

Chapitre 3

Problèmes de couverture

3.1 Introduction

Ce chapitre présente une revue des problèmes associés à la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil. Il expose dans un premier temps, les différentes motivations et les objectifs de l'étude de la couverture dans les RCSFs, de manière générale. Ensuite, en parcourant la littérature, les différents aspects du problème sont présentés. Une classification des types de couverture, par rapport à l'objet d'étude, les stratégies usuellement adoptées pour ordonnancer l'activité des capteurs, les paradigmes de calcul qui se rapportent à la nature des protocoles adoptés, et à la hétérogénéité des équipements sont abordés dans ce chapitre. Ces différents aspects sont successivement évoqués à travers les différentes sections, suivies d'une conclusion partielle en fin de chapitre.

3.2 Motivations et objectifs de la couverture

La couverture est souvent vue comme une mesure collective de la qualité de service dans un réseau, par rapport à l'observation d'un phénomène. Bien qu'il est plus aisé de définir un certain nombre d'objectifs de couverture en accord avec les exigences d'une application spécifique, certaines problématiques restent assez communes à presque toutes les applications : c'est le cas de l'énergie. Étant donné que l'efficacité énergétique est essentielle dans le fonctionnement d'un réseau de capteur, la gestion de cette contrainte est très souvent associée aux problèmes de couverture. Un capteur accomplissant ses fonctions consomme de l'énergie pour acquérir et générer des données. La source d'énergie des capteurs étant limitée, celle-ci doit être minutieusement contrôlée pour que la durée de vie désirée puisse être atteinte. Aujourd'hui, les plateformes de programmation intègrent des modules de contrôle de leur unité d'acquisition, qui leur permet d'activer ou de désactiver leur modules d'acquisition et de communication pour bien gérer leur source d'énergie.

Dépendant des applications, l'étude de la couverture pourrait être un préalable au déploie-

ment des capteurs dans une zone. Dans un déploiement déterministe, l'étude de la couverture permettrait de minimiser le nombre et/ou le coût des capteurs à déployer. Pour un déploiement aléatoire, l'étude de la couverture permet de déterminer la densité minimale que doit atteindre la population des capteurs, à déployer dans la zone d'intérêt, afin de maximiser la proportion d'espace couverte.

Dans un réseau de capteurs hétérogène, c'est-à-dire où les capteurs ne disposent pas des mêmes capacités, une bonne stratégie de couverture exploite les capacités de chaque classe de capteurs pour maximiser la qualité de service globale.

La gestion de la couverture dans un réseau doit également prendre en compte d'autres contraintes telles que la connectivité qui est une problématique aussi importante que la couverture. Etant donné que la tâche de détection des capteurs concerne à la fois l'acquisition et le report des données vers un point spécifique du réseau (station de base), toute solution proposée pour la gestion de la couverture, devrait intégrer le problème de la connectivité. Les capteurs peuvent transmettre les données soit directement vers une station de base, soit indirectement en faisant transiter l'information d'un capteur à l'autre jusqu'à la station de base.

En outre, les techniques proposées pour la gestion de la couverture dans les RCSFs, doivent s'adapter aux topologies dynamiques, au passage à l'échelle et à toute autre contrainte caractérisant le réseau opérant.

3.3 Types de couverture

Le type de couverture se réfère à l'objet d'étude. Cardei et al. [16] ont tenté de classifier les différents problèmes de couverture en trois types, en se basant sur l'objet d'étude : la couverture de surface (ou couverture de zone), la couverture de cibles (couverture par point) et la couverture de barrière. On parle de couverture de surface lorsque l'objectif de l'application c'est de surveiller une zone entière. Celle-ci peut constituer une surface plane ou un espace à trois dimensions. La couverture de cibles se réfère à la couverture dont l'objet d'étude constitue un ensemble de points discrets appelés cibles, localisés de manière précise dans une zone d'intérêt. Enfin pour la couverture de barrière, l'objectif c'est de concevoir une barrière de capteurs de manière à minimiser au maximum possible la probabilité d'intrusion d'un élément à travers la barrière. La couverture de surface a été amplement étudiée dans la littérature[61, 54]. Nous passons en revue la couverture de cibles et quelques problématiques de la couverture de barrière.

3.3.1 Couverture de cibles

Lorsque la zone de déploiement est accessible ou que sa taille n'est pas aussi grande, un déploiement déterministe des noeuds peut être effectué. Dans le contexte de la couverture de cibles, un déploiement déterministe consiste à placer les noeuds à des emplacements précis dans la zone d'intérêt de façon à ce que chaque noeud couvre au moins une cible. L'objectif principal du déploiement déterministe se résume à trouver les emplacements optimaux dans la zone d'in-

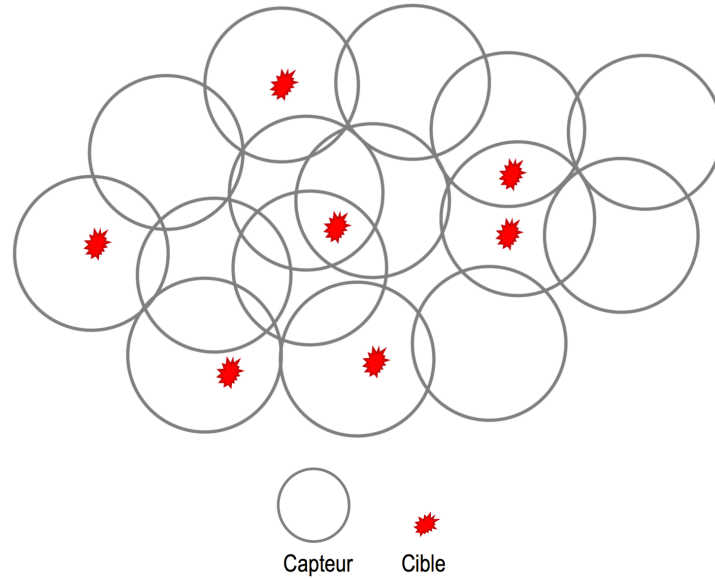


FIGURE 3.1 – Couverture de cibles.

térêt où les capteurs seront placés tels que le nombre de noeuds utilisé soit minimisé et que les exigences en termes de couverture soient satisfaites. Dans certains scénarios, différents types de capteurs sont utilisés impliquant des coûts différents pour chaque type de capteur. Dans ce cas, le déploiement prend en compte la minimisation du coût total des noeuds utilisés pour satisfaire la couverture. Pour les capteurs directionnels, l'objectif revient souvent à optimiser l'orientation des capteurs afin de maximiser la couverture des cibles.

Beaucoup de techniques peuvent être utilisées pour modéliser et résoudre le problème d'optimisation du placement des noeuds. La programmation linéaire permet de formaliser la plupart des problèmes d'optimisation. Lorsque l'espace de solution n'est pas assez grand, une recherche exhaustive de l'ensemble des placements possibles peut être effectuée afin de trouver l'optimum global. La recherche exhaustive est régie par un rapport de complexité définie dans l'équation 3.1 :

$$C = \sum_{i=1}^I (I, i) = 2^I - 1 \quad (3.1)$$

I est le nombre de sites disponibles dans une zone de couverture donnée. Selon l'équation 3.1, la complexité de la recherche exhaustive augmente de manière exponentielle avec le nombre de sites disponibles. Des algorithmes d'approximation basés sur les modèles gloutons[24, 25, 86, 97, 92, 84, 38], les algorithmes génétiques[93, 91, 75, 95] et autres techniques d'approximation[76, 8, 56, 94, 2] ont été proposées pour résoudre efficacement le problème lorsque l'espace de solution devient plus grand. Les solutions d'approximation permettent de contourner les limites en termes de complexité des solutions optimales, en proposant des solutions sous-optimales pouvant résoudre efficacement et en un temps raisonnable le problème de l'optimisation du placement des noeuds.

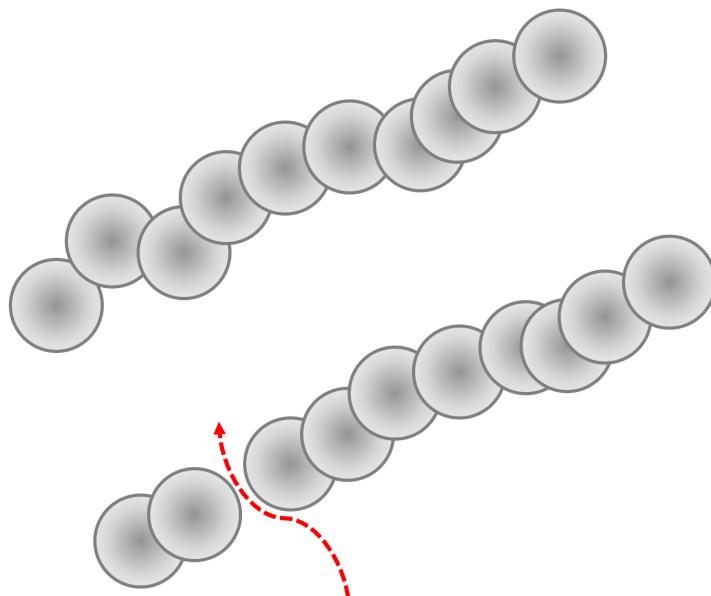


FIGURE 3.2 – Couverture de barrière.

3.3.2 Couverture de barrière

La couverture de barrière est une notion d'abord introduite dans le contexte de la robotique [41]. Dans ce type de couverture, l'objectif consiste à minimiser la probabilité d'intrusion d'un élément à travers une barrière. Les capteurs peuvent être déployés de manière linéaire, de façon à former une barrière, à partir du chevauchement de leurs zones de communication. Une illustration est donnée à la figure 3.2. Lorsque la barrière est bien formée, toute intrusion à travers la barrière est susceptible d'être détectée par l'un des capteurs [37].

La notion de chemin couverte est définie dans [64] et des algorithmes efficaces sont proposés pour trouver les voies d'exposition maximale et minimale entre deux extrémités correspondant à la plus faible et à la plus forte probabilité qu'une intrusion soit détectée par les capteurs de la barrière. La notion d'exposition pathologique est introduite pour mesurer la probabilité qu'un intrus soit détecté en se déplaçant le long d'un chemin donné. Un algorithme centralisé est proposé afin de trouver des chemins d'exposition minimale, où la probabilité qu'un intrus soit détecté est minimisée. Ces problèmes seront par la suite étudiés dans [59, 83] et des algorithmes distribués efficaces seront proposés. Dans [21], la détection des intrus traversant une région en utilisant un schéma collaboratif de détection est étudiée. Dans [4], il a été proposé un cadre d'optimisation pour la sélection des positions des capteurs pour détecter les cibles mobiles traversant une zone donnée.

Par ailleurs, la question du déploiement étant essentielle dans la couverture de barrière, la répartition des capteurs dans la région suivant une distribution de Poisson a été comparée dans [72] avec un déploiement linéaire, c'est-à-dire suivant une ligne où les capteurs sont déployés par voie aérienne. Les déploiements de capteurs suivant plusieurs lignes adjacentes ont mis en évidence comment la couverture de la barrière est affectée par la distance entre lignes adjacentes

et l'imprécision dans le placement des capteurs. Les résultats démontrent que les stratégies de déploiement des capteurs ont un impact direct sur la couverture de barrière du réseau. Différentes stratégies de déploiement peuvent entraîner la construction de différentes barrières, et donc une couverture significativement différente.

3.4 Déploiement et couverture

Un déploiement peut être dense ou non dépendant de l'application, où de la zone à surveiller. Généralement un déploiement dense est exigé dans les environnements inaccessibles, où disperser les capteurs dans la zone constitue l'alternative. Pour la couverture de cibles, un déploiement aléatoire consiste à disperser plusieurs capteurs autour de chaque cible augmentant ainsi la probabilité que chaque cible dans la zone soit couverte (applications militaires).

Un déploiement déterministe pose le problème de l'optimisation du placement des capteurs dans la zone d'intérêt tel que les objectifs de l'application soient satisfaits. Beaucoup de techniques ont été proposées dans la littérature. Celles-ci se basent souvent sur le modèle de couverture des capteurs et sur des techniques d'optimisation géométriques.

Le problème de la couverture peut être étudié par rapport à un déploiement dynamique. Un déploiement dynamique implique un redéploiement des capteurs dans la zone après le déploiement initial avec l'utilisation de capteurs mobiles.

3.5 Ordonnancement d'activité

L'ordonnancement d'activité se réfère au contrôle de l'activité des capteurs dans une zone d'intérêt, pour optimiser leur consommation d'énergie. Dans les environnements où les capteurs sont déployés de manière très dense, le nombre de capteurs est souvent supérieur à l'optimum nécessaire. C'est le cas des applications de couverture de surface et de cibles dans certains environnements (milieux désastreux, champs militaires, etc,...). Les capteurs doivent fonctionner de manière autonome, pour couvrir des cibles, pendant une certaine durée. L'énergie peut être efficacement gérée en alternant l'activité des capteurs afin de maximiser la durée de vie du réseau. Si les capteurs sont déployés en surnombre dans le champ, l'activation d'un sous-ensemble de capteurs permet d'atteindre les objectifs de couverture. Les algorithmes d'ordonnancement tentent souvent de maintenir un sous-ensemble de capteurs actif durant un certain temps avant d'en activer un autre. Pour la couverture de cibles, lorsque plusieurs capteurs sont susceptibles de couvrir les mêmes cibles, dans ce cas, les activer un à un successivement serait une meilleure solution que de les activer en même temps.

3.5.1 Stratégies d'ordonnancement

Dans le contexte du déploiement aléatoire, les nœuds sont souvent dispersés en surnombre dans une zone d'intérêt pour surveiller un ensemble de points cibles, ou une zone entière. Un point cible est susceptible d'être couvert par plusieurs nœuds simultanément. Au cas où une couverture de toutes les cibles ou de la zone est garantie par le déploiement, activer tous les nœuds ne serait pas une solution efficace à la gestion de l'énergie. Partitionner les nœuds en plusieurs sous-ensembles à activer successivement est une approche plus efficace. La figure 3.4 illustre cette stratégie. Une vue de la topologie est donnée sous forme de schéma, avec les capteurs sous forme de disque reflétant leurs zones de capture, et quelques points cibles matérialisés par les points rouges. Un capteur couvre une cible si cette dernière est placée à l'intérieur de sa zone de capture. Deux ensembles couvrants comme illustrés dans les figures 3.3b et 3.3c peuvent être formés à partir de la figure 3.3a.

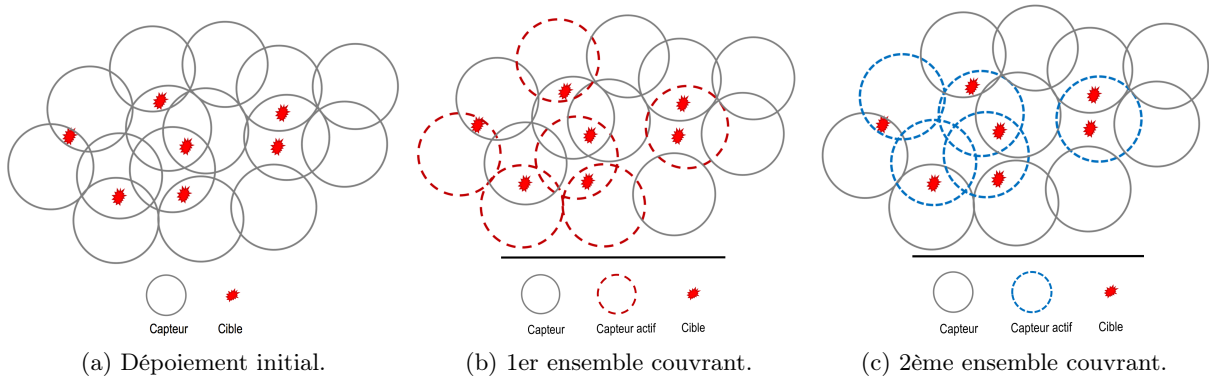


FIGURE 3.3 – Répartition des capteurs en plusieurs ensembles couvrants.

3.5.2 Algorithmes d'ordonnancement

L'approche des ensembles couvrants consiste à organiser les nœuds déployés en plusieurs sous-ensembles appelés ensembles couvrants, tels que chaque ensemble satisfait une couverture complète de la zone d'intérêt. Les ensembles seront successivement activés pour minimiser la quantité d'énergie consommée. Chaque ensemble actif contient les seuls nœuds actifs de la zone à un instant donné. Tous les autres nœuds éteignent leur unités d'acquisition jusqu'à ce que leur ensemble soit activé.

Dans une stratégie de répartition des capteurs en plusieurs ensembles, les ensembles peuvent être disjoints, non-disjoints, dominants. Les ensembles sont dits disjoints si les nœuds sont partitionnés en plusieurs sous-ensembles exclusifs [78, 14, 101, 30], c'est-à-dire l'intersection de tous les sous-ensembles de la partition est vide. Dans ce cas chaque nœud ne peut appartenir qu'à un seul ensemble. Ce qui implique le fait que chaque nœud ne peut être actif qu'une seule fois durant la durée de vie du réseau. Les ensembles sont non-disjoints [15, 102, 29] si l'intersection de tous

les sous-ensembles de la partition n'est pas vide. Un nœud peut donc participer à k ensembles et peut donc être actif k fois. La totalité de l'énergie consommée par le capteur est égale à la somme de l'énergie consommée par ce capteur dans tous les ensembles. Celle-ci doit être inférieure ou égale à sa quantité initiale d'énergie. Les ensembles non-disjoints permettent de mieux étendre la durée de vie du réseau comparés aux ensembles disjoints. Il a été démontré dans [15] que l'espace de solution des ensembles disjoints est inclus dans celui des ensembles non-disjoints.

L'approche des ensembles dominants a été introduite dans la couverture de surface. Un ensemble dominant possède la propriété que chaque nœud du réseau est soit membre de l'ensemble, ou possède un voisin à sa portée de communication appelé dominateur qui appartient à l'ensemble. Les ensembles dominants permettent de relaxer la contrainte d'une couverture complète au bénéfice d'étendre davantage la durée de vie du réseau. L'approche peut être formalisée par un graphe non orienté $G = (V, E)$, avec V désignant l'ensemble des nœuds (sommets) et E représentant les liens entre deux nœuds voisins. Deux nœuds sont voisins s'ils se trouvent chacun à la portée de capture (ou de communication) de l'autre. Un ensemble dominant est un sous-ensemble $V' \subseteq V$ tel que chaque nœud n'appartenant pas à V' possède au moins un voisin dans V .

Plusieurs travaux introduisent l'approche des ensembles comme une solution à l'ordonnancement des nœuds. L'ordonnancement est synchronisé et l'objectif est souvent associé à la maximisation de la durée de vie du réseau. Le problème posé revient souvent à trouver le maximum possible d'ensembles couvrants ainsi que le temps d'opération associé à chaque ensemble tel que chaque ensemble satisfait une couverture entière de la zone. Ce problème est Np-complet. Beaucoup d'algorithmes et de techniques d'approximation ont été proposées pour résoudre ce problème.

3.6 Caractéristiques des algorithmes

Un algorithme de gestion de la couverture peut être centralisé ou distribué. Un algorithme est centralisé s'il est exécuté à la station de base et le résultat est transmis aux capteurs. Les algorithmes centralisés requièrent généralement la connaissance de la position de chaque capteur dans le réseau. Une fois déployé, chaque capteur envoie ses données (coordonnées géographiques par GPS, et identifiant) à la station de base. Celle-ci exécute l'algorithme et renvoie les résultats aux capteurs. Chaque capteur prend ainsi connaissance de son temps d'activité dans le réseau. Les algorithmes de couverture centralisés ne sont applicables qu'aux configurations à échelle relativement petite et possèdent l'avantage de contourner les limitations en capacités de calcul des capteurs. A l'opposé, les algorithmes distribués sont plus pratiques pour les architectures à large échelle. Les capteurs coopèrent localement par échange de messages pour prendre des décisions. Les algorithmes distribués exigent des capteurs une certaine capacité de calcul. Ils sont plus tolérants aux pannes que les algorithmes centralisés.

3.6.1 Algorithmes centralisés

Les solutions centralisées adressent souvent le problème du partitionnement des nœuds en plusieurs ensembles appelés ensembles couvrants tels que chaque ensemble satisfait un certain nombre de critères (disjoints, non-disjoints, dominants, ...) tout en prenant en compte d'autres objectifs conjointement à celui de la couverture. Une vue détaillée de solutions algorithmiques centralisées est proposée dans [31].

3.6.2 Algorithmes distribués

Dans les algorithmes distribués, les nœuds décident de leur statut en se basant sur les informations échangées avec les nœuds voisins. Supposons un scénario distribué constitué de plusieurs rounds au début desquels chaque nœud prend la décision soit d'entrer en mode actif ou en mode inactif. Pour qu'un nœud prenne une décision, la première étape revient à tester la règle d'éligibilité. Celle-ci consiste à déterminer si la surface couverte par ce nœud peut être couverte par ses voisins actifs. Si tel est le cas, le nœud est redondant par rapport à la couverture et est éligible pour alterner son état en mode inactif. Le nœud est en veille durant tout le temps que la propriété de redondance reste vérifiée. Sinon le nœud passe en mode actif. La deuxième étape est la gestion de l'activation et de la désactivation des nœuds de façon à garantir une synchronisation globale et une cohérence dans les transitions entre les états.

Vérification de la redondance

Les algorithmes distribués avec l'objectif de garantir une couverture complète de la zone d'intérêt utilisent différentes techniques pour vérifier la redondance des nœuds. Beaucoup d'entre elles sont basées sur les propriétés géométriques que présentent certains modèles de couverture comme le modèle de disque. Une approche intuitive peut être de considérer toute la zone d'intérêt comme un ensemble de points discrets. Un nœud est caractérisé par l'ensemble des points qu'il couvre dans la zone. Pour tester la redondance, un nœud peut simplement vérifier si l'ensemble des points qu'il couvre peut être couvert par les nœuds actifs de son voisinage.

La notion de champs introduite par Slijepcevic et Potkonjak [78] permet de vérifier la technique de redondance. Un champ est défini tel que chaque point inclu dans un champ est couvert par le même sous-ensemble de nœuds. Bien que relativement simple, cette technique nécessite une complexité de calcul non négligeable de même que des capacités de stockage importantes.

Tian et Georganas [81] ont introduit la notion de secteur sponsorisé. Étant donnés i et j deux nœuds voisins et $S(i)$ et $S(j)$ les zones de couverture de i et j respectivement, représentées par des disques, les deux zones se rencontrent sur la partie ombrée de la figure 3.4a représentée par $S(i) \cap S(j)$. Le secteur limité par les deux segments $[N_i P_1]$ et $[N_i P_2]$ et par l'arc $\overline{P_1 P_2}$ est défini comme le secteur sponsorisé par le nœud j au nœud i (figure 3.4a(b)). L'angle de ce secteur est noté $\theta_{i \rightarrow j}$ et la direction $\phi_{j \rightarrow i}$.

La règle d'éligibilité peut être exprimée comme suit :

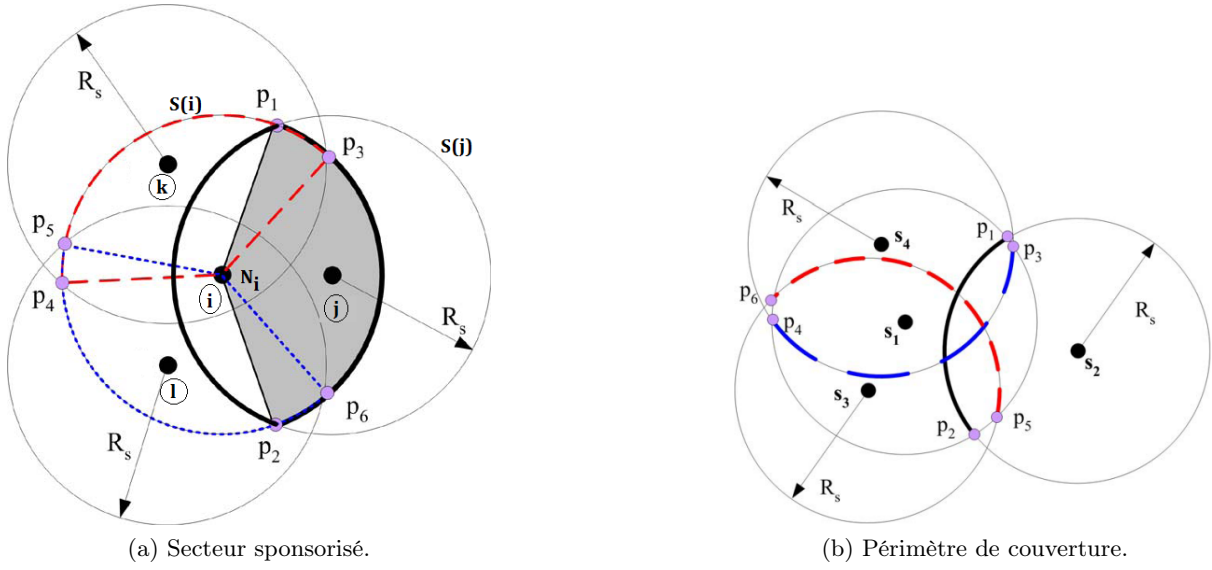


FIGURE 3.4 – Techniques de vérification de la redondance dans des scénarios distribués [85].

$$\bigcup_{j \in N(i)} S_{j \rightarrow i} \supseteq S(i) \quad (3.2)$$

avec

$$N(i) = \{j \in S / d(i, j) \leq r, j \neq i\} \quad (3.3)$$

S désigne l'ensemble des nœuds déployés dans la zone et $d(i, j)$ est la distance séparant les nœuds i et j .

La notion de périmètre de couverture introduite par Huang et al. [49] permet également de vérifier la redondance comme le montre la figure 3.4b. Un nœud est éligible s'il est candidat pour ses voisins directs. Deux nœuds s_1 et s_2 sont des voisins directs si $d(s_1, s_2) \leq 2R_s$. Dans la figure 3.4b, le nœud s_1 possède trois voisins directs et l'arc $\widehat{P_1P_2}$ est un segment du périmètre de couverture de s_2 inclus dans s_1 et est couvert par les nœuds s_3 et s_4 . D'autres techniques de vérification de la redondance ont été proposées, basées sur le diagramme de Voronoi (Carbunar et al. [13]). Un diagramme de Voronoi pour N nœuds dans une surface est une subdivision de la surface en plusieurs cellules contenant chacune un nœud tel que la distance entre le nœud et un point quelconque de la cellule est plus proche que la distance entre ce point et n'importe quelle autre nœud.

Gestion de l'ordonnancement

Après qu'un nœud ait vérifié la propriété de redondance, la décision prise ne doit pas mener à une incohérence. Le phénomène des *trous de couverture* intervient lorsque deux ou plusieurs nœuds voisins prennent en même temps la décision d'entrer en mode inactif. Un vide est ainsi créé correspondant à l'espace physique entourant ces 2 capteurs, appelé trou de couverture. Ce

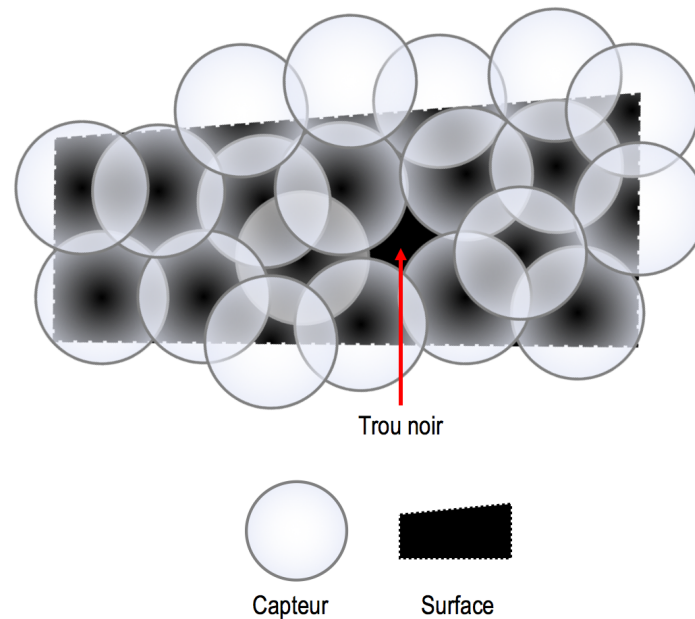


FIGURE 3.5 – Illustration des trous noirs.

phénomène peut être évité en introduisant des algorithmes de *back-off* ou des procédures efficaces pour garantir une cohérence dans la prise de décision. Généralement, on distingue deux approches dépendant des messages échangés et des procédures utilisées.

Pour la première approche, chaque nœud maintient une liste de ses voisins actifs et vérifie la redondance en supposant que tous ses voisins sont actifs. Si la redondance est vérifiée le nœud initialise un temps d'attente aléatoire et temporise jusqu'à l'expiration de ce temps. Si avant l'expiration du temps d'attente, le nœud reçoit un message de ses voisins, le nœud met à jour la liste de ses voisins actifs et revérifie la redondance. Si le temps d'attente du nœud expire sans recevoir de message, il émet un message de diffusion annonçant sa décision d'entrer en mode inactif.

La deuxième approche se différencie de la première au sens où elle introduit une activation séquentielle des nœuds. Chaque nœud tente de s'activer selon une certaine probabilité. Si l'activation réussit, le nœud diffuse un message à ses voisins leur annonçant sa décision. Sinon il maintient un temps d'attente et ajuste la probabilité d'activation. Le nœud attend l'expiration de son temps d'attente et si un message est reçu par le nœud, il met à jour la liste de ses voisins actifs et réajuste son temps d'activation avant de vérifier la redondance.

Les étapes de base des deux approches sont illustrées dans les deux organigrammes des figures 3.6 - 3.7.

Distribué vs centralisé

Comparer des protocoles centralisés et distribués revient à confronter des éléments de formulation basés sur des logiques de calcul différents. Le premier est basé sur l'itération de procédures étalée sur un ordre séquentiel. Le deuxième est basé sur une répartition des éléments de calcul

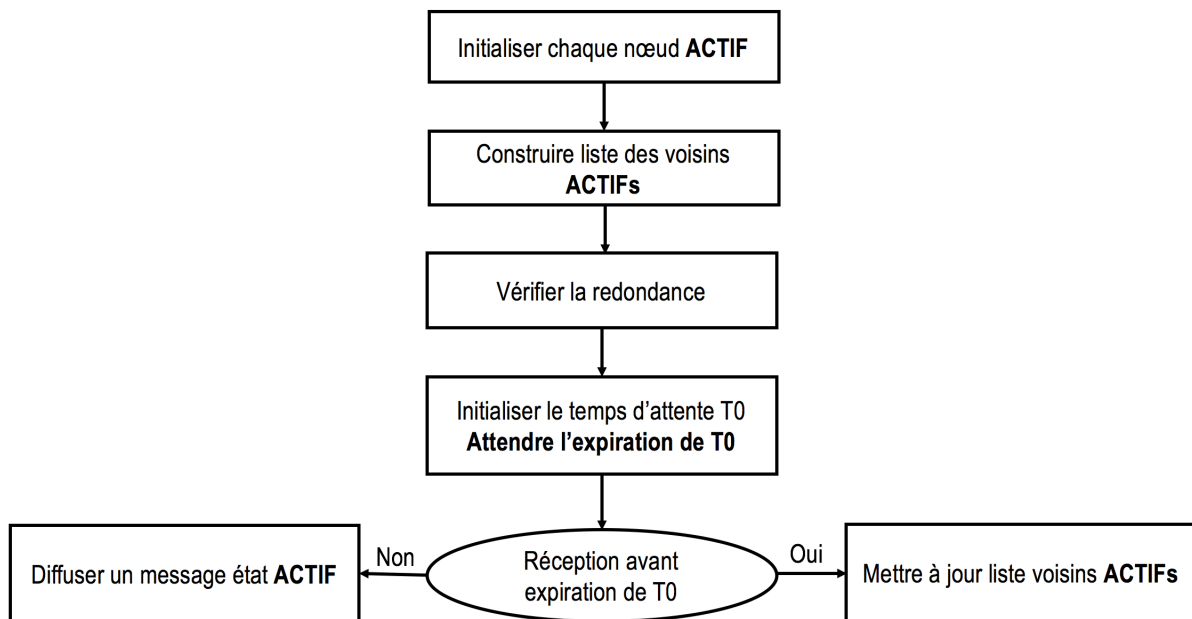


FIGURE 3.6 – Étapes de base de la première approche d’ordonnancement.

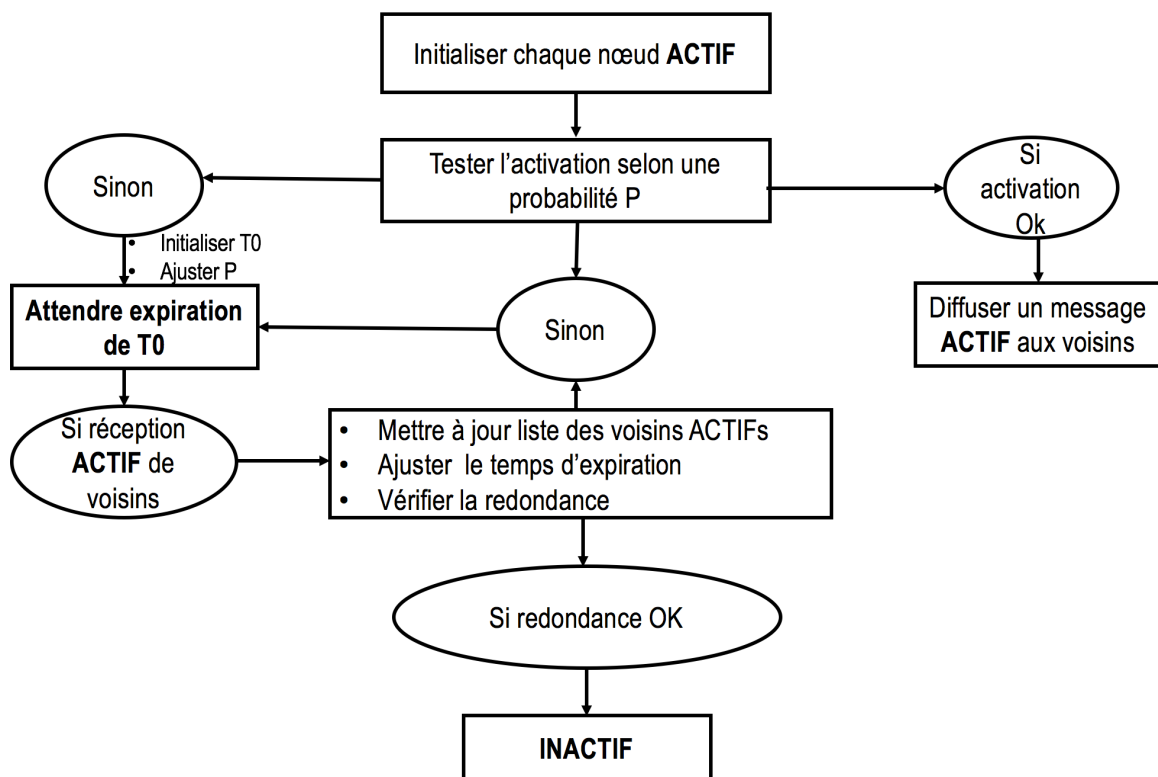


FIGURE 3.7 – Étapes de base de la deuxième approche d’ordonnancement.

sur plusieurs supports de traitement, représentés dans ce contexte par les capteurs eux-mêmes. Dans ces travaux [32], deux types de protocoles ont été développés pour la planification de la couverture et le maintien de la durée de vie d'un réseau des capteurs. Le premier est un algorithme glouton de génération d'ensembles couvrants non-disjoints, basé sur une version modifiée du problème classique des ensembles couvrants[20, 39]. Deux autres protocoles distribués (ALARM[27] et HSA[28]) sont aussi développés pour optimiser la gestion de l'énergie et le contrôle d'une topologie à grande échelle. Ils sont basés sur le concept de «Sentinel» et la nécessité de fonctionner dans des réseaux très denses. Le schéma se compose de deux parties, la procédure de planification de la veille reposant sur la redondance des noeuds, et l'ajustement dynamique de la fréquence d'éveil¹ des capteurs pour mieux tirer parti de la redondance et une procédure de recouvrement efficace pour prendre en compte les cas d'échec. La confrontation des deux solutions met en évidence un équilibrage de charge dans le calcul distribué, une meilleure gestion de l'énergie, ainsi qu'une réduction significative de la consommation d'énergie. En plus, d'autres aspects tels que le passage à l'échelle, et la réparation des trous de couverture sont aussi plus flexiblement pris en compte dans les architectures distribuées, du fait de l'autonomie des capteurs. Cependant, une durée de vie meilleure est atteinte avec la solution centralisée. La centralisation de protocole apporte plus de contrôle sur le réseau, et permet d'opérer sur une vue globale de celui-ci. Ce qui influence l'obtention de solutions optimales, ou quasi-optimales, très proches de l'optimum théorique.

3.7 Couverture et hétérogénéité des capteurs

L'hétérogénéité se réfère au fait que certains capteurs dans un réseau peuvent disposer de plus de capacités (rayon de détection, rayons de communication, énergie...) que d'autres. Certains capteurs munis de locomoteurs sont capables de se déplacer dans la zone[100]. Dans certains réseaux, les capteurs possèdent des rayons de détection différents : les capteurs disposant d'une plus grande portée (rayon de détection) peuvent couvrir plus d'espace que d'autres. Dans d'autres scénarios, les capteurs peuvent ajuster dynamiquement leurs rayons de détection pour contrôler les zones ou les cibles couvertes dans la zone d'intérêt. Dans tous ces cas, la gestion de la couverture peut exploiter les aptitudes de chaque capteur pour augmenter la qualité de la couverture globale du réseau. Les capteurs mobiles permettent d'effectuer des tâches performantes dans un réseau telles que réparer les trous de couverture. Un trou de couverture consiste à un espace non couvert ou une cible non couverte et peut être lié au déploiement ou à une panne inattendue des capteurs dans un réseau. Concernant les réseaux disposant de capteurs mobiles, le problème souvent posé par la couverture c'est comment planifier la trajectoire des capteurs mobiles pour gérer efficacement l'énergie consommée lors de chaque déplacement [100, 18, 48].

1. Afin de balancer du mode « inactif » et « actif »

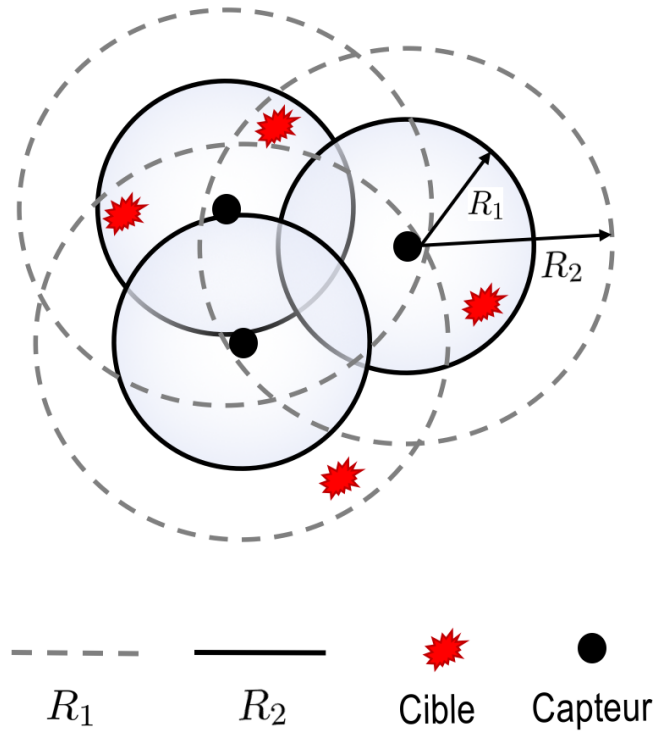


FIGURE 3.8 – Couverture de cibles et noeuds aux rayons ajustables.

3.7.1 Couverture et rayons ajustables

Les travaux présentés dans [17, 23] adressent le problème de la couverture de cibles où les noeuds peuvent ajuster leurs portées de capture afin d'économiser davantage de l'énergie. Un noeud possédant une portée de capture ajustable peut contrôler celle-ci à une valeur optimale nécessaire pour satisfaire la couverture de plusieurs cibles. Un noeud peut donc choisir d'augmenter sa portée de capture soit pour couvrir davantage de cibles ou la diminuer au cas où il en déjà couvert assez. De ce fait, l'ajustement de la portée de capture des noeuds appliqué conjointement avec l'ordonnancement des noeuds par l'approche des ensembles couvrants, permet de réduire de manière remarquable la consommation d'énergie dans tout le réseau, comparé au cas où tous les noeuds possèdent des rayons de capture fixe. La figure 3.8 illustre un réseau dont les noeuds disposent de portées de capture ajustables.

Cardei et al.[17] ont proposé une extension de leurs travaux dans [15] en considérant des noeuds à portées de capture ajustables. Le problème adressé consiste à trouver un nombre maximal d'ensembles couvrants ainsi que la portée de capture minimale et nécessaire associée à chaque noeud tel que chaque ensemble garantit une couverture complète. Trois heuristiques ont été proposées pour résoudre le problème. La première solution est basée sur la programmation linéaire. La deuxième est une heuristique centralisée basée sur un algorithme glouton pour constituer des ensembles couvrants. Initialement, la portée de tous les noeuds est initialisée à 0 et des ensembles couvrants sont formés successivement à chaque itération en privilégiant les noeuds ayant une plus grande contribution. La contribution d'un noeud est définie comme étant le rapport entre le

nombre de nœuds non couvertes par un nœud i avec une portée de capture r_p et la quantité d'énergie associée à cette portée. La troisième solution proposée est distribuée et s'exécute sur plusieurs rounds au cours desquels chaque nœud maintient un temps d'attente w_i dépendant de sa contribution avant de décider de son statut. Lorsqu'un nœud reçoit un message de ses voisins, il met à jour la liste des cibles qu'il peut couvrir, ajuste sa portée de capture à la valeur minimale nécessaire pour couvrir la liste des cibles, met à jour sa contribution avant d'ajuster son temps d'attente. A la fin de son temps d'attente, le nœud émet un message de diffusion contenant les cibles qu'il couvre. Lorsque la liste des cibles qu'un nœud peut couvrir est vide, alors il émet un message de diffusion annonçant sa décision d'entrer en mode inactif. Selon les résultats de simulation, l'énergie consommée peut être réduite de moitié comparée à l'approche de base.

Dans [62], Lu et al. adressent le problème du maintien de la connectivité et de la couverture par ajustement de la portée de capture des nœuds comme une extension des travaux dans [17]. Un protocole distribué a été proposé pour résoudre le problème. Il est constitué de deux phases : une phase d'initialisation de la connectivité et une autre phase pour garantir la couverture. Durant la phase d'initialisation de la connectivité, chaque nœud applique une règle d'éligibilité pour déterminer son statut (actif ou inactif). Un nœud i entre en mode inactif si les nœuds de son voisinage de priorité supérieure sont connectés et que ses voisins de priorité inférieure sont couverts par ceux de priorité supérieure. La règle d'éligibilité est exécutée par chaque nœud jusqu'à former une dorsale de communication où tous les nœuds (dominateurs) gardent une portée minimale. Les autres nœuds sont dits dominés. Après la phase d'initialisation, la seconde phase est entamée pour garantir la couverture où nœuds dominateurs et dominés ajustent itérativement leurs portées de capture en se basant sur leurs contributions (le ratio du nombre de cibles non couvertes sur la quantité d'énergie pour une valeur de portée de capture donnée) jusqu'à ce qu'une couverture complète des cibles soit atteinte. Chaque nœud temporise durant un temps inversement proportionnel à sa contribution maximale. Si le nœud reçoit un message de ses voisins avant l'épuisement de son temps, il recalcule sa contribution et ajuste son temps d'attente. S'il épuise son temps avant de recevoir un message de ses voisins, le nœud émet un message de diffusion contenant sa contribution et l'ensemble des cibles couvertes.

3.8 Couverture et qualité de service

La qualité de service de la couverture est souvent définie en accord avec les objectifs d'une application donnée. Le concept de ratio de couverture permet d'évaluer la proportion d'espace dans le champs, couverte par tous les capteurs, par rapport à l'espace total du champs. Dans le contexte de la couverture de cibles, le ratio de couverture représente le nombre de cibles couvertes par tous les capteurs dans une zone, sur le nombre total de cibles contenues dans la zone. Le ratio de couverture peut être défini en termes de pourcentage. Pour la couverture de zone, on dit que le ratio de couverture est de 100 % si tout point de la zone est sous la couverture d'au moins un capteur. Dans ce cas la couverture est dite complète. De même que pour la couverture de cibles,

certaines applications exigent une couverture complète de toutes les cibles qui se traduit par un ratio de couverture de 100%. On parle de couverture partielle lorsque toute la surface n'est pas couverte ou que toutes les cibles (dans le contexte de la couverture de cibles) de la zone ne sont pas couvertes. Ceci peut être dû au fait que certaines cibles sont situées si proches que couvrir toutes les cibles en même temps peut conduire à une redondance dans les données détectées. Dans ce cas la couverture complète peut être compromise au bénéfice d'une maximisation de la durée de vie du réseau. Ainsi, pour une couverture partielle, le ratio de couverture est inférieur à 100%.

D'autres applications requièrent une certaine robustesse qui se traduit par un certain niveau de qualité de service dans la couverture. La notion de degré de couverture permet de déterminer comment chaque point est couvert (ou chaque cible est couverte) dans la zone d'intérêt. Un point est k -couvert s'il est couvert par k ($k \geq 1$) capteurs dans la zone. Un point k -couvert peut tolérer $k - 1$ pannes de capteurs.

3.9 Conclusion

Au vu de la relation capteur et environnement physique en chapitre 2, et en révisant différentes formulations de la couverture, il apparaît que garantir une bonne couverture peut être conditionné par le type de déploiement des équipements. Le déploiement définit la structure topologique du réseau. Si les capteurs sont déployés de façon aléatoire, il faudrait en principe en déployer en surnombre afin de pallier à une probable imprécision dans le positionnement des équipements. Ensuite, organiser les capteurs de façon à bien apprécier leur fonctionnement au regard de la contrainte de durée de vie s'avère nécessaire. L'ordonnancement de l'activité des capteurs devient dès lors une importante problématique. Pour un déploiement déterministe, la position de chaque capteur peut être planifiée à l'avance afin d'optimiser la qualité de service globale. Une réduction des coûts de déploiement est également possible, en passant par une étude préalable. Tenant en compte la nature des protocoles opérants, l'ordonnancement peut se faire de façon centralisée et/ou distribuée.

