR(u)$  vide. Puis, à chaque étape le voisin apportant le plus de couverture par rapport à celle déjà fournie par l'ensemble  $SCR(u)$  est sélectionné. Ceci est dans le but d'obtenir un ensemble SCR aussi optimal que possible. La première heuristique proposée se base sur une intuition simple : le nœud le plus éloigné de  $u$  est celui qui apporte le plus en couverture. Chaque nœud  $u$  commence par ajouter son voisin le plus éloigné (les positions sont connues et incluses dans les messages Hello). Les voisins sont ensuite considérés par ordre décroissant de distance à  $u$ . Tout voisin  $v$  couvrant une zone jusqu'ici non couverte par l'ensemble  $SCR(u)$  est ajouté à  $SCR(u)$ . La seconde heuristique, au lieu de choisir le voisin non encore évalué le plus éloigné du nœud  $u$ , tente de choisir celui qui est censé apporter le plus de couverture par rapport à l'ensemble  $SCR(u)$  déjà constitué. Pour éviter de quantifier l'apport de chaque voisin, afin de trouver celui qui apporte le plus de couverture, une bonne approximation consiste à calculer l'isobarycentre [41] des voisins appartenant déjà à SCR et de choisir le voisin le plus loin.

#### La décision d'activité

La décision d'activité est basée sur la règle suivante : tout nœud  $u$  ayant la priorité la plus basse parmi son voisinage ou appartenant à l'ensemble de relais SCR du voisin ayant la plus petite priorité doit demeurer actif. Cette règle permet d'obtenir des ensembles de nœuds actifs connectés et couvrant totalement la zone de déploiement.

### 2.2.1.2 Protocole affranchi de la découverte du voisinage

Pour palier à l'inconvénient du protocole décrit dans [41], Gallais et al. [44], ont proposé un protocole localisé de couverture de surface sans découverte de voisinage à priori. La connaissance s'acquiert au fur et à mesure des décisions d'activité des voisins à un saut, réduisant ainsi le nombre de messages envoyés par chaque nœud. Ce protocole est utilisé dans les réseaux de capteurs synchrones.

#### *Description du protocole*

Chaque nœud choisit un temps d'attente (supposé unique) et écoute les messages transmis par les autres nœuds jusqu'à ce que ce temps expire. Une fois ce dernier écoulé, le nœud évalue sa couverture. Les capteurs dont la surface de surveillance n'est pas totalement couverte, ou couverte par un ensemble non connecté de nœuds actifs, décident de demeurer actifs durant la période d'activité courante. Ils transmettent un message positif pour l'annoncer. En passant à l'état inactif, les nœuds couverts (par un ensemble connecté) économisent leur énergie et peuvent ou non envoyer un message négatif annonçant cette non activité à leurs voisins directs. Une fois sa décision est prise, un nœud  $u$  peut également être amené à reconsidérer son statut à la suite des annonces d'activités ultérieures. Si de nouveaux voisins de  $u$  se sont manifestés, le couvrant alors totalement,  $u$  peut modifier son état et prévenir les autres nœuds de son changement d'avis. Il envoie pour ce faire un message de retrait.

Chaque décision doit être prise en tenant compte de la couverture de surface et de la connexité de l'ensemble des nœuds actifs. Pour s'assurer de sa couverture, un nœud utilise une technique basée sur un théorème géométrique, et applicable à toute forme de surface

convexe : déjà utilisé dans [45, 46], il permet de vérifier qu'une zone géométrique est totalement couverte par d'autres. Le test de la connexité dépend du rapport entre les rayons de capture ( $RCap$ ) et de communication ( $RCom$ ). En effet, si  $2RCap \leq RCom$  alors on utilise le théorème énoncé dans [46] qui, lorsque  $2RCap \leq RCom$  nous garantit la connexité des nœuds actifs aussi longtemps que la couverture de surface est préservée. Dans le cas contraire, on rajoute un simple critère de connexité : un nœud ne peut devenir passif que s'il est couvert par un ensemble connecté de voisins. On distingue donc deux décisions d'activité différentes, en fonction du rapport entre les rayons de communication et de surveillance. Un nœud  $u$  ne peut devenir passif que si :

- Lorsque  $2RCap \leq RCom$ , sa zone de capture  $S(u)$  est totalement couverte par ses voisins, ou,

• Lorsque  $RCap \leq RCom < 2RCap$ ,  $S(u)$  est couverte par un ensemble connecté de voisins.

Après avoir choisi un état (actif ou passif), chaque nœud décide d'envoyer un message ou pas. Les messages contiennent la position exacte ainsi que le type du message. Ce protocole a quatre variantes qui utilisent trois types de messages.

### **Les variantes du protocole**

Positif-Seul : seuls les nœuds qui ont décidé d'être actifs envoient un message positif. Positif et Négatif : tout nœud envoie un message correspondant à sa décision, que ce soit celle d'être actif (message positif) ou passif (message négatif).

Positif et Retrait : les nœuds qui décident d'être actifs envoient un message positif tandis que les autres demeurent muets ; les nœuds actifs, cependant, peuvent ensuite recevoir des messages positifs de la part de nœuds ayant des temps d'attente plus longs. Ils peuvent alors décider de devenir passifs s'ils sont totalement couverts par un ensemble connecté ; de tels changements sont signifiés aux voisins à l'aide d'un message de retrait. Positif, Négatif et Retrait : toutes les décisions initiales sont transmises (message positif ou négatif) ; Les nœuds ayant décidé d'être actifs peuvent ensuite reconsidérer leur choix et passer en mode passif en envoyant un message de retrait. Notons cependant que ce changement ne saurait être motivé par des messages négatifs émis par des voisins avec un temps d'attente plus long.

Les annonces négatives sont porteuses d'information lors de la décision initiale puisqu'elles informent de voisins à deux sauts ayant décidé plus tôt. Néanmoins, une partie d'entre elles, formulées postérieurement à la décision d'un nœud  $u$  et pouvant donc être justifiées par l'activité préalablement annoncée de ce même nœud  $u$ , doit être ignorée. En résumé, lors de la première décision, tous les messages sont utilisés tandis que lors des évaluations ultérieures, seuls les messages positifs (diminués de ceux qui se sont depuis retirés) sont pris en compte.

Ce protocole a montré qu'il est possible de diminuer largement le nombre de nœuds actifs tout en réduisant considérablement le nombre de messages nécessaires à chaque décision. Il permet de conserver la couverture totale ainsi que la connexité des nœuds actifs.

#### **2.2.1.3 Contrôle géographique optimal de densité**

Zhang et Hou [68], ont proposé un algorithme totalement décentralisé et localisé appelé OGDC (pour *Optimal Geographical Density Control*) pour le contrôle de densité dans les

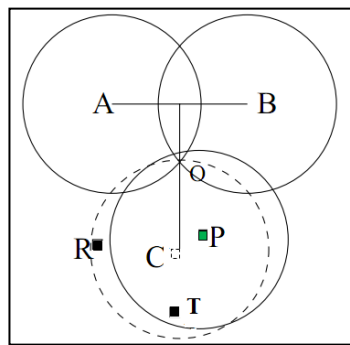
réseaux de capteurs denses et synchrones. L'objectif de cette solution, est de maintenir la couverture ainsi que la connexité en utilisant un nombre minimal de nœuds actifs.

### ***Description du protocole OGDC***

A tout moment, un nœud est dans l'un des trois états; non-décidé, actif ou passif. Comme dans [49], la durée de vie du réseau est divisée en périodes d'activité successives. Au début de chaque période, tous les nœuds sont dans l'état non-décidé, puis participent dans l'exécution de l'algorithme OGDC pour sélectionner les nœuds actifs. A la fin de l'exécution, les nœuds capteurs changent leur statut en actif ou passif dans lequel ils demeurent jusqu'au début de la prochaine période.

#### ***La sélection des nœuds actifs***

Le processus de sélection des nœuds actifs dans chaque période commence par le choix aléatoire d'un nœud capteur A (la surface surveillée par A est modélisée par un disque de rayon  $r$  centré en A; voir figure .....). ce nœud est appelé nœud de démarrage. puis un de ses voisins à une distance approximative de  $\sqrt{3}r$ , le nœud B, est choisi pour être un nœud actif. pour couvrir le point d'intersection des deux disques devrait être utilisé et les centres des trois disques forment un triangle équilatéral à longueur de côté  $\sqrt{3}r$ . bien que, dans cet exemple C soit la position optimale pour couvrir le point d'intersection O des disques A et B, il n'existe pas de nœud capteur dans cet emplacement. Cependant, le nœud le plus proche de C (le nœud P) est alors sélectionné pour couvrir l'intersection O, il est donc choisi pour devenir un nœud actif



**Figure 2.2 :** Principe de sélection d'un nœud actif dans OGDC.

Le processus se poursuit jusqu'à ce que tous les nœuds choisissent leur état, les nœuds actifs constituent l'ensemble couvrant la zone d'intérêt. Comme le nœud de démarrage est choisi aléatoirement, l'ensemble des nœuds actifs à chaque période n'est pas susceptible d'être le même. Cela garantit une consommation équitable d'énergie à travers le réseau, ainsi qu'une couverture totale et une connexité.

#### ***La sélection du nœud de démarrage***

Au début de chaque période, tous les nœuds sont dans l'état *non-décidé*. Un nœud volontaire, appelé nœud de démarrage initie le processus de décision si son énergie est supérieure à un seuil donné. Ce dernier est fixé par rapport à la longueur de la période, de manière à garantir l'activité du capteur durant toute la période en question. Un nœud capteur volontaire choisit un délai d'attente pendant lequel il écoute les messages transmis par ses voisins. Lorsque ce délai expire, le nœud change son état en *ON* et diffuse un message *power-on*. Si le nœud entend un message avant l'expiration de ce délai, alors il quitte son attente et ne devient pas un nœud de démarrage. L'utilisation du délai d'attente permet d'éviter que plusieurs nœuds voisins décident, au même moment, d'être des nœuds de démarrage. La sélection du temps d'attente est un compromis entre les performances et la latence. L'utilisation d'un délai important peut réduire le nombre de nœuds de démarrage dans le réseau. Cependant, avec moins de nœuds de démarrage, l'opération de sélection des nœuds actifs peut durer longtemps. Le message *power-on* envoyé par un nœud de démarrage contient : la position de l'émetteur et la direction selon laquelle le second nœud actif devrait être sélectionné. Cette direction est un angle généré aléatoirement dans l'intervalle uniforme  $[0, 2\pi]$ .

*Les actions prises lors de la réception d'un message power-on* Lorsqu'un nœud reçoit un message *power-on*, si son énergie est inférieure au seuil, alors il met son état à *OFF* et rentre en sommeil. Dans le cas contraire, il vérifie s'il est totalement couvert par l'ensemble de ses voisins. Si oui, il met son état à *OFF* et passe en mode sommeil. Si le nœud est éloigné d'une distance supérieure à  $2r_c$  ( $r_c$  étant le rayon de capture du nœud) de l'émetteur du message alors il ignore ce dernier, sinon, il ajoute l'émetteur à sa liste de voisins et prend une décision en se basant sur l'ordre du message reçu (est-il le premier ou non ?) et le type du nœud émetteur du message (est-il un nœud de démarrage ou non ?).

#### 2.2.1.4 Discussion des protocoles basés sur les positions

Grâce à la connaissance de coordonnées des capteurs, ce type de protocoles préserve la couverture totale de la zone d'intérêt, ce qui est son avantage principal. Néanmoins, l'utilisation du GPS consomme une quantité d'énergie considérable et augmente le coût des capteurs. Bien que, plusieurs protocoles de localisation dans les réseaux de capteurs aient été proposés, l'erreur de position pourrait être très importante. Par exemple, Langendoen et Reijers [76], ont montré que pour les protocoles de localisation basés sur la portée, l'erreur moyenne de position augmente de manière significative si le bruit est pris en considération dans l'évaluation de la portée. En effet, quand la variation de la portée dépasse 10% l'erreur moyenne de position peut excéder 50%.



A cause de ces inconvénients, des protocoles de couverture ne nécessitant pas la connaissance des positions, ont été proposés.

### 2.2.2 Protocoles indépendants de la connaissance des positions

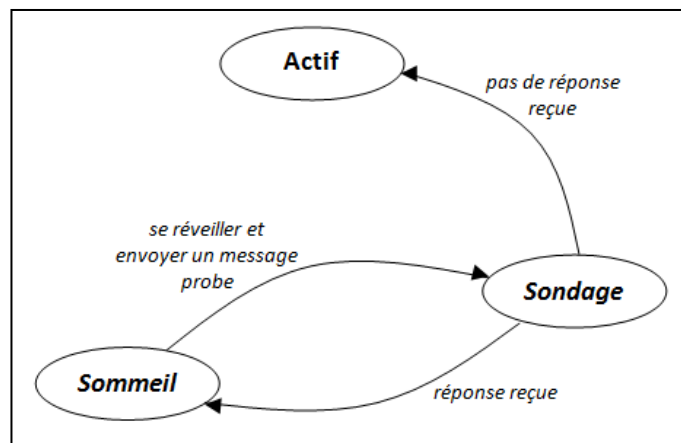
Dans ce type de protocoles, les nœuds découvrent la topologie du réseau et réagissent à ses changements en envoyant des messages de contrôle. En absence de positions des capteurs, le défi principal de ce type de protocoles, est comment assurer un taux de couverture raisonnable après l'élimination de la redondance.

#### 2.2.2.1 Sondage de l'environnement et sommeil adaptatif

Un protocole aléatoire distribué qui maintient la couverture de surface, appelé PEAS (pour *Probing Environment Adaptive Sleeping*) a été proposé dans [77] pour des réseaux de capteurs denses et asynchrones. PEAS est robuste ; il est utilisé dans des environnements où les capteurs peuvent subir des défaillances fréquentes et imprévisibles pour diverses raisons. Ce protocole a deux étapes ; *sondage de l'environnement* durant laquelle un nœud se réveille pour tester l'existence d'autres nœuds actifs dans son voisinage, et le *sommeil adaptatif* qui consiste à décider quand un nœud en sommeil doit se réveiller? c.à.d. la durée de la période d'inactivité d'un nœud.

#### Description du protocole PEAS

Dans le protocole PEAS, tout nœud peut se trouver dans l'un des trois états : sommeil, sondage ou actif. Les changements d'état d'un nœud dans ce protocole, peuvent être décrits par le diagramme suivant :



**Figure 2.3 :** Diagramme de transitions d'état du protocole PEAS.

Initialement, après le déploiement du réseau tous les nœuds sont dans le mode sommeil. La durée du sommeil suit une distribution exponentielle générée par la fonction de densité de probabilité  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ , où  $\lambda$  est le taux de sondage du nœud et  $t$  désigne la durée du sommeil.



### *L'état sondage*

Périodiquement, chaque nœud se réveille et entre en mode sondage. Un nœud sondeur envoie un message PROBE, dit de sondage, dans un rayon  $P$  (identique pour tous les nœuds) afin de vérifier l'existence d'autres nœuds actifs dans son voisinage. Tous les nœuds actifs situés dans le rayon de sondage,  $P$  doivent répondre avec un message REPLY. Si le nœud sondeur reçoit au moins une réponse, il retourne à l'état sommeil pour une nouvelle durée de temps, générée selon la même fonction de densité de probabilité.

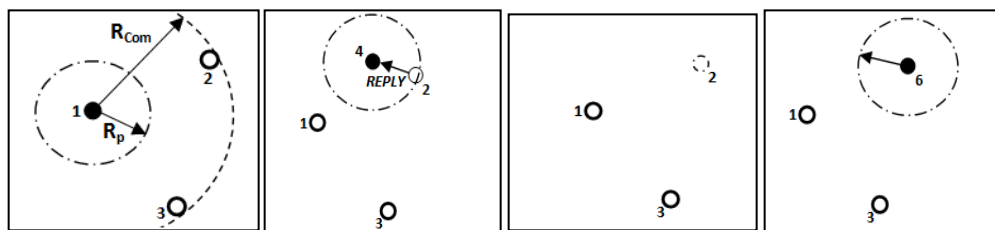
Il est possible que plus d'un voisin du nœud sondeur soit actif. Pour réduire les collisions, chaque nœud actif utilise un délai d'attente aléatoire à la fin duquel il envoie la réponse REPLY.

### *L'état actif*

Un nœud sondeur n'ayant pas reçu de réponse doit se mettre dans l'état actif. Dès lors qu'un nœud prend cette décision, il conserve ce statut jusqu'à l'épuisement de ses ressources énergétiques ou jusqu'à sa défaillance.

### *Un exemple d'exécution de PEAS*

La figure 2.4 illustre un exemple d'exécution du protocole PEAS. A l'instant  $t_1$ , les nœuds 2 et 3 sont actifs, le nœud 1 se réveille et diffuse un message PROBE dans un rayon de sondage  $R_p$ , le nœud 1 entre en activité. A l'instant  $t_2$ , le nœud 4 endormi, se réveille et sonde son voisinage. Le nœud 2 qui est dans le rayon de sondage du nœud 4 répond par un message REPLY. Après la réception de cette réponse, le nœud 4 retourne dans le mode sommeil. Puis, le nœud 2 devient défaillant à l'instant  $t_3$  et le nœud 6 se réveille à l'instant  $t_4$ . Après le sondage de son environnement, le nœud 6 est actif et remplace le nœud 2.



À  $t_1$ , 2 et 3 sont actifs, 1 sonde et entre en activité. À  $t_2$ , 4 sonde et 2 répond, 4 retourne en sommeil. À  $t_3$ , 2 est défaillant. À  $t_4$ , 6 probe et remplace 2.

**Figure 2.4 :** Un exemple d'exécution du protocole PEAS.

Le rayon de sondage  $R_p$  informe sur la redondance des nœuds actifs. Il est déterminé en fonction des exigences de l'application en termes de fiabilité, de surveillance, et de communication. Le choix de  $R_p$  affecte également la connexité du réseau, il doit être inférieur au rayon de communication maximal, pour éviter la déconnexion des nœuds actifs.

### 2.2.2.2 Protocole centralisé basé sur les ensembles dominants

Pazand et Datta [62], ont proposé une solution au problème de couverture, basée sur une formulation en théorie des graphes. Le principe de cette solution, consiste à ordonnancer l'activité des nœuds en se basant sur le concept des ensembles dominants, de cardinalité minimale. Le but est d'éliminer la redondance tout en maintenant la couverture de la zone d'intérêt.

#### *Description du protocole*

Cette approche est centralisée et composée de trois phases. La première phase consiste à construire le graphe correspondant au réseau. L'étape suivante est dédiée à la sélection des différents ensembles dominants de nœuds capteurs. La dernière phase exploite les ensembles dominants déterminés précédemment, afin d'ordonnancer l'activité des capteurs.

#### *Phase 1 : construire le graphe du réseau*

Chaque nœud  $u$  envoie un message *Hello* et construit sa table de voisinage grâce à l'écoute de ces mêmes messages. Ces tables sont envoyées à la station de base, pour construire le graphe correspondant au réseau et le représenter par une matrice d'adjacence qui sert comme entrée pour la phase suivante.

#### *Phase 2 : déterminer les ensembles dominants de cardinalité minimale*

**Définition:** soit  $G=(V,E)$  un graphe non dirigé. Un ensemble dominant (noté par la suite ED) de  $G$  est un sous ensemble de sommets  $V' \subseteq V$ , tel que pour tout sommet  $u \in V-V'$ ; il existe un sommet  $v \in V'$  pour lequel l'arc  $(u,v) \in E$ . L'ensemble dominant qui a la cardinalité minimale parmi les autres ensembles est appelé ensemble dominant minimum (noté dans la suite EDM) [71].

Afin de déterminer les ensembles dominants de cardinalité minimale, deux heuristiques différentes ont été proposées, en fonction du rapport entre les rayons de communication (RCom) et de capture (RCap). La première pour le cas  $RCom = RCap$  et la deuxième dans le cas où  $RCom > RCap$ . L'approche proposée vise, d'une part, à maximiser le nombre des EDMs et d'autre part, à minimiser la cardinalité de chacun d'entre eux.

#### *a) Cas $RCom = RCap$*

À partir de la matrice d'adjacence, la station de base sélectionne le nœud  $p$  ayant le nombre maximum de voisins (nœud de degré max). Ce nœud devient le premier membre de  $M_1$ , premier ED. Ensuite, tous les voisins de  $p$  sont exclus de la prochaine sélection. Une autre fois, à partir de la matrice d'adjacence, le nœud ayant le deuxième degré plus élevé est sélectionné comme deuxième membre de  $M_1$  et de même pour ses voisins que ceux de  $p$ . Ce

processus continue jusqu'au traitement de tous les nœuds. Ensuite tous les membres de  $M_1$ , sont exclus du calcul du prochain ED.

### ***b) Cas $RCom > RCap$***

Généralement, dans les réseaux de capteurs, le rayon de surveillance est plus petit que la portée de transmission. Par conséquent, une approche différente pour la construction des EDMs est utilisée. De manière semblable au cas précédent, à partir de la matrice d'adjacence on choisit le nœud  $p$  qui a le plus grand nombre de voisins, suivi du choix aléatoire de l'un de ses voisins. Ces deux nœuds sont les premiers membres de  $M$  ; le premier ED. Ensuite, chaque nœud  $i$  adjacent du nœud  $p$  est examiné par l'équation :

$$2 \leq \text{nombre de voisins du nœud } i \leq F \quad (2.1)$$

S'il satisfait la condition alors le nœud  $i$  sera choisi comme membre de l'ensemble  $M$ . Le paramètre  $F$  est relatif à la densité du réseau, il est déterminé par des résultats de simulation. Lorsque tous les voisins du nœud  $p$  sont examinés, les nœuds sélectionnés sont exclus lors de la prochaine sélection. Ensuite, le nœud ayant le deuxième degré plus élevé est choisi pour être membre de  $M_1$ , et de même pour ses voisins que ceux de  $p$ . Ce processus continue jusqu'au traitement de tous les nœuds et les nœuds sélectionnés dans  $M$  sont ignorés lors de la sélection du prochain EDM. Ce processus est réitéré afin de déterminer tous les EDMs.

### ***Phase 3 ; ordonnancer les ensembles dominants de cardinalité maximale***

La troisième phase est la partie la plus simple du protocole. Au fait, les EDMs calculés dans la phase précédente, sont ordonnancés afin d'assurer la couverture du réseau. A chaque période, un ED est sélectionné pour surveiller la zone de déploiement. Dans la période suivante, les nœuds actifs dans la période courante, sont mis dans l'état passif, et on choisit un autre ED.

#### **2.2.2.5 Discussion des protocoles indépendants des positions**

Bien que les protocoles indépendants de positions, ne produisent pas une couverture totale de la zone d'intérêt, ils sont moins coûteux, et plus efficaces en terme d'énergie par rapport aux protocoles basés sur les positions, car ils ne requièrent pas l'utilisation du GPS ou l'application d'une technique de localisation. Ce qui les rend très pratiques, et fortement recommandés, dans les réseaux de capteurs, du moment que la contrainte la plus critique est l'énergie. De plus, ce type de protocoles étend considérablement la durée de vie du réseau.

### **2.2.3. Protocoles basés sur l'estimation de la distance**

Dans un réseau de capteurs denses, la localisation des nœuds peut être inutile (par exemple, dans une application où l'emplacement des événements n'est pas important) pour le contrôle

de la couverture. Certains auteurs proposent alors d'utiliser l'estimation des distances entre les nœuds voisins, au lieu de leurs coordonnées, afin d'ordonner l'activité des capteurs [29, 78]. Les informations de distance peuvent être obtenues à partir de la force du signal reçu, en utilisant une antenne bidirectionnelle ou estimées à partir du nombre de nœuds voisins, étant donné que la densité de déploiement d'un réseau est connue.

### 2.2.3.1 Tests de redondance géométriques et relatifs à la densité

Younis, et *al.* [29], ont proposé un protocole de couverture appelé LUC (pour *Location-Unaware Coverage*), basé sur deux types de tests : géométriques et relatifs à la densité. Ces tests reposent sur des mesures de la distance et des échanges d'informations de voisinage à deux sauts, respectivement. Ils permettent à tout nœud du réseau de vérifier sa redondance, ensuite de décider d'être *actif* ou *passif* sans dégrader la couverture de la zone d'intérêt

#### **Description du Protocole LUC**

En se basant sur les règles D1, D2, H1, et H2, d'après O. Younis, M. Krunz and S. Ramasubramanian [67] . le protocole LUC détermine l'état de chaque nœud du réseau. Tout nœud a trois états : *actif*, *passif* et *non-décidé*. Initialement tous les nœuds sont dans l'état *non-décidé*. La première phase commence par la découverte du voisinage, où chaque nœud prend connaissance de ses voisins (par échange de messages *Hello*) à un saut et à deux sauts, ainsi que la distance qui le sépare de ses voisins à un saut. L'algorithme utilise un test, dit d'activation (*ATest*), qui retourne SUCCES (mettre le nœud à l'état *actif*) si le nœud  $v$  a le poids le plus élevé parmi ses voisins qui n'ont pas encore décidé.

Ce test est nécessaire, car il sélectionne les nœuds ayant une quantité d'énergie élevée pour être actifs, et donne une chance aux nœuds les plus faibles de se mettre en mode *passif*. Il est à noter que lorsque *ATest* réussit, l'algorithme LUC donne une autre chance au nœud  $v$  pour être *passif* (en exécutant *RTest-H1*) avant de prendre la décision finale.

La détermination des nœuds actifs se fait en exécutant la procédure du test de redondance décrite précédemment. A chaque fois qu'un nœud notifie que l'un de ces voisins est devenu actif, il exécute la procédure afin de vérifier s'il est redondant ou pas. Cette procédure est accomplie dans l'ordre suivant : les tests géométriques sont exécutés avant ceux basés sur la distance, car ces premiers ne conduisent pas à un faux positif (c.à.d. déclarer un nœud redondant alors qu'il ne l'est pas en réalité), ce qui permet d'éviter les trous de couverture. *RTest-D1* est exécuté en premier, car il a un taux de succès élevé. *RTest-H2* est ensuite exécuté afin de mettre, le plus tôt possible, les nœuds faibles dans le mode sommeil.

De plus, *RTest-H2* ne produit pas un faux positif. *RTest-H1* est exécuté seulement, lorsque tous les tests précédents ont échoué. Exécuter *RTest-H1* en dernier, minimise la probabilité

d'avoir un faux positif. Si le résultat de n'importe quel test détermine que le nœud est redondant, ce dernier quitte la procédure et change son état en *passif*. Dans le cas contraire, la procédure est déclenchée par le prochain nœud actif. Cependant, si un *timeout* spécifique a expiré et le nœud reste dans l'état *non-décidé*, alors il est forcé à prendre une décision. Le nœud devient *actif*, et annonce sa décision aux voisins, si tous les tests donnent un résultat négatif.

### 2.2.3.2 Protocole de couverture configurable

Zhang, et al. [78], ont proposé un protocole de couverture configurable, appelé CCP (pour *Configurable Coverage Protocol*), basé sur l'estimation de la distance entre les nœuds voisins. Ce protocole peut être configuré de telle sorte qu'au moins partie de la zone d'intérêt soit couverte par les nœuds actifs avec une probabilité élevée, tel que est un paramètre ajustable. D'abord, les auteurs proposent une méthode pour estimer la distance entre deux nœuds voisins en utilisant uniquement des informations locales. Ensuite, ils présentent le protocole CCP qui utilise les distances obtenues au lieu des positions géographiques de capteurs.

#### **Description du Protocole CCP**

##### *Le choix du nœud de départ*

Initialement, tous les nœuds sont dans l'état *non-décidé*. Un nœud volontaire devient nœud de départ avec une probabilité  $p$ . Avant ceci, il se met en attente pendant une durée  $T$  qui permet de réduire la probabilité d'avoir de multiples nœuds du départ. Si le nœud n'a reçu aucun message durant  $T$ , il se met dans l'état *ON* et diffuse un message *power-on*. Dans le cas contraire, il quitte son attente.

##### *La formation du premier triangle*

Après que le premier nœud du départ ait diffusé le message, tout voisin de ce nœud, choisit un timeout  $T_1$  basé sur la distance qui les sépare. A l'expiration de  $T$ , le nœud voisin change son état en *ON*, et diffuse un message *power-on*. Ce message contient les informations du segment formé entre les deux nœuds, tels que l'identifiant de ces derniers et la longueur du segment.

Lors de la réception des informations d'un segment, tout nœud voisin de l'émetteur choisit un timeout  $T$  qui dépend de la zone non couverte, et des angles du triangle qu'il forme avec les deux autres nœuds. A l'expiration de  $T_2$ , le nœud se met à l'état *ON*, et diffuse un message *power-on*. Ce message inclus des informations du triangle formé : l'identifiant des sommets et la longueur des côtés. Tout nœud sauvegarde les informations des triangles dont il est le sommet.

Les nœuds qui reçoivent les informations du triangle, et qui sont situés sur le même côté avec le nœud émetteur, quittent leur attente.

#### Le processus de sélection de nœuds

Lors de la réception d'un message incluant les informations d'un triangle ou d'un nouveau segment, seuls les nœuds qui ne sont pas déjà sommets du triangle, ni du segment, ou s'il n'y a pas déjà deux triangles associés à ce nouveau segment, effectuent des actions.

S'il n'y a qu'un seul triangle associé au nouveau segment qui satisfait la condition de la zone non couverte, le nœud annonce immédiatement la création d'un nouveau triangle avec un seul nouveau côté. Si tel n'est pas le cas, tous les autres nœuds choisissent un timeout  $T$ .

Le nœud dont la durée d'attente expire en premier, se met en *ON*, et annonce la création d'un nouveau triangle avec deux nouveaux côtés. Tous les nœuds qui reçoivent les informations du nouveau triangle, quittent leur attente. Sur la base des informations du triangle diffusées par ses voisins, quand un nœud notifie qu'il est à l'intérieur d'un triangle, il se met en *OFF*. Le protocole s'achève, lorsque tous les nœuds sont soit dans l'état *ON* ou *OFF*.

#### **2.2.3.3 Discussion des protocoles basés sur la distance**

Bien que la connaissance de positions des nœuds, puisse être utilisée pour obtenir la distance entre toute paire de nœuds, la connaissance de la distance peut ne pas suffire pour déterminer les coordonnées d'un capteur. Des résultats de simulation dans [78], montrent que les erreurs d'estimation de la distance diminuent (et donc l'exactitude des mesures croît), lorsque la densité du réseau augmente. De plus, ces erreurs sont moins importantes que ceux obtenues lors de la localisation des capteurs. De ce fait, les protocoles basés sur l'estimation de la distance, peuvent fournir de meilleurs résultats en terme de couverture dans les réseaux de capteurs denses. Néanmoins, en environnements difficiles ou avec interférences, la mesure de la distance peut manquer de précision.

### **2.3 Comparaison des protocoles de couverture de surface**

Le tableau suivant décrit une comparaison entre les protocoles présentés dans ce chapitre. Cette comparaison est faite suivant les critères que nous avons jugés les plus importants :

#### **2.3.1 La connaissance des positions**

La position géographique d'un capteur n'est pas toujours disponible, ou facile à obtenir surtout dans les environnements difficiles.

#### **2.3.2 La phase de découverte du voisinage**

Cette phase engendre généralement un coût de communication élevé, ce qui est un inconvénient pour les réseaux très denses.

<b>Critères</b> <b>Protocoles</b>	<b>Connaissance de positions des capteurs</b>	<b>Phase de découverte des voisins</b>	<b>Type du protocole</b>	<b>Caractéristiques du protocole</b>
SCR-CADS	Oui	Oui	Distribué	Utilise le principe des ensembles couvrants de surface.
Protocole affranchi e la découverte du voisinage	Oui	Non	Distribué et localisé	Utilise le théorème des points d'intersection inclus [66] pour vérifier si la zone de surveillance d'un capteur est couverte.
OGC	Oui	Non	Distribué	Sélectionne un nœud actif de façon à minimiser la zone de recouvrement avec les nœuds déjà actifs.
PEAS	Non	Non	Distribué	Un nœud est passif s'il reçoit au moins une réponse suite au sondage de son voisinage.
Protocole centralisé basé sur les ED <sub>s</sub>	Non	Oui	Centralisé	Construction centralisée des ensembles dominants de cardinalité minimale.
LUC	Utilise l'estimation de la distance	Non	Distribué	Deux types de tests sont utilisés pour identifier les nœuds redondants.
CCP	Utilise l'estimation de la distance	Non	Distribué	Configuré de telle sorte qu'au moins $\alpha$ partie de la zone d'intérêt soit couverte avec une proalité élevée

**Tableau 2.1 :** Comparaison des protocoles de la couverture de surface.

## 2.4 Conclusion

Plusieurs travaux se sont attachés à développer des protocoles assurant la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil, en utilisant la technique d'ordonnancement d'activité. Cet ordonnancement permet aux nœuds redondants, dont la surface de surveillance est couverte par l'ensemble des voisins, de s'émettre dans l'état passif afin d'économiser leur énergie, et par conséquent, d'étendre la durée de vie du réseau.

Les protocoles de couverture peuvent être classés selon divers critères. Parmi ces critères on peut citer : la connaissance de positions des capteurs ou la distance qui les sépare, la coordination entre les nœuds, et le type du protocole utilisé. En se basant sur le premier critère de classification, nous avons présenté dans ce chapitre trois types de protocoles : ceux basés sur la connaissance de positions, ceux basés sur l'estimation de la distance qui sépare les capteurs du réseau, et ceux indépendants des positions et des distances.





## CHAPITRE 3

### La solution proposé et la simulation

#### 3.1. Introduction:

Réduire la redondance dans un réseau de capteurs, tout en maintenant la couverture de la zone de déploiement, est primordial. Ceci est dans le but d'économiser la consommation d'énergie et, par conséquent, étendre la durée de vie du réseau.

Dans le présent chapitre, nous présentons un protocole distribué qui préserve la couverture dans les réseaux de capteurs, nommé Coverage Preserving based on Distance and Dominating Set (DCovPDDS). L'idée fût d'adapter un concept de la théorie des graphes : celui des ensembles dominants de cardinalité minimale, en vue de construire des ensembles couvrants. Les caractéristiques principales de ce protocole sont : nombre réduit de nœuds actifs, coût de communication très faible, robustesse et équilibrage de la consommation d'énergie entre les capteurs.

La première partie de ce chapitre, sera consacrée à la description détaillée du protocole de couverture proposé. La seconde illustrera les résultats de simulation obtenus, ainsi que l'évaluation des performances de ce protocole, cela en le comparant avec deux solutions proposées dans la littérature

#### 3.2 Motivations

Le déploiement aléatoire des nœuds capteurs, est le plus utilisé pour de nombreuses applications dans des environnements inaccessibles pour diverses raisons. En raison de la nature imprévue de ce type de déploiement, un réseau de capteurs pourrait engendrer des trous de couverture (portions non couvertes de la zone de déploiement), qui dégradent la fiabilité du réseau. Afin de palier à cette lacune, les nœuds capteurs sont déployés en forte densité. De ce fait, les réseaux de capteurs sont généralement denses et redondants ; à tout moment il existe des capteurs qui observent une même portion de la zone de déploiement. Lorsqu'un événement se produit sur cette dernière, il est d'une part inutile d'avoir un nombre élevé de capteurs qui le reporte. D'autre part, ce serait source de nombreux désagréments au niveau de l'accès au medium, toujours en raison de nœuds voulant émettre simultanément pour signaler l'événement.

Il est par conséquent, crucial d'ordonnancer l'activité des capteurs dans le double but d'économiser l'énergie, et de minimiser les problèmes liés à la gestion d'une large population d'objets partageant un medium, tel que l'air. Certains nœuds sont donc passifs à un instant donné. Les rôles sont plus souvent alternés de façon à ne pas toujours pénaliser les mêmes nœuds du réseau.

L'ordonnancement d'activité des capteurs est l'une des techniques utilisées dans plusieurs algorithmes de couverture, il permet de réduire la redondance. Ordonnancer l'activité dans un réseau de capteurs consiste à alterner les charges de façon à épuiser l'énergie des nœuds équitablement. Pendant qu'une partie participe à l'application, les autres sont dans un mode passif, économisant ainsi leur énergie. La diminution de la redondance est cruciale, mais l'ordonnancement ne doit pas mettre en péril l'application en cours.

Nous souhaitons donc ordonnancer l'activité des capteurs de façon à ce que l'ensemble des capteurs actifs soient capables de surveiller une zone aussi large que celle couverte par l'ensemble des capteurs déployés, c.-à-d. ordonnancer l'activité des capteurs tout en préservant la couverture de la zone de déploiement.

### **3.3 Le protocole DCovPDDS:**

DCovPDDS (pour Distributed Coverage Preserving based on Distance and Dominating Set) est une solution au problème de l'ordonnancement d'activité. Plus précisément, un protocole distribué qui préserve la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil, et qui se base sur un concept de la théorie des graphes: ensemble dominant de cardinalité minimale.

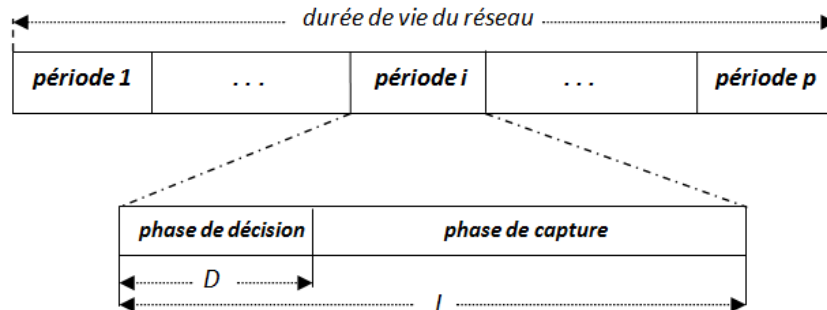
Le protocole proposé:

- 1- ne requiert pas la connaissance des positions géographiques de capteur.
- 2- n'utilise pas une phase de découverte du voisinage qui engendre généralement un coût de communication élevé.
- 3- construit des ensembles dominants couvrant de façon distribué.
- 4- permet l'équilibrage de la consommation d'énergie entre les capteurs du réseau.

#### **3.3.1 Description globale du protocole**

DCovPDDS opère en périodes d'activité de durée  $L$ , ce que tout capteur exécute ce protocole, périodiquement, à chaque  $L$  unité de temps. chaque période est composée de deux phases de décision de durée  $D$ , et une phases de capteur. la valeur de  $D$  devrait être inférieure à celle de  $L$  (figure 3.1).

Durant la première phase, chaque capteur écoute et analyse les décisions prises autour de lui afin de prendre sa décision (actif s'il est dominant ou passif si non). Les nœuds qui décident d'être actifs forment un ensemble dominant, et ils sont chargés de couvrir la zone d'intérêt durant la deuxième phase, pendant que les autres sont en mode sommeil.



**Figure 3.1 :** DCovPDDS divise la durée de vie du réseau en périodes d'activité.

Afin d'équilibrer la charge de la tâche de surveillance (capture) entre les capteurs du réseau, la décision d'un nœud est prise en fonction de son énergie résiduelle, de façon à ce que les nœuds actifs, à chaque période, soient ceux possédant le niveau d'énergie le plus élevé. Cet équilibrage de charge permet d'étendre la durée de vie du réseau.

Cardei et *al.* [52], ont démontré que l'organisation des capteurs en ensembles couvrants non-disjoints, où un capteur fait partie de plusieurs ensembles (c.à.d. il est actif durant des périodes différentes), étend considérablement la durée de vie du réseau. C'est pourquoi, dans ce travail, nous ordonnons l'activité en se basant sur la construction des ensembles dominants non-disjoints (couvrants) de nœuds actifs.

### 3.3.2 Caractéristiques principales de DCovPDDS

DCovPDDS vise deux objectifs principaux. D'une part, garantir un équilibrage de la consommation d'énergie entre les capteurs tout au long de la durée de vie du réseau. D'autre part, avoir un faible coût inhérent aux communications (sources principales de consommation d'énergie), en s'affranchissant d'une découverte à priori du voisinage.

DCovPDDS supporte la robustesse, dans la mesure où à chaque période d'activité, un seul ensemble dominant est actif pour surveiller la zone d'intérêt. Dans le cas où certains capteurs de cet ensemble sont défaillants, pour diverses raisons, le taux de couverture se dégrade temporairement, ce qui affecte la capture des données. Toutefois, ce problème ne persiste pas longtemps, étant donné qu'un autre ensemble dominant couvrant, sera déterminé lors de la prochaine période.

En fonctionnant par périodes, les capteurs ont souvent une chance d'être en mode sommeil. Ainsi, la durée de vie d'une batterie est approximativement deux fois plus longue si elle est déchargée par de courtes périodes, incluant des durées d'inactivité importantes, que dans un mode de fonctionnement continu [54, 55, 56]. Donc, avoir des nœuds capteurs basculant fréquemment entre l'état actif et l'état passif étend considérablement la durée de vie de leur batterie.

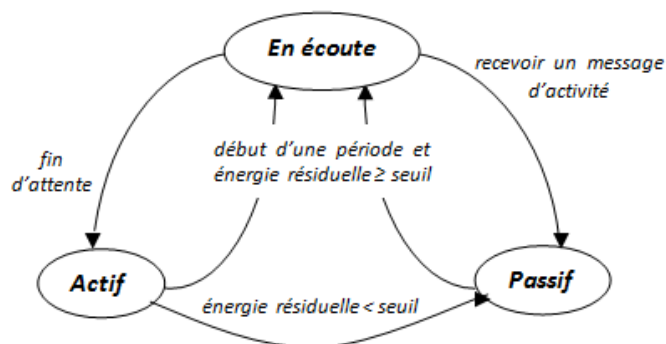
### 3.3.3 Diagramme de transitions d'états de DCovPDDS

Dans DCovPDDS, un nœud peut être dans l'un des trois états : *en écoute*, *passif* ou *actif*.

- *En écoute* : au début de chaque période d'activité, tous les nœuds se mettent en écoute pour décider de leur état.
- *Passif* : lors de la réception d'un message d'activité (en provenance d'un voisin actif), le nœud en écoute devient passif et conserve cet état jusqu'au début de la période suivante.
- *Actif* : si aucun message n'est reçu durant un temps d'attente, à l'expiration de ce dernier, le nœud se met à l'état actif (il est dominant) et envoie un message à ses voisins. A la fin d'une période, les nœuds ayant un niveau d'énergie résiduelle supérieur ou égal à un

*seuil* prédéfini (ce seuil est l'énergie nécessaire pour l'activité durant une période entière), regagnent une autre période, et les autres seront passifs (ils sont considérés comme défaillants).

Les transitions d'un nœud entre les différents états sont illustrées par le diagramme ci-dessous:



**Figure 3.2** : Diagramme de transitions d'état d'un nœud dans DCovPDDS

A l'état *passif*, le nœud est en mode sommeil afin de conserver son énergie. Durant son activité, le nœud surveille l'environnement et communique avec les autres capteurs.

Périodiquement, chaque nœud entre *en écoute* pour décider de son état dans une période d'activité donnée.

### 3.3.4 Hypothèses du travail

- Déploiement des capteurs
- Type du réseau
- Synchronisation des capteurs

#### 3.3.4.1 Déploiement des capteurs

Les capteurs sont au préalable déployés sur une zone à surveiller. Comme déjà expliqué dans le chapitre 1 (section 1.8.1), différents modes de déploiement sont envisageables. Lorsque l'environnement est accessible ou connu, il est possible de placer précisément les nœuds sur la zone d'intérêt, ce type de déploiement est dit *déterministe*. Néanmoins, l'utilisation des capteurs dans des zones inaccessibles, ou sensibles, rend impossible un tel type de déploiement. Les nœuds peuvent alors être déployés à l'aide de moyens divers (à partir d'un avion par exemple), et dans ce cas on parle de déploiement *aléatoire*.

Dans ce travail, nous supposons que les capteurs sont déployés aléatoirement. Une fois disséminés, on suppose que les capteurs sont statiques.

#### 3.3.4.2 Type du réseau

Le réseau de capteurs est constitué de nœuds déployés en forte densité, et ce pour garantir initialement une couverture totale de la zone d'intérêt. Dans un premier temps, nous supposons que les capteurs sont homogènes, dans la mesure où ils ont des rayons de communication et de surveillance (capture) identiques. Puis, nous examinerons le cas des réseaux hétérogènes.

Nous supposons aussi que les capteurs disposent d'un générateur de nombres aléatoires. De plus, deux nœuds ne peuvent pas avoir la même position géographique.

#### 3.3.4.3 Synchronisation des capteurs

Avoir un temps global, est essentiel à la réussite d'opérations, telle que la fusion de données relevées par différents capteurs, ou la datation d'événements rapportés. Il existe de

nombreux types de synchronisation, dont nous distinguons la synchronisation fine et la synchronisation ponctuelle. Par synchronisation fine, nous entendons qu'à tout moment deux capteurs du réseau ont le même temps d'horloge. En revanche, une synchronisation ponctuelle peut être obtenue à l'aide d'un message de signalisation synchronisant la totalité des nœuds à un instant donné.

Nous supposons que les capteurs sont synchronisés en temps. Puisque, notre protocole divise l'activité du réseau en périodes d'activités successives, cette synchronisation permet, au début de chaque période, à tous les capteurs de commencer le processus de décision au même moment. La synchronisation en temps du réseau, peut être assurée en appliquant un algorithme de synchronisation (voir [57] pour un état de l'art), ou par l'envoi d'un signal des stations puits ou d'une autre entité capable d'atteindre tous les capteurs (comme un hélicoptère par exemple, voir [58] pour plus de détails).

### 3.3.5 Modèles de communication et de capture

Le réseau de capteurs est modélisé par un graphe  $G = (V, E)$ ,  $V$  étant l'ensemble des sommets (capteurs) et  $E$  celui des arcs (liens de communication entre les capteurs). Une arête entre deux sommets  $u$  et  $v$  existe si  $u$  est physiquement capable d'envoyer un message à  $v$ . Un capteur est caractérisé par deux rayons différents : l'un pour la communication, noté **RCom**, et l'autre pour la capture, noté **RCap**. Deux capteurs sont voisins, si la distance qui les sépare, est au plus égale à RCom. Par conséquent, la communication est symétrique :

si un nœud  $u$  peut communiquer avec un nœud  $v$ , alors  $v$  peut aussi communiquer avec  $u$ . La surface couverte par un nœud  $u$ , appelée aussi zone de capture ou de surveillance, est la zone à l'intérieure de laquelle si un événement se produit, il sera perçu par le capteur  $u$ .

Cette surface est représentée par un cercle de rayon RCap centré en  $u$ . De même, la zone de communication est modélisée par un cercle de rayon RCom centré en  $u$ , à l'intérieur de laquelle le capteur  $u$  peut transmettre et recevoir des messages.

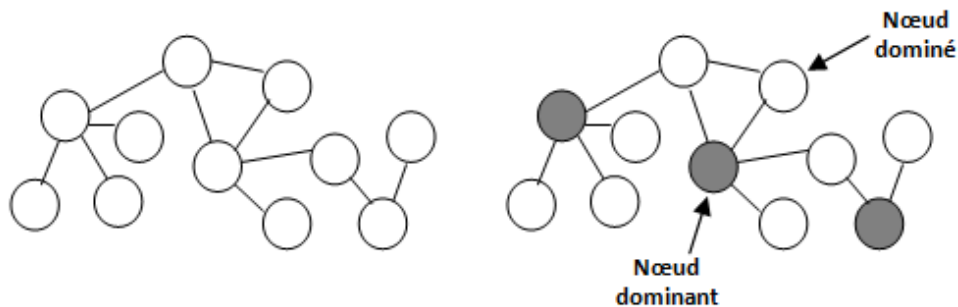
Dans ce travail, nous allons considérer a la portée de la communication, et le rayon de capture, qui sont ( $RCom=RCap$ ) .

### 3.3.6 Description détaillée de DCovPDDS

Etant donné un graphe non dirigé  $G = (V, E)$ , un ensemble dominant de  $G$  (noté par la suite ED), est un sous ensemble de sommets  $D \subseteq V$ , tel que tout sommet  $u$  du graphe, est soit dans  $D$ , soit voisin d'un sommet  $v \in D$  [41].

En d'autres termes, d'un point de vue du problème de la couverture, la définition d'un ensemble dominant est la suivante : étant donné un graphe non dirigé  $G = (V, E)$ , un ensemble dominant est composé d'un sous-ensemble de sommets, à partir desquels tous les autres sommets de  $G$  sont joignables (dominés).

Un graphe a plus d'un ensemble dominant, celui qui a la cardinalité minimale, parmi les autres, est appelé ensemble dominant minimum (noté par la suite EDM). La figure suivante illustre un graphe simple et son EDM correspondant.



**Figure 3.3** : Un graphe et son ensemble dominant minimum.

La détermination des ensembles dominants de cardinalité minimale, est un problème NP difficile [60]. Par conséquent, nous proposons une heuristique pour le résoudre.

soient:

- $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  l'ensemble des capteurs qui composent le réseau.
- $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  l'ensemble des liens de communication entre ces capteurs.

Donc,  $G = (V, E)$  est le graphe qui représente le réseau. Le but est de déterminer .

- $M = \{M_1, M_2, \dots, M_k\}$  la collection des EDMs du graphe  $G$ .

L'approche proposée vise, d'une part, à maximiser la cardinalité de  $M$ , et d'autre part, à minimiser la cardinalité de chacun de ses membres  $M_i$ .

A partir des hypothèses précédentes, et pour résoudre le problème de couverture, nous allons proposer le rayon de communication  $R_{Com}$  et le rayon de capture  $R_{Cap}$  sont égaux ( $R_{Com} = R_{Cap}$ ).



Ce protocole proposé permet la construction des EDMs de façon distribuée. En effet, chaque capteur exécute le protocole indépendamment des autres nœuds afin de déterminer son statut : est-il dominant ou non (dominé)?

DCovPDDS divise la durée de vie du réseau en périodes d'activité successives de mêmes longueurs, chacune est composée des deux phases suivantes :

**1) Phase de décision:** initialement, tous les nœuds sont en état d'écoute pendant une durée d'attente, et décident d'être *actifs* (dominants) ou *passifs* (dominés). Cette décision est basée sur des informations locales en énergie et activité.

**2) Phase de capture :** les nœuds actifs forment un EDM de tout le réseau, ils assurent la surveillance (la couverture) de la zone d'intérêt durant la phase de capture.

Les variables qui caractérisent un capteur  $i$  sont :

- $E_{initiale}$ : énergie initiale, elle est la même pour tous les nœuds.
- $EC_i$ : énergie courante ou résiduelle, initialement elle est égale à  $E_{initiale}$ .
- $PER_i$  : pourcentage de l'énergie résiduelle.
- $N_i$  : nombre aléatoire.
- $T_{attente_i}$ : délai d'attente.

la variable  $etat_i^p$  indique l'état du capteur  $i$  à la période  $p$ . Elle peut prendre l'une des valeurs suivantes :

- *écoute* : pendant la phase de décision, tous les nœuds sont initialement à l'état d'écoute.
- *actif* : le nœud est dominant, donc il décide d'être actif durant la phase de capture.
- *passif* : un nœud dominé, se met en mode sommeil pendant la phase de capture.

Il est à noter que lors de la première exécution de l'algorithme, on considère que tous les nœuds étaient passifs, c.à.d. la valeur de  $etat_i^0$  est égale à passif pour tout  $i$ .

Les fonctions utilisées par un capteur  $i$  sont :

- $reçu(j, Msg\_dom)$ : le nœud  $i$  a reçu un message de domination d'un voisin actif  $j$ .
- $envoyer(i, Msg\_dom)$ : le nœud  $i$  a envoyé un message de domination, suite à sa décision.

#### La fonction de calcul du temps d'attente

Le temps d'attente d'un nœud  $i$  pour une période d'activité  $p$  est calculé en fonction du pourcentage de son énergie résiduelle  $PER_i$  et de son état à la période  $(p - 1)$ . Le temps d'attente

inversement proportionnel au niveau d'énergie restante permettrait aux nœuds les plus faibles de décider tardivement ; maximisant ainsi leurs chances de conserver leur énergie en devenant passifs.

$$T_{attente} = A_i * \frac{1}{PE_{ri}} + N_i \quad (\text{N}^\circ \text{ de formule}) \quad \textbf{Formule (3.1)}$$

Tell que :

- $A_i$ : est le nombre de périodes d'activité où le nœud  $i$  a été actif.
- $N_i$ : est un nombre aléatoire uniformément distribué dans l'intervalle  $]a, b[$ .

il ermet d'éviter que deux nœuds voisins, qui ont la même quantité d'énergie courante, aient le même délai d'attente. Donc, ils décident simultanément, ce qui conduit à des trous de couverture (portions non surveillées de la zone d'intérêt). La valeur de la variable aléatoire  $N_i$  pour la période d'activité  $p$ , dépend de l'état du nœud  $i$  à la période  $(p - 1)$ , elle est générée comme suit :

$$N_i \in \begin{cases} ]0, \frac{PE_{ri}}{2} [ & \text{si le noeud } i \text{ était passif.} \\ ] \frac{PE_{ri}}{2}, 1 [ & \text{si le noeud } i \text{ était actif.} \end{cases}$$

Ces deux intervalles permettent à un nœud actif de choisir un nombre aléatoire élevé et à un nœud passif un nombre aléatoire faible. La formule (3.1) permet aux capteurs, ayant un pourcentage d'énergie résiduelle élevé, d'avoir un temps d'attente court, qui expire en premier. Par conséquent, ces capteurs ont plus de chances d'être *actifs*. En revanche, les nœuds possédant une faible quantité d'énergie, ont une longue durée d'attente. De plus, à chaque activité le niveau d'énergie d'un nœud  $i$  diminue et le nombre de sélections  $A_i$  croît. Donc, ce nœud aura un temps d'attente élevé dans les périodes suivantes, ce qui augmente la probabilité qu'il soit *passif*. De cette façon, DCovPDDS équilibre la charge entre les capteurs, en utilisant ceux ayant le niveau d'énergie résiduelle le plus élevé, pour assurer la couverture.

#### Les étapes d'exécution de DCovPDDS

Dans une période d'activité  $p$  donnée, le processus de décision d'un nœud  $i$  est décrit par l'algorithme DCovPDDS(i) ci-dessous. Pour rentrer en décision, l'énergie résiduelle d'un nœud doit être supérieure a un seuil prédéfini  $S_{euil}$ . Ce seuil est l'énergie nécessaire pour l'activité durant une période entière. Les nœuds qui participent à l'exécution de DCovPDDS, dans une période donnée, sont ceux appartenant à l'ensemble  $S = \{i / EC_i \geq E_{seuil}\}$ .

Tous les nœuds possèdent la même quantité d'énergie initiale  $E_{initiale}$ , a tout moment un nœud  $i$  peut connaître le niveau de son énergie courante  $EC_i$  (appelée aussi énergie résiduelle). Par conséquent, le nœud  $i$  peut calculer le pourcentage de son énergie résiduelle;  $PER_i = \frac{EC_i}{E_{seuil}}$  (ligne 1 de l'algorithme). Avant de prendre sa décision, chaque nœud calcule un délai d'attente qui est inversement proportionnel à son énergie résiduelle et en fonction de son état à la période précédente (lignes 2-6). Durant ce temps, le capteur écoute les messages transmis par les nœuds voisins ayant un temps d'attente inférieur au sien (lignes 7-9). Si ce temps s'écoule sans que le nœud reçoive de messages, c.-à-d. aucun des voisins n'est actif ; il conclut alors qu'il est dominant et décide de passer à l'état *actif* afin de surveiller sa zone de capture pour la période d'activité courante (ligne 11). Ainsi, le nœud transmet un message annonçant sa domination aux voisins directs (ligne 12). Dès qu'un nœud voisin reçoit ce message, il décide d'économiser son énergie en basculant directement vers le mode *passif* sans envoyer de message (ligne 13).

En d'autres termes, tout nœud est considéré comme dominant durant son attente. Dès qu'il reçoit un message de domination il devient dominé. Par conséquent, il se met dans l'état *passif*. Si son délai d'attente expire sans qu'il ne reçoive de messages, il annonce alors sa domination et passe à l'état *actif*. Donc tout nœud  $u$  ayant le plus court temps d'attente parmi ses voisins est actif, tandis que ces derniers sont passifs. On dit alors que le nœud  $u$  domine l'ensemble de ses voisins. Par conséquent, l'ensemble de tous ces nœuds (dominants leurs voisins) forme un ED de tout le réseau. A la fin de la phase de décision, tous les nœuds décident de se mettre dans l'un des deux états : actif pour les nœuds qui sont dominants, passif pour le reste. Les nœuds actifs sont les membres de l'EDM qui est chargé de couvrir la zone d'intérêt durant la deuxième phase.

L'algorithme DCovPDDS :

Algorithme DCovPDDS(i) a la période d'activité p.

**DEBUT**

$$1. PEr_i = \frac{EC_i}{E_{initiale}}$$

2. si  $\text{état}_i^{p-1} = \text{actif}$  alors /\* le nœud était actif durant la période précédente \*/

3. Générer  $N_i \in ]\frac{PEr_i}{2}, 1]$

4. Sinon Générer  $N_i \in ]0, \frac{PEr_i}{2}]$

5. Finsi

$$6. Tattente_i = A_i \cdot \frac{1}{PEr_i} + N_i$$

7. Tantque ( $Tattente_i > 0$ ) et ( $\text{non } \text{eçu}(j, \text{Msg\_dom})$ ) Faire

8.  $\text{état}_i^p = \text{écoute}$  /\* le nœud se met en écoute durant la phase de décision de la période courante \*/

9. Fin tantque

10. Si  $Tattente_i = 0$  alors

11.  $\text{état}_i^p = \text{actif}$  /\* le nœud décide d'être actif \*/

12. envoyer ( $i, \text{Msg\_dom}$ )

13. Sinon  $\text{état}_i^p = \text{passif}$  /\* le nœud décide d'être passif \*/

14. Finsi

**FIN**

### 3.4 Simulation et analyse des performances

Pour expérimenter la solution proposée, nous avons choisi d'utiliser notre propre outil de simulation. Cette décision a été prise après l'étude des simulateurs de réseaux de capteurs sans fil existants (NS-2 [61], OMNet++ [62], Glomosim [63], ...), qui étaient pour la plupart beaucoup trop lourds et peu adaptés à nos besoins. Nous pouvons citer pour exemple NS-2, pour lequel beaucoup de modifications étaient requises pour aboutir au résultat voulu. Le temps qui aurait été nécessaire pour réaliser ces modifications était bien supérieur à celui requis pour réaliser un simulateur minimal adapté à nos problèmes. De plus, de la part de la complexité de NS-2, il aurait été difficile de déterminer précisément si les modifications apportées ne corrompaient pas d'une manière ou d'une autre les résultats expérimentaux.

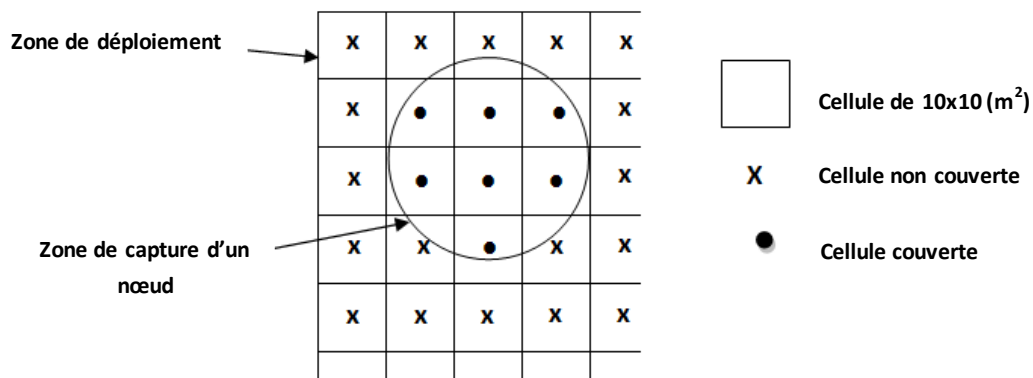
Afin d'analyser les performances du protocole proposé, nous avons développé un simulateur écrit en Java. Dans cette section, nous évaluons les performances de DCovPDS, puis nous comparons ses résultats avec ceux de deux autres solutions existantes. L'une de ces solutions est centralisée n'utilisant pas les positions de capteurs, proposée par Pazand et Datta [64], et l'autre est localisée basée sur l'utilisation de positions, proposée par Gallais et al [65].

#### 3.4.1 Les paramètres de simulation

Lors de l'expérimentation de notre protocole nous avons utilisé les paramètres de simulation suivants :

Les résultats présentés sont obtenus à partir de réseaux composés de nœuds déployés sur une zone carrée de dimension  $500 \times 500$  (m<sup>2</sup>). Nous avons la plupart du temps, simulé des réseaux allant de 100 à 1000 nœuds avec un pas de 100. Le déploiement des nœuds est uniformément aléatoire. Toute topologie n'est conservée pour la simulation que si elle couvre la totalité de la zone de déploiement (en considérant le rayon de capture des nœuds).

La couverture est quant à elle évaluée, en divisant la zone de déploiement en cellules de  $10 \times 10$  (m<sup>2</sup>). Une cellule est considérée couverte si son centre est couvert. Le pourcentage de zone couverte est alors le rapport entre le nombre de cellules couvertes par au moins un capteur et le nombre total de cellules [66].



**Figure 3.6 :** Méthode d'évaluation de la couverture, utilisée dans DCovPDDS [66].

### 3.5.CONCLUTION

Nous avons présenté DCovPDDS, un protocole distribué et localisé permettant de préserver la couverture dans les réseaux de capteurs homogènes et hétérogènes. Etant donné le contexte de ce type de réseaux, nous avons pu démontrer que notre protocole rivalise non seulement avec la solution centralisée CDSC [62], mais également avec les deux variantes PS et PNR (de la solution décentralisée proposée par Gallais et *al.* [34]) en terme de nœuds actifs, tout en réduisant considérablement le nombre de messages nécessaires, ce qui induit à une diminution de la consommation d'énergie. De plus, les performances de notre protocole en terme de taux de couverture ne se dégradent pas en présence des erreurs de transmission, ce qui est à l'inverse de CDSC. Enfin, en équilibrant la consommation d'énergie entre les capteurs, DCovPDDS étend considérablement la durée de vie du réseau.

Pour cette solution, nous sommes parvenus à respecter notre contrainte algorithmique, qui était de proposer un protocole totalement décentralisé. Nous sommes ainsi parvenus à un comportement global cohérent sur la base de décisions locales simples.

