Optimisation de l'enegie dans les réseaux de capteurs sans fil par connectivité et ordonnancement d'activité des capteurs

ABDOULAYE ALI Ibrahima (ibrahima.a.ali@aims-senegal.org)
L'Institut Africain des Sciences Mathématiques (AIMS)
Sénégal

Supervisé par: Dr. Cherif DIALLO
Université Gaston Berger,Saint Louis

28 Fevrier 2019

Présenté pour l'obtention d'un Master II à AIMS



Résumé

Au cours de ce mémoire, nous avons abordé des problématiques liées à l'optimisation de la couverture et de la connectivité d'un réseau de capteurs sans fil par ordonnancement d'activité des capteurs. Nous avons d'abord commencé par une présentation générale des réseaux de capteurs sans fil. Dans cette partie, nous avons donné la définition d'un réseau de capteurs, son architecture, ses differénts domaines d'application et les principales contraintes à prendre en compte pour une bonne conception d'un réseau de capteurs. Ensuite nous avons présenté l'ordonnancement d'activité des capteurs avec les critères de couverture et connectivité. C'est l'une des méthodes les plus connues pour pallier aux contraintes liées à la mise en place d'un réseau de capteurs capable de répondre aux ré- sultats escomptés. Dans cette partie nous avons présenté les trois différentes approches d'ordonnancement qui existent dans la littérature et un algorithme d'ordonnancement distribu é. La dernière partie de ce travail est consacrée à la modélisation. Dans cette partie nous avons présenté une formulation linéaire de la couverture et de la connectivité dont sa résolution avec CPLEX a fourni des résultats qui montrent que l'ordonnancement des capteurs permet d'améliorer en grande partie la durée de vie d'un réseau en conservant sa couverture ainsi que sa connectivité.

Mots-clés : optimisation, couverture, connectivité, ordonnancement d'activité, réseau de capteurs.

Table des matières

1 Introduction générale **1**

1.1 Quelques notions générales 2

1.2 Optimisation 2

1.3 La programmation linéaire 3

1.4 Modélisation mathématique 5

1.5 Méthode de résolution 5

2 Généralités sur les réseaux de capteurs **7**

2.1 Architecture d'un nœud-capteur 7

2.2 Les Réseaux de Capteurs Sans Fil 8

2.3 Domaines d'application des réseaux de capteurs 10

2.4 Contraintes dans la conception d'un réseau de capteurs 11

2.5 Conclusion 12

3 Approche d'optimisation d'energie dans les réseaux de capteurs **13**

3.1 Notion de durée de vie d'un réseau 13

3.2 Conservation d'énergie 14

3.3 Techniques du Duty-cycling 15

3.4 Techniques orientées données 15

3.5 Ordonnancement des capteurs dans les RCSF 16

3.6 Les différentes approches de gestion d'ordonnancement 16

3.7 Algorithme d'ordonnancement distribué dans les RCSF 17

3.8 Conlusion 18

4 Modélisation et Tests numériques **19**

4.1 Introduction 19

4.2 Modélisation du problème 19

4.3 Conclusion 21

4.4 Tests numériques 21

References **31**

1. Introduction générale

L'évolution technologique récemment connue dans le domaine de l'électronique, mécanique et aussi le domaine de la communication a donné naissance à une nouvelle génération de réseau, les réseaux de capteurs sans fil. Cette nouvelle ère de l'informatique embarquée promet de révolutionner notre façon de vivre, de travailler et d'interagir avec l'environnement physique qui nous entoure. Les nœuds capteurs qui communiquent via des liens sans fil et qui sont dotés de capacité de calcul et de collecte de données, facilitent une gamme d'applications très variée qui a été irréalisable ou trop chère il y'a quelques années. Ces petits capteurs peuvent être dispersés sur des routes, des machines ou peuvent être attachés à des êtres humains, des animaux ou des véhicules pouvant ainsi s'intégrer dans de nombreux domaines d'application allant de la surveillance au téléguidage dans les champs de bataille, en passant par la détection et la surveillance biomédicale, la surveillance environnementale, le suivi de la production industrielle et très récemment avec les espaces intelligents. Les capteurs sont alimentés par des piles limitées en termes d'énergie, quand le nœud capteur épuise son énergie il sera considéré comme mort. Par ailleurs, recharger les batteries dans les réseaux de capteurs est parfois impossible en raison de l'emplacement inaccessible des nœuds ou pour la simple raison que cette opération est pratiquement ou économiquement irréalisable. Ils doivent donc fonctionner en suivant un plan d'économie d'énergie effcace. De ce fait, la mise en œuvre de bonnes politiques de gestion de l'énergie demeure une question très discutée par les chercheurs. Ce qui fait de la conservation d'énergie l'un des critères de performance les plus convoités parmi les solutions destinées aux réseaux de capteurs sans fil. L'une des techniques les plus utilisées pour pallier à cette contrainte phare est l'ordonnancement d'activité. C'est une méthode qui utilise les redondances issues du déploiement des capteurs pour mettre en veille certains nœuds tout en assurant le but essentiel du réseau à savoir la couverture totale de la zone ainsi que la connexité du réseaux. Autrement dit l'ordonnancement d'activité des capteurs est l'activation du nombre nécesseraire de capteur afin de prolonger la durée de vie du réseau. Ainsi l'objectif de ce mémoire est de proposer un modèle mathématique qui minimise le nombre de capteurs actifs sous contraintes que toute la zone soit couverte ainsi que la connectivité totale du réseau soit assurée. La suite de ce mémoire est structurée autour de trois chapitres. Le premier chapitre présente les notions générales sur les réseaux de capteurs sans fil en commençant par la définition des notions de base d'un réseau de capteurs. Il présente aussi leurs architectures, la pile protocolaire, ses différents domaines d'application et les principales contraintes liées à la conception d'un réseau de capteurs. Le chapitre suivant est une présentation de manière détaillée de l'ordonnancement d'activité avec le critère de couverture et de connectivité. L'objectif de ce chapitre est de montrer comment l'ordonnancement peut améliorer la durée de vie du réseau. Nous allons commencer par définir les notions de couverture et de connectivité ensuite de la durée de vie dans les réseaux de capteurs et en fin les différentes approches d'ordonnancement qui existent dans la littérature. Cette section se termine par un algorithme d'ordonnancement distribué. Le dernier chapitre de ce mémoire sera consacré à la modélisation de notre problématique. Dans ce chapitre, nous commençerons d'abord par présenter un modèle de couverture et ensuite son amélioration avec comme ajout des contraintes de connectivité. La présentation de ces modèles sera précédée par leurs descriptions suivies des terminologies qui y seront utilisées. La dérnière partie de ce chapitre sera consacrée aux tests numériques suivis de discussion. Le mémoire finit par une conclusion avec quelques perspectives.

1.1 Quelques notions générales

Dans cette partie, nous rappelons quelques notions générales d'optimisation utilisées dans cette thèse. Il s'agit plus précisément des notions de programmation linéaire et programmation linéaire en nombres entiers.

1.2 Optimisation

Le monde des industries, des entreprises est souvent confronté à des problèmes de décision. Une partie importante de ces problèmes que rencontrent les dirigeants dans la pratique sont sans aucun doute les problèmes d'optimisation linéaire ou programme linéaire. Avec la puissante avancée de la technologie informatique, on utilise des logiciels pour résoudre ces problèmes sans connaître la théorie qui se cache derrière. Les logiciels d'optimisation sont nombreux. On peut citer le cplex, Matlab, Lindo, Excel, Maple etc. Ces logiciels résolvent différents types de problèmes d'optimisation parmi lesquels ceux que nous traitons dans le cadre de la programmation linéaire en nombres entiers(PLNE). Cette section a pour objet de présenter quelques notions utiles pour comprendre le mystère qui se trouve derrière ces logiciels. Il commence par une présentation de l'optimisation d'une manière générale. Nous introduisons ensuite la notion de programmation Linéaire (PL) car le Programme linéaire en nombres entiers n'est rien d'autre que le programme linéaire auquel on a ajouté des contraintes d'intégrité puis celle de programmation linéaire en nombres entiers(PLNE) proprement dite.

1.2.1 le problème général d'optimisation combinatoire. Un problème d'optimisation combinatoire consiste à trouver la meilleure solution dans un ensemble discret, qu'on appelle ensemble de solutions réalisables. En général cet ensemble est fini mais compte un grand nombre d'éléments, d'où l'utilisation du terme « combinatoire ». La notion de meilleure solution est définie au sens d'une fonction, qu'on appelle fonction objectif (ou fonction coût). Mathématiquement cela peut se formuler de la façon suivante : On se donne :

- une fonction $J : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ appelée fonction-objectif ;
- un ensemble $U \subset \mathbb{R}^n$ appelé ensemble des contraintes.

Le problème d'optimisation consiste à déterminer, lorsqu'il existe, un minimum ou un maximum de J sur U. Un problème d'optimisation peut se formuler comme suit :

1.2.2 Minimisation. Minimiser J sur U revient à chercher $x^* \in U$ tel que

$$J(x^*) = \min_{x \in U} J(x)$$

Ceci équivaut à : $J(x^*) \leq J(x), \forall x \in U$. x^* est la solution optimale du problème.

1.2.3 Maximisation. Maximiser J sur U revient à chercher $x^* \in U$ tel que

$$J(x^*) = \max_{x \in U} J(x)$$

Ceci équivaut à : $J(x^*) \geq J(x), \forall x \in U$

Parmi les problèmes d'optimisation combinatoire classique, on peut citer le problème de couverture ou the set covering problem [24][23] qui consiste à déterminer un couplage de valeur maximale. On peut citer aussi le problème de plus court chemin dans un graphe qui, étant donnés un graphe et une valuation sur les arcs du graphe, consiste à trouver le chemin qui minimise la somme des valuations des arcs reliant deux sommets du graphe. Le problème de voyageur de commerce, parmi les plus connus, consiste à trouver, dans un graphe, un cycle Hamiltonien dont le coût est minimal.

1.3 La programmation linéaire

1.3.1 Definition. Un problème d'optimisation linéaire est un probème d'optimisation où la fonction objectif et les contraintes sont linéaires.

Il peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \min Z(x) &= c.x \\ Sous\ contraintes & \\ Ax &\geq b \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

où A est une matrice $n \times m$ à coefficients réels, $b \in \mathbb{R}^m$, $c \in \mathbb{R}^n$ et $x \in \mathbb{R}^n$ Cette forme est appelée forme canonique.

1.3.2 Definition. La forme standard du PL s'écrit sous la forme

$$\begin{aligned} \min Z(x) &= c.x \\ Sous\ contraintes & \\ Ax &= b \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

1.3.3 Definition. Le domaine $\Omega = \{x \in \mathbb{R}^n / Ax \geq b; x \geq 0\}$ est appelé domaine réalisable (ou admissible).

- $\underline{\Omega = \emptyset}$: le problème n'a pas de solution réalisable.
- $\underline{\Omega \neq \emptyset}$: le problème est dit réalisable.
- Le problème est dit borné s'il existe une constante réelle $k \in \mathbb{R}$ vérifiant l'inégalité suivante : $c.x \geq k$ pour toute solution réalisable $x \in \Omega$

1.3.4 Definition. Pour un problème de « minimisation », nous disons que la solution x^* est *solution optimale* si les deux conditions suivantes sont vérifiées :

- $x^* \in \Omega$ (la solution x^* est admissible)
- $x \in \Omega \Rightarrow c.x \geq c.x^*$ (la solution x^* donne la plus petite valeur).

1.3.5 Theorem. *Un programme linéaire est réalisable et borné si et seulement si il possède une solution optimale*

1.3.6 Résolution de programmes linéaires. Dans cette sous section, nous présentons quelques définitions et propriétés puis une description de la méthode du Simplexe, méthode développée par G. Dantzig en 1947, et qui reste jusqu'à présent l'algorithme connu le plus performant pour les tailles classiques.

1.3.7 a) Résolution graphique.

1.3.8 Definition.

1. Un ensemble P défini par $P = \{x \in \mathbb{R}^n / Ax \leq b\}$ est un polyèdre. $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$ et $b \in \mathbb{R}^m$.
2. Un ensemble E est dit convexe, si $\forall x, y \in E, \lambda x + (1 - \lambda)y \in E$ pour $0 \leq \lambda \leq 1$.

1.3.9 Proposition. Soit $\mathcal{D}_R = \{x \in \mathbb{R}^n / Ax = b\}$ l'ensemble des solutions réalisables d'un programme linéaire sous forme standard. $\mathcal{D}_R$ est un polyèdre convexe, fermé.

1.3.10 Definition. Un point $x \in \mathcal{D}_R$ est un sommet (ou point extrême) si et seulement s'il n'existe pas $y, z \in \mathcal{D}_\mathcal{R}$, $y \neq z$ tels que $x = \lambda y + (1-\lambda)z$ avec $0 \leq \lambda \leq 1$.

1.3.11 Theorem.

x est une solution de base réalisable si et seulement si x est une solution réalisable de $\mathcal{D}_\mathcal{R}$;

L'optimum de la fonction objectif f, s'il existe, est atteint en au moins un sommet de $\mathcal{D}_\mathcal{R}$

1.3.12 b) Algorithme du Simplexe. Nous donnons ici une synthèse de l'algorithme du Simplexe. Le lecteur intéressé par cette notion peut consulter [**?**] [**?**]. On considère un PL écrit sous forme standard c'est-à-dire si on a par exemple une contrainte de la forme

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_i \leq b_i$$

. On peut écrire

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_i + x_{n+i} = b_i$$

en ajoutant une variable supplémentaire indexée $n+i$ où i est le numéro de la contrainte. Cette variable n'apparaît pas dans la fonction objectif et prend des valeurs positives.

Base réalisable et solutions associées On appelle variables de base, m variables parmi les $n+m$ d'une forme standard ; qui peuvent être écrites en fonction des n autres variables. Ces variables forment alors une base du PL, les autres variables sont dites hors-bases. On associe à une base une solution du PL en fixant les variables hors-bases à 0. Une base est dite *réalisable* si la solution associée est réalisable pour le PL. On peut facilement vérifier qu'une telle solution est réalisable : il suffit de vérifier que toutes les valeurs sont positives ou nulles. Il est très facile de savoir si la solution associée à une base admissible est optimale pour le PL. Pour cela, il suffit de réécrire la fonction objectif en fonctions des variables hors-bases. Cas de maximisation : si les coefficients obtenus sont tous négatifs alors la solution associée est optimale. Cas de minimisation : si les coefficients obtenus sont tous positifs alors la solution associée est optimale.

Description de l'algorithme du Simplexe On suppose que l'on dispose d'une base réalisable de départ B^0. Les différentes étapes de l'algorithme sont les suivantes :

(a) B^0 base réalisable de départ. Itération k=0.

(b) k $\leftarrow$ k + 1.

(c) à l'itération k, soit B la base courante, $x = [x_B, x_N]$ la solution de base correspondante. Calculer : $\bar{b} = B^{-1}.b$, (les valeurs des variables de base) $\pi = c_B.B^{-1}$, (les multiplicateurs du simplexe) $\bar{c_N} = c_N - \pi.N$ (les coûts réduits)

(d) si $\bar{c_N} \geq 0$, STOP : l'optimum est atteint. Si $\exists$ s tel que : $\bar{c_s} < 0$ alors :

(e) Soit A_s la colonne s de A. Calculer $\bar{A_s} = B^{-1}.A_s$. Si $\bar{a_{is}} \leq 0$, $\forall i = 1, ..., m$, STOP : optimum non borné($-\infty$). sinon, calculer :

$$\hat{x_s} = \frac{\bar{b_r}}{\bar{a_{rs}}} = \min_{i/\bar{a_{is}}>0} \{\frac{\bar{b_i}}{\bar{a_{is}}}\}$$

.

— Soit x_t la variable correspondante à la r-ième ligne de la base c'est-à-dire telle que $B^{-1}.A = e_r$ (m-vecteur à composantes toutes nulles sauf la composante r égale à $+1$) ; alors la variable s prend la valeur $\bar{x_r} > 0$ ($\ll$ rentre en base $\gg$) ; la variable t s'annule ($\hat{x_t} = 0$) ($\ll$ sort de la base $\gg$) ; la nouvelle solution courante $\hat{x}$ correspond à la nouvelle base réalisable : $\hat{B} = B + \{A_s\} - \{A_t\}$. Calculer l'inverse de la nouvelle base $\hat{B}^{-1}$ et retourner en (b).

Géométriquement, la procédure s'interprète comme un cheminement de point extrême en point extrême adjacent le long de la frontière de X (ensemble des solutions du problème). Algébriquement, elle s'interprète comme la détermination d'une suite de bases adjacentes $B^0, B^1, ..., B^q, ...$ et de solution de bases $x^0, x^1, ..., x^q, ...$ telles que $z(x^0) > z(x^1) > ... > z(x^q) > ...$

1.3.13 Programmation linéaire en nombres entiers. La programmation linéaire en nombres entiers(PLNE) étudie des programmes linéaires dans lesquels les variables sont astreintes à être entières. En particulier les variables peuvent être booléennes c'est-à-dire ne prendre que les valeurs 0 ou 1. On parle de PL en 0-1. La contrainte d'intégrité sur la variable est nécessaire pour modéliser certains problèmes tels la localisation des hubs étudiée dans cette thèse, en particulier des problèmes algorithmiques. Cette contrainte complémentaire rend le problème plus complexe et demande des techniques particulières. c'est donc un problème NP-difficile. Elle est un domaine très riche de la programmation mathématique. Les recherches dans ce domaine sont nombreuses et ont vraiment commencé avec GOMORY en 1958. Pour plus de détails sur la PLNE, le lecteur intéressé peut consulter [25][26][27].

1.4 Modélisation mathématique

Considérons la forme matricielle de la programmation linéaire ci-dessus. Si on introduit de nouvelles contraintes (appelées contraintes d'intégrité), on obtient la formulation de la programmation linéaire en nombres entiers.

$$\begin{aligned} \min Z(x) &= c.x \\ Sous\ contraintes & \\ Ax &\geq b \\ x &\geq 0 \quad x_i \quad entiers(i = 1, 2, ..., n). \\ avec \quad x = (x_1, x_2, ..., x_n). & \end{aligned}$$

Lorsque les variables sont astreintes à prendre que les valeurs 0 ou 1, on parle de programmation linéaire en 0-1 ou programme binaire.

1.5 Méthode de résolution

Pour résoudre un PLNE, une des premières idées que l'on pourrait avoir serait d'abord de résoudre le PL continu, puis de prendre la valeur entière la plus proche, un arrondi de la solution optimale non entière que l'on aurait trouvé. Malheureusement, cette méthode est complètement fausse. Il existe des méthodes propres aux PLNE pour les résoudre. Pour résoudre les problèmes de PLNE, il existe aussi de nombreux solveurs commerciaux : par exemple Cplex, Xpress ou Gurobi et des solveurs livres : Glpk ou Scip. Dans cette thèse nous ne présentons que les méthodes de recherches arborescentes par séparation et évaluation. Méthode qu' utilise le logiciel Cplex que nous avons utilisé pour nos simulations. Le lecteur intéressé par ces différentes méthodes peut consulter [29][28].

1.5.1 La méthode séparation et évaluation (Branch and Bound). L'algorithme de séparation et évaluation, plus connu sous son appellation anglaise *Branch and Bound* (B & B) [30] repose sur une méthode arborescente de recherche d'une solution optimale par séparations et évaluations, en représentant les états solutions par un arbre d'états, avec des nœuds, et des feuilles. Le *branch-and-bound* est basé sur trois axes principaux :

— L'évaluation ;
— La séparation,
— la stratégie de parcours.

L'évaluation L'évaluation permet de réduire l'espace de recherche en éliminant quelques sous-ensembles qui ne contiennent pas la solution optimale. L'objectif est d'essayer d'évaluer l'intérêt de l'exploration d'un sous-ensemble de l'arborescence. Le *branch-and-bound* utilise une élimination de branches dans l'arborescence de recherche de la manière suivante : la recherche d'une solution de coût minimal, consiste à mémoriser la solution de plus bas coût rencontré pendant l'exploration, et à comparer le coût de chaque nœud parcouru à celui de la meilleure solution. Si le coût du nœud considéré est supérieur au meilleur coût, on arrête l'exploration de la branche et toutes les solutions de cette branche seront nécessairement de coût plus élevé que la meilleure solution déjà trouvée.

La séparation La séparation consiste à diviser le problème en sous-problèmes. Ainsi, en résolvant tous les sous-problèmes et en gardant la meilleure solution trouvée, on est assuré d'avoir résolu le problème initial. Cela revient à construire un arbre permettant d'énumérer toutes les solutions. L'ensemble de noeuds de l'arbre qu'il reste encore à parcourir comme étant susceptibles de contenir une solution optimale, c'est-à-dire encore à diviser, est appelé ensemble des noeuds actifs.

La stratégie de parcours

— **La largeur d'abord** : Cette stratégie favorise les sommets les plus proches de la racine en faisant moins de séparations du problème initial. Elle est moins efficace que les deux autres stratégies présentées.
— **La profondeur d'abord** : Cette stratégie avantage les sommets les plus éloignés de la racine (de profondeur la plus élevée) en appliquant plus de séparations au problème initial. Cette voie mène rapidement à une solution optimale en économisant la mémoire.
— **Le meilleur d'abord** : Cette stratégie consiste à explorer des sous-problèmes possédant la meilleure borne. Elle permet aussi d'éviter l'exploration de tous les sous-problèmes qui possèdent une mauvaise évaluation par rapport à la valeur optimale.

La méthode de *Branch and Bound* permet de résoudre le problème de localisation de façon optimale. Toutefois elle n'est efficace que pour les problèmes de petites tailles (problèmes avec au plus 50 nœuds)[31]

2. Généralités sur les réseaux de capteurs

Les avancées technologiques récentes confortent la présence de l'informatique et de l'électronique au cœur du monde réel. De plus en plus d'objets se voient ainsi équipés de processeurs et de moyens de communication mobiles, leur permettant de traiter des informations mais également de les transmettre. Les réseaux de capteurs sans fil entrent dans ce cadre. Dans ce chapitre, nous présenterons les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures, la pile protocolaire des capteurs et leurs diverses applications. Nous discuterons également sur les principaux facteurs et contraintes qui inffuencent la conception des réseaux de capteurs sans fil.

2.1 Architecture d'un nœud-capteur

Un nœud-capteur est composé de plusieurs éléments ou modules correspondant chacun à une tâche particulière d'acquisition, de traitement, ou de transmission de données. Il comprend également une source d'énergie. **L'unité d'acquisition des données** : le principe de fonctionnement des détecteurs

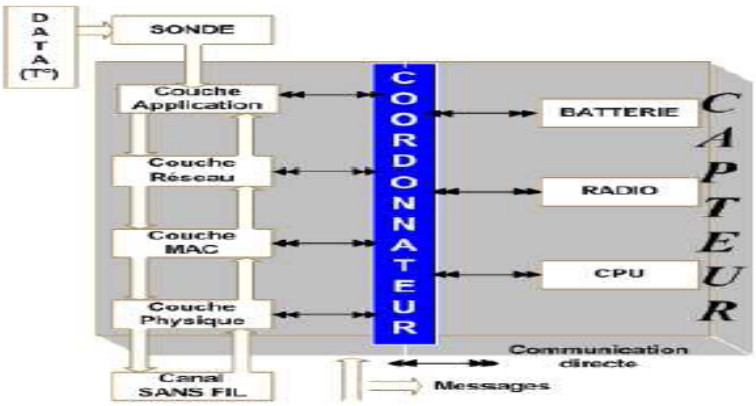


FIGURE 2.1 – Structure d'un nœud capteur.

est souvent le même : il s'agit de répondre à une variation des conditions d'environnement par une variation de certaines caractéristiques électriques. Les variations de tension sont ensuite converties par un convertisseur Analogique-Numérique afin de pouvoir être traitées par l'unité de traitement.

L'unité de traitement des données : L'unité de traitement est composée d'un processeur et d'une mémoire. Elle permet la coordination entre l'unité de capture et l'unité de transmission. Ainsi elle est dotée de deux interfaces dont l'une est liée avec l'unité de capture et l'autre avec l'unité de transmission. **L'unité de transmission de données** : les composants utilisés pour réaliser la transmission sont des composants classiques. Ainsi on retrouve les mêmes problèmes que dans tous les réseaux sans-fil : la quantité d'énergie nécessaire à la transmission augmente avec la distance. **La source d'énergie** : pour des réseaux de capteurs sans fil autonomes, l'alimentation est une composante cruciale. Il y a essentiellement deux aspects : premièrement, stocker l'énergie et la fournir sous la forme requise ; deuxièmement, tenter de reconstituer l'énergie consommée par un réapprovisionnement grâce à une source externe au nœud-capteur telles les cellules solaires. Le stockage de l'énergie se fait traditionnellement en utilisant ses piles. L'unité d'énergie est généralement constituée de deux batteries de types AA fonctionnant à

1,5 volt.

2.2 Les Réseaux de Capteurs Sans Fil

Les avancées technologiques récentes confortent la présence de l'informatique et de l'électronique au cœur du monde réel. De plus en plus d'objets se voient ainsi équipés de processeurs et de moyens de communication mobiles, leur permettant de traiter des informations mais également de les transmettre. Les réseaux de capteurs sans fil entrent dans ce cadre.

2.2.1 Architecture d'un réseau de capteur sans fil. Un réseau de capteur sans fil est composé de deux types de nœuds : les nœuds capteurs et les nœuds puits. Les capteurs sont chargés de relever des informations de les traiter si nécéssaire et de router les informations relevées sur la zone de couverture vers le point de collecte, également appelé puits ou sink en anglais. Le nœud puits récupère les informations remontées par les différents capteurs et les transmet au centre de traitement. Les capteurs disposés de manière aléatoire forment la zone de couverture. La figure ci-apres est une illustration d'un réseau de capteurs sans fil.

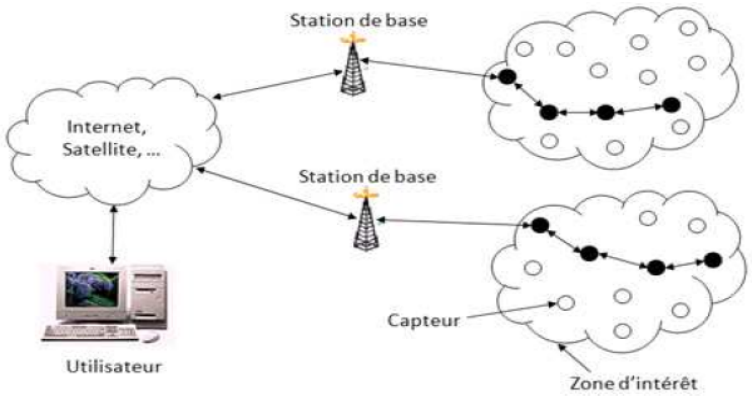
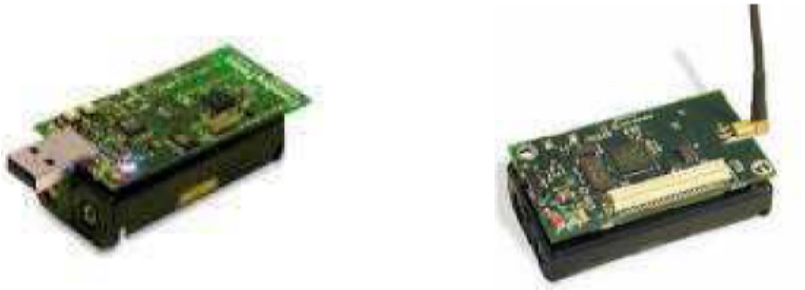


FIGURE 2.2 – Architecture d'un réseau de capteur sans fil.

2.2.2 Caractéristiques des capteurs. Pour illustrer les caractéristiques des capteurs, on présente un type de chaque famille : MicaZ de la famille Mica et TelosB de la famille Telos comme montre dans la figure ci-dessous. Le tableau suivant résume les caractéristiques de ces capteurs.

2.2.3 facteurs de conception d'un réseaux de capteurs sans fil. La conception des réseaux de capteurs est influencée par de nombreux facteurs comme la tolérance aux pannes, les coûts de production, la consommation d'énergie, l'environnement ou la topologie du réseau. Ces facteurs représentent la base de la conception de protocoles ou d'algorithmes pour les réseaux de capteurs. **Tolérance aux pannes** : Les nœuds peuvent être sujets à des pannes dues à leur fabrication (ce sont des produits de série bon marché, il peut donc y avoir des capteurs défectueux) ou plus fréquemment à un manque d'énergie. Les interactions externes (chocs, interférences) peuvent aussi être la cause des dysfonctionnements. Afin que les pannes n'affectent pas la tâche première du réseau, il faut évaluer la capacité du réseau à fonctionner sans interruption. **Coût de fabrication** : Les nœuds sont des produits fabriqués en série du fait de leur grand nombre. Il faut que le coût de fabrication de ces nœuds soit tel que le coût global du réseau ne soit pas supérieur à celui d'un réseau classique afin de pouvoir justifier son intérêt. **Topologie du réseau** :



Capteur TelosB Capteur MicaZ

FIGURE 2.3 – Capteurs TelosB et MicaZI.

Caractéristiques	TelosB	MicaZ
Flash	48Kb	512Kb
RAM	10Kb	4Kb
Antenne	Radio Chipcon Wireless Transceiver	Antenne Chipcon CC2420
MCU	1MHz T1 MPS430	8MHz ATmega128
Dimension	65x31x6 Mm	58x32x7 Mm
2 piles AA	Radio+cpu :75mW Sleep mode : 140µW	Radio+cpu mode :63mW Sleep mode : 30µW
External flash	512kB	512kB

FIGURE 2.4 – Caractéristiques de quelques exemples de capteurs.

En raison de leur forte densité dans la zone à observer, il faut que les nœuds-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 ; Post-Déploiement - Exploitation et le Redéploiement. **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. Les réseaux de capteurs fonctionnant selon un mode de routage par saut, chaque nœud du réseau joue un rôle important dans la transmission de données. Le mauvais fonctionnement d'un nœud implique un changement dans la topologie et impose une réorganisation du réseau.

2.2.4 Classification des réseaux de capteurs. Il existe actuellement un grand nombre de capteurs, avec des fonctionnalités diverses et variées. Tous ces différents capteurs ne pourraient être décrits ici, cependant une liste exhaustive peut être trouvée sur le site The Sensor Network Museum. La plupart des capteurs dépendent de l'application pour lesquels ils ont été conçus (capteur aquatique, sous-terrain, etc. . .). Il est plus intéressant de décrire les capteurs les plus utilisés et leur évolution au cours du temps. En l'occurrence, la figure ci-apres illustre l'évolution des capteurs au cours de ces 20 dernières années. Cette représentation met en avant l'importance des travaux de recherche de l'université de Berkeley dans l'essor des réseaux de capteurs, surtout sachant que l'entreprise Xbow (aussi appelé Crossbow) qui fait jusqu'à

aujourd'hui office de référence dans la fabrication de capteurs est née au sein de la célèbre université californienne. Les capteurs fabriqués par Xbow au cours des dix dernières années (famille de capteurs

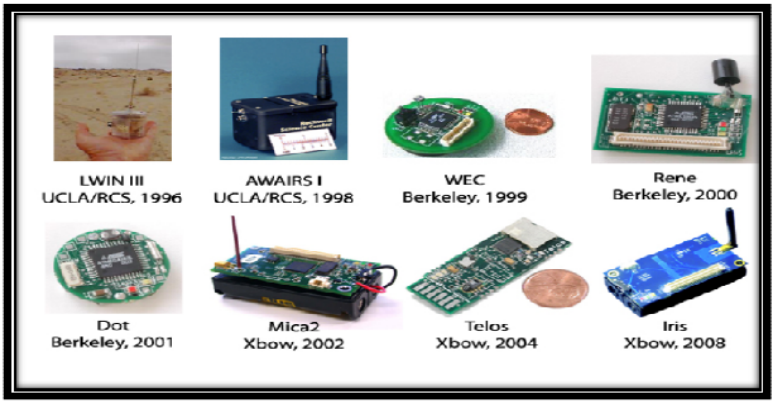


FIGURE 2.5 – Quelques exemples de capteurs.

Mica et Telos) sont sans aucun doute les plus utilisés dans les expériences et travaux de recherche. Ces capteurs sont capables de mesurer plusieurs métriques (température, humidité, luminosité, etc. . .) et s'articulent pour la plupart d'entre eux autour du Chipcon CC2420 qui est devenu le standard au niveau des modules de transmission utilisant le protocole de communication IEEE 802.15.4.

2.3 Domaines d'application des réseaux de capteurs

L'évolution des supports de communication sans fil, la miniaturisation, le faible coût des micro-capteurs et l'élargissement de la gamme des sondes de captage ont élargi le champ d'application des réseaux de capteurs. Ils permettent de collecter et de traiter des informations complexes issues de l'environnementetc. Ils s'insèrent également dans d'autres systèmes industriels tels que le contrôle et l'automatisation des chaînes de montage. Les réseaux de capteurs pourraient aussi révolutionner la manière même de comprendre et de construire des systèmes physiques complexes,notamment dans les domaines militaire, environnemental, domestique, sanitaire, de la sécurité, etc.

2.3.1 Applications militaires. Le domaine militaire a été, comme dans le cas de plusieurs technologies, un précurseur pour le développement d'applications de 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 appréciable dans un tel domaine. Un réseau de capteurs déployé sur un secteur stratégique ou difficile d'accès, permet par exemple d'y surveiller tous les mouvements (amis ou ennemis), ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations) .

2.3.2 Applications liées à la sécurité. Les réseaux de capteurs permettent le suivi temps réel des structures d'avions, de navires, d'automobiles, ou des métros, de même que des réseaux de fourniture et de distribution d'énergie électrique et du gaz. Un réseau de capteurs détectant les mouvements ou le bruit peut constituer un système de détection et de prévention d'intrusions sur un site industriel ou un secteur critique. Déjouer le système ne serait plus aussi simple, puisqu'il n'existe pas de point critique. La prévention d'accidents par la surveillance des routes ou des voies ferrées est une des applications envisagées des réseaux de capteurs sans fil. L'évolution des mouvements sismiques, les altérations

de structure d'un bâtiment, d'une route, d'un quai, d'une voie ferrée, d'un pont ou d'un barrage hydroélectrique (suite à un séisme ou au vieillissement) pourraient être détectées par des capteurs. Certains capteurs ne s'activant que périodiquement peuvent fonctionner durant des années, voire des décennies.

2.3.3 Applications médicales. La surveillance des fonctions vitales d'un organisme vivant peut être facilitée par des micro-capteurs avalés ou implantés sous la peau. Des gélules sous forme de micro-capteurs ou de micro-caméras pouvant être avalées existent déjà et permettent, sans recours à la chirurgie, de transmettre des images depuis l'intérieur d'un corps humain. Une récente étude présente des capteurs pouvant fonctionner dans le corps humain pour le traitement de certaines maladies. La surveillance de la glycémie, la surveillance des organes vitaux ou la détection précoce de certains cancers sont des applications biomédicales envisagées. Des réseaux de capteurs permettraient également une surveillance temps réel des maternités (détection de vol de bébés) ou des patients.

2.3.4 Applications environnementales. La détection de mouvements d'oiseaux, d'animaux de petite taille ou d'insectes est une des applications environnementales possibles des réseaux de capteurs sans fil. Il devient ainsi possible d'observer la bio-diversité, sans déranger, des espèces animales vulnérables ou difficiles à étudier dans leur environnement naturel, et de proposer des solutions plus efficaces pour la conservation de la faune et de la flore. Grâce aux réseaux de capteurs, il est également possible de détecter des problèmes environnementaux comme la pollution, les incendies en milieu forestier, ainsi que la possibilité d'évaluer le taux de pesticides dans l'eau.

2.3.5 Applications commerciales. Dans le domaine de la grande distribution, les réseaux de capteurs pourraient améliorer le processus de stockage et de livraison (pour surveiller la chaine du froid en particulier). Le réseau ainsi formé, pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet, d'une palette ou d'une cargaison. Des entreprises manufacturières, via des réseaux de capteurs, pourraient suivre le procédé de production depuis la matière première jusqu'au produit final livré. Dans les immeubles, le système domotique de chauffage et de climatisation, d'éclairage ou de distribution d'eau pourrait optimiser son efficience grâce à des micro-capteurs. Utilisée à grande échelle, une telle application permettrait de réduire la demande mondiale en énergie et indirectement les émissions de gaz à effet de serre.

2.3.6 Applications agricoles et de transport. Les capteurs peuvent être semés avec les graines. Ainsi, les zones sèches seront facilement identifiées et l'irrigation sera donc plus efficace et économique. Les RCSF permettent aussi la surveillance des réseaux ferroviaires ou routiers ainsi que d'éventuelles intrusions.

2.4 Contraintes dans la conception d'un réseau de capteurs

La réalisation et la conception d'un réseau de capteur sans fil dediées aux applications citées ci dessus sont inffluencées par plusieurs contraintes.

2.4.1 Contraintes énergétiques. Pour les réseaux de capteurs sans fill, la contrainte énergétique est un facteur principal. En effet les RCSF sont souvent équipés par des batteries non rechargeables avec une réserve energétique limitée. En plus les nœuds capteurs sont généralement déployés dans des zones dont l'accès est diffcile voire impossible par l'homme. Ainsi l'épuisement de l'énérgie de certains nœuds aurait un impact pour le bon fonctionnement du réseau. Par conséquent, la durée de vie du réseau est étroitement liée à la consommation d'énergie. Plusieurs méthodes de conservation d'énergie, tels que l'utilisation de différents modes opérationnels avec différents niveaux d'énergie ont été implantées au niveau matériel lors de la conception des nœuds. De plus, l'ordonnancement d'activité doit cependant

être coordonné et renforcé de façons étandue afin de préserver les performances du réseau et ainsi utiliser de façon rationnelle l'énergie des nœuds capteurs.

2.4.2 Contraintes liées à la qualité de service. Après avoir définie un réseau capable de répondre aux besoins de l'application considéré et mis en place un mécanisme de conservation de l'énergie, la qualité de service est ensuite l'un des paramètres essentiels à tenir en compte. La qualité de service dans les RCSF se définit par la capacité d'interpréter l'information collectée par le puits. Ainsi la qualité est alors précisée en fonction du réseau et du type de mesure. Par conséqent , il n'existe pas de définition objective de la qualité du service pour les RCSF.

2.4.3 Tolérance aux pannes. La tolérance aux pannes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruptions dues à une erreur intervenue sur un ou plusieurs capteurs. Une panne de nœud peut subvenir lors de la conception par défaut de fabrication, elle peut aussi être dû aux accidents survenus lors du déploiement. L'épuisement de l'énergie de certains nœuds lors de l'opération et les interfaces liées à l'environnement peuvent également rendre non fonctionnelle une partie du réseau. Ainsi pour le bon fonctionnement de tout réseau il est d'une importance capitale de tenir en compte à la tolérance des fautes.

2.4.4 Agrégation des données. Les réseaux de capteurs sans fil sont caractérisés par une forte densité donc une forte redondance des données de capture. Ainsi les nœuds voisins peuvent capturer les mêmes informations et les transferer vers la station de base. Ce qui entraine la réception par cette dernière des informations redondantes. Pour pallier à cette redondance, on fait appel à l'agrégation des données. L'agrégation des données est l'une des techniques utilisée pour réduire la transmission d'information redondantes. Cette technique est connue aussi sous le nom de fusion de données.

2.4.5 Contraintes liées à la sécurité. Comme pour tout réseau sans fil, l'information circule sur une interface partagée et non dédiée. N'importe quel intrus peut alors soit récupérer l'information, soit la modifier ou la rendre inexploitable. C'est pourquoi des mesures de sécurité doivent être mises en place pour protéger l'information. Cependant, tous les mécanismes de sécurité sont crées pour des réseaux où les nœuds disposent d'une forte capacité de traitement, ce qui n'est pas le cas des capteurs. Á ce jour, trés peu de solutions sont adaptées aux capteurs en termes de sécurité.

2.4.6 Contraintes liées à l'environnement. Pour le bon fonctionnement d'un réseau, les nœuds capteurs doivent être conçus d'une maniére a résister aux différentes et sévères conditions telles que la forte chaleur, la pluie, l'humidité entre autres. Il est nécessaire alors de concevoir un réseau de capteur capable de résister à ces types d'événements.

2.5 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant vu la diversité de ces applications : santé, environnement, industrie et même dans le domaine sportif. Dans ce chapitre, nous avons présenté les RCSF, leurs spécificités et les concepts nécessaires à la compréhension des réseaux de capteurs. Cependant, nous avons aussi énuméré les principales contraintes à tenir en compte pour une bonne conception d'un réseau de capteurs sans fil. Parmi les contraintes énumérées, nous avons remarqué que la contrainte énergétique occupe la place la plus importante. En effet, les réseaux de capteurs se caractérisent par une capacité énergétique limitée rendant l'optimisation de la consommation d'énergie dans des réseaux pareils une tâche critique pour prolonger la durée de vie du réseau.

3. Approche d'optimisation d'energie dans les réseaux de capteurs

L'un des avantages majeurs des réseaux de capteurs sans fil est de pouvoir surveiller des cibles dans une vaste zone, a moindre coût. Les capteurs, autonomes, sont généralement alimentés par une batterie dont la durée de vie est limitée. Par conséquent, la consommation énergétique est un aspect important des missions de surveillance. En général, il n'est pas utile d'activer tous les capteurs en même temps pour surveiller toutes les cibles, dans la mesure oú de nombreuses parties de la zone á surveiller sont couvertes par plusieurs capteurs en même temps. Maximiser la durée de vie du réseau revient à réduire la consommation énergétique des nœuds. Malgré les progrès qui ont été faits, la durée de vie de ces dispositifs à piles continue d'être un défi majeur et un facteur clé, exigeant davantage de recherches sur l'efficacité énergétique des plates-formes et des protocoles de communication.

En supposant que les cibles, ainsi que leurs trajectoires, sont connues à l'avance, notre but est de planifier un ordonnancement d'activités des capteurs. Cet ordonnancement doit être tel qu'il préserve autant que possible la capacité courante du réseau de capteurs à surveiller ultérieurement certaines zones jugées intéressantes par l'exploitant du réseau de capteurs. On souhaite également que l'ordonnancement minimise l'énergie totale consommée pendant la mission de surveillance. Le contexte d'utilisation du réseau de capteurs est désormais celui de missions multiples, où l'on cherche d'abord à préserver le réseau pour de futures missions de surveillance, tout en privilégiant les solutions qui minimisent l'énergie consommée pour accomplir la mission courante.

3.1 Notion de durée de vie d'un réseau

L'objectif de tout concepteur est de mettre en place un réseau qui dure le plus longuement possible. La durée de vie d'un réseau est définie comme étant le temps écoulé depuis son déploiememnt jusqu'à ce que le réseau soit non fonctionnel. Le terme non fonctionnel dépend du type d'application considérée donc la durée de vie est fortement liée aux résultats attendus. Ainsi on peut avoir une durée de vie basée sur la couverture et une durée de vie basée sur la connectivité.

3.1.1 Problématique récurrente de la durée de vie d'un réseau de capteur. Dans les différents protocoles de routages nous retrouvons pratiquement toujours le même problème qui revient tout le temps. Il s'agit de la durée de vie du réseau qui reste limité. En effet, en essayant de changer le protocole de routage, nous pouvons obtenir des économies d'énergie mais le réseau peut ne plus fonctionner car des nœuds dont la position dans le réseau est considérée comme stratégique ont épuisés leur énergie.

3.1.2 Durée de vie basée sur le nombre de nœuds vivants. Dans cette définition, la durée de vie du réseau est définie par la durée jusqu'au moment où un certain nombre de nœuds épuise leur batterie. Il existe plusieurs définitions possibles dans cette catégorie selon le nombre de nœuds défaillants à considérer. Une autre définition consiste à considérer la durée jusqu'au moment où 50% des nœuds épuisent leur énergie Holger Karl and Andreas Willig . Pour Di Tian and Nicolas D Georganas, la durée de vie d'un réseau est exprimée par la durée jusqu'à ce que tous les capteurs épuisent leur énergie.

3.1.3 Durée de vie basée sur la couverture. Un réseau est dit non fonctionnel, pour ce qui concerne la couverture, lorsque les nœuds ne parviennent plus à couvrir toute la zone d'intérêt. Ainsi la durée de vie est définie comme l'intervalle de temps écoulé depuis le déploiememnt du réseau jusqu'à ce

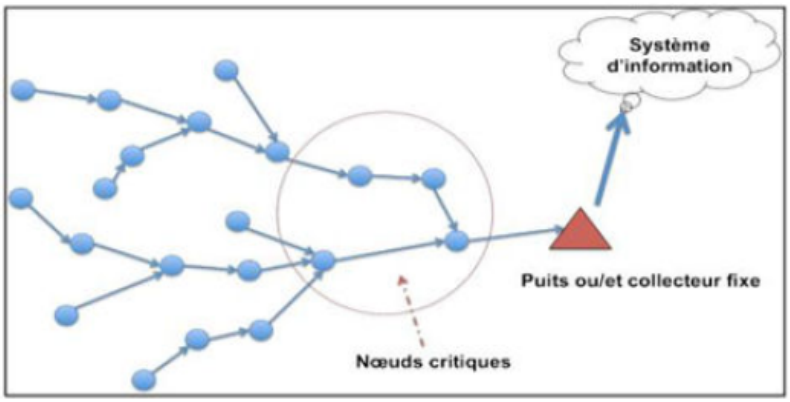


FIGURE 3.1 – Noeuds critiques dans un réseau.

qu'une portion de la zone d'intérêt ne soit plus couverte KACIMI . Dame Diongue définit la durée de vie comme étant la durée maximale durant laquelle des événements donnés puissent être détectés avec une probabilité définie.

3.1.4 Durée de vie basée sur la connectivité. La connectivité des nœuds capteurs est une des notions essentielles pour le bon fonctionnement d'un RCSF. En effet, les informations capturées par les nœuds sont souvent acheminées vers la station de base via une communication dite multi-saut entre les nœuds. Donc un problème de connexion des nœuds peut freiner le bon fonctionnement du réseau et réduire sa durée de vie. Ainsi une durée de vie basée sur la connectivité est définie comme la durée pendant laquelle un pourcentage donné de nœuds possède un chemin vers la base KAMICI. Pour réduire la consommation d'énergie dans un RCSF et prolonger la durée de vie du réseau plusieurs mécanismes ont été mis en place dont l'ordonnancement d'activité des capteurs.

3.1.5 Durée de vie basée sur des les exigences de qualité de service. Certains travaux définissent la durée de vie du réseau en termes de paramètre de qualité de service requise pour l'application. Santosh Kumar et all, defit la durée de vie comme la période pendant laquelle le réseau satisfait la qualité de service requise. Di Tian and Nicolas D Georganas, définit la durée de vie du réseau comme étant la période jusqu'à ce que le réseau n'est plus capable de fournir un taux acceptable de détection d'événements. Cette définition est vague, puisqu'on ne spécifie pas le paramètre de qualité de service à considérer, et non précise.

3.2 Conservation d'énergie

Des mesures expérimentales ont montré que, généralement, c'est la transmission des données qui est la plus consommatrice en énergie, et de façon significative, les calculs, eux, consomment très peu. La consommation d'énergie du module de détection dépend de la spécificité du capteur. Dans de nombreux cas, elle est négligeable par rapport à l'énergie consommée par le module de traitement et, par dessus tout, le module de communication.

Dans d'autres cas, l'énergie dépensée pour la détection peut être comparable, ou supérieure à celle nécessaire à la transmission de données. En général, les techniques d'économie d'énergie se concentrent sur deux parties : la partie réseau (i.e., la gestion d'énergie est prise en compte dans les opérations

de chaque nœud, ainsi que dans la conception de protocoles réseau), et la partie détection (i.e., des techniques sont utilisées pour réduire le nombre ou la fréquence de l'échantillonnage coûteux en énergie). Toutefois, une quantité considérable d'énergie est consommée par les composants d'un nœud (CPU, radio, etc), même s'ils sont inactifs. Un plan de gestion dédié à l'énergie peut alors être utilisé pour éteindre temporairement les composants du nœud lorsqu'ils ne sont pas sollicités.

3.3 Techniques du Duty-cycling

Cette technique est principalement utilisée dans l'activité réseau. Le moyen le plus efficace pour conserver l'énergie est de mettre la radio de l'émetteur en mode veille (low-power) à chaque fois que la communication n'est pas nécessaire. Idéalement, la radio doit être éteinte dès qu'il n'y a plus de données à envoyer et ou à recevoir, et devrait être prête dès qu'un nouveau paquet de données doit être envoyé ou reçu. Ainsi, les nœuds alternent entre périodes actives et sommeil en fonction de l'activité du réseau. Ce comportement est généralement dénommé Duty-cycling. Un Duty-cycle est défini comme étant la fraction de temps où les nœuds sont actifs. Comme les nœuds-capteurs effectuent des tâches en coopération, ils doivent coordonner leurs dates de sommeil et de réveil. Un algorithme d'ordonnancement Sommeil/Réveil accompagne donc tout plan de Duty-cycling. Il s'agit généralement d'un algorithme distribué reposant sur les dates auxquelles des nœuds décident de passer entre l'état actif et l'état sommeil. Il permet aux nœuds voisins d'être actifs en même temps, ce qui rend possible l'échange de paquets, même si les nœuds ont un faible duty-cycle (i.e., ils dorment la plupart du temps).

3.4 Techniques orientées données

Généralement, les plans Duty-cycling ne tiennent pas compte des données prélevées par les nœuds. Par conséquent, des approches orientées données peuvent être utiles pour améliorer l'efficacité en énergie. En fait, la détection (ou prélèvement de données) affecte la consommation d'énergie de deux manières :

- Des échantillons inutiles : les données échantillonnées ont souvent de fortes corrélations spatiales et/ou temporelle , il est donc inutile de communiquer les informations redondantes à la Station de Base. Un échantillonnage inutile implique une consommation d'énergie à son tour inutile. En effet, même si le coût de l'échantillonnage est négligeable, cela induit aussi des communications tout le long du chemin qu'emprunte le message.
- La consommation électrique du module de détection : réduire la communication ne suffit pas lorsque le capteur est lui-même très consommateur.

Des techniques orientées données sont conçues pour réduire la quantité d'échantillonnage de données en garantissant un niveau de précision acceptable dans la détection pour l'application.

3.4.1 Réduction des données. Réduire les données en terme de volume ou de nombre de paquets, dans le réseaux peut avoir un impact majeur sur la consommation d'énergie due à la communication. Parmis les méthodes de réductions de données, nous trouvons le In-network processing qui consiste à réaliser de l'agrégation de données (par exemple, calculer la moyenne de certaines valeurs) au niveau des nœuds intermédiares entre la source et le Sink. Ainsi, la quantité de données est réduite tout en parcourant le réseau vers le Sink. Une agrégation de données appropriée est spécifique à l'application. Un état de l'art sur les techniques In-network processing est présenté dans le document. La compressions de données peut être appliquée également pour réduire la quantité d'informations transmises par les nœuds sources. Ce régime implique l'encodage d'informations au niveau des nœuds qui engendrent des données, et le

décodage au niveau du Sink.

Pour réduire la consommation d'énergie dans un RCSF et prolonger la durée de vie du réseau plusieurs mécanismes ont été mis en place dont l'ordonnancement d'activité des capteurs.

3.5 Ordonnancement des capteurs dans les RCSF

Les réseaux sans fil sont essentiellement constitués des nœuds capteurs dont la durée de vie dépend de la durée de vie de leurs batteries. Donc l'efficacité énergétique est une exigence majeure pour tout allongement de la durée de vie du réseau. L'ordonnancement de l'activité des nœuds est une des techniques utilisée pour améliorer la consommation en énergie des capteurs. L'ordonnancement consiste à sélectionner parmi les nœuds déployés dans le réseau ceux qui doivent rester actifs tout en préservant le but essentiel du réseau. Par conséquent quelque soit l'état des capteurs, la zone d'intérêt doit être couverte le plus complètement possible ; chaque ensemble de nœud actif doit former un réseau connexe afin qu'il puisse acheminer l'information à la station de base. Le problème d'ordonnancement se résume ainsi comme suit : Il s'agit de minimiser le nombre de nœuds actifs tout en conservant le but essentiel du réseau qui est la couverture complète de la zone d'étude ainsi que la connectivité totale du réseau.

3.6 Les différentes approches de gestion d'ordonnancement

L'ordonnancement de l'activité des nœuds est une technique qui gère la redondance des nœuds lors du déploiement pour économiser l'énergie des capteurs. Il s'agit de mettre en veille les capteurs redondants tout en préservant la couverture de la zone d'intérêt et de maintenir la connectivité du réseau. Donc pour concevoir un mécanisme d'ordonnancement répondant aux exigences applicatives il faut nécessairement répondre aux questions suivantes :

1. Quelle est la régle à suivre pour qu'un nœud sache s'il faut entrer en mode veille ?
2. Quand un nœud doit-il prendre une telle décision ?
3. Combien de temps doit-il rester en mode veille ?

Trois approches d'ordonnancement existent dans la littérature : approche centralisée, approche hiérarchisée et une approche décentralisée.

3.6.1 Approche centralisée. Les solutions d'ordonnancement centralisées nécessitent une unité dite centralisée qui gère tout le réseau. et capable d'assigner à chaque objet un rôle Les changements de topologie dus aux éventuelles pannes ou à la mobilité des nœuds sont conçus de façon à pouvoir informer les nœuds concernés. On trouve ce genre d'utilisation dans les applications de domotique où les capteurs sont chargés de fournir des informations au contrôleur central lui-même chargé de réguler les différents appareils de la maison comme la climatisation, la lumière, les micro-ondes, les rideaux etc. On retrouve également ces approches dans les applications de surveillance de structure, chargées de signaler toute anomalie dans l'édifice. Ces solutions d'ordonnancement ne sont donc adaptées que lorsque l'environnement peut être atteint et qu'une infrastructure existe ou peut y être déployée.

3.6.2 Approche hiéarchisée. Dans une approche hiéarchique, le réseau est scindé en plusieurs sous réseaux dont chacun est capable de s'auto-configurer. Pour se faire, une des solutions existantes est l'élection d'un chef de ces sous ensembles élus dans différents nœuds du sous ensemble. Son rôle est

de répartir les charges et équilibrer les ressources disponibles. Dans ce type d'ordonnancement, les informations de changements de topologie ne sont ditribuées qu'au sein du sous ensemble. Ceci pour une solution plus favorable au passage à l'échelle. Contrairement à une approche ou la complexité exponentielle serait ici répartie sur les différents sous ensembles du réseau. Cependant le problème de cette approche est de gérer les appartenances à ces sous ensembles et le passage éventuel de l'un à l'autre.

3.6.3 Approche distribuée. Pour les téchniques d'ordonnancement distribuées aucune vision globale du réseau n'est nécessaire. Aucune hiérarchie ni infrastructure n'existe. Chaque nœud décide de sa propre activité en se basant que sur l'observation de ses propres descendants à un saut ou à k-saut. Les algorithmes distribué réduisent ainsi le coût de la transmission au nœud central en le remplaçant par des communications avec des voisins et traitement locaux.

3.7 Algorithme d'ordonnancement distribué dans les RCSF

Dans cette section nous présentons un algorithme d'ordonnancement distribué. Il permet aux nœuds capteurs de prendre une décision d'être en mode actif ou en mode veille. L'algorithme est composé de deux phases : une phase d'auto-ordonnancement et une phase de surveillance.

• Phase d'auto-ordonnancement La phase d'auto-ordonnancement est constituée de deux parties :

1. Chaque nœud envoie à ses voisins un message contenant sa localisation, sa réserve énergetique, son identité et son dégré. le message est nommé MDC (Message Des Capteurs). À la réception de MDC, chaque nœud se compare à l'expéditeur et maintient deux listes de voisins, une liste dite LCS (Liste des Capteurs Supérieurs) et une liste dite LCI (Liste des Capteurs Inférieurs) selon le type de message reçu. La liste LCS est la liste destinée à stocker les capteurs dominant l'expéditeur et la liste LCI est destinée pour le stock des capteurs dominés par l'expéditeur.
2. À la fin de l'étape précédente, chaque capteur vérifie si sa zone de perception est couverte par les nœuds de sa liste LCS.

Si oui alors il se désactive directement. Sinon, il attend un certain temps qui est en fonction de sa réserve énérgitique puis recalcule son éligibilité à l'extinction en considérant : Les nœuds de LCS Les nœuds de LCI ont déja decidé d'être actifs. S'il est éligible alors il se désactive. Sinon il envoie un message awake à ses voisins et reste actif. •Phase de surveillance Après la phase d'auto-ordonnancement, les nœuds actifs assurent la surveillance de la zone d'étude. • Exemple Pour illustrer l'algorithme considérons la figure ci-apres. On suppose que les nœuds 2, 3, 5, 6, ont des réserves d'énergie supérieures à celles des nœuds 1 et 4. Donc deux cas se présentent entre le nœud 1 et le nœud 4 :

1. L'énergie du nœud 1 est inférieure à l'énergie du nœud 4.
2. L'énergie du nœud 4 est inférieure à l'énergie du nœud 1.

Pour le premier cas on a : •$LCS(1) = \{3, 4, 5\} \Longrightarrow 1$ est éligible. •$LCS(4) = \{2, 6\} \Longrightarrow 4$ doit être actif. Pour le deuxième cas on a : •$LCS(1) = \{3, 4, \} \Longrightarrow 1$ doit rester actif. •$LCS(4) = \{1, 2, 6\} \Longrightarrow 4$ est éligible.

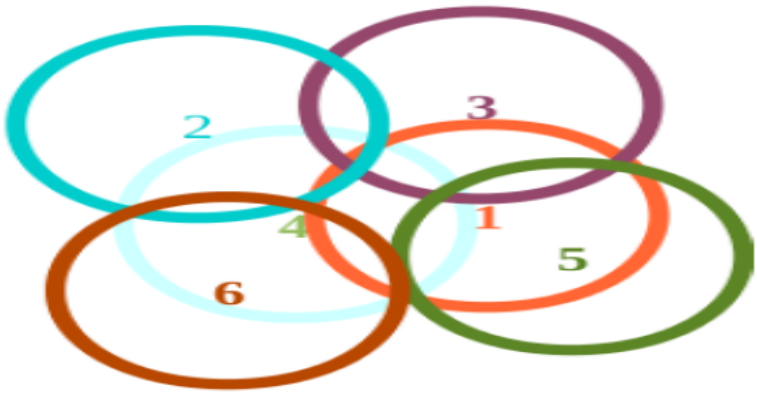


FIGURE 3.2 – Exemples.

3.8 Conlusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'ordonnancement d'activité avec le critère de couverture et de connectivité. Nous avons d'abord commencé par l'étude de la connexité d'un réseau de capteurs sans fil ensuite de la couverture de la zone d'intérêt. La notion de durée de vie a été étudiée en troisième lieu. Nous avons traité en dernier lieu l'ordonnancement d'activité en donnant trois approches différentes et un algorithme permettant aux nœuds capteurs redondants d'entrer en mode veille.

4. Modélisation et Tests numériques

4.1 Introduction

Un réseau de capteurs sans fil a pour but essentiel de capter des informations, de les traiter si nécessaire ensuite de les envoyer vers la station de base qui par le biais de l'internet les transmet vers un utilisateur final. Ainsi la couverture complète de la zone d'intérêt de même que la connetivité totale du réseau sont fondamentales pour tout réseau de capteurs sans fil. Dans ce chapitre, nous proposons une formulation linéaire de la connectivité pour garantir l'acquisition des informations recueillies tout en assurant la couverture de la zone afin de détecter toutes les cibles qui y seront présentes.

4.2 Modélisation du problème

4.2.1 Description et notations. Dans cette partie nous proposons un modèle qui gère la redondance issue du déploiement dans les réseaux de capteurs pour maximiser la durée de vie du réseau tout en garantissant la couverture totale de la zone d'intérêt ainsi que la connectivité du réseau. Il s'agit de minimiser le nombre de nœuds actifs afin d'économiser l'énergie des nœuds en veille sous contrainte des exigences applicatives. Pour se faire, nous considérons une zone d'intérêt contenant plus de nœuds que nécessaires pour son observation. Le modèle proposé se base sur les hypothéses suivantes : La zone d'étude est assimilable à une grille. Le déploiement est aléatoire et redondant. Les nœuds sont statiques. Les nœuds ont les mêmes rayons de couverture et de communication. Le rechargement des nœuds est impossible. Les terminologies utilisées dans le modèle sont résumées dans le tableau

Notation	Signification
M	L'ensemble des positions des catpeurs de la grille
N	L'ensemble des positions des cibles de la grille
T_i	Le nombre de capteurs intermédiaires entre le capteur présent à la position i et la station de base
$d(i,j)$	Distance entre le capteur à la position i et la cible à la position j
R_{com}	Rayon de communication
R_{cov}	Rayon de couverture
S_i	Valeur binaire égale à 1 si la distance entre le capteur à la position i et la station de base est inférieure ou égale à R_{com} et 0 sinon
$a_{i,j}$	Valeurs binaires égale à 1 si $d(i,j) \leq R_{cov}$ et 0 sinon
$b_{i,k}$	Valeurs binaires égale à 1 si $d(i,k) \leq R_{com}$ et 0 sinon

TABLE 4.1 – Notations utilisées dans le modèle.

4.2.2 Formulation mathématique. Dans cette section on commence d'abord par donner un modèle qui assure la couverture de la zone d'intérêt et ensuite un modèle qui garantit à la fois la couverture de la zone d'étude et la connectivité du réseau.

1. Modèle sous contrainte de couverture :

•La variable de décision : La variable de décision est la valeur binaire Xi qui exprime l'état du capteur à la position i. Elle est définie par : $X_i = \begin{cases} 1 & \text{si le capteur à la position i est actif} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$ •La fonction objectif : L'objectif est de minimiser le nombre de nœuds actifs présent dans la zone d'intérêt. La fonction objectif est donc :

$$Z = \sum_{i \in M} X_i$$

•Contraintes : Pour que la couverture totale de la zone soit assurée il faut que chaque position dans la zone soit surveillée au moins par un capteur. Donc les contraintes de couverture sont :

$$Z = \sum_{i \in M} a_{i,j} X_i \quad \forall j \in N$$

•Le modèle : Ainsi le problème de minimisation des nombres de capteurs actifs sous contraintes de couverture s'écrit :

$$min \sum_{i \in M} X_i \tag{4.2.1}$$

$$\sum_{i \in M} a_{i,j} X_i \geq 1 \quad \forall j \in N \tag{4.2.2}$$

$$X_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in M \tag{4.2.3}$$

1. Modèle sous contraintes de couverture et de connectivité :

Couvrir une zone est inutile s'il n'est pas possible de transmettre les informations recueillies vers la station de base. Donc la connectivité est une contrainte fondamentale pour le bon fonctionnement de tout réseau. Ainsi, nous proposons dans cette partie un modèle qui minimise les nœuds actifs et assure à la fois la couverture de la zone et la connectivité du réseau.

•La variable de décision : Pour garantir la connectivité au sein du modèle, nous choisissons d'ajouter à la variable de décision un indice t caractérisant le dégré de connectivité . Elle devient ainsi $X_{i,t}$ et est définie par :

$X_{i,t} = \begin{cases} 1 & \text{si le capteur i est actif et est connecté à la station de base par t capteurs actifs} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$ En d'autres termes, il existe un chemin entre la position i et la station principale composé de t capteurs, chaque couple successif étant à une distance inférieure ou égale R_{com}. •La fonction objectif : L'objectif est de minimiser le nombre de nœuds actifs présents sur la grille en vue de maximiser la durée de vie du réseau. Ainsi la fonction à minimiser est

$$Z = \sum_{i \in M} \sum_{t=0}^{T_i} X_{i,t} \tag{4.2.4}$$

•Contraintes de couverture : Comme on a ajouté une dimension t aux variables de décisions donc la contrainte de couverture s'écrit :

$$Z = \sum_{i \in M} \sum_{t=0}^{T_i} a_{i,j} X_{i,t} \geq 1 \quad \forall j \in N \tag{4.2.5}$$

•Contrainte de connectivité :

Elle est scindée en deux parties : la connexion directe et la connextion indirecte Connexion directe : elle correspond aux éléments de la grille qui sont en portée directe de la station de base c'est-à-dire le cas t = 0. Elle est assurée par la contrainte :

$$S_i - X_{i,0} \geq 0 \quad \forall i \in M$$

Connexion indirecte : elle correspond aux élements de la grille liés par la station de base par au moins un capteur intermédiaire c'est-à-dire le cas t ¿ 0. La connexion indirecte est assurée par la contrainte suivante :

$$\sum_{k \in M} b_{i,k} X_{k,t-1} - X_{i,t} \geq 0 \quad \forall i \in M \quad et \quad t = 1, ..., T_i$$

•Le modèle : Le modèle linéaire global qui exprime la couverture et la connectivité s'écrit donc de la manière suivante :

$$min \sum_{i \in M} \sum_{t=0}^{T_i} X_{i,t} \tag{4.2.6}$$

$$\sum_{i \in M} \sum_{t=0}^{T_i} a_{i,j} X_{i,t} \geq 1 \quad \forall j \in N \tag{4.2.7}$$

$$\sum_{k \in M} b_{i,k} X_{k,t-1} - X_{i,t} \geq 0 \quad \forall i \in M \quad et \quad t = 1, ..., T_i \tag{4.2.8}$$

$$S_i - X_{i,0} \geq 0 \quad \forall i \in M \tag{4.2.9}$$

$$X_{i,t} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in M \quad et \quad t = 1, ..., T_i \tag{4.2.10}$$

Le modèle proposé implique ainsi la minimisation du nombre de capteurs actifs (4.6) sachant que chaque cible de la zone soit couverte au moins par un capteur (4.7). Chaque capteur est connecté directement à la station de base (4 :9) ou est lié à la station de base par t capteurs actifs (4.8).

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé le problème d'activation et de mise en veille des capteurs. Un premier modèle a été proposé pour assuré la couverture et réduire la consommation en énergie des capteurs puis a été amelioré pour garantir non seulement la couverture totale de la zone mais aussi assurer la connectivité de l'ensemble des capteurs du réseau. Par contre il nous manque seulement les données pour simuler.

4.4 Tests numériques

Les tests numériques ont été réalisés avec le logiciel CPLEX studio. Il permet de créer des fichiers selon le langage OPL. Le langage OPL est un langage informatique permettant de spécifier des problèmes

d'optimisation, qui peuvent être ensuite passés à un solveur pour la résolution. Ces fichiers permettent d'exprimer des problèmes : d'optimisation linéaire continue d'optimisation linéaire en nombres entiers ou mixtes de programmation par contraintes. Cependant il ne permet pas d'exprimer de problèmes de programmation non-linéaire.

4.4.1 Modèle de couverture. •Paramètres utilisés

Pour le modèle de couverture nous considérons une zone d'intéret contenant 10 capteurs pour la surveillance de 7 cibles.Sa matrice de couverture est représentée par le tableau avec les cj ; j = 1 ;... ; 7 représentent les cibles.

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
x_1	1	0	1	0	0	0	0
x_2	0	1	0	1	0	0	0
x_3	0	0	0	0	0	0	1
x_4	1	1	0	0	0	1	0
x_5	0	0	1	0	1	1	1
x_6	0	0	1	0	0	0	0
x_7	1	0	1	1	0	0	0
x_8	0	1	0	0	0	1	0
x_9	0	0	0	0	0	0	1
x_{10}	0	1	0	0	1	1	0

TABLE 4.2 – Matrice de couverture des cibles.

•Résultats et analyse La résolution du problème avec CPLEX dont le programme de résolution est représenté en annexe, a donné les solutions suivantes : $X_1 = 0; X_2 = 0; X_3 = 0; X_4 = 1; X_5 = 1; X_6 = 0; X_7 = 1; X_8 = 0; X_9 = 0; X_{10} = 0$

Ainsi seule l'activation de 3 capteurs est suffisante pour l'observation de toutes les cibles qui sont présentes dans la zone comme le montre la. Les autres capteurs seront donc en mode veille et vont économiser leur énergie ce qui va entraîner le prolongement de la durée de vie du réseau tout en conservant la couverture totale de la zone.

4.4.2 Modèle de couverture et de connectivité. •Paramètres utilisés Pour le modèle de couverture et de connectivité nous avons considéré une zone contenant 7 capteurs déployés aléatoirement avec le nombre maximum de capteurs intermédiaire fixé à 2 dont les matrices de couverture et de connectivité sont représentées respectivement dans les tableaux 4.3 et 4.4 et le vecteur Si est donné par le tableau 4.5

•Résultats et analyse

La résolution du modèle avec CPLEX dont le programme de résolution est représenté en annexe, a donné les résultats suivants :

Donc l'activation de DEUX capteurs est suffsante pour assurer la couverture et la connectivité du réseau. Il s'agit des capteurs x_2 et x_3 de degrés respectifs 1 chacun. Ainsi l'information captée par x_2 passe par x_3 pour arriver à la station de base et celle captée par x_3 passe par x_2 pour acceder à la station de base. Le capteurs x_1 seras en mode veille et par conséquent vas économiser son énergie. D'ou l'auguementation de la durée de vie du réseau.

1	0	1	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1
1	1	0	0	0	1	0
0	0	1	0	1	1	1
0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	1	1	0

TABLE 4.3 – Matrice de couverture.

1	0	1	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	0	1	1	0
0	0	1	0	1	1	1
0	1	1	0	0	0	0
1	0	1	1	1	0	0

TABLE 4.4 – Matrice de connectivité.

1	0	1	0	0	0	1

TABLE 4.5 – Le vecteur S_i.

4.4.3 Conclusion. Dans ce chapitre nous avons abordé le problème d'activation et de mise en veille des capteurs. Un premier modèle a été proposé pour assuré la couverture et réduire la consommation en énergie des capteurs puis a été amelioré pour garantir non seulement la couverture totale de la zone mais aussi assurer la connectivité de l'ensemble des capteurs du réseau. La résolution de nos modèles avec CPLEX a donné des solutions qui montrent que la minimisation des nœuds actifs contribue largement à l'augmentation de la durée de vie du réseau.

Mm (taille 3)	Tt (taille 3)	Valeur
1	1	0
1	2	0
1	3	0
2	1	1
2	2	0
2	3	0
3	1	1
3	2	0
3	3	0

TABLE 4.6 – Résultats.

Conclusion

Dans ce mémoire nous avons traité l'optimisation de la couverture et de la connectivité des réseaux de capteurs sans fil. Dans un premier temps nous avons présenté une vision globale des réseaux de capteurs. Dans cette partie, nous avons donné la définition d'un réseau de capteurs, ses différénts domaines d'application, et les principales contraintes à tenir en compte pour la bonne conception d'un réseau de capteurs. La seconde partie de notre travail est consacrée à l'étude de l'ordonnancement d'activité des capteurs. C'est une technique utilisée pour pallier aux différentes contraintes citées ci-dessus notamment la contrainte énergétique. Il s'agit d'activer le nombre nécessaire de nœuds et de mettre en veille les autres. Les nœuds en mode veille vont économiser leur énergie ainsi la durée de vie du réseau serait allongée. La troisième partie de ce mémoire est consacrée à la formulation mathématique de notre problématique. Dans cette partie, nous avons proposé un modèle mathématique dont le but est de minimiser le nombre de nœuds actifs sous contraintes des exigences applicatives à savoir la couverture totale de la zone d'intérêt ainsi que la connectivité du réseau.

Et en fin la résolution du modèle obtenu avec le solveur Ilog CPLEX qui a donné des solutions qui montrent que l'ordonnancement distribué des nœuds nous permet non seulement de consommer moins d'énergie mais aussi de réduire la complexité du réseau.

Le travail de ce mémoire à été réalisé sous les hypothèses suivantes :

1. Les nœuds déployés sont statiques
2. Les nœuds ont les mêmes rayons de couverture et de connectivité
3. La station de base est unique

Pour les travaux futurs, nous comptons élargir notre travail avec un RCSF hétérogène c'est-à-dire un réseau avec des nœuds mobiles et une diversité de rayon de communication et de couverture . Le modèle proposé considère une zone d'interêt avec une seule station de base. Une perspective intéressante de ce travail serait aussi de proposer un modèle avec plusieurs stations de bases.

References

[1] Santosh Kumar, Anish Arora, and Ten-Hwang Lai., *On the lifetime analysis of always-on wireless sensor network applications. In Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005. IEEE International Conference on, pages 37pp. IEEE, 2005.*

[2] Holger Karl and Andreas Willig., *Protocols and architectures for wireless sensor networks. Wiley-Interscience, 2007.*

[3] Di Tian and Nicolas D Georganas., *LaTeX : A document preparation system*, Addison-Wesley, 1986.

[4] D. J. C. MacKay, *A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications, pages 32-41. ACM, 2002.*

[5] Dame Diongue., *: Optimisation distribuée de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil. Thèse de Doctorat de l'université de Gaston Berger de Saint Louis Spécialité Informatique soutenue le 13 juin 2014.*

[6] Rahim KACIMI., *: Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil. Doctorat de l'Universté de Toulouse, 2009.*

[7] Chérif Diallo, *Techniques d ?amélioration du routage et de la formation des clusters multi-sauts dans les réseaux de capteurs sans fil*

[8] Abdallah makhoul., *: Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données. Thèse de l'Université France compte (2008).*

[9] Antoine Gallais., *: Ordonnancement d'Activité dans les Réseaux de Capteurs : l'exemple de la Couverture de surface. Thése en Sciences mathématiques de l'Université des Sciences et Technologies de Lille (spécialité informatique) présenté le 26 juin 2007.*

[10] LEHSAINI Mohamed., *: Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique. Thèse de Doctorat de l'Université de Franche-Comté Spécialité Informatique, année 2009.*

[11] Wan DU. *: Modélisation et Simulation de Réseaux de Capteurs sans Fil. Thése pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole Centrale de Lyon, Année : 2011*

[12] Cheick-Tidjane Kone. *: Conception de l'architecture d'un réseau de capteurs sans fil de grande dimension. Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy I,2011.*

[13] *Quentin Lampin. : Réseaux urbains de capteurs sans-fil :Applications, caractérisation et protocoles. Thése en Informatique L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, janvier 2014.*

[14] FELLAH Khadidja. *: TECHNIQUES D'OPTIMISATION POUR L'ECONOMIE D'ENERGIE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL. Diplome de magister en Informatique de l'Université d'Oran Es-senia, 2008.*

[15] Said El Abdellaoui. *: Etude et analyse de la performance du système coopératif "MIMO-Virtuel" pour les réseaux de capteurs sans fil. Thése en sciences de l'Université MOHAMMED V-AGDAL Rabat, année 2013.*

[16] BENAHMED Khélifa. *: Approche Théorie des Graphes pour la Surveillance d'un Réseau de Capteurs sans fil. Pour l'obtention du diplôme de Magister en Informatique de l'Université d'Oran Es-senia, année 2007.*

[17] Matthieu LE BERRE. *: Optimisation de déploiement et localisation de cible dans les réseaux de capteurs. Thése en optimisation et sureté des systemes de l'Université de Technologie de Troyes, année 2014.*

[18] Pascale Minet, Ridha Soua, Ichrak Amdouni, Erwan Livolant, Saoucene Mahfoudh. : *Ordonnancement de l'activité des noeuds dans les réseaux ad hoc et les réseaux de capteurs sans fil. Ecole d'Eté Temps Réel, Aug 2013, Toulouse, France, 2013.*

[19] Mitta Nourreddine,Rachid El Gouri. *: Une étude et une classification des algorithmes distribués d'ordonnancement des réseaux de capteurs sans fil. Laboratoire Génie Electriques et Systèmes Energétiques Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail Kénitra, Maro.*

[20] Rachit Trivedi , Varun Pratap Singh. *: Coverage and Connectivity Issue in Wireless Sensor Networks. Department of Electronics et Communication Engineering. Premprakash Gupta Institute of Engineering, Bareilly, India, 2011.*

[21] Hatem BEN AMOR GERAD. *: Initiation à CPLEX. Octobre 2013.*

[22] Christophe et Andréa Duhame. *: Introduction à CPLEX. ISIMA 2008/2009.*

[23] SAKAROVITCH Michel *Optimisation combinatoire : Méthodes mathématiques et algorithmiques. 1984.*

[24] TEGHEM Jacques *Programmation Linéaire. Collection statistique et Mathématiques appliquées, 2003.*

[25] Christelle Gueret, Christian Prins, and Marc Sevaux. *Programmation linéaire : 65 problèmes d'optimisation modélisés et résolus par visual express. Eyrolles, 2000.*

[26] Rémi Ruppli. *Programmation linéaire. 2005.*

[27] A. Schrijver. *Theory of linear and integer programming. 1986.*

[28] Christos H. *Papadimitriou and Kenneth Steiglitz. Combinatorial optimization. Dover, 1998.*

[29] A. Schrijver.*Theory of linear and integer programming. 1986.*

[30] A.H Land and A.G Doig.*An automatic method for solving discrete programming problems. Econometrica, 28 :497–520, 1960.*

[31] A.T ERNEST and M. KRISHNOMOORTHY. *Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem. location science, 4(3) :139–154, 1996.*

Annexe

Programme de résolution avec OPL-CPLEX pour le modèle de couverture

Modèle 1

```
/*********************************************
* OPL 12.6.1.0 Model
* Author: stg_ali
* Creation Date: 28 févr. 2019 at 20:11:51
*********************************************/
int Maxposition=...;
int Maxcible = ...;
range position = 1..Maxposition;
range cible=1..Maxcible;
int a[position][cible] = ...;
//variable
dvar boolean X[position];
minimize sum(i in position )(X[i]);
subject to {
//contraintes de couverture:
forall(j in cible)
sum(i in position ) a[i][j]*X[i] >= 1 ;
```

Données du programme

```
Données Modèle 1
/*********************************************
* OPL 12.6.1.0 Data
* Author: stg_ali
* Creation Date: 28 févr. 2019 at 20:11:51
*********************************************/
Maxposition = 10;
Maxcible= 7;
a=[[1,0,1,0,0,0,0],
[0,1,0,1,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,1],
[1,1,0,0,0,1,0],
[0,0,1,0,1,1,1],
[0,0,1,0,0,0,0],
[1,0,1,1,0,0,0],
[0,1,0,0,0,1,0],
[0,0,0,0,0,0,1],
[0,1,0,0,1,1,0],
];
```

```
Résultats Modèle 1
// solution (optimal) with objective 3
// Quality Incumbent solution:
// MILP objective                                3.0000000000e+000
// MILP solution norm |x| (Total, Max)           3.00000e+000 1.00000e+000
// MILP solution error (Ax=b) (Total, Max)       0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP x bound error (Total, Max)               0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP x integrality error (Total, Max)         0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP slack bound error (Total, Max)           0.00000e+000 0.00000e+000
//

X = [0
0 0 1 1 0 1 0 0 0];
// pool solution #0 with objective 3
// Quality Solution pool solution 'p4' (of 3):
// MILP objective                                3.0000000000e+000
// MILP solution norm |x| (Total, Max)           3.00000e+000 1.00000e+000
// MILP solution error (Ax=b) (Total, Max)       0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP x bound error (Total, Max)               0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP x integrality error (Total, Max)         0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP slack bound error (Total, Max)           0.00000e+000 0.00000e+000
//

X = [0
0 0 1 1 0 1 0 0 0];
// solution (optimal) with objective 3
// Quality Incumbent solution:
// MILP objective                                3.0000000000e+000
// MILP solution norm |x| (Total, Max)           3.00000e+000 1.00000e+000
// MILP solution error (Ax=b) (Total, Max)       0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP x bound error (Total, Max)               0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP x integrality error (Total, Max)         0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP slack bound error (Total, Max)           0.00000e+000 0.00000e+000
//

X = [0
0 0 1 1 0 1 0 0 0];
```

Programme de résolution avec OPL-CPLEX pour le mod èle de couverture et de connectivité

```
Modèle 2
/*********************************************
* OPL 12.6.1.0 Data
* Author: stg_ali
* Creation Date: 28 févr. 2019 at 20:11:51
*********************************************/
```

```
int MaxMm=...;
range Mm = 1..MaxMm;
int MaxTt =...;
range Tt = 1..MaxTt;

int a[Mm][Mm]=...;
int b[Mm][Mm]=...;
int sink[Mm] =...;

dvar boolean X[Mm][Tt];

minimize sum(i in Mm , t in Tt)X[i][t];
subject to {
ctpremier:
forall(i in Mm)
forall( j in Mm)
sum(i in Mm , t in Tt)a[i][j]*X[i][t]>=1;
ctdeuxieme:
forall(i in Mm )
forall(t in Tt)
if(t == 0)
sink[i]-X[i][t] >= 0;
cttroisieme:
forall(i in Mm , t in Tt)
forall(l in Mm )
forall(j in Mm)
if (l == t-1)
sum(j in Mm)b[i][j]*X[j][l] - X[i][t] >= 0;
 }
```

Données du programme

```
Données Modèle 2
/*********************************************
* OPL 12.6.1.0 Data
* Author: stg_ali
* Creation Date: 28 févr. 2019 at 20:11:51
*********************************************/
MaxMm = 3;
MaxTt =3;
a = [[0, 1 ,0],
[1 , 0 , 1],
[1 , 1 , 0]];

b = [[1, 0 ,0],
[0 , 0 , 1],
[1 , 0 , 0]];
```

```
sink = [1 ,0 , 1];

Solution Modèle 2
solution (optimal) with objective 2
// Quality Incumbent solution:
// MILP objective                                  2.0000000000e+000
// MILP solution norm |x| (Total, Max)             2.00000e+000 1.00000e+000
// MILP solution error (Ax=b) (Total, Max)         0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP x bound error (Total, Max)                 0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP x integrality error (Total, Max)           0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP slack bound error (Total, Max)             0.00000e+000 0.00000e+000
//

X = [[0
0 0]
[1 0 0]
[1 0 0]];

Mm  (taille 3) Tt  (taille 3) Valeur
1 1 0
1 2 0
1 3 0
2 1 1
2 2 0
2 3 0
3 1 1
3 2 0
3 3 0
```