

REPUBLIQUE ALGERIÈNNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Khider – BISKRA
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département d'informatique



T H È S E

en vue d'obtenir le titre de

Docteur en Informatique 3^{ème} cycle LMD

de l'université Mohamed Khider – Biskra

Option : Techniques de l'image et de l'intelligence artificielle

Une Approche Agent Mobile Pour Les Réseaux De Capteurs

Présentée et soutenue par

Imene ALOUI

Devant le jury composé de :

Pr. Benmohamed Mohamed	université de Constantine 2	Président
Pr. Kazar Okba	université de Biskra	Rapporteur
Pr. Mokhtari Aicha	USTHB	Examineur
Dr. Terrissa Sadek Labib	université de Biskra	Examineur
Dr. Rezeg Khaled	université de Biskra	Examineur
Dr. Benharzallah Saber	université de Biskra	Examineur
Dr. Kahloul Laid	université de Biskra	Invité

REMERCIEMENTS

Je remercie avant tout "DIEU" le tout puissant, de m'avoir donnée la santé, le courage et la patience pour mener à bien ce projet de doctorat.

Je voudrais remercier grandement mon directeur de thèse, Pr. Okba KAZAR, pour toute son aide. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse.

Je tiens à remercier particulièrement monsieur Laid KAHLOUL pour toutes nos discussions, ses conseils et son aide qui m'ont accompagné tout au long de ma thèse.

Je remercie l'ensemble des membres de mon jury : Pr. Mohamed BENMOHEMED, Pr. Aicha MOKHTARI, Dr. Sadek Labib TERRISSA, Dr. Khaled REZEG et Dr. Saber BENHARZALLAH pour l'intérêt qu'ils ont accordé à mon travail et pour avoir accepté de participer à ce jury.

Enfin, je tiens à exprimer mes sincères gratitudeux aux personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de la présente thèse de doctorat et en particulier ma famille.

ملخص

حاليا، عملية إدراج أنظمة الوكيل المتنقل في شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSN) لها تأثير إيجابي على هذا النوع من الشبكات. بحيث أن طريق سير الوكيل المتنقل في الشبكة يؤثر بشكل كبير على استهلاك الطاقة. و لكن العثور على التسلسل الأمثل لعقد المصدر يمثل مشكلة من نوع NP-hard. العديد من الأبحاث السابقة تمحورت حول كيفية تخطيط الطريق في الشبكة من خلال استخدام وكيل متنقل واحد (SIP) أو العديد من الوكلاء المتنقلين (MIP).

يجب في عملية تخطيط الطريق بالنسبة للعديد من وكلاء المتنقلين في شبكات الاستشعار اللاسلكية (MIP)، أن ننظر في المسائل الثلاث التالية: (أ) العدد المناسب من الوكلاء المتنقلين، (ب) التجمع المناسبة لعقد المصدر ، وأخيرا (ج) المسار الأمثل لكل وكيل متنقل من أجل زيارة كافة العقد المرتبطة به. في ما يخص الحلول الحالية لمشاكل MIP ، المسافة الجغرافية هي العامل الوحيد المستعمل في تخطيط طرق الوكلاء. هذه الحلول تهمل عامل حجم البيانات المرصدة من قبل العقد، وهو عامل آخر يؤثر على استهلاك الطاقة أيضا.

للحد من مدة المهمة وكمية الطاقة المستهلكة في الشبكة، قمنا بالاعتماد على منهجية بحثية. حيث اقترحنا حلا جديدا لمشاكل MIP يستند على العاملين الأساسيين (المسافة الجغرافية وحجم البيانات) المؤثرين في استهلاك الطاقة. من خلال استخدام هذين العاملين، توفر هذه الدراسة وسيلة جديدة لتحديد عدد الوكلاء المتنقلين و طريقة تجميع عقد المصادر. بعد تحديد عدد الوكلاء ومجموعات العقد، نحدد المسار الذي يزوره كل وكيل متنقل باستخدام خوارزمية GRASP.

الكلمات المفتاحية: شبكات الاستشعار اللاسلكية، وكيل المتنقل، تخطيط الطريق، استهلاك الطاقة، MIP، SIP، خوارزمية GRASP.

Abstract

The integration of mobile agent systems in the wireless sensor networks (WSN) has a positive impact on this type of networks. The itineraries followed by mobile agents have an influence significantly on the energy consumption. Finding an optimal sequence of visited source nodes (data sensors) is an NP-hard problem. Many researches have dealt with itinerary planning in WSNs through the use of a single agent (SIP: Single agent Itinerary Planning) or multiple mobile agents (MIP: Multiple agents Itinerary Planning).

The itinerary planning, for multiple agents in WSN (MIP), must consider the following three issues: (i) the appropriate number of Mobile Agents, (ii) the suitable grouping of source-nodes, (iii) and finally, the optimal itinerary for each Mobile Agent to visit all its associated nodes. In the current MIP solutions, the geographical distance is the unique factor motivating to plan the itinerary of the agents. These solutions don't consider the data size provided by each node which is another factor which affecting energy consumption too.

To reduce the task duration and the amount of consumed energy in the WSN, a research methodology was adopted. We provide a new MIP solution which is based on the both basic factors (geographical distance and data size) affecting energy consumption. Using these two factors, this study provides a new way for determining the number of mobile agents and for grouping source-nodes. Once, the number of mobile agents and the node groups are defined, we identify the itinerary (a path passing through the set of source nodes that must be visited by the mobile agent). The itinerary is defined using the GRASP (Greedy randomized adaptive search procedure) heuristic algorithm.

Keywords: wireless sensor networks, mobile agent, itinerary planning, energy consumption, SIP solution, MIP solution, GRASP algorithm.

Résumé

Actuellement, l'intégration des systèmes d'agents mobiles dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) a un impact positif sur ce type de réseaux. Les itinéraires suivis par des agents mobiles ont une influence significative sur la consommation d'énergie. Trouver une séquence optimale des nœuds sources à visiter est un problème NP-hard. Un nombre important de recherches ont porté sur la planification d'itinéraires dans les réseaux de capteurs grâce à l'utilisation d'un seul agent (SIP: Single agent Itinerary Planning) ou plusieurs agents mobiles (MIP: Multiple agents Itinerary Planning).

La planification d'itinéraires, pour plusieurs agents dans un RCSF (MIP), doit examiner les trois questions suivantes: (i) le nombre approprié d'agents mobiles, (ii) le regroupement approprié de nœuds sources, (iii) et enfin, l'itinéraire optimal suivi par chaque agent mobile afin de visiter tous ses nœuds associés. Dans les solutions actuelles de MIP, la distance géographique est l'unique facteur de motivation pour planifier l'itinéraire des agents. Ces solutions ne considèrent pas la taille des données fournies par chaque nœud qui est un autre facteur qui influence la consommation d'énergie aussi.

Pour diminuer la durée de la tâche et la quantité d'énergie consommée dans le RCSF, une méthodologie de recherche a été adoptée. Nous proposons une nouvelle solution de MIP qui est basé sur les deux facteurs de base (distance géographique et la taille des données) qui influencent la consommation d'énergie. À travers l'utilisation de ces deux facteurs, cette étude fournit une nouvelle façon pour déterminer le nombre d'agents mobiles et le regroupement des nœuds sources. Une fois, le nombre d'agents mobiles et le nœud groupes sont définis, nous identifions l'itinéraire qui doit être visités par chaque agent mobile à l'aide du l'algorithme heuristique GRASP (Greedy randomized adaptive search procedure).

Mots-clés : réseaux de capteurs sans fil, agent mobile, planification d'itinéraires, consommation d'énergie, solution SIP, solution MIP, Algorithme GRASP.

Table des matières

Chapitre 1 : Introduction

I.1 Vue d'ensemble	1
I.2 Contexte du travail	2
I.3 Objectif	3
I.4 Contribution	3
I.5 Structure de la thèse	3

Chapitre 2 : Réseau de capteurs sans fil

II.1 Introduction	5
II.2. Définition de réseau de capteurs	5
II.3 Définition d'un capteur	6
II.4 Architecture d'un capteur	6
II.4.1 L'unité d'acquisition	6
II.4.2 L'unité de traitement	6
II.4.3 L'unité de transmission ou de communication	7
II.4.4 L'unité d'alimentation (Batterie)	7
II.5 Architecture de communication d'un réseau de capteurs	8
II.6 Pile protocolaire	9
II.6.1 Les couches de la pile	9
II.6.2 Les plants de la pile	10
II.7 Domaines d'applications des réseaux de capteurs	11
II.7.1 Applications militaires	11
II.7.2 Applications environnementales	12
II.7.3 Applications médicales	12
II.7.4 Applications domestiques	13
II.8 Facteurs et contraintes liées aux réseaux de capteurs	14

II.9 Différence entre les RCSFs et les réseaux AD HOC.....	16
III.10 Consommation d'énergie dans les RCSF.....	16
II.10.1 Énergie de capteur	16
II.10.2 Modèle de consommation d'énergie.....	17
II.10.3 Facteurs de dissipation d'énergie	18
II.10.3.1 Etat du module radio.....	18
II.10.3.2 Accès au medium de transmission.....	19
II.10.3.3 Technologies de la communication	21
II.10.3.4 Routage des données	22
II.10.4 Techniques de minimisation de la consommation d'énergie.....	22
I.10.4.1 Techniques au niveau de capture	24
II.10.4.2 Techniques au niveau de calcul	24
II.10.4.3 Techniques au niveau de communication.....	24
II.11 Conclusion	27

Chapitre 3 : Travaux connexes

III.1 Introduction	29
III.2 Concept d'agent.....	29
III.2.1 Caractéristiques d'un agent	30
III.2.2 Interactions entre les agents	32
III.3 Systèmes multi agents	34
III.3.1 Types de système multi agent	35
III.3.2 Communication dans les systèmes multi agent.....	36
III.3.3 Avantages et Défis d'un système multi agents.....	36
III.4 Agent mobile.....	37
III.4.1 Définition d'agent mobile	37
III.4.2 Mobilité	37
III.4.2.1 Degré de mobilité	38

III.4.2.2 Ressources nécessaires à la mobilité	38
III.4.3 Caractéristiques d'un agent mobile	39
III.4.4 Fonctionnement d'un agent mobile	39
III.4.5 Comparaison entre les paradigmes "Client/Serveur" et "Agent mobile"	40
III.4.6 Utilité d'un agent mobile.....	41
III.4.7 Problèmes posés par les agents mobiles.....	43
III.4.8 Plateformes des agents mobiles.....	44
III.4.8.1 Plateformes écrit en Java.....	44
III.4.8.2 Plateformes non écrit en Java.....	44
III.5 Planification d'itinéraire.....	45
III.5.1 Définition d'itinéraire.....	45
III.5.2 Types de planification	46
III.5.3 Modèles de fusion de données dans RCSF	46
III.5.4 Planification d'itinéraire à base d'un seul agent mobile dans le RCSF.....	49
III.5.5 Planification d'itinéraire à base de multiples agents mobiles dans le RCSF.....	51
III.6 Analyse des travaux	56
III.7 Conclusion.....	59

Chapitre 4 : Approche proposée

IV.1 Introduction.....	60
IV.2 Description globale de l'approche proposée	61
IV.3 Description détaillée de l'approche proposée	62
IV.3 .1 Partitionnement de réseau	62
IV.3 .2 Détermination du nombre des agents mobiles	64
IV.3 .2.1 Nombre d'agents mobiles en fonction de la taille des données.....	65
IV.3 .2.2 Nombre d'agents mobile en fonction de la distance géographique	67
IV.3 .3 Construction d'itinéraire	68
IV.3 .3.1 Regroupement des nœuds sources	68

IV.3 .3 .2 Détermination d'itinéraire	70
IV.4 Format de paquet d'agent mobile	73
IV.5 Fonctionnement générale	74
IV.6 conclusion	76

Chapitre 5 : Mise en œuvre et résultats

V.1 Introduction	77
V.2 Outil de simulation	78
V.3 Model de réseau.....	78
V.4 Model de capteur	79
V.5 Simulation et évaluation.....	80
V.5.1 Mesures de performance	80
V.5.2 Paramètres de simulation.....	81
V.5.3 Résultats et discussion.....	81
V.5.3 .1 Equilibrage de la charge des données entre multiples agents mobiles.....	82
V.5.3 .2 Longueur totale d'itinéraire.....	82
V.5.3 .3 Coût de l'énergie.....	83
V.5.3 .4 Durée de la tâche	84
V.6 Conclusion.....	85

Chapitre 6 : Conclusion et perspectives

VI.1 Conclusion	86
VI.2 Limitations	87
VI.3 Futurs travaux	87

Liste des figures

Figure II. 1 Exemple de capteur intelligent MICA2 de Crossbow.....	6
Figure II. 2 Composants d'un capteur	7
Figure II. 3 Fonctionnement des réseaux de capteur.....	8
Figure II. 4 Pile protocolaire.	9
Figure II. 5 Applications militaires.	11
Figure II. 6 Applications environnementales.	12
Figure II. 7 Applications médicales.	13
Figure II. 8 Applications domestiques.	13
Figure II. 9 Energies consommées par un capteur.	17
Figure II. 10 Modèle de consommation d'énergie	18
Figure II. 11 Consommation d'énergie en acquisition, traitement, et communication [34].	19
Figure II. 12 Emission simultanée d'un message (collision).	20
Figure II. 13 Surécoute dans une transmission.	20
Figure II. 14 Techniques de conservation d'énergie.	Erreur ! Signet non défini.
Figure II. 15 Exemple de mécanisme d'agrégation.....	25
Figure III. 1 Composants d'un système multi agent.	35
Figure III. 2 Degré de mobilité des applications.	38
Figure III. 3 Fonctionnement d'un agent mobile	40
Figure III. 4 Client / Serveur Versus Agent mobile	40
Figure III. 5 Modèles de fusion des données dans le RCSF	47
Figure III. 6 Sortie de chacun algorithmes LCF (a) et GCF (b), C : le centre de network.	49
Figure III. 7 CL-MIP architecture.	51
Figure III. 8 AG-MIP architecture.	52
Figure III. 9 GA-MIP architecture.	53
Figure III. 10 TCG architecture.....	54
Figure III. 11 Sortie de NOID (a). L'itinéraire d'AM provenant de la sortie de NOID (b)...	54
Figure III. 12 SNOID partitionnement de la zone autour de la station de base (Sink).	55
Figure IV. 1 Processus général de DD-MIP approche.	62
Figure IV. 2 Processus général de k-means méthode.....	63
Figure IV. 3 Processus de partitionnement de réseau.	64

Figure IV. 4 Processus de détermination nombre d'agents mobile.....	65
Figure IV. 5 L'exécution de la stratégie GDGM-MIP (un exemple démonstratif) .	70
Figure IV. 6 Processus général de GRASP.....	71
Figure IV. 7 Format de paquet d'agent mobile.....	73
Figure IV. 8 Diagramme de séquence.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure V. 1 Visualisation du réseau avec 5 groupes dans OPNET 14.5 modeler.....	78
Figure V. 2 Structure du modèle de simulation de capteur.....	79
Figure V. 3 Equilibrage de charge des données entre 3 agents mobiles.....	82
Figure V. 4 Longueur totale d'itinéraire.....	83
Figure V. 5 Impact de nombre de nœuds sources sur l'énergie consommée.....	84
Figur V. 6 Impact de nombre de nœuds sources sur la durée de la tâche.....	85

Liste des tableaux

Tableau II. 1 Tableau Comparatif entre les technologies de la communication sans fil	22
Tableau III. 1 Tableau comparatif de chaque approche proposé.	58
Tableau IV. 1 Nombre d'agents mobiles en fonction de la taille des données.	66
Tableau IV. 2 Nombre d'agents mobile en fonction de la distance géographique.	67
Tableau IV. 3 Nombre final d'agents mobiles.	68
Tableau V. 1 Paramètre de simulation de réseau.	81
Tableau V. 2 Paramètre de simulation pour l'agent mobile.	81
Tableau V. 3 Paramètre de simulation pour GRASP.	81
Tableau V. 4 Paramètre de simulation pour GA-MIP.	81

Chapitre 1

Introduction

Table des matières

I.1 Vue d'ensemble	1
I.2 Contexte du travail	2
I.3 Objectif.....	3
I.4 Contribution.....	3
I.5 Structure de la thèse.....	3

Chapitre 1

Introduction

Ce chapitre introduit notre thèse. Il commence, tout d'abord, par un vue d'ensemble du domaine de recherche. Il représente, ensuite, le contexte et but de l'étude. Pour après, fournir la contribution de cette thèse. Il continue ensuite à discuter les questions de recherche et à la fin, la structure de la thèse est présentée.

I.1 Vue d'ensemble

La technologie des Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) joue un rôle important dans le domaine de la télécommunication. Elle permet d'apercevoir une nouvelle façon de recueillir les données. La grande puissance de ce type de réseaux se repère dans la facilité de leur déploiement dans une zone géographique spécifique et la bonne qualité de leur service [1].

Un RCSF est constitué d'un ensemble de nœuds (capteurs) capables de recueillir des informations à partir d'un environnement surveillé et de les transmettre à une station de base "Sink" par l'intermédiaire du support sans fil. Un réseau de capteurs est souvent caractérisé par un déploiement dense dans les environnements à grande échelle. Cependant, il est principalement limité en termes de ressources (capacités insuffisante de stockage, de traitement et d'autonomie) parce qu'il est généralement alimenté par des piles rarement remplaçables. Cela conduit à des problèmes liés à la consommation d'énergie durant le fonctionnement des nœuds de réseau [17]. Afin de résoudre ces limites, l'intérêt de la recherche a augmenté dans la conception, le développement et le déploiement de systèmes d'agents mobiles dans les réseaux de capteurs sans fil [5].

La technologie des Agents Mobiles "AMs" représente une tendance relativement récente dans l'informatique distribuée, qui répond aux problèmes de flexibilité et d'évolutivité des modèles centralisés. Un agent mobile est un type particulier de logiciel qui migre entre les

nœuds d'un réseau pour effectuer une ou plusieurs tâches de façon autonome et intelligente. Il répond aux conditions changeantes de l'environnement du réseau, afin de réaliser les objectifs de son répartiteur [72].

Dans les RCSF, les données produites par les nœuds capteurs voisins sont très corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer la réception par la station de base d'informations redondantes. Ce grave problème d'évolutivité peut être adressé par les agents mobiles. L'idée principale est de déléguer des multiples agents mobiles aux nœuds sources pour la fusion (agrégation) efficace des données dans les réseaux de capteurs. Ce principe permet de réduire la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs, ainsi réduire la consommation d'énergie dans le réseau et améliorer sa durée de vie [81].

En résumé l'utilisation des agents mobiles pour déployer dynamiquement de nouvelles applications dans les réseaux de capteurs se révèle être une méthode efficace pour relever les problèmes liés à la consommation d'énergie. Ils ont été jugés particulièrement utiles pour faciliter la fusion et la diffusion efficace des données dans les réseaux de capteurs [2].

1.2 Contexte du travail

La majorité des travaux de recherche dans le domaine de déploiement de systèmes d'AMs dans les RCSF sont orientés vers l'optimisation de consommation d'énergie des nœuds à travers la planification d'itinéraire d'agent mobile. L'itinéraire suivi lors de la migration de l'agent mobile peut avoir un impact significatif sur la consommation d'énergie. Cependant, trouver une séquence optimale de nœuds sources à visiter par les AMs est un problème difficile à résoudre (un problème NP-hard) [16].

La planification d'itinéraire pour plusieurs agents dans les RCSF, doit prendre en considération les trois questions suivantes [5]:

1. Quel est le nombre optimal des agents mobiles ?
2. Quelle est la manière optimale pour regrouper les nœuds sources ?
3. Quel est l'itinéraire optimal adopté par chaque agent mobile ?

Pour répondre aux questions ci-dessus, une nouvelle architecture de planification d'itinéraire entre multiples agents mobiles pour le réseau de capteurs sans fil est conçue. Une série de simulations pour mesurer les performances du nouveau processus de planification est également effectuée.

I.3 Objectif

L'objectif principal de ce travail est de réaliser un système de planification d'itinéraire entre multiples agents mobiles.

A travers ce système, nous visons à atteindre les objectifs suivants:

- ✓ Étudier les différents concepts nécessaires aux réseaux de capteurs sans fils et les systèmes multi-agents.
- ✓ Proposer une technique de planification d'itinéraire entre multiples agents mobiles pour l'équilibrage de la charge dans les réseaux de capteur sans fil.
- ✓ Augmenter la durée de vie du réseau de capteurs.
- ✓ Réduire la durée de la tâche de collecte des données dans le réseau.

I.4 Contribution

Le contexte de notre étude est consacrée à augmenter la durée de vie des réseaux de capteurs et de réduire la durée de la tâche de collecte des données. Le présent travail se concentre plus particulièrement sur la résolution de certains verrous liés à la planification d'itinéraire entre multiples agents mobiles dans les RCSF. Dans ce contexte, nous prenons en compte la problématique d'équilibrage de la charge entre les agents mobiles.

Notre étude fournit une nouvelle vue sur la façon de déterminer le nombre des agents mobiles et la façon de regrouper les nœuds sources. Cette étude combine à la fois les deux facteurs qui influent la consommation d'énergie (la distance géographique et la taille des données) pour planifier l'itinéraire entre les agents. Ce principe a un impact particulièrement positif en termes de la durée de la tâche et de la quantité d'énergie consommée.

I.5 Structure de la thèse

La structure de notre thèse est la suivante :

Le chapitre 2 présente la littérature qui couvre tous les grands sujets qui sont appropriés pour cette recherche. L'objectif est de fournir au lecteur des informations de base nécessaires pour enquêter sur ce thème de recherche, et d'identifier les problèmes avec les réseaux de capteurs.

Le chapitre 3 introduit le concept d'agent mobile et réalise une analyse détaillée sur les différentes architectures développées durant ces dernières années dans le domaine de la planification d'itinéraire à base des agents mobiles dans les réseaux de capteurs.

Le chapitre 4 est dédié à la conception de notre architecture proposée. Dans un premier temps, nous étudions successivement, les objectifs de notre système tout en donnant une description sur l'architecture et la présentation des différentes étapes pour atteindre l'objectif fixé et escompté.

Le chapitre 5 présente, tout d'abord, les résultats de simulations qui ont été menées pour évaluer la fonctionnalité du système de planification d'itinéraire conçu pour les réseaux de capteurs sans fil. Après cela, une explication détaillée de la façon dont les simulations ont été analysées est fourni.

Le chapitre 6 conclut cette thèse et propose des pistes potentielles pour des futures recherches.

Chapitre 2

Les réseaux de capteurs: principes et caractéristiques

Table des matières

II.1 Introduction	5
II.2. Définition de réseau de capteurs	5
II.3 Définition d'un capteur	6
II.4 Architecture d'un capteur	6
II.5 Architecture de communication d'un réseau de capteurs	8
II.6 Pile protocolaire	9
II.7 Domaines d'applications des réseaux de capteurs	11
II.8 Facteurs et contraintes liées aux réseaux de capteurs	14
II.9 Différence entre les RSCSFs et les réseaux AD HOC	16
II.10 Consommation d'énergie dans les RSCSF	16
II.10.1 Énergie de capteur	16
II.10.2 Modèle de consommation d'énergie.....	17
II.10.3 Facteurs de dissipation d'énergie	18
II.10.4 Techniques de minimisation de la consommation d'énergie.....	22
II.11 Conclusion.....	27

Chapitre 2

Réseau de capteurs sans fil

Ce chapitre présente une généralité sur les réseaux de capteurs sans fil (architectures de communication, applications, facteurs et contraintes, etc.). Il se concentre particulièrement sur la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil qui est la plus importante dans le contexte de cette thèse.

II.1 Introduction

Les dernières décennies ont été marquées par le développement rapide de la technologie de transmission sans fil et tout particulièrement par l'apparition des réseaux de capteurs sans fil (RCSF).

Les réseaux de capteurs se composent de micros composants nommés « capteurs » peu coûteux, capables de collecter des informations pour les traiter ensuite les transmettre à l'aide d'une communication sans fil à une station de base. Par conséquent, les réseaux de capteurs ont révolutionné le paradigme de collecte et de traitement d'informations dans divers environnements. Ils sont au centre de diverses applications dans plusieurs secteurs tel que la surveillance de zones sensibles pour les militaires, la détection de feu de forêt, le diagnostic médical...etc. L'opération élémentaire au niveau de ces réseaux est la collecte systématique d'informations. Celle-ci est possible grâce aux capteurs qui nous informent sur leurs environnements respectifs.

II.2. Définition de réseau de capteurs

Les réseaux de capteurs sont considérés comme une famille particulière des réseaux ad hoc. Ce sont des réseaux sans fil composés d'un grand nombre de nœuds appelés capteurs. Ces nœuds communiquent entre eux pour capter, traiter et transmettre les informations collectées dans différents environnements. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement

prédéterminée, ils peuvent avoir des positions fixes ou bien être aléatoirement déployés dans une zone géographique dans le but de surveiller cette zone [40].

II.3 Définition d'un capteur

Un capteur est un dispositif électronique qui transforme l'état d'une grandeur physique observée (température, lumière, pression, etc.) en une grandeur utilisable. Il constitue l'élément de base des systèmes d'acquisition de données [39].



Figure II. 1 Exemple de capteur intelligent MICA2 de Crossbow[39].

II.4 Architecture d'un capteur

L'infrastructure d'un capteur est concrétisée autour de quatre principales unités comme le montre la figure II.2.

II.4.1 L'unité d'acquisition

Cette unité englobe deux sous-unités : le capteur et le convertisseur analogique-numérique (ADC). Le capteur obtient des mesures numériques sur des phénomènes observés et les transforme en signaux analogiques. L'ADC convertit ces signaux analogiques en signaux numériques puis il les transmet à l'unité de traitement [40].

II.4.2 L'unité de traitement

Cette unité constitue l'élément le plus important du capteur. Elle est composée d'un processeur et d'une unité de stockage. Elle contrôle les procédures permettant au nœud de collaborer avec les autres nœuds pour réaliser les tâches d'acquisition et stocke les données collectées [41].

L'unité de traitement possède deux interfaces : une interface avec l'unité d'acquisition et une autre avec l'unité de transmission. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de transmission [42].

II.4.3 L'unité de transmission ou de communication

L'unité de transmission fournit un moyen de communication entre les nœuds de réseau ; elle assure l'échange de donnée (émissions et réceptions) entre ces nœuds via un support de communication radio [41].

II.4.4 L'unité d'alimentation (Batterie)

C'est l'unité qui alimente les trois unités citées précédemment, elle fournit l'énergie nécessaire à leur fonctionnement [39].

Il existe d'autres composants complémentaires qui peuvent être reliés aux capteurs comme les systèmes de localisation GPS (Global Position System) et les mobilisateurs qui permettent le déplacement des capteurs, etc. [42].

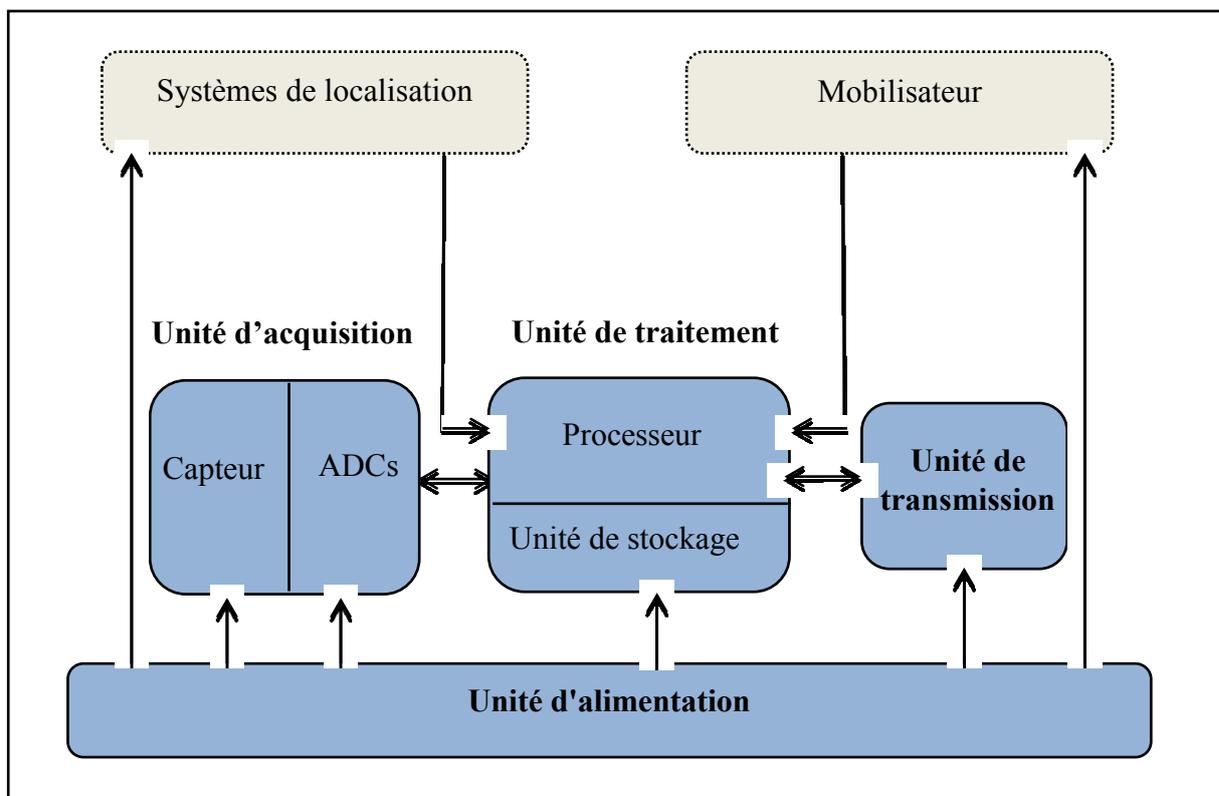


Figure II. 2 Composants d'un capteur [42].

II.5 Architecture de communication d'un réseau de capteurs

L'architecture des réseaux de capteurs fournit un prototype nécessaire à la compréhension des réseaux de capteurs et des relations entre les éléments utilisés. Cette architecture se base sur l'interaction entre les trois éléments suivant [56] :

- **nœud capteur**
- **zone d'intérêt** : Appelée aussi « champ de captage », c'est une zone géographique où on place les capteurs du réseau pour superviser ou surveiller des phénomènes divers.
- **stations de base (Sink)** : Nommé aussi nœuds-puits où l'écoulement des données se termine. Ces nœuds-puits sont des nœuds spéciaux qui possèdent plus de ressources matérielles et permettent de collecter et stocker les informations sorties des capteurs.

L'interaction entre ces éléments suit une séquence d'opérations telles que le déploiement, la détection d'évènement et la transmission des données. Ces opérations doivent être exécutées dans l'ordre comme dans la figure II.3 [43].

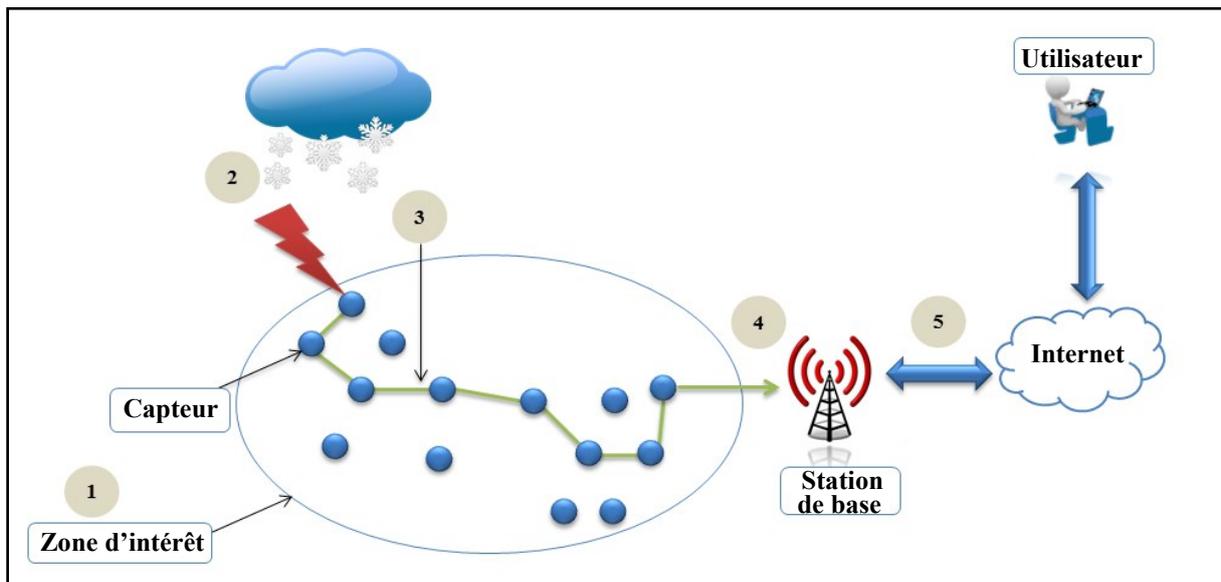


Figure II. 3 Fonctionnement des réseaux de capteur [43].

1. Les capteurs sont déployés dans la zone d'intérêt de façon aléatoire ou fixe.
2. Lorsqu'un capteur détecte un évènement il le traite localement pour acquérir des données concernant cet évènement.
3. La transmission des données acquis par le capteur est réalisée par le biais d'une communication multi-sauts où un chemin est créé pendant le passage des messages par plusieurs nœuds.

4. La transmission des données se déroule jusqu'à ce qu'elles atteignent la station de base ou l'écoulement des données se termine.
5. La station de base est branchée à une machine puissante via internet pour utiliser les données récoltées.

II.6 Pile protocolaire

La pile protocolaire mise en œuvre pour l'ensemble de protocoles de communication du réseau de capteurs [57] est illustrée par la figure II.4.

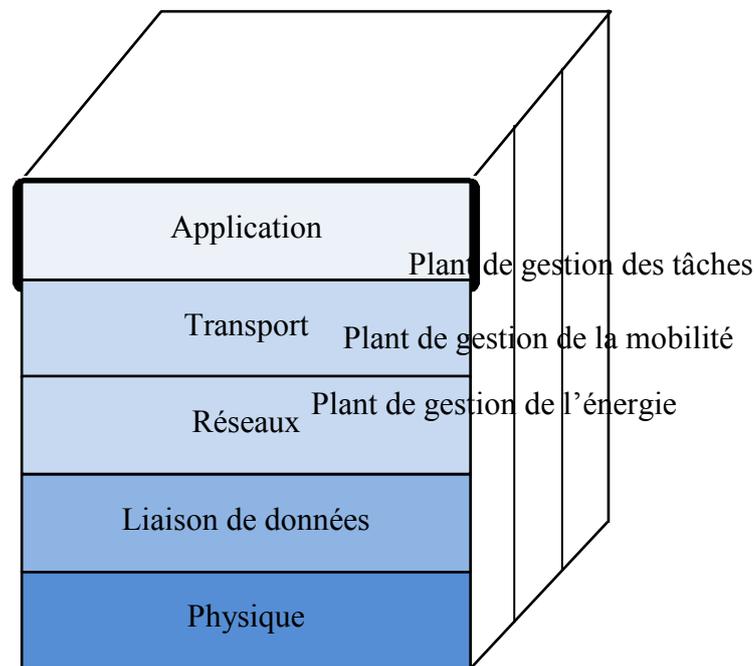


Figure II. 4 Pile protocolaire [57].

La pile protocolaire comprend 5 couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI (Open Systems Interconnection). Chaque couche de la pile communique avec une couche adjacente (celle du dessus ou celle du dessous). Chaque couche utilise ainsi les services des couches inférieures et en fournit à celle de niveau supérieur. Elle comprend ainsi 3 plants pour la gestion d'énergie, la gestion de la mobilité ainsi que la gestion des tâches.

II.6.1 Les couches de la pile

La pile protocolaire pour les réseaux de capteurs est organisée en couches superposées l'une sur l'autre. Chaque couche assure une partie des fonctionnalités nécessaire à la communication entre les entités du réseau. Les cinq couches du RCSF sont [57] :

- La couche application : Elle constitue les différentes applications qui peuvent être implémentées sur un réseau. Il s'agit du niveau le plus proche des utilisateurs géré directement par le logiciel.
- La couche transport : Elle permet de diviser les données issues de la couche application en paquets pour les délivrer, ainsi elle réordonne et rassemble les paquets venus de la couche réseau avant de les envoyer à la couche application.
- La couche réseau : Elle permet de trouver un chemin et une transmission fiable des données fournies par la couche transport.
- La couche liaison de données : Elle prend soin de multiplexage du flux de données, contrôler l'accès aux MAC (Media Access Control), établir les liaisons point à point et multi-point dans le réseau et assurer la détection et la réception des trames de données.
- La couche physique : Elle permet d'assurer la génération et modulation du signal radio, Estimation de la qualité de liens (signal) et la sélection des fréquences porteuses des données au niveau bit.

II.6.2 Les plans de la pile

Les plans de gestion sont nécessaires afin que les nœuds capteurs puissent fonctionner ensemble de manière efficace et prolonger la durée de vie du réseau. Les trois plans du RCSF sont [57]:

- Le plan de gestion de l'énergie : Il permet de préserver l'énergie en contrôlant l'utilisation de la batterie. Par exemple, un capteur se met en veille après la réception d'un message à partir d'un voisin dans le but d'éviter la duplication des messages déjà reçus. Dans le cas où le niveau d'énergie devient bas, le nœud diffuse à ses voisins une alerte les informant qu'il ne peut pas participer au routage.
- Le plan de gestion de la mobilité : Il assure le routage des données dans un réseau de capteurs mobile. Il est capable d'enregistrer les mouvements du nœud afin de l'aider à se localiser.
- Le plan de gestion des tâches : Comme il n'est pas nécessaire que tous les nœuds de réseau travaillent avec le même rythme, certains nœuds exécutent la tâche de captage plus que d'autres selon leur niveau d'énergie. Le plan de gestion des tâches permet d'ordonner les différentes tâches de captage de données dans une zone spécifique afin d'assurer un travail coopératif et efficace au niveau de consommation d'énergie.

II.7 Domaines d'applications des réseaux de capteurs

Les avantages qui caractérisent les réseaux de capteurs les permettent de s'adapter à plusieurs domaines d'applications. Parmi ces domaines où les réseaux de capteurs se révèlent très utiles et peuvent offrir de meilleures contributions, on peut noter le militaire, l'environnemental, le médicale et le domestique [39].

II.7.1 Applications militaires

Dans un domaine important comme le militaire, il faut utiliser des technologies de communication efficaces telle que les réseaux de capteurs qui sont caractérisés par la fiabilité, le déploiement rapide, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes. Dans ce contexte, il existe plusieurs travaux tel que :

- DSN (Distributed Sensor Network) [58], c'est l'un des premiers projets développé par la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) dans les années 80. Il utilise les réseaux de capteurs pour rassembler des données distribuées.
- Il y a aussi, le réseau WATS (Wide Area Tracking System) [59], développé par le laboratoire national de recherche « Lawrence Livermore ». l'objectif principal de ce réseau est d'effectuer la surveillance constante d'une zone d'intérêt, à l'aide des détecteurs des rayons gamma et des neutrons pour détecter et dépister les dispositifs nucléaires.
- JBREWS (Joint Biological Remote Early Warning System) [60], est un autre réseau conçu aussi par le laboratoire national de recherche « Lawrence Livermore » afin d'avertir les troupes dans le champ de bataille des attaques biologiques possibles.



Figure II. 5 Applications militaires [59].

En générale, les recherches dans le domaine des réseaux de capteurs pour les applications militaire se développent afin d'aider les unités militaires dans un champ de bataille, protéger les villes contre des attaques, telles que les menaces terroristes, de surveiller les mouvements

des forces ennemies, ou analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection des armes chimiques, biologiques ou radiations).

II. 7.2 Applications environnementales

Actuellement, l'environnement constitue un axe de recherche très important pour les réseaux de capteurs. Il aide l'homme à observer et connaître plusieurs choses sur son environnement à travers le déploiement des capteurs dans un endroit précis. Il permet aussi de prévoir des catastrophes naturelles (tremblement de terre, feux, inondation) pour assurer une intervention beaucoup plus rapide et efficace [40]. Avec les réseaux de capteurs on peut détecter un éventuel début de feu et par suite faciliter la lutte contre les feux de forêt avant leur propagation. On peut aussi, en fonction de réseau de capteurs détecter la pollution et analyser la qualité d'air dans un endroit urbains ou empêcher les risques industriels tels que la fuite de produits toxiques (gaz, produits chimiques, pétrole, etc.) [39].



Figure II. 6 Applications environnementales[40].

II.7.3 Applications médicales

Dans le domaine de la médecine, Les champs d'applications des réseaux de capteurs sont vastes. L'application la plus courante est la surveillance des patients à travers l'implantation des capteurs dans le corps humain pour contrôler les problèmes médicaux comme le cancer et la glycémie ou surveiller la progression d'une maladie, par suite aidé les patients à maintenir leur santé [41].

Il y a d'autre champ d'application médicale qui assure la surveillance des patients à distance à l'aide d'un système en temps réel dont le but est de faciliter la communication entre les pompiers qui porte des malades et les spécialistes dans les hôpitaux qui sont disponibles pour la consultation à distance [40].

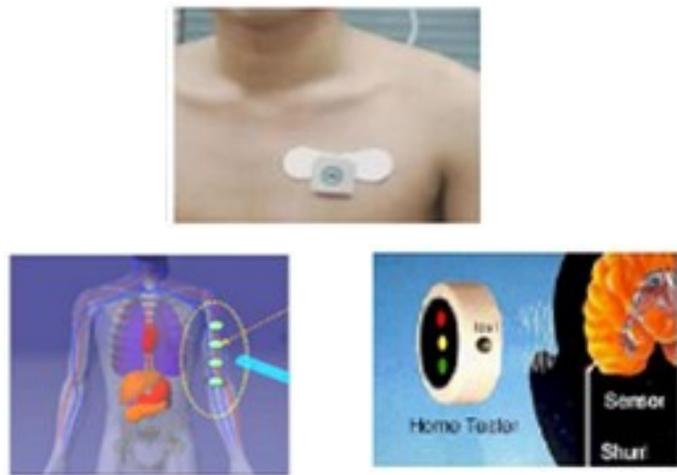


Figure II. 7 Applications médicales [41].

II.7.4 Applications domestiques

Les applications domestiques du réseau de capteurs représentent des nouvelles technologies embarquées par l'intégration des capteurs dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs... etc. Le déploiement des capteurs dans les maisons permet d'aider l'humain à contrôler ces appareils domestiques localement ou à distance. Ils offrent aussi l'automatisation de certaines opérations domestiques. Par exemple lorsqu'une chambre est vide, la lumière s'arrête automatiquement, la climatisation et le chauffage s'ajustent selon les points multiples de mesure et lorsqu'un intrus essaie d'accéder à la maison, l'alarme de sécurité se déclenche à l'aide d'un capteur anti-intrusion [39].



Figure II. 8 Applications domestiques [39].

II.8 Facteurs et contraintes liées aux réseaux de capteurs

Les facteurs et contraintes lors de la conception et la réalisation des réseaux de capteurs sans fil sont nombreux. Le contexte de développement des réseaux de capteurs prend en compte ces facteurs et contraintes pour une invention plus mieux.

- **Mode de déploiement**

Le déploiement des capteurs est la première opération dans le fonctionnement global d'un réseau de capteurs. Ce déploiement se fait par plusieurs façons selon les besoins des applications. On a le mode de déploiement déterministe où on place les capteurs un par un manuellement. On a aussi le déploiement aléatoirement où on déploie les capteurs à travers un outil d'aide comme l'avion [42].

- **Consommation énergétique**

Le nœud capteur est un dispositif micro-électronique, alimenté par une batterie de faible puissance ($< 1.2V$). Dans la plupart des cas le remplacement de la batterie est impossible. En conséquence, la durée de vie du capteur est donc dépendante de la durée de vie de sa batterie. En effet, la gestion de la conservation d'énergie a une haute importance pour prolonger la durée de vie du réseau. Cette dernière représente l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau, de l'instant où l'énergie du premier nœud s'épuise [43].

- **Ressources limitées**

Les nœuds capteurs ont une capacité de traitement, de mémoire et bande passante limitée. En effet, ces limitations présentes des grands défis pour les industriels [45].

- **Topologie dynamique**

La topologie du réseau peut changer à des instants imprévisibles et d'une manière rapide, pour plusieurs raisons. Il y a des cas dans lequel les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements dangereux, tels que le champ de bataille. De ce fait, la défaillance d'un nœud capteur est très probable. On a aussi des cas où un nœud capteur peut devenir non opérationnel à cause de l'expiration de son énergie. Et dans certaines applications, les capteurs du réseau sont attachés à des unités mobiles qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire [46].

- **Lien radio**

Les nœuds du réseau de capteurs utilisent une interface de communication sans fil où on assure la communication entre ces nœuds à travers des liens radio qui permet de propager les signaux sur une certaine distance [46].

- **Communication multi-saut**

Les réseaux des capteurs utilisent le mode de communication multi-saut comme un support de communication. La transmission multi-saut permet une économie efficace de la bande passante et les ressources énergétique du réseau, puisque un paquet de données peut être livré à plusieurs destinations en une seule transmission. Cela ne concerne pas tous les capteurs connectés à un réseau, mais seulement un sous-ensemble défini de ces capteurs, c'est le groupe multi-saut [44].

- **Dimension d'un capteur**

Les capteurs sont caractérisés par une taille très réduite qui possède plusieurs avantages, tel que la flexibilité de déploiement. Cependant, une taille réduite d'un nœud peut limiter la puissance de batterie utilisée pour alimenter le capteur [60].

- **Facteur d'échelle**

Les réseaux de capteurs sont caractérisés par un grand nombre des capteurs (des milliers de capteurs). Donc, ces réseaux doivent fonctionner avec des densités de capteurs très grandes. Par conséquent, ils engendrent beaucoup de schémas pour pouvoir garantir un bon fonctionnement des réseaux [59].

- **Faibles Coûts de production**

Souvent, les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre de nœuds. Le prix d'un nœud est très important afin d'estimer le coût global du réseau. Réduire le coût de production d'un nœud capteur est l'un des défis qui rend l'utilisation de ce genre des réseaux rentables [56].

- **Sécurité physique**

Les réseaux de capteurs sans fil sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé [57].

II.9 Différence entre les RCSFs et les réseaux AD HOC

Les RCSF sont souvent considérés comme étant les successeurs des réseaux ad hoc. En effet, les RCSF partagent avec les réseaux ad hoc (ou MANET : Mobile Ad hoc NETWORKS) plusieurs propriétés en commun, telles que [73] :

- Absence d'infrastructure (c'est-à-dire, ad hoc) ; de ce fait, ils ont besoin d'être auto configurables.
- Communications sans fil, ce qui fait que la portée de communications est limitée par la capacité de rayonnement des antennes utilisées.

Malgré les points communs qui caractérisent ces deux types de réseaux, il y a des différences entre eux, tels que [74] :

- Une communication broadcast pour les réseaux de capteurs, contrairement aux réseaux ad hoc qui utilise souvent des communications unicast (point à point).
- Un nombre plus important de nœuds peut être utilisés dans un RCSF que pour les réseaux ad hoc (forte scalabilité).
- Le mode d'application de réseaux MANET est différent des RCSF. Les entités d'un réseau MANET sont souvent utilisées directement par des êtres humains comme les portables, tandis que les entités de RCSF interagissent essentiellement avec l'environnement.
- Une collaboration entre les nœuds capteurs pour atteindre un seul objectif dans le RCSF, tandis que chaque nœud de MANET a son propre objectif.

III.10 Consommation d'énergie dans les RCSF

L'efficacité énergétique est une forte exigence pour maximiser la durée de vie du réseau. Donc, prolonger la durée de vie de chaque capteur devient un objectif en soi, afin de garantir une meilleure durée de vie globale au réseau.

Dans cette section, nous détaillons le problème de dissipation d'énergie dans les RCSFs avec les principales solutions proposées dans la littérature pour résoudre ce problème.

II.10.1 Énergie de capteur

L'énergie consommée par un nœud capteur est due essentiellement aux opérations suivantes : la capture, le traitement et la communication de données [31].

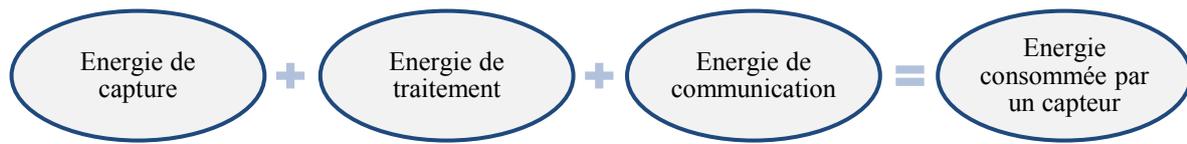


Figure II. 9 Energies consommées par un capteur [31].

▪ **Energie de capture**

En général, l'énergie de capture représente un faible pourcentage de l'énergie totale consommée par un capteur. Il est dissipée pour accomplir certains nombres de tâches telles que, l'échantillonnage, traitement de signal, conversion analogique/numérique et activation de la sonde de capture.

▪ **Energie de traitement**

L'énergie de traitement est un peu plus que l'énergie de capture. Cependant, elle est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication. Elle se divise en deux parties : 1) l'énergie de commutation qui est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel). 2) l'énergie de fuite qui correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement.

▪ **Energie de communication**

C'est l'énergie qui représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur. L'énergie de communication se décline en deux parties : l'énergie de réception et l'énergie de l'émission. Cette énergie est influencée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio.

II.10.2 Modèle de consommation d'énergie

Formellement, l'énergie ' E_c ' consommée par un capteur est défini dans [21] par l'équation (1):

$$E_c = E_{c/capture} + E_{c/traitement} + E_{c/communication} \quad (1)$$

Dans lequel:

- $E_{c/capture}$: l'énergie consommée par l'unité de capture.
- $E_{c/traitement}$: l'énergie consommée par l'unité de traitement.

- $E_{c/communication}$: l'énergie consommée par l'unité de communication. $E_{c/communication}$ représente la somme des deux valeurs: " E_{TX} " qui est l'énergie de transmission et " E_{RX} " qui est l'énergie de réception, comme le montre l'équation (2):

$$E_{c/communication} = E_{TX} + E_{RX} \quad (2)$$

Où:

$$E_{TX}(k, d) = (E_{elec} * k) + (E_{amp} * k * d^2) \quad (3)$$

$$E_{RX}(k) = E_{elec} * k \quad (4)$$

Et:

- k : la taille des données en bits;
- d : distance entre le nœud émetteur et le nœud récepteur;
- E_{elec} : l'énergie de transmission électronique;
- E_{amp} : l'énergie d'amplification.

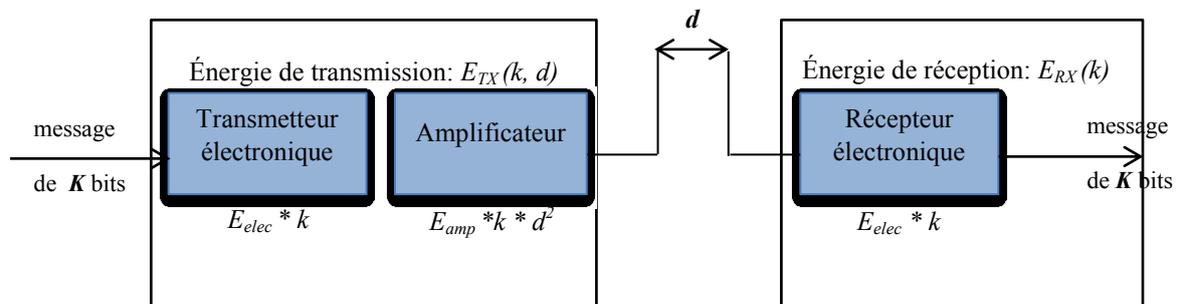


Figure II. 10 Modèle de consommation d'énergie [21].

À travers ce modèle de consommation d'énergie, nous notons que la distance géographique « d » entre le l'émetteur et le récepteur et la taille des données fournies « k » sont des facteurs dominants dans la consommation d'énergie.

II.10.3 Facteurs de dissipation d'énergie

Pour assurer l'efficacité énergétique les solutions envisagées doivent réduire ou éliminer les facteurs de dissipation d'énergie présentées ci-dessous.

II.10.3.1 Etat du module radio

Le module radio est le composant du nœud capteur qui consomme un pourcentage élevé d'énergie que les autres composants, puisque c'est lui qui assure la communication entre les capteurs. Ce module passe principalement par les quatre états suivants [32]:

- Etat transmission : La radio transmet un paquet.

- Etat réception : La radio reçoit un paquet.
- Etat sommeil (mise en veille, SLEEP): La radio est mise hors tension.
- Etat actif (écoute, IDLE): Dans cet état la radio est allumée, mais elle n'est pas employée (ni entrain de recevoir, ni de transmettre). Cela provoque une perte de l'énergie suite à l'écoute inutile du canal de transmission. Pour éviter ce problème, il faut basculer les nœuds dans le mode sommeil le plus longtemps possible.

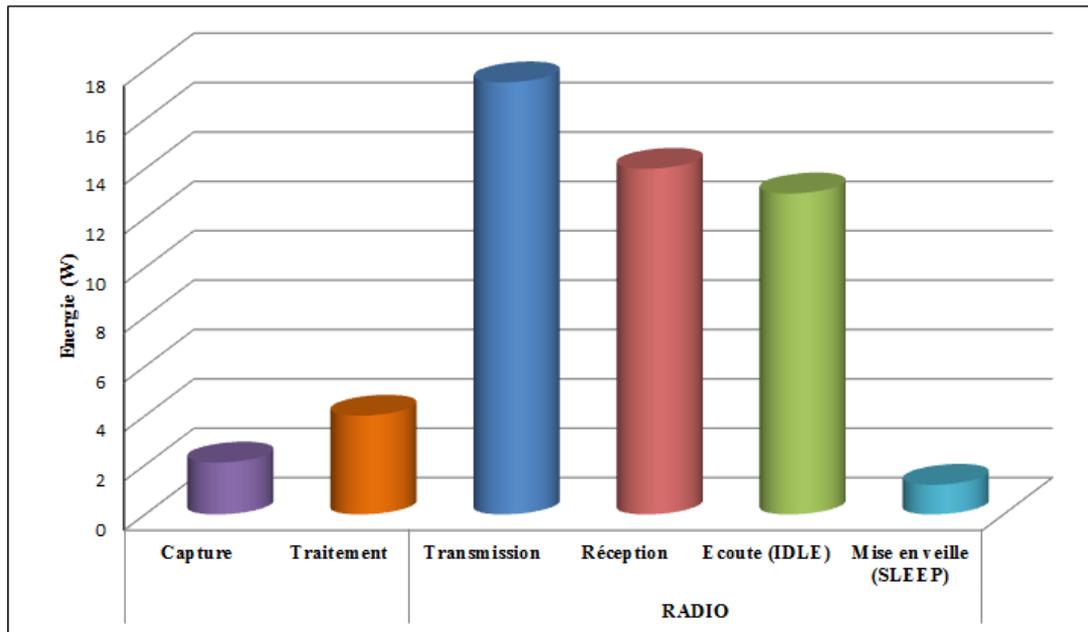


Figure II. 11 Consommation d'énergie en acquisition, traitement, et communication [34].

II.10.3.2 Accès au medium de transmission

La sous couche MAC assure l'accès au support de transmission, la fiabilité de transmission, le contrôle de flux, la détection d'erreur et la retransmission des paquets. Puisque les nœuds partagent le même médium de transmission, la sous-couche MAC joue un rôle important pour la coordination entre les nœuds et la minimisation de la consommation d'énergie [33]. Dans ce qui suit, nous analyserons les principales causes de consommation d'énergie au niveau de la couche MAC.

▪ La collision

La collision est l'une des sources de perte d'énergie les plus importantes. Les nœuds capteurs possèdent en général une seule antenne radio et partagent le même canal de transmission. Par conséquent, une collision se produit dans le cas de transmission simultanée

des données provenant de plusieurs capteurs. Ces données transmises deviennent inexploitables et doivent être abandonnées [35].



Figure II. 12 Emission simultanée d'un message (collision) [35].

- **La surécoute**

Le phénomène de surécoute (*overhearing*) se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés. La surécoute conduit à une perte d'énergie additionnelle à cause de l'implication des autres capteurs dans la réception des données [35].

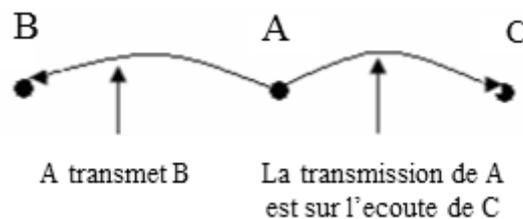


Figure II. 13 Surécoute dans une transmission [35].

- **La surcharge (overhead)**

Pour assurer le fonctionnement de protocoles de la couche MAC, on a toujours besoin de l'échange de paquets de contrôle. Ces paquets assurent les différentes fonctionnalités : signalisation, connectivité, établissement de plan d'accès et évitement de collisions. On parle alors d'overhead des paquets de contrôle qui nécessite une énergie additionnelle [75].

- **La surémission (overemitting)**

Le phénomène de surémission (*overemitting*) se produit quand un nœud capteur envoie les données à un destinataire qui n'est pas prêt à les recevoir. En effet, les messages envoyés sont considérés inutiles et consomment une énergie additionnelle [35].

- **L'écoute à vide (idle listening)**

L'écoute à vide ou (*idle listening*) se produit quand la radio écoute le canal pour recevoir d'éventuelles données. Son coût énergétique est particulièrement élevé et le coût exact de l'écoute à vide dépend du matériel radio et du mode de fonctionnement [35].

- **La taille des paquets**

La taille des messages échangés dans le réseau a un effet sur la consommation d'énergie des nœuds émetteurs et récepteurs. En effet l'augmentation de la taille des paquets produit plus d'énergie. Donc une grande puissance de transmission est nécessaire pour des paquets de grande taille [36].

II.10.3.3 Technologies de la communication

- **Bluetooth / IEEE 802.15.4**

Bluetooth est une spécification de l'industrie des télécommunications. Elle utilise une technique radio courte distance destinée à simplifier les connexions entre les appareils électroniques. Malheureusement, un grand défaut de cette technologie est sa trop grande consommation d'énergie [61].

- **WIFI / IEEE 802.11**

Le Wi-Fi «Wireless Fidelity» est un ensemble de normes concernant les réseaux sans fil qui ont été mises au point par le groupe IEEE 802.11. Il couvre cinq normes différentes, chacune représente une évolution par rapport à la précédente (IEEE 802.11 a/b/g/n/ac). Le WIFI présente un mauvais choix pour les réseaux de capteur ; il possède une durée de vie très faible qui est de l'ordre de quelques jours [76].

- **ZigBee / IEEE 802.15.4**

ZigBee est une norme de transmission de données sans fil permettant la communication entre les machines. Cette technologie est caractérisée par des débits de données inférieures et une très faible consommation électrique avec un coût de production très bas. Elle présente une durée de vie très importante qui est de l'ordre de plusieurs années. Les nœuds sont conçus pour fonctionner plusieurs mois en autonomie complète et jusqu'à deux ans pour les moins consommant. Ces caractéristiques font de la norme ZigBee une candidate idéale pour les contrôles industriels, les applications médicales, les détecteurs de fumée et d'intrusion [62].

- **Dash 7 / ISO/IEC 18000-7**

Dash7 est une nouvelle technologie de réseaux sans fil en utilisant la norme ISO/IEC 18000-7. Sa consommation électrique est très faible, la durée de vie de la batterie peut tenir plusieurs ans. Sa distance de communication est de 2 km. Elle fournit une faible latence pour le suivi des objets en mouvement, un protocole à petite pile, des supports de capteurs et de sécurité plus fiables et un débit de transmission allant jusqu'à 200 kbits/s [63].

	Bluetooth	WIFI	ZigBee	Dash 7
Standard utilisé	IEEE 802.15.1	IEEE 802.11 a/b/g/n/ac	IEEE 802.15.4	ISO/IEC 18000- 7
Autonomie	Mois	Jours	Années	Années
Vitesse de transfert	1 Mb/s	11-54-108-320- 1000 Mb/s	250 kb/s	200 kb/s
Portée (environ)	10 m	300 m	100 m	1000 m

Tableau II. 1 Tableau Comparatif entre les technologies de la communication sans fil [77].

II.10.3.4 Routage des données

Le routage est le mécanisme par lequel des chemins sont sélectionnés dans un réseau pour acheminer les données d'un point à un autre. Les réseaux de capteurs utilisent un routage multi-sauts où l'acheminement des paquets d'une source donnée à une destination se fait à travers plusieurs nœuds intermédiaires. Les nœuds d'un chemin adopté consomment de l'énergie soit pour transmettre ces données ou pour relayer les données des autres nœuds. Dans ce contexte, une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau [38].

II.10.4 Techniques de minimisation de la consommation d'énergie

Après la description des principales causes de consommation d'énergie dans les RCSF, nous présentons dans ce qui suit les différentes techniques utilisées pour minimiser cette consommation. Ces techniques sont appliquées soit au **(a)** niveau de capture, **(b)** niveau de calcul ou **(c)** niveau de communication.

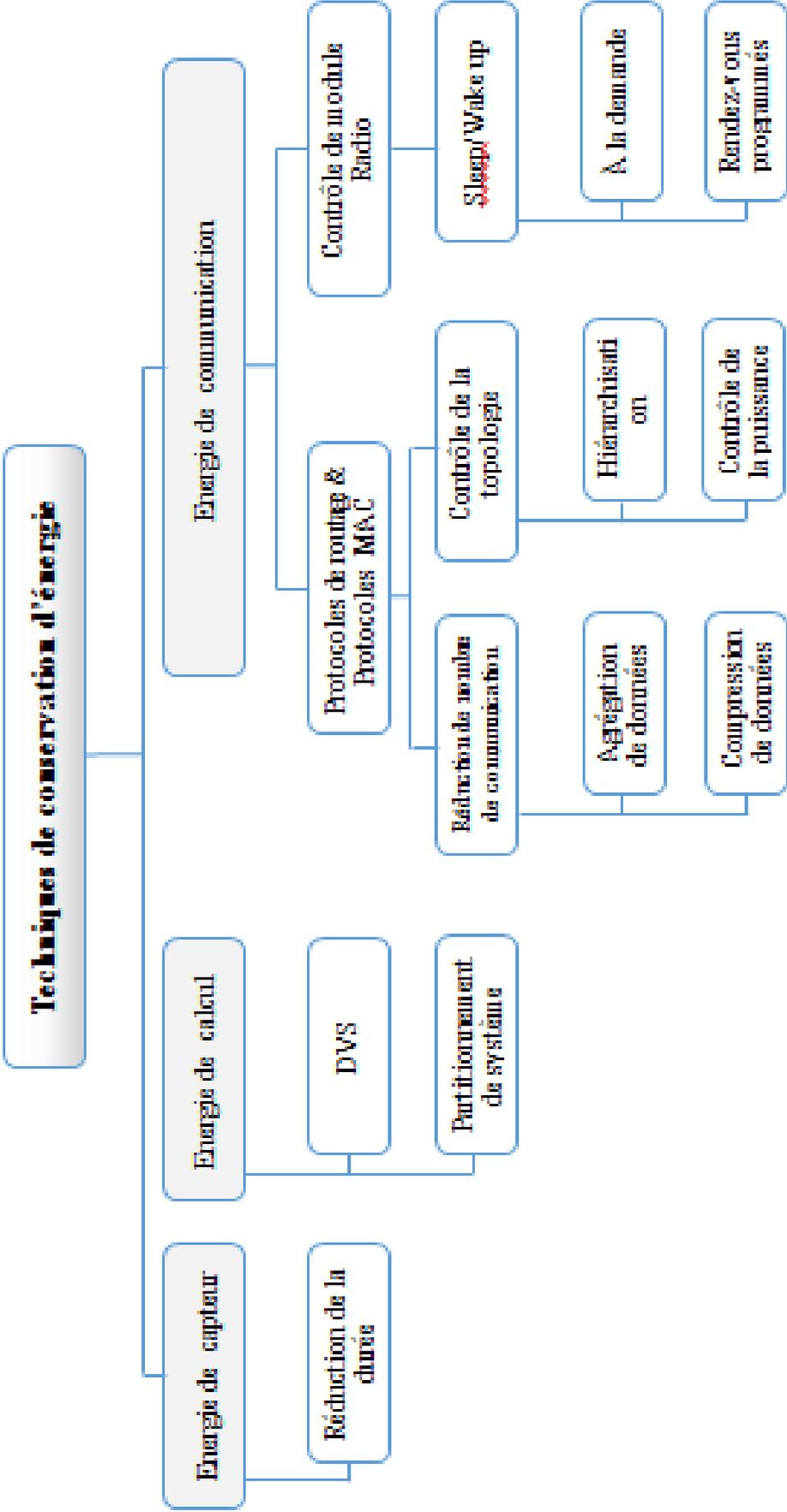


Figure II.14 Techniques de conservation d'énergie.

I.10.4.1 Techniques au niveau de capture

La seule solution apportée pour la minimisation de la consommation d'énergie au niveau de la capture consiste à réduire les durées de captures.

II.10.4.2 Techniques au niveau de calcul

L'énergie de calcul peut être optimisée en utilisant deux techniques :

- L'approche DVS (Dynamique Voltage Scaling) [24], consiste à ajuster de manière adaptative la tension d'alimentation et la fréquence de microprocesseur pour économiser la puissance de calcul sans dégradation des performances.
- L'approche de partitionnement de système, consiste à transférer un calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul [25].

II.10.4.3 Techniques au niveau de communication

La minimisation de la consommation d'énergie pendant la communication est étroitement liée aux deux aspects suivants : 1) Protocoles de routage & Protocoles MAC et 2) Contrôle de l'état de module radio.

1) Protocoles de routage & Protocoles MAC

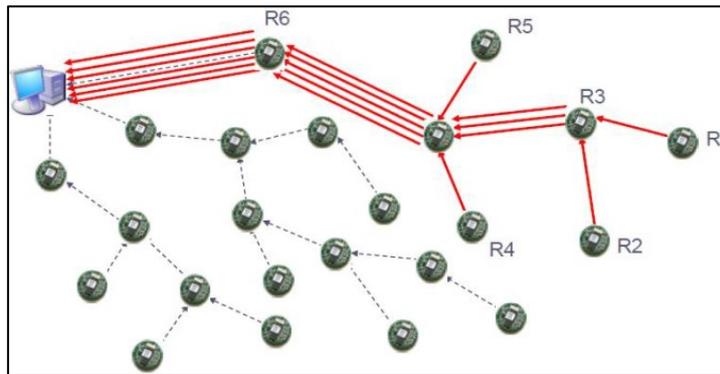
Pour cet aspect la minimisation d'énergie est liée aux protocoles développés pour la couche réseau et la sous couche MAC. Ces protocoles se basent sur la réduction de nombre de communication ou bien sur le contrôle de la topologie du réseau [26].

❖ Réduction de nombre de communication

Le but de cette technique est de réduire le nombre des messages d'émission/ réception à travers les deux opérations suivantes :

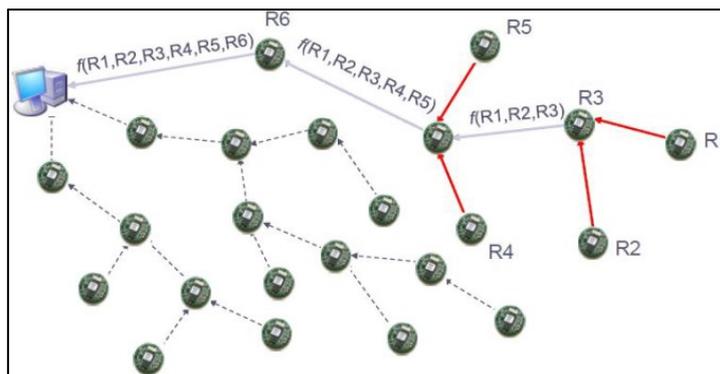
- L'agrégation des données : l'opération qui permet à partir d'une série de n messages reçus par un nœud de ne renvoyer vers le Sink qu'un seul message résumant les informations contenue dans ces n messages. Cette technique est connue aussi sous le nom de fusion de données [78].

a) Récolte de données sans mécanisme d'agrégation



Total de 18 messages envoyés sur le RCSF.

b) Récolte de données avec mécanisme d'agrégation



Total de 7 messages envoyés sur le RCSF.

Figure II. 14 Exemple de mécanisme d'agrégation [78].

- La compression de données : l'opération qui consiste à transformer une donnée A en une donnée B de taille plus courte que l'original. Ces techniques réduit le nombre de messages envoyés et donc économise l'énergie [79].

❖ **Contrôle de la topologie**

Le contrôle de la topologie permet la conservation d'énergie de communication par l'ajustement de la puissance de transmission et le regroupement des nœuds capteurs (hiérarchisation) [25].

- Le contrôle de la puissance de transmission n'a pas seulement un effet sur la durée de vie de la batterie d'un nœud capteur, mais aussi sur la capacité de charge du trafic qui est caractérisée par le nombre de paquets transmis avec succès vers une destination. En outre, il influe sur la connectivité et la gestion de la densité (le nombre de nœuds voisins). Ainsi, il peut conserver l'énergie à deux niveaux : explicitement par l'application de puissances faibles d'émissions et implicitement en réduisant la contention avec d'autres nœuds transmetteurs [27].
- La hiérarchisation consiste à organiser le réseau en structure à plusieurs niveaux. C'est le cas, par exemple, des algorithmes de groupement (clustering), qui organisent le réseau en groupes (clusters) avec des leaders de groupe (cluster-heads) et des nœuds membres [28].

2) Contrôle de l'état de module radio

Le contrôle de l'état de module radio est un moyen efficace pour conserver l'énergie. Il se base sur le principe suivant : « mettre la radio de l'émetteur en mode veille à chaque fois que la communication n'est pas nécessaire » [29]. Cet aspect englobe principalement les techniques « Sleep/Wake up » qui sont divisés en deux catégories « à la demande » et « rendez-vous programmés » [80] :

- Les solutions « à la demande » utilisent l'approche la plus intuitive pour la gestion d'énergie. L'idée de base est qu'un nœud devrait se réveiller seulement quand un autre nœud veut communiquer avec lui. Le problème principal associé aux régimes à la demande est de savoir comment informer un nœud en sommeil qu'un autre nœud est disposé à communiquer avec lui. À cet effet, ces systèmes utilisent généralement plusieurs radios avec différents compromis entre énergie et performances.
- L'idée des solutions « rendez-vous programmés » est que chaque nœud doit se réveiller en même temps que ses voisins. Typiquement, les nœuds se réveillent suivant un ordonnancement de réveil et restent actifs pendant un court intervalle de temps pour communiquer avec leurs voisins. Ensuite, ils se rendorment jusqu'au prochain rendez-vous.

II.11 Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie, des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil. La description que nous avons faite sur ces réseaux fournira au lecteur les bases nécessaires à la compréhension de tous les concepts liées à ce type de réseaux.

Contrairement aux réseaux traditionnels qui se préoccupent de garantir une bonne qualité de service, les réseaux de capteurs doivent, en plus, donner de l'importance à la conservation d'énergie. Ils doivent intégrer des mécanismes qui permettent aux utilisateurs de prolonger la durée de vie du réseau en entier, car chaque nœud est alimenté par une source d'énergie limitée et généralement irremplaçable.

Afin de résoudre cette limite, nous proposons dans notre thèse une nouvelle approche basée sur les agents mobiles. Le concept d'agent mobile repose sur une exécution distribuée, ils offrent plusieurs avantages améliorant la performance de plusieurs applications distribuées. C'est la raison pour laquelle, nous consacrons le chapitre suivant pour détailler la notion d'agent mobile et les travaux liés dans ce contexte.

Chapitre 3

Travaux connexes

Table des matières

III.1 Introduction.....	29
III.2 Concept d'agent.....	29
III.3 Systèmes multi agents.....	34
III.4 Agent mobile.....	37
III.4.1 Définition d'agent mobile.....	37
III.4.2 Mobilité.....	37
III.4.3 Caractéristiques d'un agent mobile	38
III.4.4 Fonctionnement d'un agent mobile	39
III.4.5 Comparaison entre les paradigmes "Client/Serveur" et "Agent mobile"	40
III.4.6 Utilité d'un agent mobile	41
III.4.7 Problèmes posés par les agents mobiles	43
III.4.8 Plateformes des agents mobiles	44
III.5 Planification d'itinéraire	45
III.5.1 Définition d'itinéraire	45
III.5.2 Types de planification.....	46
III.5.3 Modèles de fusion de données dans RCSF.....	46
III.5.4 Planification d'itinéraire à base d'un seul agent mobile dans le RCSF	49
III.5.5 Planification d'itinéraire à base de multiples agents mobiles dans le RCSF	51
III.6 Analyse des travaux	56
III.7 Conclusion	59

Chapitre 3

Travaux connexes

Ce chapitre présente une généralité sur le paradigme d'agent mobile et les systèmes multi agents. Il se concentre particulièrement sur les travaux de planification d'itinéraire à base des agents mobiles pour minimiser la consommation d'énergie dans les RCSF avec une analyse comparatif de ces travaux.

III.1 Introduction

La programmation par agents mobiles est un paradigme de programmation des applications réparties sur des réseaux de grande taille tel que les réseaux de capteurs recouvrant de multiples domaines administratifs. L'agent mobile est d'un grand intérêt pour la mise en œuvre d'applications dont les performances varient en fonction de la disponibilité et de la qualité des services et des ressources. De ce fait, les agents mobiles sont un choix évident dans le domaine des réseaux de capteurs. Plusieurs recherches ont proposés des moyens pour utiliser efficacement l'agent mobile dans ce genre de réseau. Ils ont été jugés particulièrement utiles pour faciliter la fusion et la diffusion efficace des données dans les réseaux de capteurs [2]. Dans les tâches de fusion de données à base des agents mobiles le choix des itinéraires des agents est d'une importance critique affectant le coût global de la consommation d'énergie.

III.2 Concept d'agent

Plusieurs définitions ont été données à travers les années où chaque définition traite un ou plusieurs aspects de ce paradigme :

Selon [46], un agent est un système capable d'action autonome et réfléchie dans un environnement réel.

Selon [47], un agent est un logiciel persistant qui a un but bien précis, l'agent peut être distingué d'un logiciel classique par sa taille car plus petite et par ces objectifs et agendas sur lesquelles il se base pour accomplir ses tâches.

Selon [48], un agent est un système informatique qui se trouve dans un environnement complexe et dynamique, et qui aperçoit puis réagit de façon autonome, afin de réaliser les buts pour lesquels il a été créé.

Selon IBM [49], un agent intelligent est un logiciel qui effectue un ensemble de tâches prédéterminées, avec un certain degré d'indépendance et d'autonomie, en se basant sur un ensemble de connaissances et une représentation d'objectifs prédéterminés.

III.2.1 Caractéristiques d'un agent

Un agent est caractérisé essentiellement par les points suivants [50] :

- La nature : L'agent peut être une entité physique ou virtuelle ; l'entité physique est quelque chose qui agit dans le monde réel, Par exemple : un robot, un avion ou une voiture. Par contre, l'entité virtuelle est une entité qui n'existe pas physiquement et elle représente un composant logiciel ou un module informatique.
- L'autonomie : Cela signifie qu'il n'est pas dirigé par des commandes venant de l'utilisateur ou d'un autre agent, mais par lui-même. Il dispose donc d'une certaine liberté de mouvement.
- L'environnement : il représente l'espace dans lequel l'agent est capable de percevoir et agir.
- La communication : l'agent a des capacités à communiquer directement avec les autres agents.
- L'efficacité: elle représente la rapidité d'exécution et d'intervention de l'agent.
- La capacité représentationnelle : Les agents n'ont qu'une représentation partielle de leur environnement, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas de vision globale de tout ce qui se passe à leur environnement. Un agent ne connaît pas tous les détails, il possède uniquement trois types de

connaissance; des connaissances du domaine, des connaissances de contrôle et des connaissances de communication et interaction.

- Les ressources propres : Pour permettre à l'agent d'agir dans l'environnement, il a besoin d'un certain nombre de ressources: énergie, CPU, quantité de mémoire, accès à certaines sources d'informations. Ces ressources rendent l'agent dépendant de son environnement, mais elles lui donnent une certaine indépendance, en étant capable de les gérer.
- L'objectif : L'agent est ainsi une sorte "d'organisme vivant" dont le comportement, qui se résume à communiquer, à agir et éventuellement, à se reproduire, vise à la satisfaction de ses besoins et de ses objectifs à partir de tous les autres éléments (perceptions, représentations, actions, communications et ressources) dont il dispose.

Ils y a d'autres caractéristiques optionnelles qui distinguent les agents tels que [51]:

- Le raisonnement: l'agent peut être lié à un système expert ou à d'autres mécanismes de raisonnements plus ou moins complexes.
- Le contrôle: il peut être totalement distribué entre les agents mais peut être voué à une certaine classe d'agents comme les agents « facilitateurs ».
- L'anticipation: l'agent peut plus ou moins avoir les capacités d'anticiper les événements futurs.
- La granularité ou complexité: l'agent peut être très simple comme un neurone mais aussi plus complexe.
- La contribution: l'agent participe plus ou moins à la résolution du problème ou à l'activité globale du système.
- Intentionnalité: un agent intentionnel est un agent guidé par ses buts. Une intention exprime donc la volonté d'un agent d'atteindre un but ou d'effectuer une action.
- Rationalité: les agents rationnels disposent des critères d'évaluation de leurs actions, et sélectionnent selon ces critères les meilleures actions pour atteindre le but.
- Adaptabilité : un agent adaptable est un agent capable de contrôler ses aptitudes (communicationnelles, comportementales, etc.) selon l'environnement.

- **Engagement:** La notion d'engagement est l'une des qualités essentielles des agents coopératifs. Un agent coopératif planifie ses actions par coordination et négociation avec les autres agents. En construisant un plan pour atteindre un but, l'agent se donne les moyens d'y parvenir et donc s'engage à accomplir les actions qui satisfont ce but ; l'agent croit qu'il a élaboré, ce qui le conduit à agir en conséquence.
- **Intelligence:** On appelle agent intelligent un agent cognitif, rationnel, proactif et adaptatif.

III.2.2 Interactions entre les agents

Une interaction est une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques pour aboutir à un objectif précis.

On appelle situation d'interaction un ensemble de comportements résultant du regroupement d'agents qui doivent agir pour satisfaire leurs objectifs en tenant compte des contraintes provenant des ressources plus ou moins limitées dont ils disposent et de leurs compétences individuelles.

Lors d'interactions entre les agents on tombe parfois dans des situations de conflit qui sont des cas dans lequel les objectifs (intentions) des agents ne sont pas compatibles et/ou les ressources et les capacités des agents sont insuffisantes [52].

Les interactions entre agents s'expriment sous diverses formes et la coopération est la forme générale d'interaction la plus étudiée dans les systèmes multi agents. Un agent évite les situations conflictuelles pour résoudre un problème par la coordination ou bien par négociation [52].

○ **Coordination**

Dans le cas de coordination, les agents travaillent sur des problèmes dont les solutions sont utiles pour les autres agents donc le travail doit être coordonné dans le temps. La coordination permet aux agents de considérer toutes les tâches et de ne pas dupliquer le travail. La coordination des actions est liée à la planification et à la résolution des conflits, car c'est à ce niveau qu'on tient compte des actions (plans) des autres agents [50].

○ **Négociation**

Les activités des agents dans un système distribué sont souvent interdépendantes et entraînent des conflits. Pour résoudre les conflits, il faut considérer les points de vue des agents, les négocier et utiliser des mécanismes de décision concernant les buts sur lesquels le système doit se focaliser. La négociation est caractérisée par un faible nombre d'agents

impliqués dans le processus et un protocole minimal d'actions : proposer, évaluer, modifier et accepter ou refuser une solution. Le problème de la négociation ne consiste pas forcément à trouver un compromis mais peut s'étendre à la modification des croyances d'autres agents pour faire prévaloir un point de vue [51].

III.2.3 Types d'agent

Les propriétés qui caractérisent un agent déterminent son type. Il existe plusieurs types d'agent, ils sont cités dans ce qui suit :

Agent réactif: Cet agent est marqué par un comportement basé sur le principe de stimulus-Réponse. La structure des agents purement réactifs tend à la simplicité, mais ces derniers peuvent être capables d'actions de groupe complexes et coordonnées. Les agents de ce type sont habituellement de petite taille et de grand nombre dans l'environnement. Ils ne sont pas nécessairement intelligents, néanmoins des comportements collectifs intelligents peuvent émerger [53].

Agent cognitif: Un agent cognitif possède une représentation symbolique de son environnement et est doté de capacités de raisonnement. Les agents sont immergés dans un environnement dans lequel ils interagissent. D'où leur structure s'articule autour de trois fonctions principales : percevoir, décider et agir [51].

Agent mobile: C'est un agent qui se déplace dans l'environnement [53].

Agent adaptable: un agent est dit *adaptable* si certains de ses mécanismes internes, opérationnels (envoi de messages, déplacement...) ou fonctionnels (comportement), sont modifiables en cours d'exécution. Conformément à la propriété d'autonomie, l'agent contrôle lui-même ses propres évolutions [51].

Agent réactif: c'est un agent autonome ; il est capable de percevoir l'environnement et répondre à temps aux changements qui peuvent affecter l'environnement [50].

Agent proactif: c'est un agent qui possède un comportement orienté objectifs en prenant des initiatives [51].

Agent social: ce type d'agent possède la capacité d'interaction avec d'autres agents pour les aider dans leurs activités [49].

Entre ces différents types des agents, nous nous intéressons dans ce travail aux agents mobiles qu'on va les étudier dans ce qui suit.

III.3 Systèmes multi agents

Des disciplines ont été produites, dans le but de rendre le fonctionnement de n'importe quelle machine naturelle et intelligent comme l'être humain. L'intelligence artificielle (I.A) est l'une de ces disciplines qui vise à comprendre la nature de l'intelligence en construisant des programmes imitant l'intelligence humaine. L'approche classique de l'intelligence artificielle, qui est relative à la conception de système à base de connaissances, ne convenait pas aux applications progressives qui exigent une taille importante des connaissances et diversité des connaissances. De même dans la réalité, les individus travaillent généralement en groupe. Cela a conduit à l'apparition d'une nouvelle approche d'intelligence artificielle appelée intelligence artificielle distribuée (I.A.D). Cette intelligence artificielle distribuée repose sur le principe de la distribution de l'intelligence entre un ensemble d'entités qui coopèrent pour atteindre un objectif global où chacune entre elles ne peut le réaliser individuellement. Une extension des systèmes I.A.D est proposée, dans lequel les composants qui possèdent une certaine autonomie doivent être dotés des capacités de perception et d'action sur leur environnement. On parle alors d'agent et par conséquent les systèmes multi agents [45].

Un système multi agent (SMA) est un système composé d'un ensemble d'agents autonomes, situés dans un certain environnement et interagissant selon certaines relations pour aboutir à un objectif global [65].

Les systèmes multi agents sont composés des éléments spécifiques. Ces éléments sont les suivants [45] :

- un environnement, c'est à dire un espace disposant généralement d'une métrique.
- un ensemble d'objets situés, c'est à dire qu'il est possible d'associer à chaque objet, à un moment donné une position dans l'environnement.
- un ensemble d'agents représentant des entités actives du système.
- un ensemble de relations qui unissent des objets (agents) entre eux.
- un ensemble d'opérations permettant aux agents de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets.
- des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la relation du monde à cette tentative de modification.

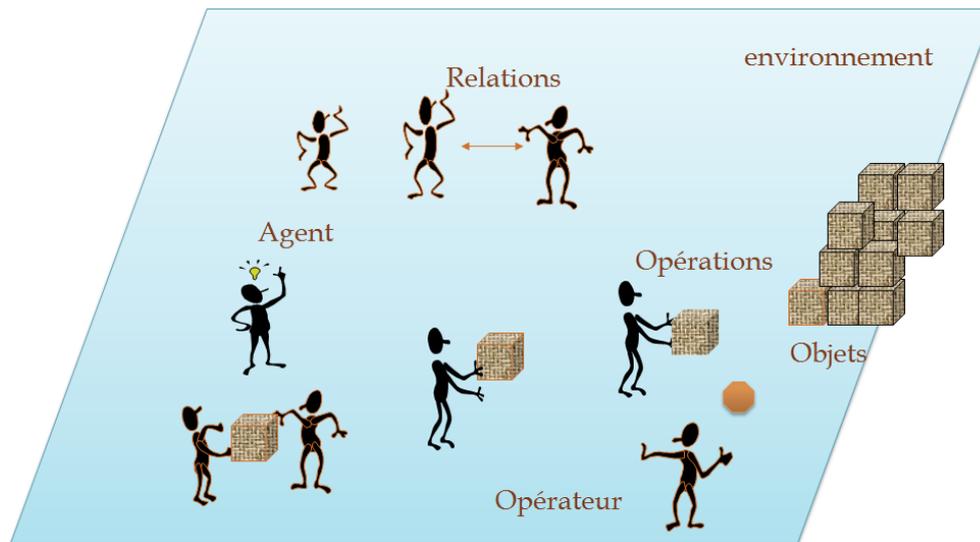


Figure III. 1 Composants d'un système multi agent [45]

III.3.1 Types de système multi agents

On représente dans cette partie les trois types des SMA :

A. Les systèmes multi-expertises

Ils modélisent l'interaction de plusieurs agents cognitifs, spécialistes de leur domaine et requis pour l'accomplissement d'une tâche complexe (le contrôle du trafic aérien, les systèmes automatisés de production et la maintenance de réseaux informatiques). Dans ce cas, les agents sont virtuels ; ils n'existent pas physiquement. L'exemple le plus courant dans les systèmes multi-expertises est le système Maps [66].

B. Les systèmes multi-robots

Ce sont des systèmes regroupant des agents artificiels ayant une existence physique et engagés dans une tâche commune. Ce sont des robots chargés de tâches collectives, tel que les robots footballeurs (Microb est un système multi-robots, mis au point par Anne Collinot, Laurent Ploix et Alexis Drogoul (1996), qui permet à une équipe de petits robots de jouer au football contre une équipe de joueurs humains) [67].

C. Les systèmes de simulation

Ce sont des systèmes qui modélisent et simulent des modèles biologiques (sociétés animales, cellulaire...etc.). La simulation est réalisée en décrivant les caractéristiques et le

comportement d'une population selon les critères d'un système I.A.D, tel que la fourmilière [66].

III.3.2 Communication dans les systèmes multi agents

Les agents communiquent entre eux pour coopérer, coordonner leurs actions, réaliser des tâches en commun et devenir ainsi de véritables êtres sociaux. Il y a deux approches principales de communication dans les systèmes multi agents qui sont la communication par envoi de message et la communication par partage d'informations [45].

- **Communication par envoi de messages**

Les agents envoient leurs messages directement et explicitement au destinataire selon le mode point à point où l'agent émetteur du message connaît et précise l'adresse de ou des agents destinataires. Ce type de communication est généralement le plus employé par les agents cognitifs. Les agents peuvent aussi envoyer les messages selon le mode envoi par diffusion où le message est envoyé à tous les agents du système. Ce type de transmission est très utilisé dans les systèmes dynamiques ainsi que les systèmes d'agent réactif.

- **Communication par partage d'informations**

Ce type de communication est utilisé dans le cas où : il y a recouvrement des domaines d'expertise de chaque agent et il suppose également que les agents ne possèdent qu'une connaissance limitée sur les domaines d'activité des autres agents et pose des problèmes de synchronisation. Les composants ne sont pas en liaison directe mais communiquent via une structure de données partagées (tableau noir) où on trouve les connaissances relatives à la résolution (état courant du problème) qui évolue durant le processus d'exécution. Cette manière de communiquer est l'une des plus utilisées dans la conception des systèmes multi-agents.

III.3.3 Avantages et Défis d'un système multi agents

Il y a évidemment plusieurs avantages qui caractérisent le système multi agents. Les architectures basées sur les agents fournissent une manière bien particulière afin d'aborder des problèmes rapidement, il est caractérisé par les propriétés suivantes [69] :

- Modularité.
- Fiabilité.
- Vitesse, avec le parallélisme.

- Réutilisation et la portabilité.
- Intervention des schémas d'interaction sophistiqués (coopération, coordination, négociation).
- Résolution de programmes distribués.
- Modélisation, et simulation des phénomènes naturels.
- Réalisation de systèmes informatiques complexes.

Bien que les S.M.A offrent de nombreux avantages potentiels, ils doivent aussi relever beaucoup de défis, tel que [69] :

- Répartition des tâches et des connaissances.
- Coordination des agents.
- Gestion des conflits et maintien de la cohérence.
- Communication entre les agents.
- Construction d'un agent capable d'agir de manière autonome.
- Construction d'une organisation capable d'agir de manière coopérative.

III.4 Agent mobile

La croissance des exigences et des préférences des utilisateurs, ainsi que la nécessité d'une évolutivité progressive des applications, on fait en sorte qu'une vision centralisée, rigide et passive atteint ses limites. En revanche, les progrès technologiques récents ont permis l'émergence d'un nouveau moyen facilitant la tâche de la conception et du développement de ces applications. En effet, l'essor de l'informatique distribuée s'est accompagné de l'apparition du paradigme des agents mobiles. Ce dernier offre une plus grande souplesse et efficacité de traitement [64].

La technologie des agents mobiles présente d'intéressantes perspectives pour divers domaines d'applications de l'ère actuelle.

III.4.1 Définition d'agent mobile

Un agent mobile est un processus qui a la capacité de se déplacer pendant son exécution dans une machine d'un hôte à un autre dans un réseau hétérogène en conservant son état interne [71].

III.4.2 Mobilité

On peut désigner la mobilité par la mobilité matérielle ou la mobilité logicielle. La mobilité matérielle est le déplacement d'un terminal physique, tel qu'un ordinateur portable

ou un téléphone. Alors que la mobilité logicielle est le déplacement d'un programme logiciel entre deux ou plusieurs terminaux physiques. L'entité logicielle mobile est alors appelée composant, agent, application mobile [72].

III.4.2.1 Degré de mobilité

Il existe deux degrés de mobilité des applications : faible et forte [68].

- **Mobilité faible**

Elle consiste à transférer seulement **les données et le code** d'une application qui se déplace au cours de son exécution sur une machine source vers une machine destination. Donc, si on trouve une interruption de l'exécution de l'application, cette dernière reprend son exécution depuis le début, tout en possédant les valeurs mises à jour de ses données.

- **Mobilité forte**

Elle consiste à transférer **les données, le code plus l'état d'exécution** d'une application qui se déplace au cours de son exécution sur une machine source vers une machine destination. Donc, si on trouve une interruption de l'exécution de l'application, cette dernière reprend son exécution depuis le point où elle a été interrompue sur la machine de départ.

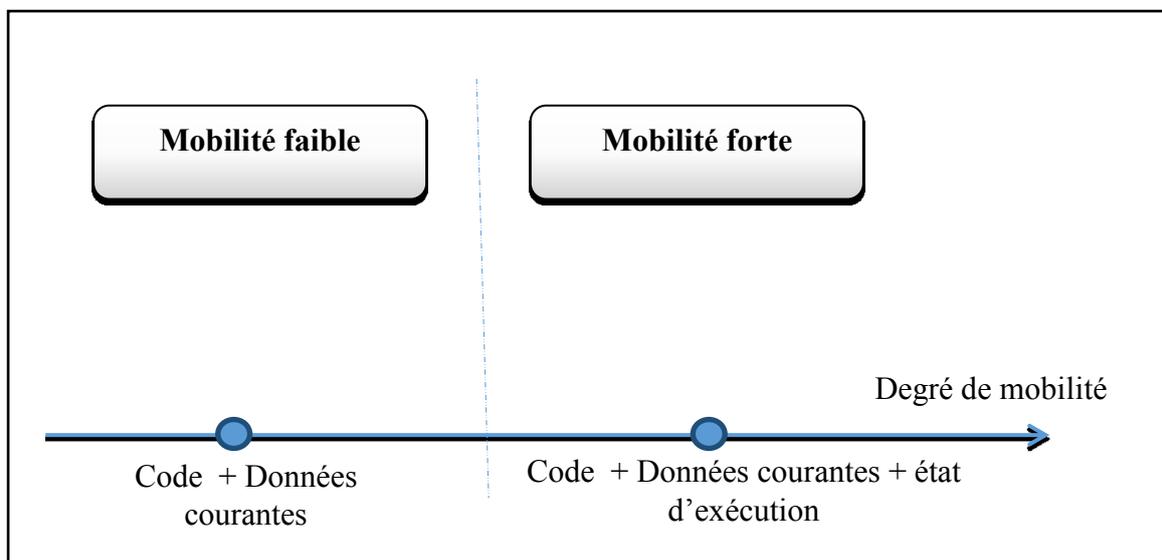


Figure III. 2 Degré de mobilité des applications [68].

III.4.2.2 Ressources nécessaires à la mobilité

Si un système supporte la mobilité faible ou forte, Il y a toujours des ressources spécifiques qui devraient émigrer avec l'agent selon le degré de mobilité. Ces ressources sont les suivantes [72]:

- **Etat** : L'état d'un agent peut être considéré comme une photo instantanée de son exécution. Il permet à l'agent de reprendre son exécution dès qu'il arrive à destination.
- **Implémentation** : l'agent mobile a besoin d'un code pour pouvoir s'exécuter.
- **Interface** : Un agent fournit une interface permettant aux autres agents et aux autres systèmes d'interagir avec lui.
- **ID** : Chaque agent possède un ID unique durant son cycle de vie, qui lui permet d'être identifié et localisé.
- **Autorité** : Une autorité est une entité dont l'identité peut être authentifiée par n'importe quel système auquel elle essaye d'accéder. Il existe principalement deux types d'autorités, le fabricant (manufacturer) qui est le fournisseur du code d'implémentation de l'agent et le propriétaire (owner) qui a la responsabilité du comportement de l'agent.

III.4.3 Caractéristiques d'un agent mobile

Un agent mobile est une entité logicielle disposant des facultés suivantes [70] :

- **Mobilité** : la capacité d'un agent à se déplacer dans un réseau informatique.
- **Comportement** : Un agent est pourvu d'un programme qui lui dicte des tâches qu'il doit accomplir.
- **Autonomie** : Un agent agit indépendamment du client. Il décide lui-même où il va et ce qu'il doit y faire, en fonction du comportement qui lui a été donné.
- **Mémoire** : Un agent dispose d'un potentiel de mémorisation permettant par exemple de récolter des informations.
- **Communication** : Un agent doit pouvoir interagir avec les différents environnements (le client et les hôtes) et les autres agents (locaux ou distants).

III.4.4 Fonctionnement d'un agent mobile

Le client donne une mission à un agent. Pour la réaliser, l'agent se déplace dans le réseau de machines accédant localement aux services offerts par ces machines. On peut distinguer trois phases [46]:

- (1) L'activation de l'agent mobile avec la description de sa mission.
- (2) L'exécution de la mission par l'agent qui se déplace pour accéder aux services.
- (3) La récupération éventuelle des résultats de l'agent mobile.

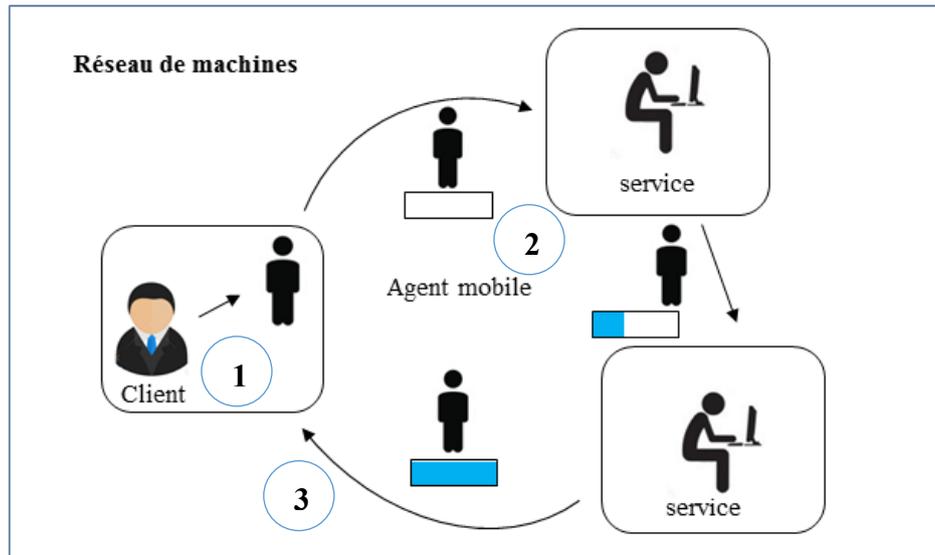


Figure III. 3 Fonctionnement d'un agent mobile [53].

III.4.5 Comparaison entre les paradigmes "Client/Serveur" et "Agent mobile"

Dans le paradigme: "*client/serveur*", un client demande un service auprès du serveur d'une façon interactive et synchrone, ceci signifie que le client est bloqué tant que le serveur n'a pas répondu. Tandis qu'au niveau du modèle "*agent mobile*", l'agent se déplace d'une façon autonome entre les machines d'un réseau pour réaliser certaines tâches localement. Ces agents s'exécutent d'une façon asynchrone ce qui permet de dire que ce paradigme est mieux adapté que le client/serveur à des traitements longs nécessitant des interrogations fréquentes du serveur [52].

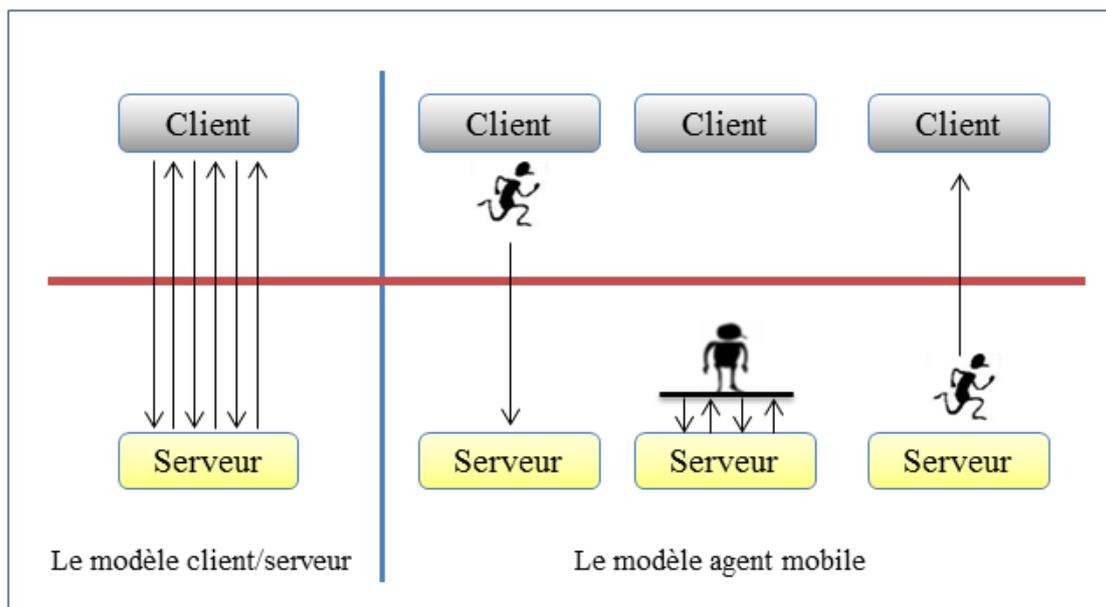


Figure III. 4 Client / Serveur Versus Agent mobile [52].

III.4.6 Utilité d'un agent mobile

L'utilité des agents mobiles et leurs performances peuvent être résumées comme suit [71]:

- **L'exécution mobile fait meilleur usage du réseau**

La mobilité est une technique utile qui permet aux agents de faire transférer leurs exécutions aux emplacements dynamiques où les ressources qu'ils en ont besoins sont localisées. Les agents mobiles peuvent se déplacer d'une machine à une autre, c.-à-d., d'un système d'exploitation à un autre pour continuer leur exécution. Ils permettent une haute qualité, haute performance, et des applications mobiles économiques. Par conséquent, ces applications peuvent utiliser le réseau de façon transparente pour accomplir leurs tâches. Ils traitent les données dans la source de données, plutôt que d'aller la chercher à distance, donc, autoriser la plus haute opération de performance. Ils font un meilleur usage du réseau quand ils voyagent.

- **La conception et le développement des applications d'Internet**

La conception et le développement des applications d'Internet exigent un accès dynamique et peut être mobile aux ressources de ces applications. En conséquence, c'est une approche basée sur les agents mobiles autonomes. Ces applications s'exécutent de façon proactive, réagissent à des changements de leur environnement et aident un serveur sur l'internet à affecter le travail au client.

- **La réduction de la charge du réseau**

Dans le cas où les applications fassent des interrogations très fréquentes de la base de données, il serait certainement moins coûteux de faire migrer le code de traitement que les données à traiter, qui peuvent être beaucoup plus volumineuses. Ceci induit une minimisation des communications distantes.

- **L'ajout de fonctionnalités spécifiques aux serveurs**

Dans les applications client/serveur, les serveurs fournissent une interface publique avec un ensemble fixe de primitives. Les clients ont besoins de fonctionnalités de haut niveau composées de ces primitives et leurs besoins peuvent changer dans le temps. Au lieu de

modifier l'interface du serveur pour satisfaire les besoins de chaque client, ce dernier peut maintenir sa propre interface sur le serveur en utilisant un agent mobile.

- **La reconfiguration dynamique**

La reconfiguration dynamique des applications à distance peut se présenter sous différents aspects : La modification de l'architecture de l'application par l'ajout ou la suppression de certains de ses composants logiciels, la modification de la mise en œuvre des composants ou le changement de la distance géographique de l'application. Cette modification consiste à déplacer des composants logiciels de l'application vers de nouveaux sites, sous forme d'agents mobiles.

- **Les communications hétérogènes**

Bien que, les réseaux de communication offrent beaucoup d'avantages potentiels, cependant, ils peuvent soulever autant de problèmes quand des systèmes incompatibles (format de données, système d'exploitation, architecture interne) doivent être reliés. Les agents mobiles peuvent résoudre ce genre de problèmes.

- **Les communications asynchrones**

Certaines applications exigent plusieurs interactions client/serveur qui nécessitent une connexion réseau assurée pendant une longue période, ou dans plusieurs transmissions séparées. Lorsqu'un agent mobile est utilisé, le client n'aura pas besoin de maintenir une connexion quand ses agents accèdent et traitent des informations sur le serveur. Ce qui permet d'augmenter les communications asynchrones entre le client et le serveur.

- **La tolérance aux pannes**

Dans le modèle client/serveur, en cas où un échec survient sur le serveur d'un réseau pendant une demande, il est difficile pour le client de réclamer et resynchroniser avec le serveur parce que la connexion réseau a été perdue. Cependant, dans le modèle à base d'agents mobiles, ces derniers n'ont pas besoin de maintenir des connexions permanentes et leur état est centralisé avec eux, alors les échecs sont généralement plus faciles à négocier.

III.4.7 Problèmes posés par les agents mobiles

Les agents mobiles impliquent aussi des coûts et des risques. Les plus évidents sont ceux abordés à la reprise à distance: la migration et l'exécution de l'agent doivent être portatives à travers des plateformes hétérogènes. En plus, l'utilisation des agents mobiles impliquent des contraintes additionnelles concernant la communication (agent-à-agent et agent-à-hôte) et la sécurité [72].

▪ La migration de l'agent

La migration de l'agent dans un système de machines hétérogènes pose un problème car la représentation du code et des données du processus est dépendante de la machine sur laquelle il s'exécute. Dans le cas de machines avec des architectures différentes, l'état d'un agent risque de ne pas être compris. Les solutions proposées sont :

- la traduction de l'état de l'agent de la représentation source à la représentation finale, ce qui implique autant de traducteurs que de couples d'architectures différentes.
- la représentation de l'état dans un format standard intermédiaire, indépendante de la machine et compris par toutes les machines.

▪ La communication

Le maintien des communications entre agents est un autre problème rencontré lors de la migration de l'agent. En effet, que se passe-t-il lorsqu'un message arrive à un agent en cours de migration? Dans ce cas, on doit considérer que l'état d'agent en cours de migration est un état particulier dans lequel il ne peut recevoir de messages. Dans ce cas il devra prévenir les autres agents.

▪ La sécurité

La sécurité est un sérieux problème qui présente un centre d'intérêt de multiples travaux de recherches à l'heure actuelle. Un agent doit se protéger des attaques extérieures par rapport aux autres agents, à ses environnements d'exécution et pendant son déplacement sur le réseau. Son intégrité et la confidentialité des données qu'il transporte doivent être assurées. Cette problématique reste encore ouverte nécessitant ainsi plus d'attention de la part de la communauté de chercheurs et des connaisseurs du domaine.

III.4.8 Plateformes des agents mobiles

Il existe à l'heure actuelle des plateformes différentes qui supportent le paradigme de programmation d'agents mobiles. Certaines de ces plateformes écrites en Java pur et d'autres non.

III.4.8.1 Plateformes écrit en Java

Java est un langage de programmation représentant le centre de la plupart des systèmes d'agents mobiles. Il est populaire à cause de sa machine virtuelle. On a plusieurs plateformes écrites en Java, elles sont citées dans ce qui suit :

- **Odyssey** conçu par General Magic, est l'une des premières plateformes d'agents. Il est indépendant du protocole de transport utilisé et peut donc s'adapter à RMI¹, CORBA² ou DCOM³.
- **Aglets** d'IBM, utilisent la notion de référence distante (AgletProxy), le passage de messages (multicast, broadcast) et le protocole ATP développé par IBM. Il offre en outre une certaine notion de sécurité en limitant les ressources allouées aux aglets.
- **Jade** créée par CSELT⁴ de l'université de Parma, est un logiciel qui simplifie la mise en place des systèmes multi-agents par une interface personnalisée qui répond aux spécifications de la Fondation pour les Agents Intelligent Physique et grâce à un ensemble d'outils qui supportent la résolution des bugs. Jade propose en plus des services de sécurité.
- **Concordia** de Mitsubishi, est un système d'agents similaire aux Aglets et Odyssey où le code est téléchargeable pour le développement d'applications non commerciales [16].

III.4.8.2 Plateformes non écrit en Java

Il y a d'autres plateformes qui n'ont pas écrites en Java et qui possèdent de nombreux intérêt. Parmi ces plateformes on a :

- **Tacoma** (Tamos And COrnell Moving Agents) est l'une des plateformes qui ne fournit pas de moyens d'équipements automatiques pour capturer l'état. Quand un agent veut émigrer à une nouvelle machine, il crée un répertoire qui enveloppe son code et toute l'information de l'état désirée. Le dossier est envoyé à la nouvelle machine qui démarre l'environnement de l'exécution nécessaire et fait appel à un point d'entrée connu dans le code de l'agent pour reprendre son exécution [71].

1 RMI : Remote Method Invocation

2 COBRA : Common Object Broker Architecture

3 DCOM : Distributed Component Object Model

4 CSELT : Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni

- **Telescript** est un langage, et une plateforme d'exécution. Telescript a une infrastructure pour une exécution portable et solide des programmes mobiles. Les programmes écrits dans le langage Telescript supportant la migration forte de l'agent qui déplace l'état interne complet de l'agent à une nouvelle place dans le réseau [20].
- **D'Agents** (Distributed Agents) qui était connue par Agent Tcl, supporte la migration forte pour des agents mobiles écrits dans Tcl, Java et Scheme, aussi bien qu'un agent stationnaire écrit dans C/C++ [72].
- **Ara** (Agents for Remote Action) est un système d'agents mobiles multi-langages (Tcl, Java et C/C++). Les agents mobiles dans Ara sont programmés dans un langage d'interprétation et sont exécutés dans un interpréteur pour ce langage. Il peut y avoir plusieurs interpréteurs dans le même système Ara. Les agents peuvent migrer "fortement" n'importe quand durant leur exécution, conserver leur état interne et continuer directement avec l'état après l'appel de migration [71].

III.5 Planification d'itinéraire

La majorité des travaux de recherche dans le domaine de déploiement de système d'agent mobile dans les RCSF sont orienté vers l'optimisation de consommation d'énergie des nœuds à travers la planification d'itinéraire d'agent mobile (AM). L'itinéraire suivi lors de la migration de l'agent peut avoir un impact significatif sur la consommation d'énergie. Trouver une séquence optimale de nœuds source a visité par les AM est un problème difficile à résoudre (NP-hard problem) [12].

III.5.1 Définition d'itinéraire

Un itinéraire est défini comme étant la route suivie par un agent mobile lors de sa migration. La planification d'itinéraire peut être définie par la station de base (Sink) et/ou par l'agent mobile. Elle comprend les trois critères suivants [3]:

- ***Nombre d'agents mobiles***

Le nombre d'agents mobiles est un facteur important dans la planification d'itinéraire. Un nombre élevé d'agent produit plus de flux de transmission. Par conséquent, plus d'énergie va être consommé. Cependant, l'utilisation d'un nombre réduit d'agents mobiles pose le problème de retard dans le temps de réponse. Donc il faut toujours songé à chercher le nombre optimal d'agents mobiles.

▪ ***Regroupement de nœuds sources***

Il faut sélectionner un ensemble de nœuds sources à visiter par l'agent mobile, donc elles doivent être regroupées et assignées à leurs agents correspondants de manière optimale. En outre les nœuds-sources dans le même groupe doivent être liées entre elles géographiquement (proches les uns des autres).

▪ ***Itinéraire de chaque agent mobile***

Après avoir déterminé le nombre des agents mobiles avec leurs groupes de nœuds-sources correspondant, le chemin de chaque agent devrait être déterminé (l'ordre de visite des nœuds sources). On peut traiter indépendamment la définition de chemin comme un problème d'optimisation d'itinéraire.

III.5.2 Types de planification

Selon les critères au-dessus la planification d'itinéraire peut être classée comme suit:

- Planification statique : l'itinéraire de l'agent est totalement déterminé par la station de base (Sink) avant que l'agent est distribué [55].
- la planification dynamique : l'agent mobile détermine de manière autonome les nœuds sources à visiter et le chemin de sa migration selon l'état actuel du réseau.
- planification hybride : dans ce cas, la décision de l'ensemble des nœuds sources à visiter est fournie par la station de base (Sink). Tandis que, l'ordre de visite est déterminé dynamiquement par l'agent mobile.

III.5.3 Modèles de récolte de données dans RCSF

Les réseaux de capteurs passent par trois modèles de fusion de données : le modèle de RCSF conventionnel, le modèle de RCSF à base d'un seul agent mobile et le modèle de RCSF à base de multiple agent mobile. La figure III.5 compare les modes de fusion des données dans les RCSF.

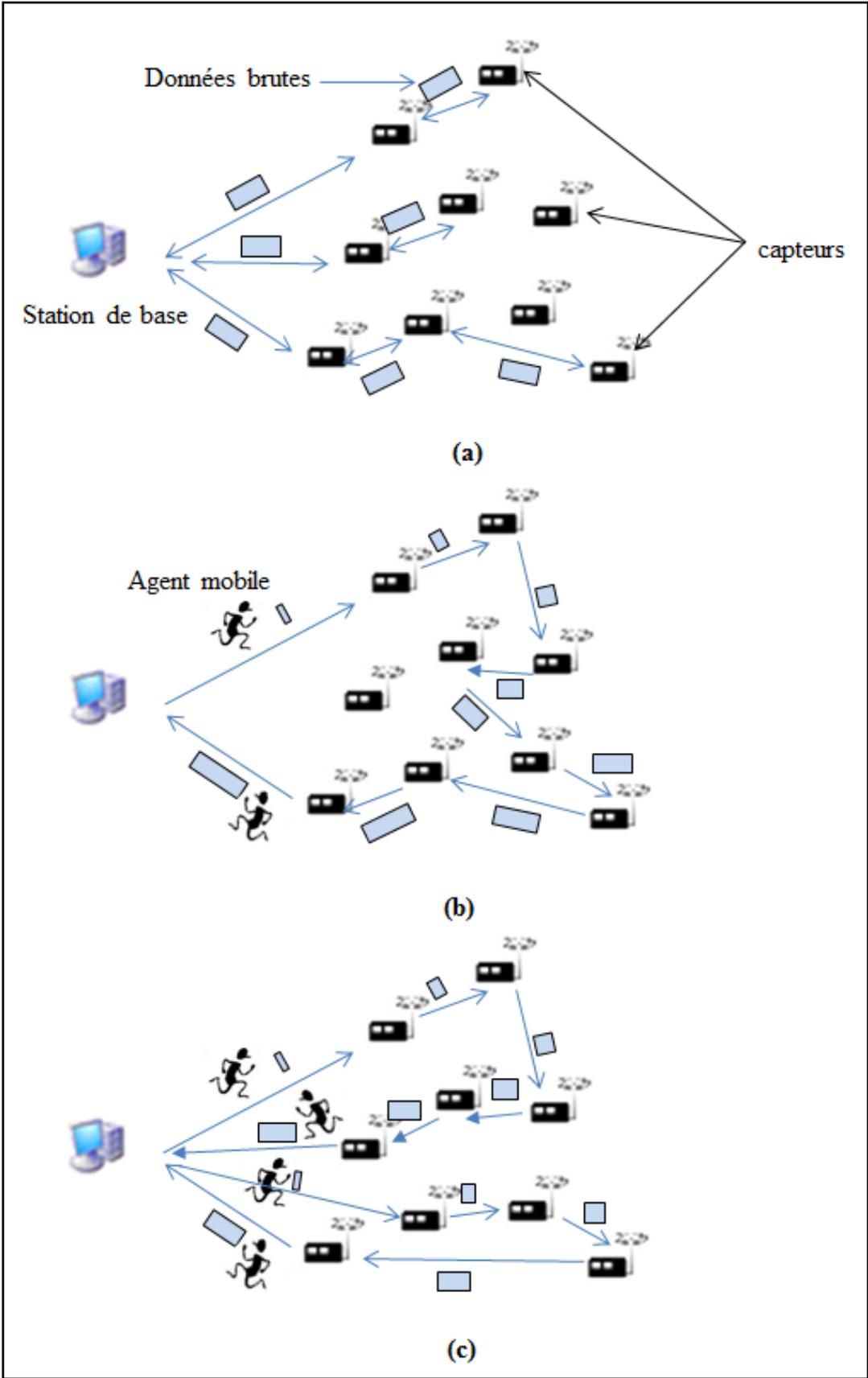


Figure III. 5 Modèles de récolte des données dans le RCSF (a : modèle conventionnel, b : modèle à base un seul agent mobile et c : modèle à base multiples agents mobiles)[2].

Dans les réseaux de capteurs conventionnels qui se basent sur le paradigme client\serveur, les données détectées par les capteurs sont transmises directement par les capteurs de la station de base comme le montre la figure III.5. (a). Ceci génère une grande quantité de trafic sur le réseau puisque le nombre des messages échangés entre les nœuds est très élevé.

Le nouveau modèle de RCSF qui se base sur le paradigme "agent mobile", écrase la limite du modèle client\serveur par le déplacement de l'agent entre les nœuds d'un réseau de façon autonome pour fusionner les données [2].

La figure III.5. (b) représente un modèle de réseau de capteurs qui se base sur un seul agent mobile où la récupération des informations détectées par tous les capteurs source est effectué à travers l'envoi d'agent dans un ordre précis, Ce qui conduit à :

- La réduction de la consommation de la bande passante.
- L'introduction d'une flexibilité supplémentaire dans le réseau.

Cependant, l'utilisation d'un seul agent mobile dans les RCSF ne s'applique qu'aux réseaux de petite taille. L'augmentation de la taille du réseau conduit à l'augmentation de nombre de nœuds sources. La distribution de ces derniers deviendra plus compliquée. Cela provoque les deux problèmes suivants:

- Retards importants causés par la grande échelle des réseaux de capteurs, dans lequel de nombreux nœuds sources doivent être visités par un seul agent.
- Plus de risque de perdre l'agent à cause de sa migration vers plusieurs nœuds sources.

Notez que :

- Les nœuds de capteurs dans l'itinéraire de l'agent épuisent l'énergie plus rapidement que d'autres nœuds.
- La taille de l'agent mobile augmente continuellement lors de la visite de nœuds sources.

Pour résoudre ces problèmes, les chercheurs ont proposés l'utilisation de plusieurs agents mobiles au lieu d'un seul agent mobile.

L'idée principale d'un modèle de RC qui se base sur multiples agents mobiles est de partager la tâche de récolte de données entre plusieurs agents. La figure III.5. (c) donne un exemple de ce modèle avec deux agents dans lequel, les nœuds sont divisés en deux groupes et les nœuds

dans chaque groupe sont visités par un agent particulier qui est expédié à partir de la station de base.

La performance de ce modèle peut dépasser celle d'un modèle à base d'un seul agent mobile si les nœuds sont bien regroupés et les itinéraires sont bien conçus. Cependant, un système basé sur multiple AM réintroduit plus de trafic de transmission dans le réseau. Par conséquent, le système à plusieurs AM devrait découvrir le meilleur équilibre sur le compromis entre la performance et l'efficacité.

III.5.4 Planification d'itinéraire à base d'un seul agent mobile dans le RCSF (SIP : Single mobile agent Itinerary Planning)

Dans cette section, nous traitons un certain nombre d'études qui ont été menées pour résoudre le problème de planification par l'utilisation d'un seul agent mobile (SIP : Single mobile agent Itinerary Planning), les plus célèbres de nos jours sont :

Dans l'article [2], deux algorithmes heuristiques sont proposés: 1) LCF algorithm (Local Closest First) qui cherche le prochain nœud avec la distance la plus courte au nœud actuel, et 2) GCF algorithm (Global Closest First) qui cherche le nœud le plus proche de la station de base.

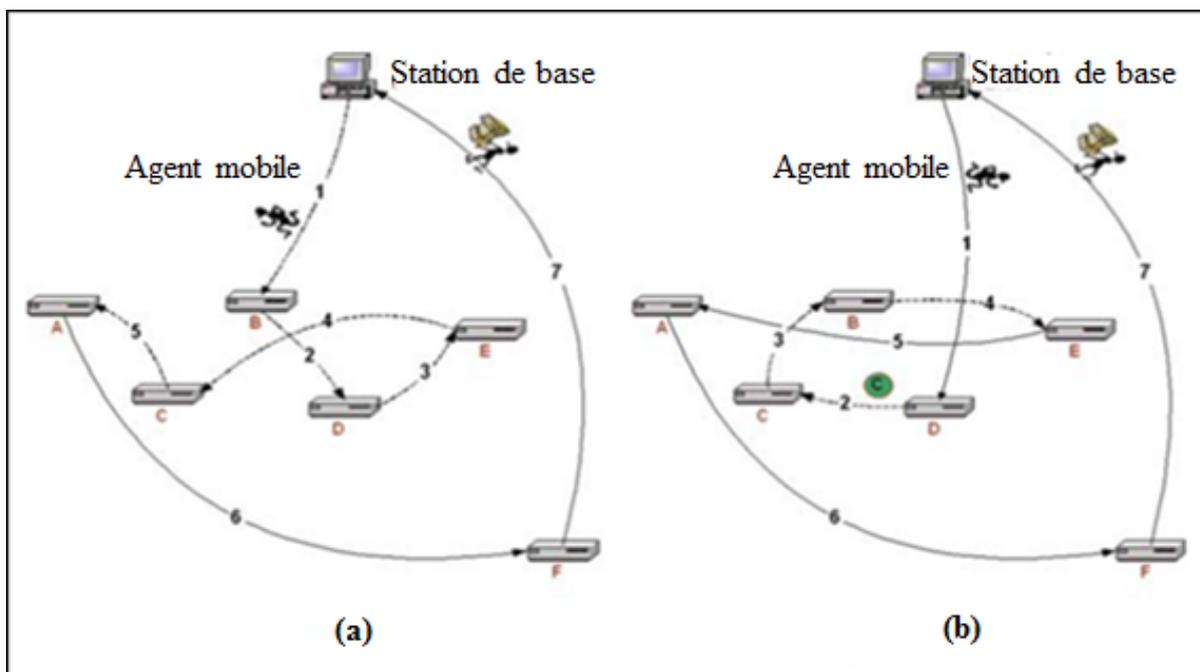


Figure III. 6 Sortie de chacun algorithm LCF (a) et GCF (b), C : le centre de network.

Le principal atout de ces deux algorithmes est qu'ils sont associés à une faible complexité de calcul. Cependant, l'itinéraire de l'algorithme LCF dépend fortement de l'emplacement actuel de l'agent mobile. Donc la recherche de la prochaine destination parmi les nœuds sources adjacentes à l'emplacement récent de l'agent mobile, au lieu de regarder la matrice des distances de réseau «global». Par conséquent, les nœuds à être visité sont généralement associée à un coût de migration élevé (voir, par exemple, les deux derniers sauts, 6 et 7, la figure. III. 6 a). D'une autre part, GCF produit dans la plupart des cas un itinéraire plus désordonné que le LCF et les oscillations de l'agent mobile répétitives autour du centre de la région, entraînant des chemins longs et de mauvaise performance.

Dans l'article [82], MAWSN (Mobile Agent –Based Wireless Sensor Network) a été proposé. Dans MAWSN, l'agent mobile est utilisé pour : (a) d'éliminer la redondance des données entre les nœuds sources en appliquant le traitement locale au niveau du nœud, (b) éliminer la redondance spatiale entre les nœuds sources voisins par l'agrégation de données à l'aide de l'agent mobile et (c) réduire les communications supplémentaire en utilisant une technique d'unification de paquets qui enchaîne les données provenant de plusieurs petits paquets en un seul paquets plus long afin de réduire les frais généraux de la communication au niveau de la tâche combinée. Les auteurs ont prouvé que MAWSN présente un gain de performance par rapport au modèle client / serveur en termes de consommation d'énergie. Cependant, les auteurs admettent que MAWSN implique un retard important dans les scénarios où l'agent visite un grand ensemble de capteurs du fait qu'un seul agent mobile est employé.

Dans l'article [3] MADD (Mobile Agent based Directed Diffusion) a été proposé. Dans MADD l'itinéraire d'un agent mobile est prévu par la station de base. L'ordonnancement d'itinéraire est similaire au MAWSN, mais la différence réside lorsque l'agent mobile atteint le dernier nœud source où il ignore le code de traitement et porte seulement le résultat agrégé à la station de base afin d'économiser l'énergie [54].

Dans [4], un algorithme génétique pour la planification d'itinéraire à base d'un agent mobile dans les réseaux de capteurs est présenté. Il suppose que chaque nœud ne peut pas être visité à plusieurs reprises afin de réduire l'espace de recherche. Bien que l'optimisation globale puisse être obtenue en utilisant l'algorithme génétique, il représente une solution légère pour conserver l'énergie des nœuds capteurs.

III.5.5 Planification d'itinéraire à base de multiples agents mobiles dans le RCSF (MIP : Multiple mobile agents Itinerary Planning)

Afin de résoudre les problèmes liés aux approches SIP, un certain nombre d'études ont été menées pour la planification d'itinéraire entre multiples agents mobiles dans le réseau de capteurs. Ces études permettent l'emploi de multiples agents mobiles en parallèle visitant chacun un nombre limité de nœuds. Dans cette section, nous passons en revue certaines de ces approches.

Chen et al. [6] a proposé l'algorithme CL-MIP (Centre Location-based Multi agents Itinerary Planning), l'idée principale est de considérer la solution de planification d'itinéraire pour multi-agents (MIP) comme une extension de la solution de planification d'itinéraire pour un seul agent mobile (itératif SIP). En CL-MIP, le champ des visites d'un agent mobile est déterminé par un cercle centré en un point central de visite (VCL). Ensuite, les nœuds sources au sein de la zone circulaire sont affectés à un agent. Le CL-MIP utilise l'un des algorithmes de SIP proposées ci-dessus [2-4], pour déterminer le chemin de chaque agent mobile [7]. Dans cette approche l'efficacité du groupement des nœuds sources en forme de cercle n'est pas une solution générique parce que les nœuds sont répartis irrégulièrement. En outre, la performance du groupement des nœuds sources sera également fortement affecter par le rayon du cercle, bien que la valeur optimale du rayon n'est pas encore mesurée ou analysés explicitement [5].

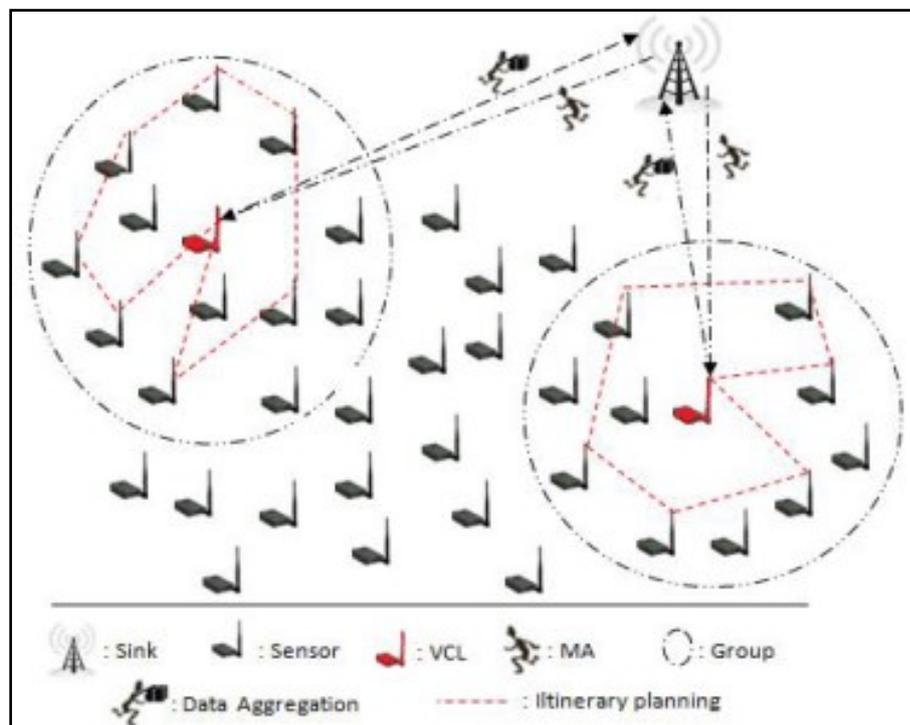


Figure III. 7 CL-MIP architecture [2].

Dans [19], l'AG-MIP (Angle Gap -MIP) a été proposé, cette proposition offre une nouvelle vision de regroupement des nœuds sources qui n'utilise pas la forme du cercle. Dans AG-MIP les nœuds au sein d'un particulier écart d'angle $\Delta\theta$ autour d'un point central de visite (VCL), doivent être inclus dans le même groupe. L'idée principale d'AG-MIP est de connecter la station de base et tous les nœuds sources avec des lignes droites. Donc les écarts d'angle $\Delta\theta$ entre les lignes deviennent un facteur critique pour décrire le degré pertinent entre les nœuds sources. L'importance de l'AG-MIP est leur mode de groupement; il utilise écart d'angle pour diviser le réseau en secteurs. Par conséquent, il conduit à une contestation et des interférences potentiellement réduits entre agent mobile, cependant l'interrogation ouverte dans cette approche est de trouver un seuil optimal de l'écart d'angle.

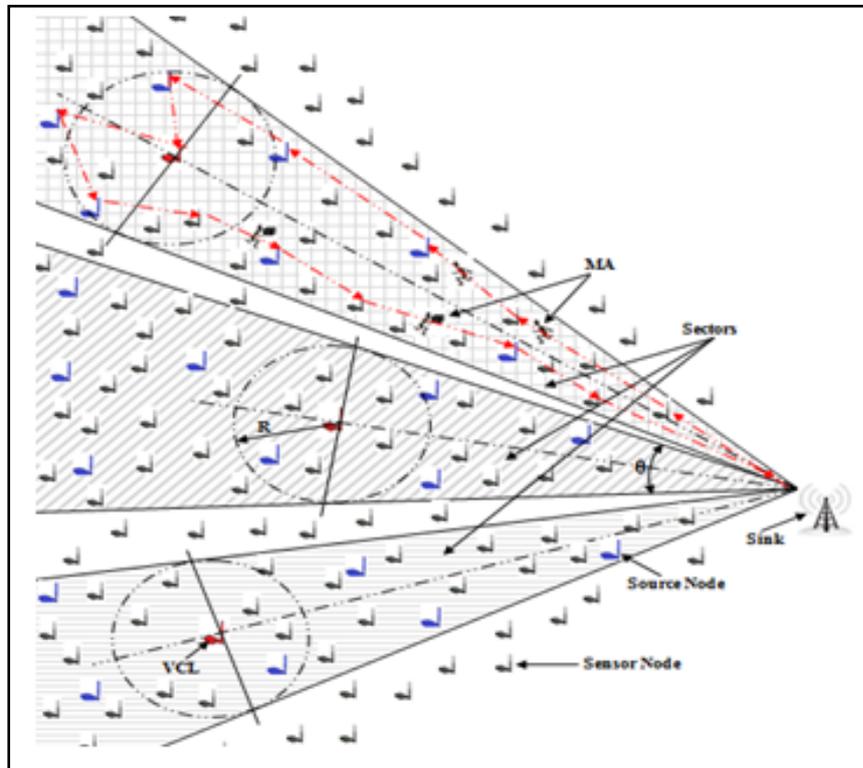


Figure III. 8 AG-MIP architecture [19].

Dans [8], un algorithme génétique pour la planification d'itinéraire de multiples agents mobiles (GA-MIP) est proposé. Pour réaliser l'algorithme GA-MIP, la séquence des nœuds source et le groupe de ces nœuds sont codés en numéros comme des gènes de l'évolution génétique. Tout d'abord, un espace de recherche rempli de gènes choisis au hasard est mis en place. Ensuite, une approche d'évolution itérative est effectuée. A chaque itération, les opérateurs d'évolutions telles que le croisement et la mutation sont appliqués pour augmenter la variété des gènes. Après ces procédures, l'opérateur de sélection sélectionne les meilleurs

gènes pour survivre à la prochaine génération, qui est analogue à la sélection naturelle dans le monde réel. Après un certain nombre d'itérations, la solution qui correspond à une stratégie efficace de planification d'itinéraire sera retenue. Bien que, plusieurs simulations ont été effectuées pour montrer la performance de GA-MIP en termes de durée de la tâche et de consommation d'énergie, la complexité élevée de calcul rend la mise en œuvre de GA-MIP encore discutable [15].

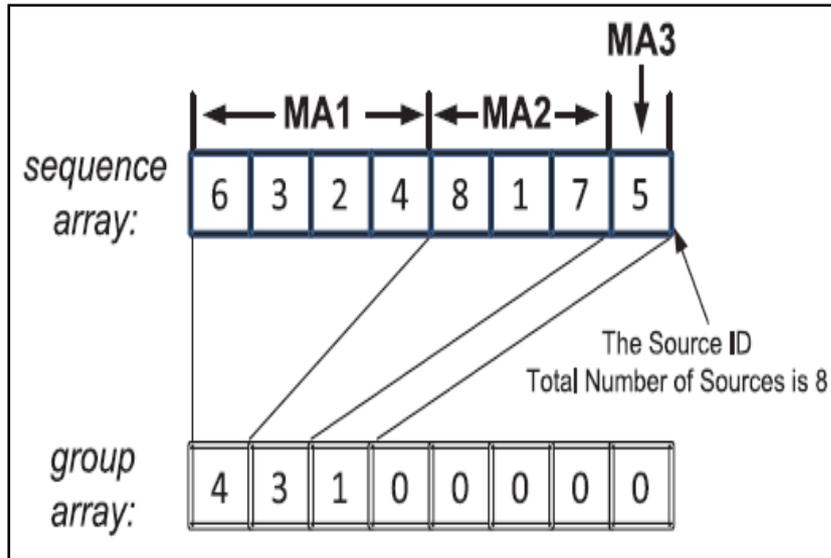


Figure III. 9 GA-MIP architecture [15].

La proposition dans [9] considère les modèles de problèmes de MIP comme un graphe totalement connecté (TCG). Dans le TCG, les sommets sont les nœuds du réseau de capteurs, et le poids d'une arête est dérivé à partir d'estimations du saut entre les deux nœuds d'extrémité de l'arête. Les auteurs indiquent que tous les nœuds-source dans un sous arbre particulier devraient être considérées comme un groupe. En outre, les auteurs présentent un facteur d'équilibre tout en calculant le poids dans le TCG, pour former un arbre d'équilibrage minimal (BST). Le facteur d'équilibre permet un contrôle flexible sur le compromis entre le coût de l'énergie et la durée de la tâche. Cet algorithme est nommé BST-MIP (Balanced minimum Spanning Tree-based Multi agents Itinerary Planning).

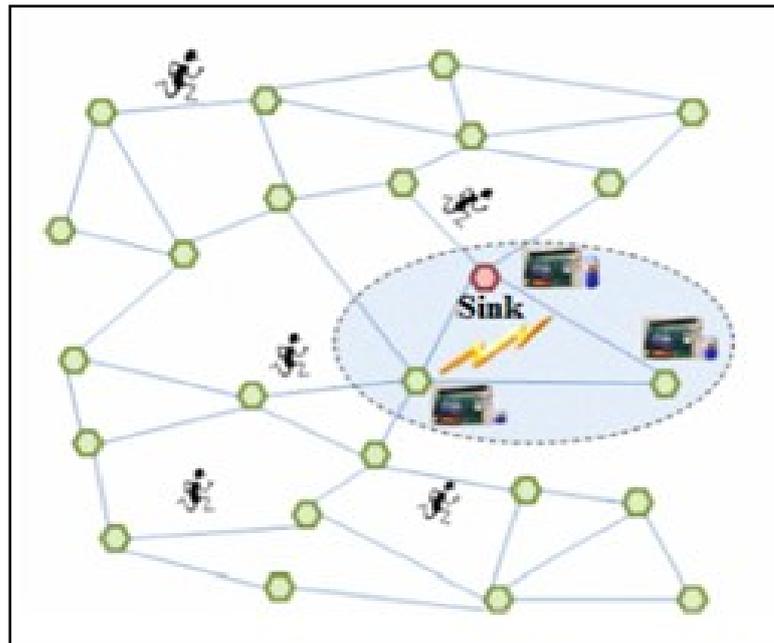


Figure III. 10 TCG architecture [9].

Dans [10], l'algorithme NOID (Near-Optimal Itinerary Design) est proposé. L'objectif de l'algorithme NOID est de trouver le nombre d'agents mobiles qui minimisent le coût global de la fusion de données et de construire le chemin en fonction de la distance géographique. NOID surpasse LCF et GCF, mais il souffre d'une faible vitesse de travail et une complexité de calcul.

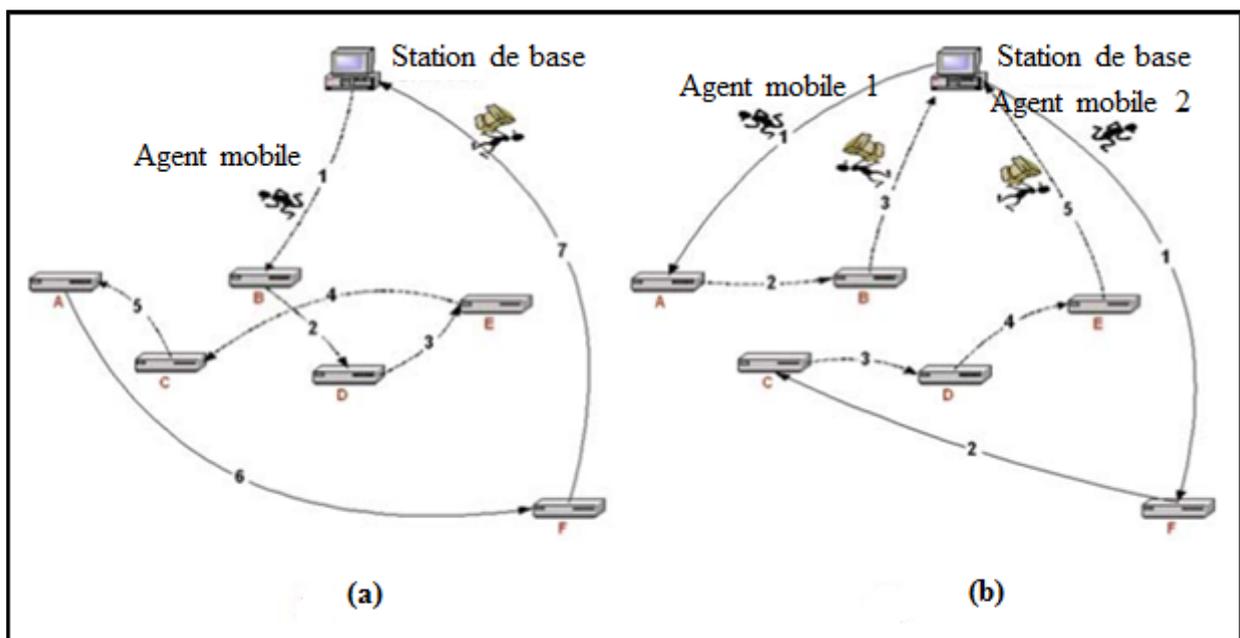


Figure III. 11 Sortie de NOID (a). L'itinéraire d'agent mobile provenant de la sortie de l'algorithme NOID (b)[10].

Le SNOID algorithm (second quasi-optimal itinerary design) dans [11] est présenté pour déterminer le nombre d'agents mobiles qui devraient être utilisés et l'itinéraire qui devraient suivre. L'idée principale de SNOID est de partitionner la zone autour de la station de base en zones concentriques et de construire les chemins les plus courts des agents mobiles vers la station de base. Tous les nœuds-sources à l'intérieur de la première zone sont connectés directement à la station qui est le point de départ de l'itinéraire des agents mobiles.

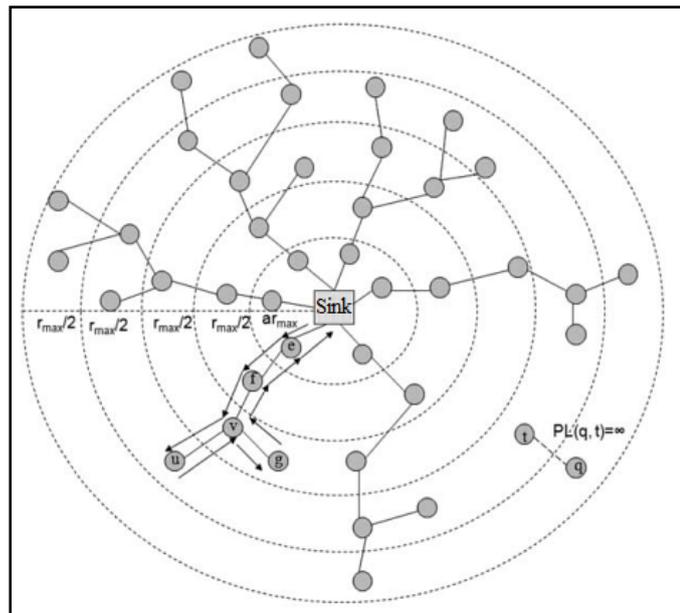


Figure III. 12 SNOID partitionnement de la zone autour de la station de base (Sink) [11].

La proposition dans [14], applique une structure arborescente avec des branches pour la planification des itinéraires (CBID: Clone-Based Design). L'idée principale de CBID est d'inclure un nœud dans un itinéraire. Si ce nœud rend le coût total minimal il distribue parallèlement un certain nombre d'agents mobiles. Ces agents mobiles visitent séquentiellement des nœuds capteurs disposés dans des structures d'arbres lors de la visite des nœuds capteurs avec deux ou plusieurs agents mobiles-enfant qui sont cloné par l'agent mobile- maître. Cette proposition a un résultat significatif pour réduire les dépenses d'énergie et le temps de réponse globale. Cependant, si la taille de RCSF augmente la taille arborescence augmente aussi; donc plus de branches seront créés qui dégrade les performances en raison de l'interférence.

La conception Indications Tree-Based (TBID) est illustrée en [18]; c'est un algorithme heuristique qui améliore celui proposé dans [10]. Cet algorithme utilise également une approche gourmande pour construire des itinéraires à faible coût pour tous les agents

forment un arbre binaire. Il génère des itinéraires à faible coût pour les agents mobiles, mais la consommation d'énergie est doublée dans les routes inverses et les interférences entre les énormes quantités de branches.

III.6 Analyse des travaux

La performance des algorithmes conçus à base d'un seul agent mobile est relativement faible en particulier dans les réseaux de capteurs à grande échelle. En effet, un seul agent mobile est utilisé pour la tâche de fusion des données et par conséquent, il doit porter une lourde charge de données extraites par les nœuds sources. De ce fait, cette catégorie ne convient que pour les réseaux de capteurs à petite échelle.

D'autre part, la catégorie à base de multiples agents mobiles peut être efficacement utilisée dans les réseaux de capteurs à grande échelle. Dans ce cas, plusieurs agents mobiles travaillent en parallèle pour effectuer la tâche de fusion de données qui mènent à un gain considérables d'énergie. Cependant, la complexité des algorithmes proposés dans cette catégorie (MIP) est considérable par rapport à des algorithmes à base d'un seul agent (SIP). En plus, la distance géographique est le facteur unique pris en compte pour la planification de l'itinéraire entre les agents. L'utilisation de la distance géographique seule provoque l'apparition des limites suivantes:

- Un déséquilibre au niveau de regroupement des nœuds sources où certains agents mobiles vont s'exécuter dans des groupes avec une grande densité et d'autres agents avec une faible densité. Cela conduit à un déséquilibre au niveau des données requit entre les agents et provoque un impact négatif sur la durée de la tâche et de la quantité d'énergie consommée.
- La non-fiabilité au niveau de détermination de nombre des agents qui ne suit pas une formule spécifique où il est égal au nombre de groupes. Par conséquence, cela provoque aussi le problème de déséquilibre.

Dans le tableau III. 1 nous résumons les avantages et les inconvénients de tous les travaux de recherche examinés dans ce chapitre.

Approches	Catégorie	Type de Planification	Paramètres de performance	Avantages	Inconvénient
LCF & GCF	A base d'1 AM	Statique	Distance géographique entre les nœuds de Réseau	<ul style="list-style-type: none"> • Faible complexité. • Facile à mettre en œuvre. 	<ul style="list-style-type: none"> • l'augmentation de la consommation d'énergie et de temps de réponse dans les réseaux à grandes échelle.
MAWSN		hybride		<ul style="list-style-type: none"> • élimination de la redondance spatiale • Réduction des frais généraux de communication. 	
Algorithme génétique		statique		<ul style="list-style-type: none"> • Réduction d'espace de recherche. 	
MADD		statique		<ul style="list-style-type: none"> • Convient pour des architectures de réseaux plats. 	

CL-MIP	A base de multiple AM	statique	Distance géographique entre les nœuds de Réseau	<ul style="list-style-type: none"> Facile à mettre en œuvre. 	<ul style="list-style-type: none"> Détermination de regroupement de nœuds et de nombre d'agents qui assure l'équilibrage de la charge du réseau. Complexité élevée.
AG-MIP				<ul style="list-style-type: none"> contestation et interférences potentiellement réduits entre les agents mobiles. 	
GA-MIP		hybride		<ul style="list-style-type: none"> performance en termes de durée de la tâche. 	
NOID		Statique		<ul style="list-style-type: none"> fiable pour les réseaux de grand d'échelle (réduction du temps de communication et diminution du temps de réponse). 	
SNOID				<ul style="list-style-type: none"> Faible coût. 	
TBID				<ul style="list-style-type: none"> résultat significatif pour réduire les dépenses d'énergie et le temps de réponse globale. 	
CBID					

Tableau III. 1 Tableau comparatif de chaque approche proposée.

III.7 Conclusion

La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs reste toujours un problème persistant. Afin de résoudre ce problème, plusieurs chercheurs ont adopté l'intégration des agents mobiles pour la fusion des données dans les RCSF. Le choix des itinéraires des agents mobiles est d'une importance critique puisqu'il affecte le coût global de la consommation d'énergie. Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les principaux travaux de planification d'itinéraire à base d'un seul et multiple agent mobile. On constate que, les réseaux de capteurs conventionnels qui se basent sur le paradigme client/serveur ont un impact négatif sur la minimisation d'énergie consommé qui est loin d'être atteintes. Par ailleurs, les travaux de recherche qui utilisent la technologie d'agent mobile constitue une alternative prometteuse pour réduire la consommation d'énergie. Ainsi l'avantage principal des approches basées sur les agents mobiles réside dans le fait que les agents mobiles travaillent d'une manière parallèle et autonome.

Dans le chapitre suivant, nous entamons le développement de notre contribution de planification d'itinéraire entre multiples agents mobiles dans les RCSF.

Chapitre 4

Approche proposée

Table des matières

IV.1 Introduction	60
IV.2 Description globale de l'approche proposée	61
IV.3 Description détaillée de l'approche proposée.....	62
IV.3 .1 Partitionnement de réseau.....	62
IV.3 .2 Détermination du nombre des agents mobiles.....	64
IV.3 .3 Construction d'itinéraire.....	68
IV.4 Format de paquet d'agent mobile.....	73
IV.5 Fonctionnement générale.....	74
IV.6 conclusion.....	76

Chapitre 4

Planification d'itinéraire entre multiples agents mobiles pour réduire la consommation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Ce chapitre décrit l'approche que nous avons proposée pour la planification d'itinéraire avec les différents composants utilisés pour l'implémenter. Il étudie essentiellement l'architecture globale et les descriptions détaillées des différentes entités, ainsi que leurs rôles. En outre, il met en relief les différents algorithmes de système.

IV.1 Introduction

Le contexte de notre étude est consacrée à augmenter la durée de vie des réseaux de capteurs et de réduire la durée de la tâche de collecte des données. Le présent travail se concentre plus particulièrement sur la résolution de certains problèmes liés à la planification d'itinéraire entre multiples agents mobiles dans les RCSFs.

Dans la majorité des études proposées pour résoudre les problèmes de MIP, la distance géographique est le seul facteur pris en compte pour la planification d'itinéraire entre les agents afin de diminuer la consommation d'énergie. Cependant, la taille de données est un facteur important qui influence aussi la consommation d'énergie (voir le modelé énergétique-chapitre 2). La concentration sur la distance géographique, seulement, provoque l'apparition de certaines limites. Pour cette raison, nous proposons une nouvelle stratégie (DD-MIP: geographical Distance and Data size based algorithm for Multiple mobile agents Itinerary Planning), qui combine à la fois les deux essentielles facteurs qui influent la consommation d'énergie (La distance géographique et la taille des données). Notre nouvelle méthode permet d'améliorer les solutions de MIP, par l'augmentation de la durée de vie du RCSF et en réduisant la durée de la tâche.

IV.2 Description globale de l'approche proposée

Afin d'atteindre notre objectif (augmenter la durée de vie et réduire la durée de la tâche dans le RCSF), nous proposons une nouvelle méthode (DD-MIP: geographical Distance and Data size based algorithm for Multiple mobile agents Itinerary Planning) qui permet la planification de l'itinéraire entre multiples agents mobiles. Notre approche proposée peut être classée comme un modèle de planification statique où la planification d'itinéraire est totalement déterminé par la station de base (Sink) qui ne souffre pas du problème de la consommation d'énergie.

La structure de notre modèle est représentée par la figure 1, qui comprend les trois étapes suivantes:

Étape 1: partitionnement du réseau basé sur l'emplacement géographique; le partitionnement est effectué en fonction de la distance entre les nœuds capteurs (les plus proche regroupées ensemble) par la méthode « K-means ». Cette phase va produire un ensemble de partitions. Chaque partition peut recevoir plusieurs agents mobiles;

Étape 2: Déterminer le nombre nécessaire d'agents mobiles pour chaque partition selon la taille des données fournies par chacun des nœuds sources et de la distance géographique.

Étape 3: Bâtir l'itinéraire pour chaque agent mobile, cette étape comprend les deux sous-étapes suivantes:

- Définir les groupes de nœuds sources qui doivent être visités par chaque agent mobile en fonction de la taille des données fournies par ces nœuds;
- Déterminer l'ordre de visite à tous les nœuds sources selon l'algorithme heuristique GRASP (Greedy randomized adaptive search procedure).

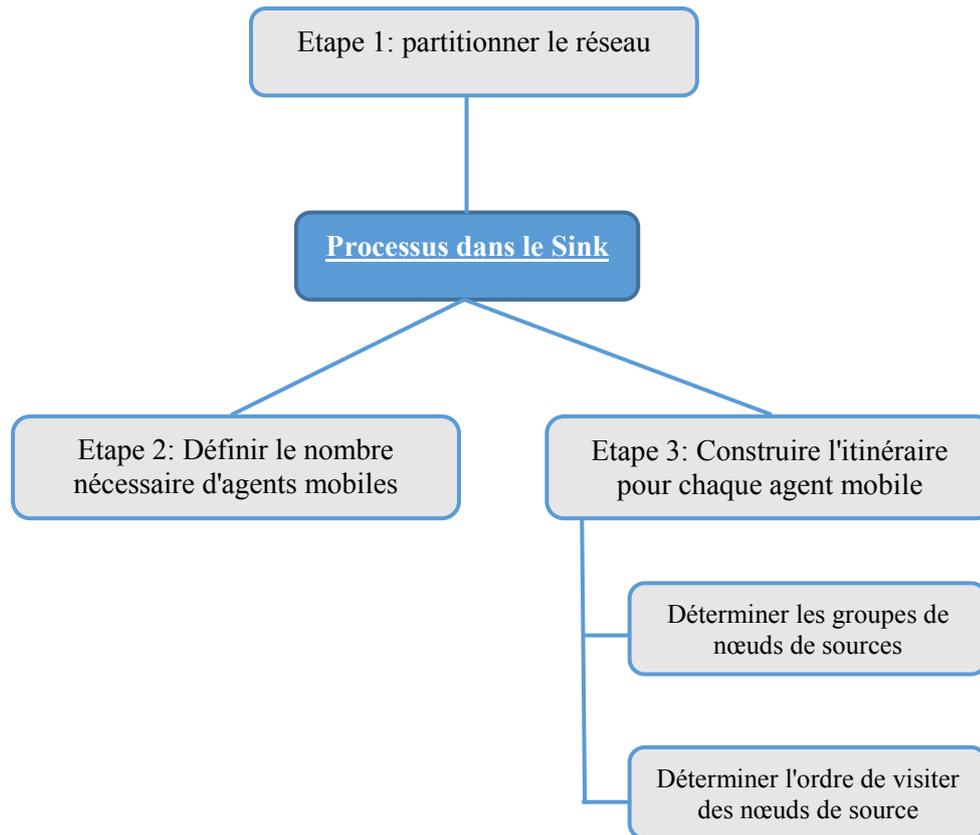


Figure IV. 1 Processus général de DD-MIP approche.

IV.3 Description détaillée de l'approche proposée

Dans cette section, nous présentons les trois étapes ci-dessus de la stratégie proposée avec plus de détails.

IV.3 .1 Partitionnement de réseau

Sur la base de l'emplacement géographique, cette phase est responsable de la répartition du réseau. Ce partitionnement est réalisé conformément à la distance entre les nœuds capteurs (les nœuds les plus proches sont regroupés ensemble). Notre stratégie permet la séparation du réseau en k clusters par l'utilisation de l'algorithme "k-means" [13]. C'est une méthode simple et efficace. Elle peut être utilisée avec de grandes bases de données (des milliers de capteurs). L'algorithme k-means vise à cloisonner les n nœuds capteurs $S_i: i \in [1, 2, \dots, n]$ en k clusters $P_j \in [1, 2, \dots, K] (k \leq n)$ en utilisant k centres de " C_j " choisie arbitrairement. Cet algorithme vise à minimiser la distance entre les nœuds capteurs " S_i " à l'intérieur de chaque cluster " P_j " en utilisant la formule (1):

$$\arg \min_P \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|S_i - C_j\|^2 \quad (1)$$

Où $\|S_i - C_j\|^2$: la distance entre les nœuds capteurs " S_i " et le centre de cluster " C_j ".

La méthode calcule la distance entre tous les nœuds capteurs S_i et tous les initiaux centres " C_j " et affecte chaque nœud au plus proche cluster. Une fois que tous les capteurs sont affectés, des nouveaux centres de clusters sont calculés (ainsi, les centres sont mobiles), où nous déterminons la moyenne " G_j " (voir la formule (2)) de chaque cluster et désigne cette moyenne comme un nouveau centre " C_j ". Ce processus est répété jusqu'à ce que le partitionnement atteigne une certaine stabilité (En effet, un seuil peut être fixé comme un critère d'arrêt).

$$G_j = \frac{1}{|P_j|} \sum_{i=1}^n S_i \quad (2)$$

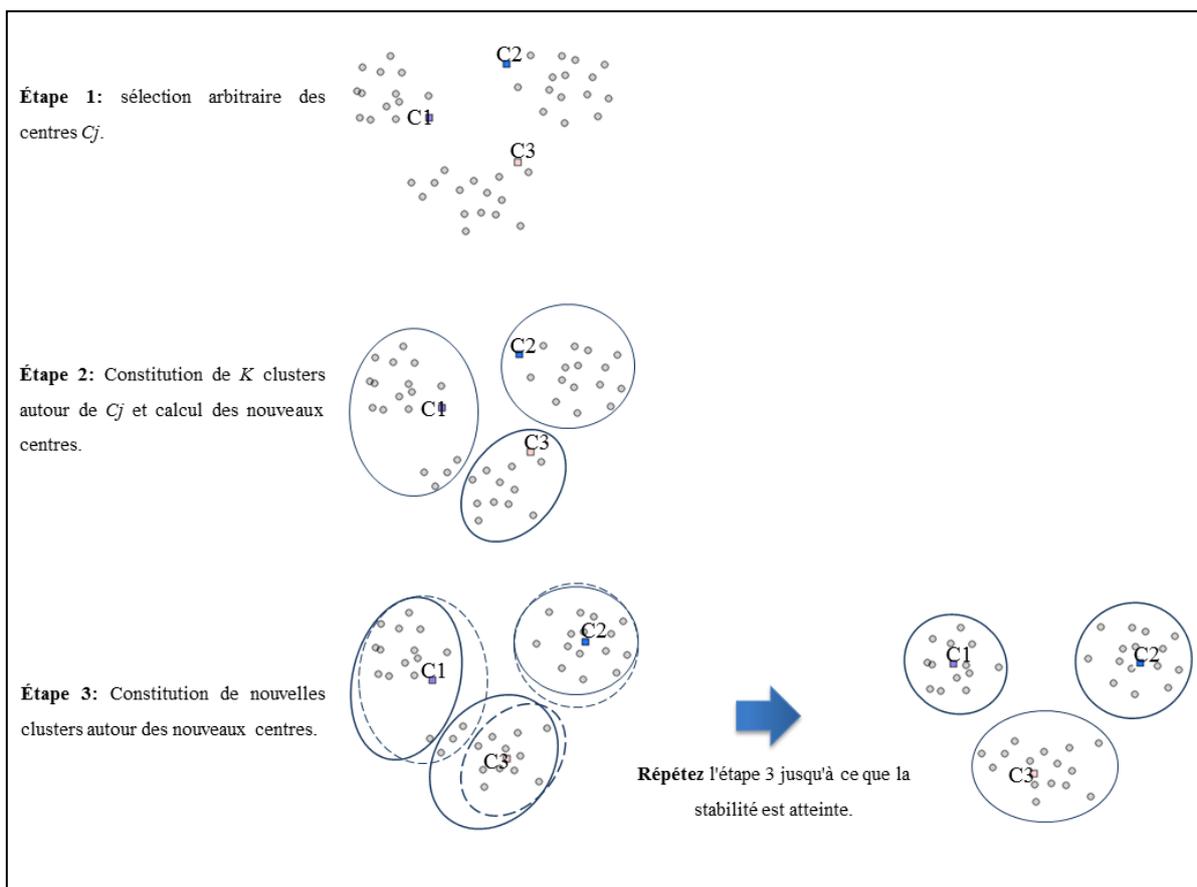


Figure IV. 2 Processus général de k-means méthode [13].

Une fois le partitionnement est effectuée, nous sélectionnons dans chaque cluster un nœud particulier comme un chef de cluster " L_j ". Il est le nœud le plus proche aux tous les nœuds source du cluster, donc le chef de cluster change à chaque changement des nœuds sources (il est un nœud changeable). Ce chef sera responsable juste d'envoi de la taille de données (et non les données) fournies par tous les nœuds sources à l'intérieur de son cluster, à la station de base.

Nous définissons le cluster-leader “ L_j ” par l'équation (3):

$$L_j = \frac{1}{|P_j|} \sum_{h=1}^m S'_h \quad (7)$$

Où:

S'_h : Ensemble de nœuds source $S'_h: h \in [1, m] : S'_h \subset S$.

La figure IV.3 montre graphiquement l'évolution du processus de partitionnement du réseau.

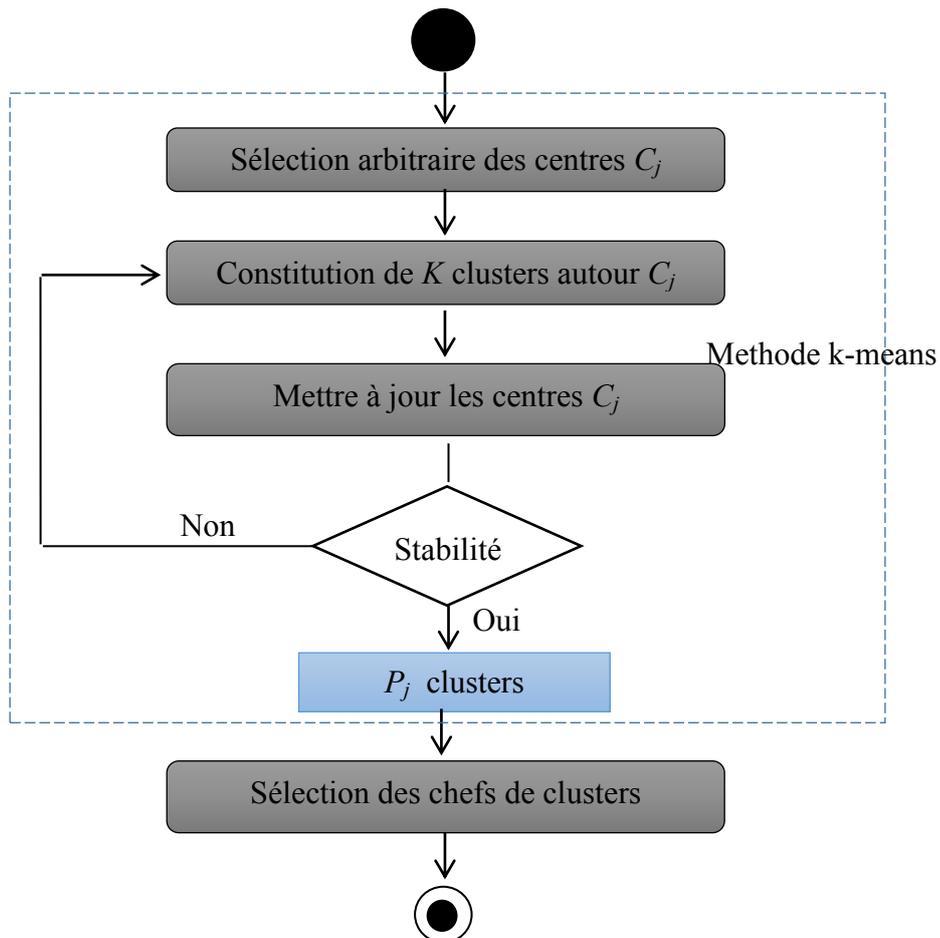


Figure IV. 3 Processus de partitionnement de réseau.

IV.3 .2 Détermination du nombre des agents mobiles

Le nombre d'agents mobiles est un facteur important dans la résolution du problème de MIP. Un nombre élevé d'agents mobiles provoque plus de flux de transmission de ces agents sur le RCSF, ainsi il augmente la consommation d'énergie. Cependant, un petit nombre d'agents mobiles provoque le problème de retard dans la durée de la tâche.

Dans chacune des études existantes sur le MIP, la détermination de nombre d'agents ne suit pas une formule spécifique. Tout simplement, le nombre d'agents est égal au nombre de clusters, bien que les clusters sont irrégulièrement répartis. Dans notre approche, le nombre d'agents varie d'un cluster à un autre, en fonction de la taille des données fournies par chacun des nœuds sources à l'intérieur de leurs clusters. En plus du critère de la taille des données, nous concèderons aussi le critère de la distance géographique comme les autres méthodes de MIP existantes.

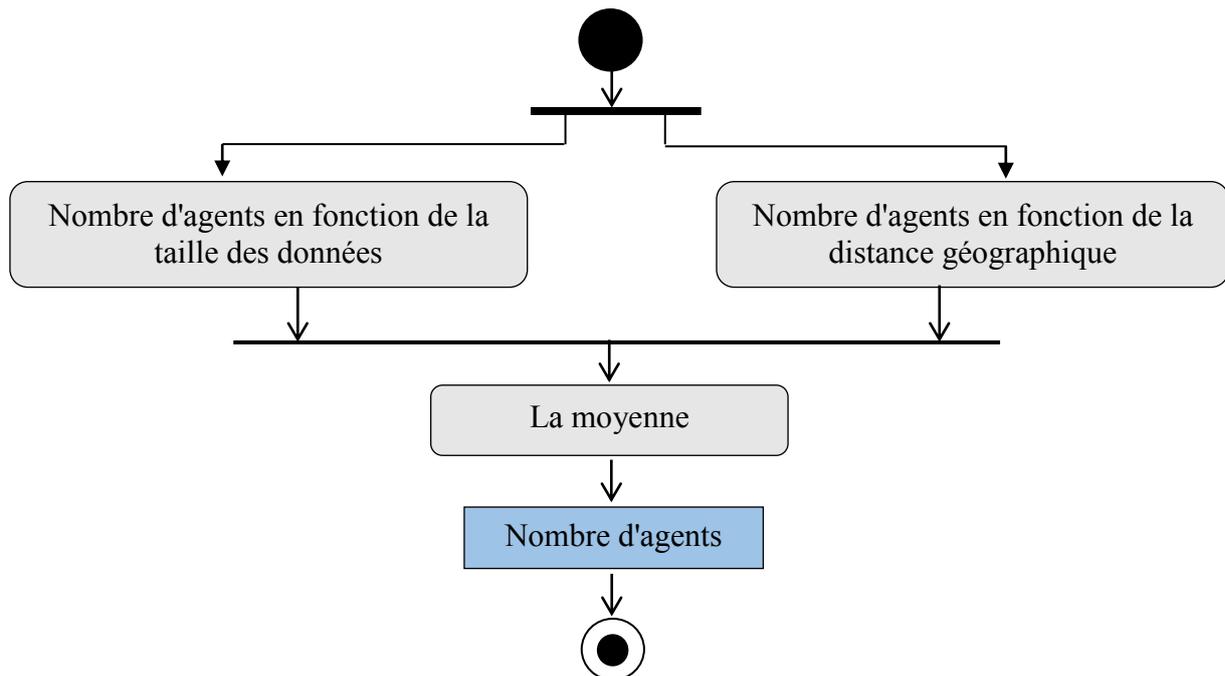


Figure IV. 4 Processus de détermination nombre d'agents mobile.

Comme il est représenté dans la figure ci-dessus (figure IV.4), on calcule simultanément pour chaque cluster le nombre d'agents mobiles en fonction de la taille des données ainsi que le nombre d'agents mobiles en fonction de la distance géographique, puis on calcule la moyenne entre eux afin d'obtenir le nombre final d'agents mobiles.

IV.3 .2.1 Nombre d'agents mobiles en fonction de la taille des données

A ce stade, on détermine le nombre d'agents mobiles en fonction du facteur de la taille des données. En effet, l'augmentation de la quantité des données à l'intérieur d'un cluster entraîne l'augmentation du nombre d'agents mobiles affectés à ce cluster. Ce principe permet de garantir l'équilibrage des données dans le réseau.

Nous considérons que le cluster qui possède le minimum taille des données parmi l'ensemble des clusters aura un seul agent mobile. Le nombre d'agents affectés aux autres clusters augmentera avec la croissance des données détectées dans chaque cluster. En effet, le nombre des agents mobiles en fonction de la taille des données 'Nb_{MA_data}' dans chaque cluster «j» est définie par l'équation (8):

$$Nb_{MA_data}(j) \approx \frac{DS(j)}{\min(DS(i))_{i=1..k}} \quad (8)$$

Où:

$DS(j)$: la taille des données détectées dans le cluster 'j' qui est composée de y nœuds. Cette taille est calculée en utilisant la formule suivante:

$$DS(j) \approx \sum_{x=1}^y k[x] \quad (9)$$

Avec:

$k[x]$: la taille des données fournies par le nœud source x à l'intérieur du cluster j .

Le tableau IV.1 montre un exemple illustratif pour définir le nombre d'agents mobiles en fonction de la taille des données, avec un réseau de 3 clusters.

Clusters		la taille des données fournies par chaque nœud source "x"				Taille des données de Cluster $DS(j)$	Nb _{MA_data}
P_j		x 1	x 7	x 9	/		
P_1	nœud source	x 1	x 7	x 9	/	500 : $\min(DS(j))$	500/500=1
	taille des données	120	130	250	/		
P_2	nœud source	x 22	x 30	x 32	x 41	1100	1100/500 ≈ 2
	taille des données	680	225	97	98		
P_3	nœud source	x 52	x 60	x 67	x 72	1600	1600/500 ≈ 3
	taille des données	420	780	167	233		

Tableau IV. 1 Nombre d'agents mobiles en fonction de la taille des données.

IV.3 .2.2 Nombre d'agents mobile en fonction de la distance géographique

La distance géographique est un facteur important dans les approches de MIP; l'agent mobile qui migre à des endroits lointains (long parcours) peut disparaître. En outre, l'agent prend plus de temps pour collecter les données lorsque le trajet est plus long. Afin de diminuer la disparition des agents, nous liions la détermination de nombre d'agents mobiles à la distance géographique du cluster. L'augmentation de l'éloignement d'un cluster par rapport à la station de base entraîne l'augmentation du nombre d'agents mobiles affectés à ce cluster.

Le nombre d'agents mobiles en fonction de la distance géographique ' $Nb_{MA_distance}$ ' dans chaque cluster ' j ' est définie par l'équation (9):

$$Nb_{MA_distance}(j) \approx \frac{d(j)}{\min(d(i))_{i=1..k}} \quad (10)$$

où:

$d(j)$: la distance entre la station de base et le centre " C_j " du cluster ' j '.

Le tableau IV.2 montre le même exemple précédent utilisé pour déterminer le nombre d'agents mobiles à affecter à chaque cluster en fonction de la distance géographique.

Clusters P_j	coordonnées du centre de cluster C_j	Coordonnées de Sink	la distance entre le centre C_j et le Sink $d(j)$	$Nb_{MA_distance}$
P_1	(268,59)	(500,250)	300 : $\min d(j)$	300/300=1
P_2	(140,73)		401	401/300≈1
P_3	(1180,83)		700	700/300≈2

Tableau IV. 2 Nombre d'agents mobile en fonction de la distance géographique.

Le tableau IV.3 définit le nombre final d'agents mobiles obtenus par la moyenne entre Nb_{MA_data} et Nb_{MA_data} dans chaque cluster.

Clusters P_j	Nb _{MA_data}	Nb _{MA_data}	Le nombre d'AM
P_1	1	1	$(1+1)/2= 1$
P_2	2	1	$(2+1)/2 \approx 2$
P_3	3	2	$(3+2) \approx 3$

Tableau IV. 3 Nombre final d'agents mobiles.

A travers les résultats obtenus dans les tableaux IV.1, IV.2, et IV.3, nous affirmons la variation du nombre d'agents mobiles entre les clusters. Lorsque la quantité des données ou la distance géographique augmente, le nombre d'agents augmente, et vice versa.

IV.3 .3 Construction d'itinéraire

Après avoir déterminé le nombre d'agents mobiles nécessaires pour l'agrégation de données, nous procédons à l'étape de la construction d'itinéraire. Dans notre cas de nombreux agents sont affectés au même cluster, ce dernier est divisée en un certain nombre de groupes qui égal au nombre d'agents affectés. La construction de la trajectoire pour chaque agent mobile comprend:

- (i) la détermination du groupe des nœuds sources associée à cet agent;
- (ii) la détermination d'itinéraire pour cet agent, cet itinéraire doit inclure tous les nœuds déterminés dans la première étape.

La deuxième étape est réalisée en utilisant l'algorithme heuristique GRASP (Greedy randomized adaptive search procedure). Ces deux étapes sont présentées dans les deux sous-sections suivantes.

IV.3 .3.1 Regroupement des nœuds sources

Dans cette sous-section, le groupe $VG(AM_i)$ des nœuds sources que l'agent mobile doit visiter dans son cluster est défini. Afin de définir cet ensemble $VG(MA_i)$, nous avons élaboré une stratégie GDGM (the Greatest Data in the Greater Memory) pour assurer cette tâche. Le GDGM est basée sur le principe suivant: « le nœud qui a la plus grande taille de données est associée à l'agent mobile qui possède la taille de mémoire libre la plus grande ». Et dans le cas où nous avons certains nœuds avec les mêmes tailles de données, chaque agent mobile porte

le nœud le plus proche géographiquement au dernier nœud dans son groupe. Cette stratégie de GDGM assure l'équilibrage de la charge des données entre les agents mobiles [30].

Ci-dessous, nous présentons l'algorithme de la stratégie GDGM et la figure IV.5 montre son exécution.

Pseudo code de GDGM algorithme:

Données:

S' : Ensemble de nœuds sources

$VG(MAx) \leftarrow \emptyset$

$RDS[h]$: Taille des données brutes fournies par chaque nœud source h

MMA : Taille mémoire d'agent mobile

Début

Pour chaque cluster P_j

o Calculez le nombre d'agents mobiles;

Répéter

o Trouver le nœud source qui possède le max ($RDS [h]$);

o associer ce nœud avec l'AM qui a la plus grande taille mémoire libre ($\max (MMA [x])$);

$VG(MAx) \leftarrow \{ h \in S' \mid \max (RDS[h]) \}$

Si (nous avons plusieurs nœuds avec les mêmes tailles des données) **alors**

chaque agent mobile porte le nœud le plus proche géographiquement au dernier nœud dans son $VG(MA_i)$;

$VG(MAx) \leftarrow \{ h \in S' \mid \min (d[h]) \}$

o **Mettre à jour** la taille mémoire libre d'agent: $MMA[x] = MMA[x] - RDS[h]$;

Jusqu'à (tous les nœuds sources sont associés à des MAs);

Fin pour

Fin.

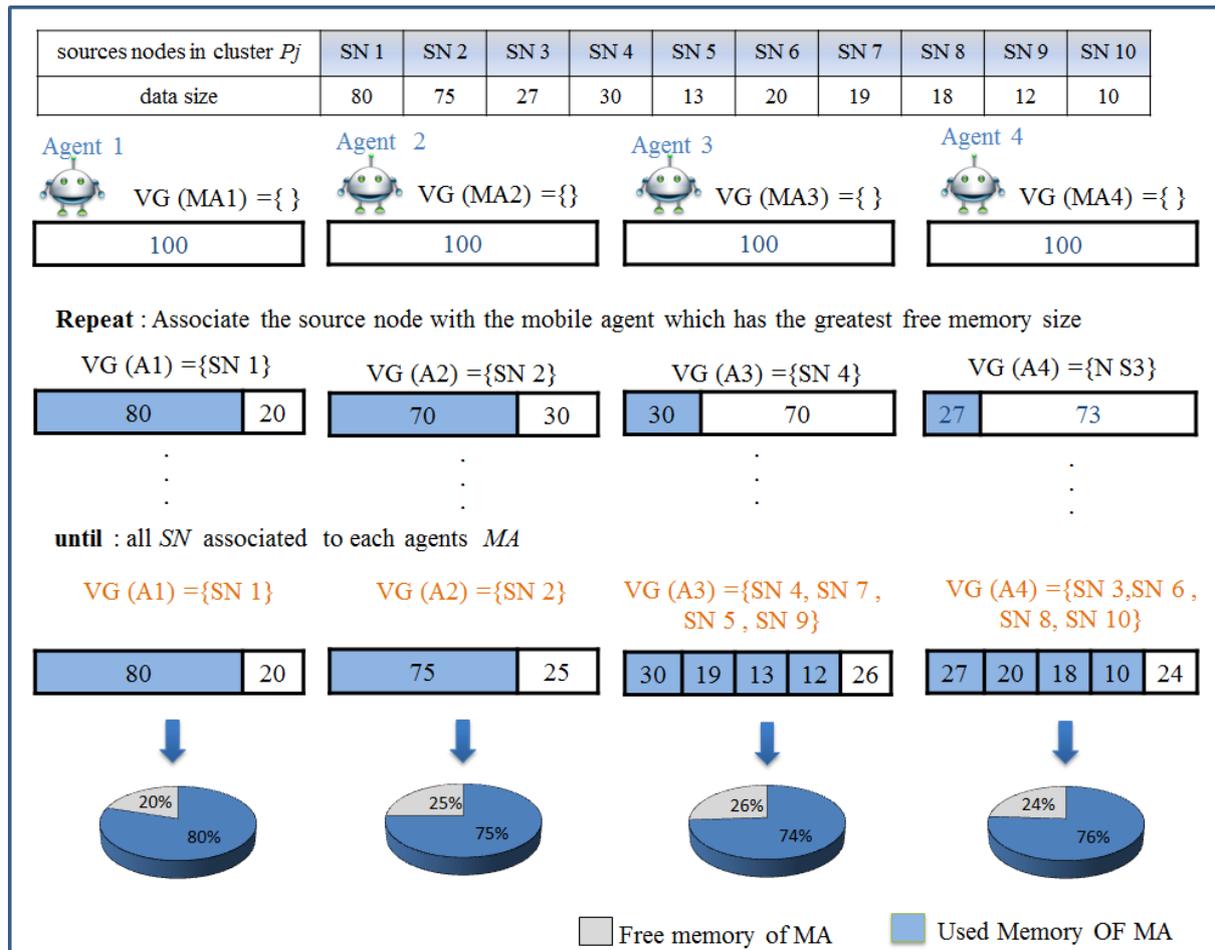


Figure IV. 5 L'exécution de la stratégie GDGM-MIP (un exemple démonstratif) [30].

IV.3 .3 .2 Détermination d'itinéraire

Cette tâche est chargée de déterminer l'ordre de nœuds (y compris les nœuds sources) à suivre par chaque agent mobile afin d'agrèger les données selon l'algorithme heuristique GRASP (Greedy randomized adaptive search procedure). Nous avons choisi cet algorithme en raison de ses performances en termes de temps de calcul réduit par rapport à d'autres méta-heuristiques et évidemment, pour la qualité du résultat final. Cet algorithme effectue deux étapes pour un nombre donné d'itérations [23]:

- **La première étape:** Construction d'une solution qui tente de construire un circuit selon l'algorithme semi-glouton.
- **La deuxième étape:** Recherche locale qui tente d'améliorer l'itinéraire construit dans la première étape par une recherche locale. L'itinéraire final sera la meilleure solution obtenue.

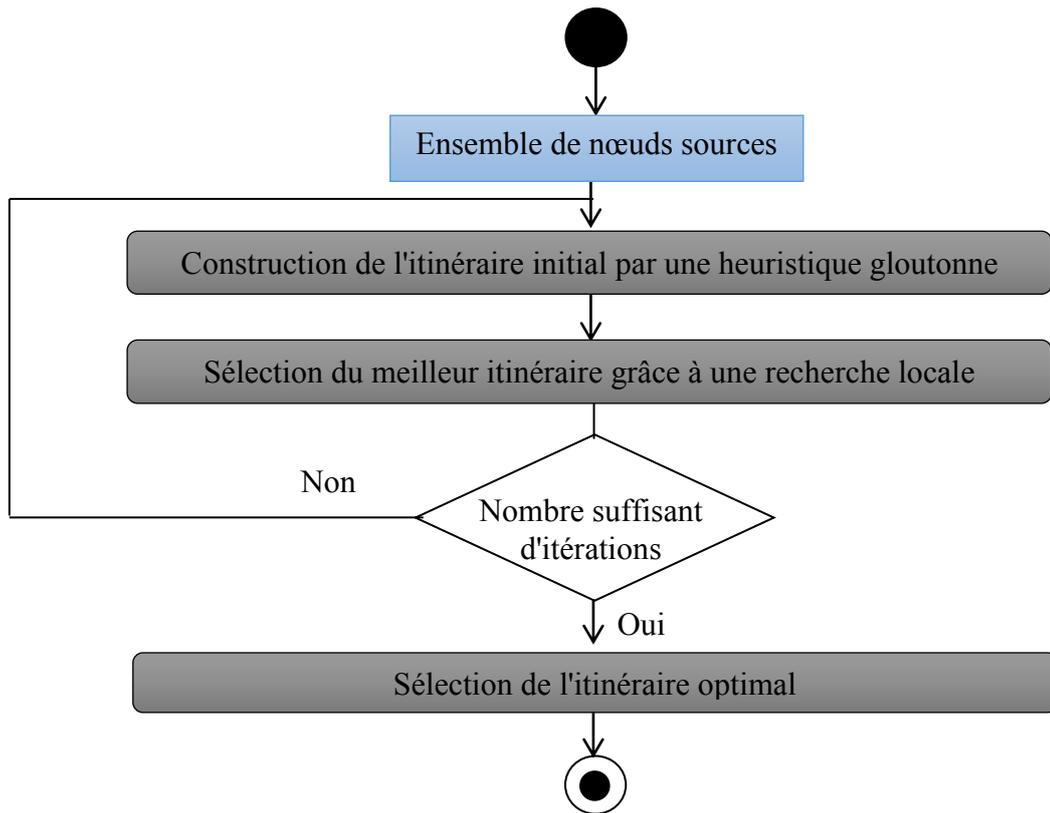


Figure IV. 6 Processus général de GRASP [23].

A. Etape de construction

Au cours de l'étape de construction un circuit est réalisé de manière itérative; où chaque itération ajoute un arc dans la solution partielle actuelle. Pour déterminer l'arc à ajouter, nous utilisons une liste des meilleurs candidats obtenus (RCL: Restricted Candidate List) avec une fonction glouton et on prendre un arc de manière aléatoire à partir de cette liste. Après cela, la liste RCL est mise à jour dynamiquement. Cette étape de la construction se poursuit jusqu'à l'obtention d'une solution complète.

La construction de la RCL est régi par un paramètre $\alpha \in [0, 1]$ qui contrôle la qualité et le nombre d'arc à inclure. Pour notre problème (problème de minimisation), RCL est construit comme suit:

$$RCL \leftarrow \{e \in C \mid c(e) \leq cMin + \alpha (cMax - cMin)\} \quad (11)$$

Où:

C: liste de tous les arcs possibles qui relient les nœuds d'un cluster P_j .

e: l'arc inclus.

$cMin, cMax$: le coût incrémental minimum et maximum de 'C'.

$c(e)$: le coût incrémental de l'arc 'e'.

Le pseudo code pour l'étape de construction est donnée ci-dessous :

Procédure GreedyRandomizedConstruction(α)

Solution $\leftarrow \phi$

$C \leftarrow E$

Evaluation du cout incrémental $c(e) \ e \in C$

Tant-Que $C \neq \phi$ **faire**

$CMin \leftarrow \min \{c(e), e \in C\}$

$CMax \leftarrow \max \{c(e), e \in C\}$

$RCL \leftarrow \{e \in C \mid c(e) \leq CMin + \alpha(CMax - CMin)\}$

 Sélection aléatoire de s depuis RCL

 Solution \leftarrow Solution $\cup \{s\}$

 Mise à jour de C

 Réévaluation du cout incrémental pour $e \in C$

Fin Tant-Que

Retourne Solution

Fin.

B. Etape de recherche locale

L'itinéraire construit par l'étape précédente n'est pas nécessairement optimale. En raison de cela, GRASP effectue une recherche locale sur l'itinéraire obtenu à l'étape précédente afin de l'améliorer. La recherche locale est effectuée de manière itérative; il remplacera la solution actuelle par une meilleure solution dans le voisinage à l'aide de la stratégie "First-improving", où on remplace l'itinéraire initial par le premier meilleur voisin qu'on trouve. L'algorithme s'arrête lorsqu'on ne trouve aucune meilleure solution.

Le pseudo code pour l'étape de la recherche locale est donnée ci-dessous :

Procédure RechercheLocal (Solution)

Tant-Que (Solution non optimal) **faire**

 Rechercher S' tq $f(S') \leq f(\text{Solution})$

 Solution $\leftarrow S'$

Fin Tant-Que

Retourne Solution

Fin RechercheLocal

Après cette étape on aura une solution localement optimale qu'on va comparer avec les solutions obtenues dans chaque itération, où chaque itération est indépendante des autres, et se déroule de la même façon. La solution finale sera la meilleure solution obtenue.

IV.4 Format de paquet d'agent mobile

L'information contenue dans le paquet d'agent mobile est séparé en trois parties, comme le montre la figure IV.7.

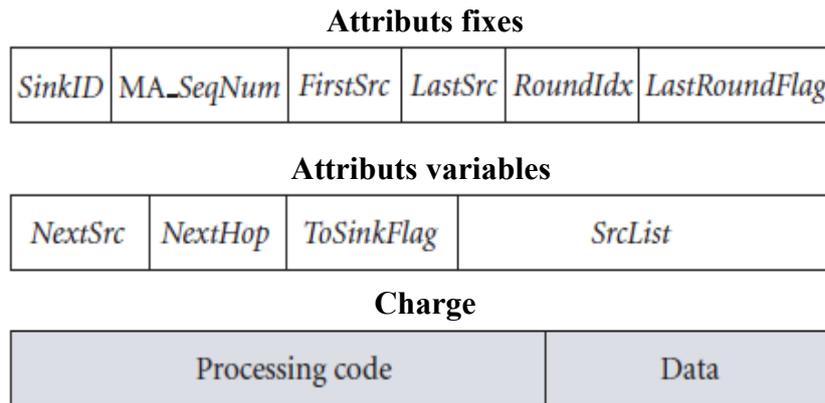


Figure IV. 7 Format de paquet d'agent mobile.

A. Attributs fixes :

Ces attributs représentent les paramètres permanentes dans le paquet, il se compose de :

Paire de *SinkID* et *MA_SeqNum* est utilisé pour identifier la station de base « sink » et le paquet d'agent mobile. À chaque fois que la station de base distribue un nouveau paquet d'AM, il va incrémenter le *MA_SeqNum*.

FirstSrc et *Last-Src* sont le premier et le dernier nœud source qui doit être visité par l'AM. Donc ils indiquent les points de début et du final d'agrégation des données par l'AM.

RoundIdx est l'indice du cycle actuel. La valeur est initialement fixée à '1' par la station de base dans le premier cycle.

LastRoundFlag indique que le cycle actuel est le dernier cycle en toutes les tâches. Quand un AM arrive au *LastRoundFlag*, le système annule le code de traitement de cet agent après son exécution.

B. Attributs variables

Quand un agent mobile migre, il peut changer quelque attributs tel que : *NextSrc*, *NextHop*, *SrcList* et *ToSinkFlag* qui indiquent la route dynamique de la migration de cet agent.

Puisque notre planification d'iteneraire est de type statique, dans ce cas nous fixons ses atributs.

NextSrc spécifie que la destination suivante de nœud source à être visité.

NextHop indique le nœud de saut suivant qui est un nœud intermédiaire ou un nœud source cible. Si *NextHop* est égal à *NextSrc*, cela signifie que le nœud de saut suivant est la destination source actuelle.

SrcList contient les identificateurs (IDs) de nœuds capteurs cible qui doivent encore être visités dans le cycle actuel. *SrcList* contient initialement tous les identifiants des nœuds sources quand un agent mobile est créé. L'ID correspondant à un nœud sources sera supprimé après la visite de ce nœud par l'AM.

ToSinkFlag indique que la destination de l'AM est la station de base après leur visite aux toutes les nœuds sources.

C. Charge

La charge comprend deux types de données. Le premier est : *ProcessingCode* qui est utilisé pour traiter les données détectées. Le deuxième est : *Data* qui porte les données après l'opération d'agrégation. *Data* est nulle quand un AM est généré, et il augmente lors de sa migration entre les nœuds sources.

IV.5 Fonctionnement générale

Le processus général de notre approche est décrit comme suit : Au niveau de sink on trouve trois processus (Diviseur Réseau, Planificateur_nb_Agent et Planificateur d'itinéraire) lancés par le processus principal, et au niveau des nœuds on trouve le processus « Collecteurs_données ». La figure ci-dessous montre la communication entre tous les acteurs pour atteindre la transmission de l'information.

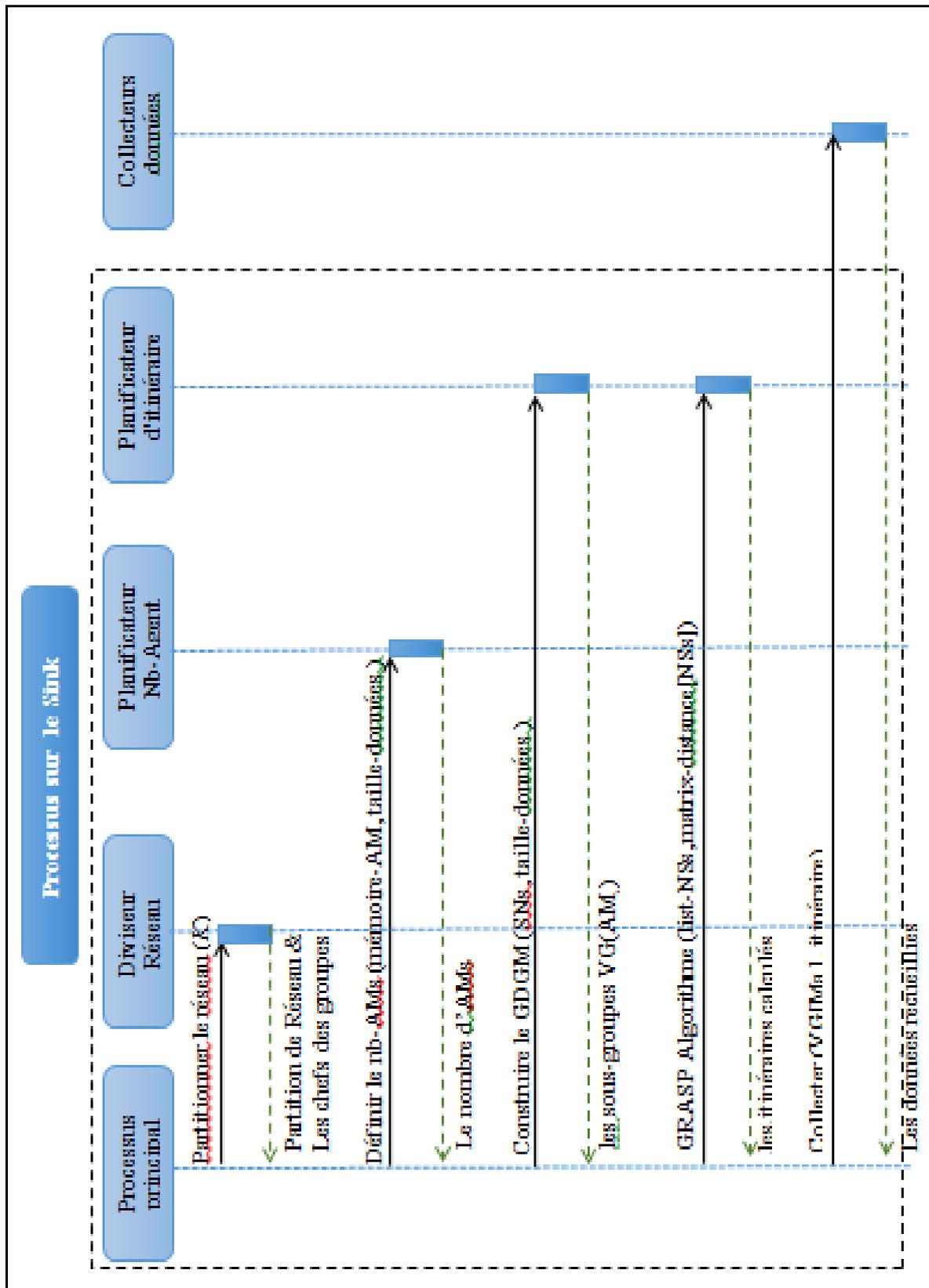


Figure IV. 8 Diagramme de séquence.

Le scénario au-dessus est exécuté comme suit:

- On lance le partitionnement du réseau importé par la station de base « Sink » à travers la méthode de k-means où les nœuds les plus proches sont regroupés ensembles et on détermine un nœud chef pour chaque partition.
- Une fois la station de base « Sink » reçoit la liste des nœuds sources avec leurs tailles des données importé par les chefs des partitions, on détermine le nombre des agents mobile nécessaire pour la récolte des données.
- Après la détermination du nombre des agents, on commence par la détermination des sous-groupes des nœuds source associées à chaque agent mobile par l'utilisation de la stratégie GDGM.
- Ensuite, avec l'algorithme heuristique GRASP on détermine l'ordre de visite de ces nœuds.
- Finalement, la station de base envoie les agents mobiles aux nœuds sources et lorsque toutes les données sont récoltées, le groupe d'agents mobiles revient à la station de base.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une analyse de la description et de la modélisation de notre système. Ce dernier consiste à développer une approche de planification d'itinéraire entre multiples agents mobiles. Celle-ci repose sur les deux facteurs de base qui influencent la consommation d'énergie: la distance géographique et la taille des données. Le chapitre suivant sera consacré essentiellement à l'implémentation du notre système.

Chapitre 5

Mise en œuvre et résultats

Table des matières

V.1 Introduction.....	77
V.2 Outil de simulation.....	78
V.3 Model de réseau	78
V.4 Model de capteur.....	79
V.5 Simulation et évaluation	80
V.5.1 Mesures de performance	80
V.5.2 Paramètres de simulation	81
V.5.3 Résultats et discussion	81
V.6 Conclusion	85

Chapitre 5

Mise en œuvre et résultats

Ce chapitre présente les résultats de simulations obtenus à partir de l'exécution du DD-MIP que nous avons mis en œuvre pour résoudre le problème de la planification d'itinéraire entre multiple agents mobiles, ainsi que son analyse et validation. De même, nous présentons les outils et les plateformes de développement utilisés à l'implémentation des différents composants du système.

V.1 Introduction

Pour évaluer la performance de notre proposition DD-MIP dans les réseaux de capteurs, nous mettons en œuvre notre technique «GDGM» pour déterminer le nombre d'agents mobiles et regrouper les nœuds sources. Par la suite, on applique l'algorithme GRASP (Greedy randomized adaptive search procedure) sur le problème pour identifier l'itinéraire qui doit être visités par chaque agent mobile. GRASP est un algorithme semi-stochastique de complexité réduite par rapport aux autres algorithmes heuristiques. Pour être en mesure de tirer des conclusions fiables sur la précision et la robustesse des algorithmes, plusieurs essais de diverses itérations sont effectuées dans chaque simulation. Un aperçu sur les tests de simulation est présenté.

L'impact de différents paramètres des modèles DD-MIP CL-MIP, GA-MIP, LCF et client /serveur est examiné. Par conséquent, les résultats généraux de chaque algorithme sont présentés. Les discussions sur les valeurs des résultats sont alors fournies.

V.2 Outil de simulation

Pour bâtir notre système, nous avons choisi OPNET modeler en vue de ses qualités de simplicité, de robustesse, de portabilité et de dynamisme, en plus il est maniable et facile à utiliser. OPNET modeler est un environnement qui nous permet de modéliser et de simuler des réseaux de communications grâce à ses bibliothèques de modèles (routeurs, commutateurs, stations de travail, serveurs ...) et de protocoles (TCP/IP, FTP, FDDI, Ethernet, ATM ...). Le module radio OPNET permet la simulation des réseaux de radiocommunication : hertzien, téléphonie cellulaire et satellitaire [22].

V.3 Model de réseau

Suite au modèle de référence du réseau de capteurs dans le domaine de MIP, les nœuds capteurs sont déployés de façon aléatoire dans un terrain de 1000 m × 500 m et la station de base « sink » se trouve au centre des nœuds (figure V.1). Pour vérifier la propriété d'échelle de notre algorithme, nous sélectionnons un réseau à grande échelle avec 800 nœuds capteurs et 80 nœuds sources.

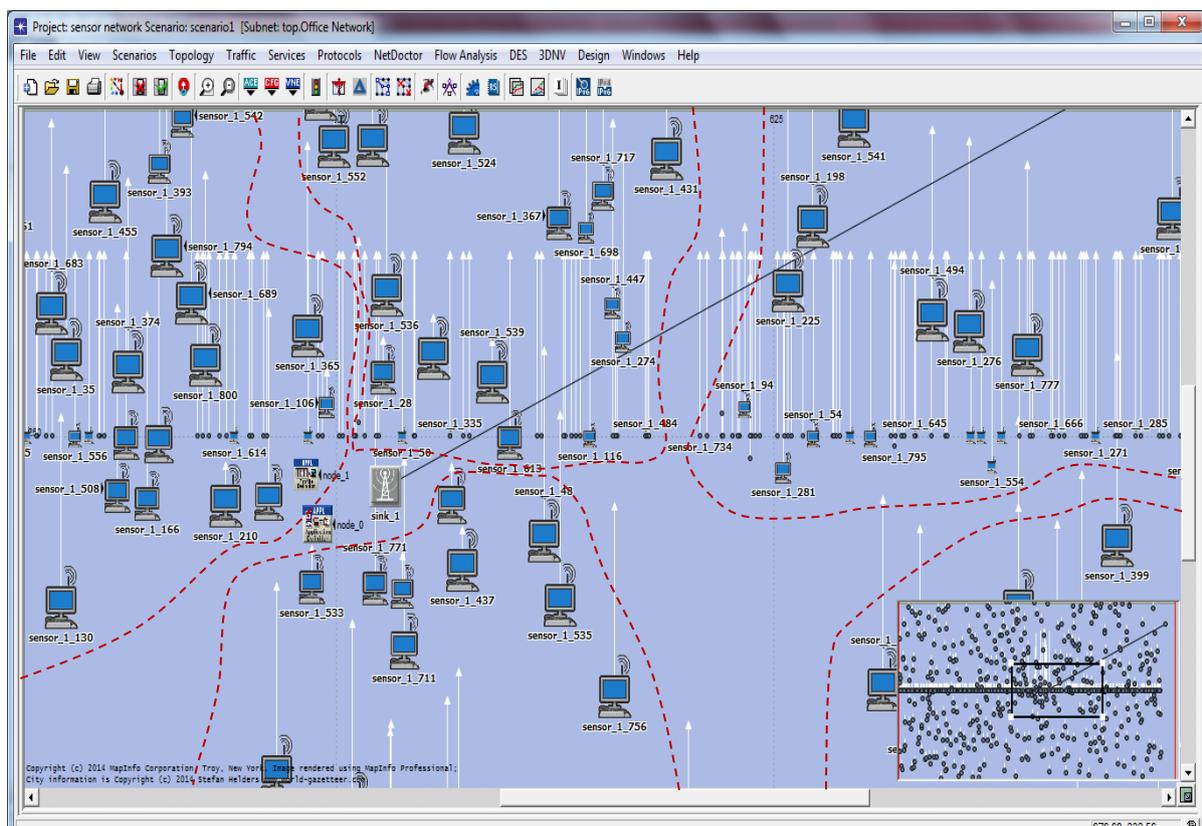


Figure V.1 Visualisation du réseau avec 5 groupes dans OPNET 14.5 modeler.

V.4 Model de capteur

Le modèle de simulation de nœud capteur implémenté dans notre étude est défini dans la norme IEEE 802.11b (standard WIFI). La structure des nœuds capteurs utilisés dans notre modèle de simulation est composée de cinq blocs fonctionnels:

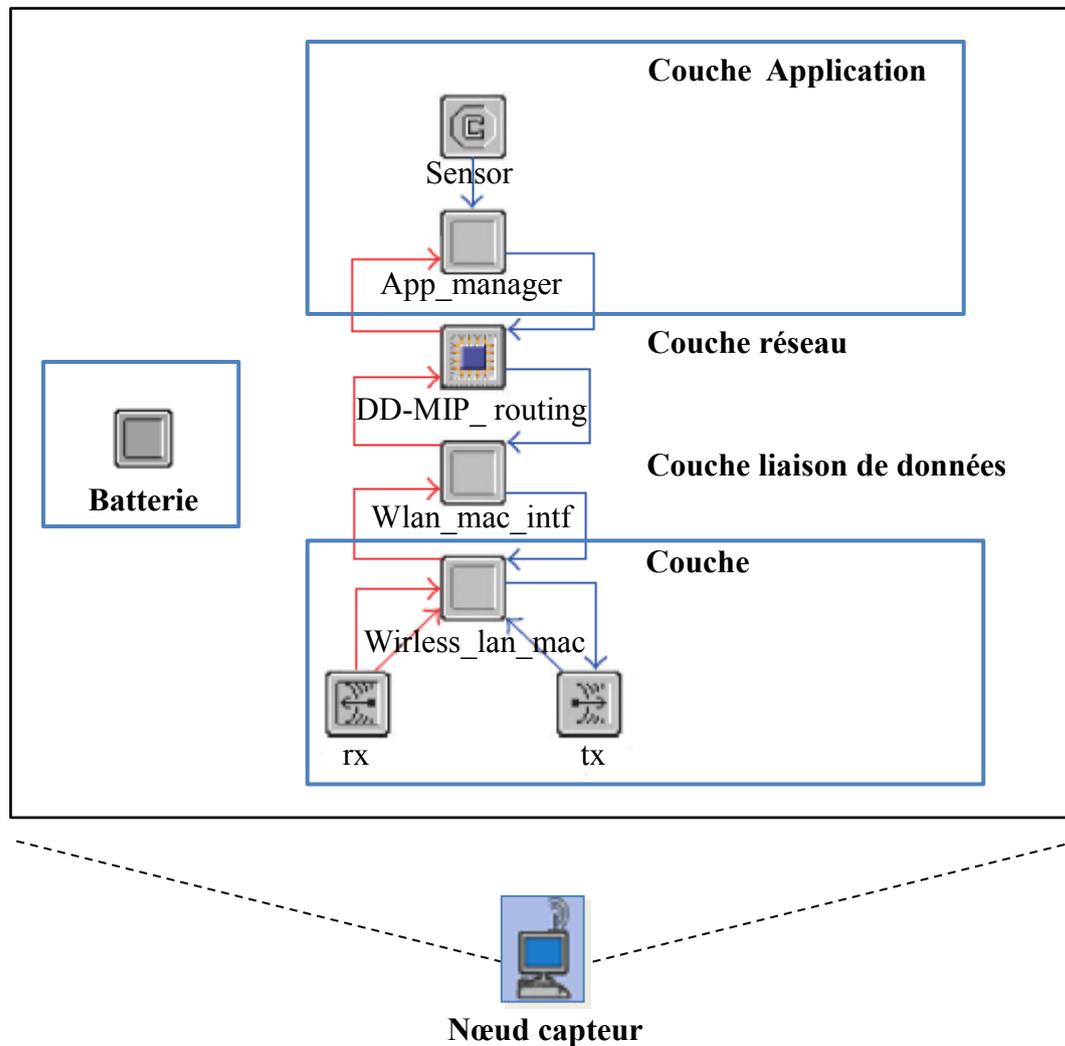


Figure V. 2 Structure du modèle de simulation de capteur.

- **Couche Application**

Elle constitue essentiellement de différents applications qui peuvent être implémentées par :

1. le module capteur (sensor): Chaque tâche nécessite la transmission périodique des paquets de données.
2. le module App_manger: destiné au traitement des applications de réseau.

- **Couche routage**

Elle permet de router les données selon l'algorithme DD-MIP.

- **Couche liaison de données**

Cette couche est également responsable de gérer les trames et d'établir les liaisons dans le réseau à l'aide de mise en œuvre de la norme IEEE802.11b.

- **Couche physique**

La couche physique se compose d'un émetteur sans fil de radio (tx) et de récepteur (rx) conforme à la spécification IEEE 802.11b.

- **Le module de batterie**

Responsable de calculer le niveau d'énergie consommée par le capteur. Chaque nœud commence avec la même valeur initiale d'énergie (4,500 W).

V.5 Simulation et évaluation

Afin de comparer la performance de notre solution DD-MIP avec les modèles CL-MIP, GA-MIP, LCF et client /serveur, nous effectuons des simulations dans OPNET Modeler 14.5 [22].

V.5.1 Mesures de performance

Afin d'évaluer notre proposition, nous définissons les mesures de performance suivantes :

1. ***Equilibrage de LA charge des données entre multiples agents mobiles:***

Cette mesure est essentielle pour la répartition équilibrée des données entre les agents. Elle a des influences significatives sur la durée de la tâche et la consommation d'énergie.

2. ***Longueur totale d'itinéraire:***

C'est la somme de tous les itinéraires adoptés par chacun des agents.

3. ***Coût de l'énergie:***

Cette mesure est indispensable pour prolongé la durées de vie de réseau. Le but est de minimiser la consommation d'énergie de sorte que l'itinéraire adopté par chaque agent soit le moins coûteux possible en termes d'énergie.

4. ***Durée de la tâche:***

La durée de la tache représente le temps occupé pour récolter toutes les données du réseau. Dans les approches MIP où plusieurs agents travaillent en parallèle, la durée de la tâche est le temps occupé par le dernier agent pour retourner à la station de base.

V.5.2 Paramètres de simulation

Les paramètres utilisés et leurs valeurs nominales sont présentés dans les tableaux [V.1, V.2, V.3 et V.4] ci-dessous. Ces tableaux inclure les paramètres indispensable pour le réseau, l'agent mobile, l'algorithme GRASP et l'approche GA-MIP.

PARAMÈTRES DE RÉSEAU	
La taille du réseau	1000 m x500m
Distribution des nœuds	Aléatoire
Plage de transmission radio	60 m
Nombre des nœuds capteurs	800
Nombre des nœuds sources	80/800
Taille des données Brutes	2048 bits

Tableau V. 1 Paramètre de simulation de réseau.

PARAMÈTRES DE L'AGENT MOBILE	
Taux de réduction des données	0.8
Taille de code de l'AM	1024 bits

Tableau V. 2 Paramètre de simulation pour l'agent mobile.

PARAMÈTRES DE l'algorithme GRASP	
Nombre des itérations	1500
Paramètre de contrôle de la qualité (α)	0.5

Tableau V. 3 Paramètre de simulation pour GRASP.

PARAMÈTRES DE l'algorithme génétique GA-MIP	
Nombre des itérations	1500
Probabilité de croisement	0.9
Probabilité de mutation	0.2

Tableau V. 4 Paramètre de simulation pour GA-MIP.

V.5.3 Résultats et discussion

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus à partir de l'exécuter des modèles DD-MIP, CL-MIP, GA-MIP, LCF et client /serveur. Ensuite, nous discutons et

analysons ces résultats acquis en comparant les différents aspects de ces modèles selon les mesures de performance au-dessus. À la fin, avec l'aide de ces discussions, nous abordons les réponses à nos questions de recherche.

V.5.3 .1 Equilibrage de la charge des données entre multiples agents mobiles

Figure V.3 détermine l'efficacité de l'algorithme DD-MIP sur le niveau d'équilibrage de la charge de données entre les agents mobiles. Les pourcentages des données collectées par chacun des trois agents sont distribués entre 17% et 20%. Ainsi, DD-MIP permet aux agents de recueillir une taille de données à peu près équivalente. Cela prouve que cette stratégie permet d'obtenir un équilibre de la charge de données entre les agents, contrairement aux autres modèles qui ne pourraient pas l'atteindre.

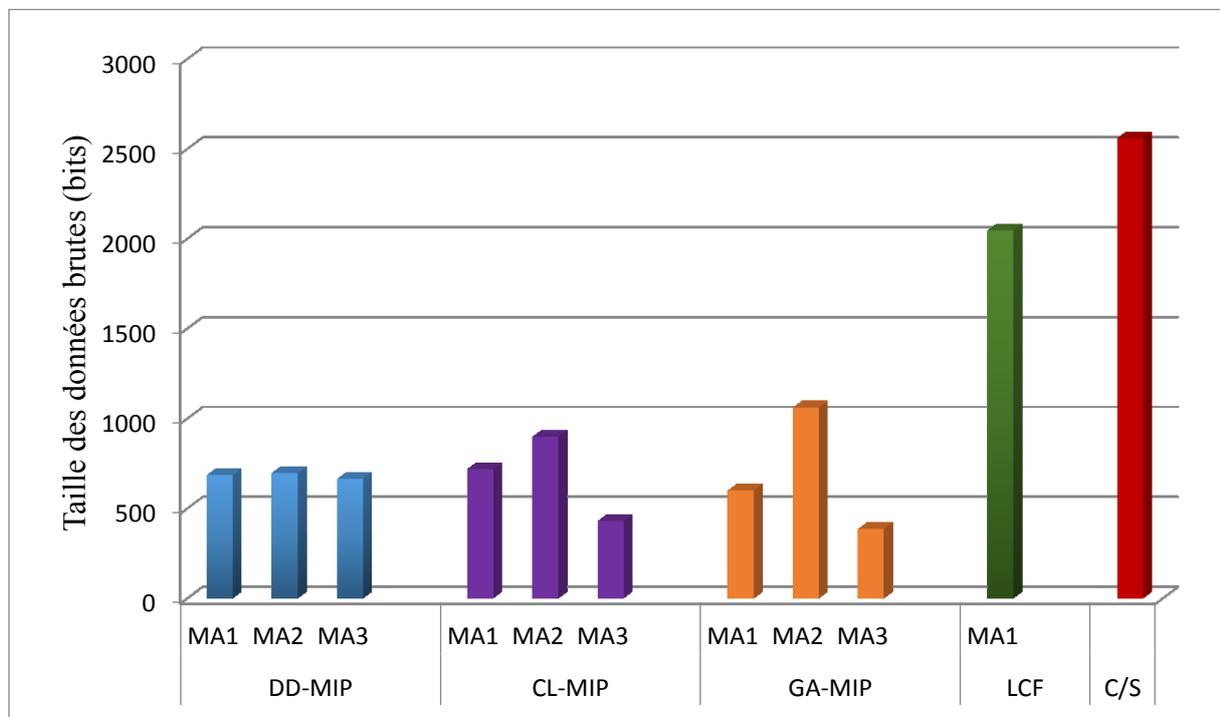


Figure V. 3 Equilibrage de charge des données entre 3 agents mobiles pour DD-MIP, CL-MIP, GA-MIP, LCF et Client / Serveur.

V.5.3 .2 Longueur totale d'itinéraire

Comme le montre la figure V.4, l'algorithme DD-MIP a un grand avantage par rapport au CL-MIP et LCF en termes de longueur totale d'itinéraire. En outre, les résultats obtenus sont très proche de GA-MIP qui est considéré comme l'un des meilleures solutions connues pour trouver l'itinéraire le plus court. Pour le modèle Client / Serveur la longueur totale d'itinéraire est considéré très élevés, parce que chaque capteur envoi ces données individuellement a ma station de base.

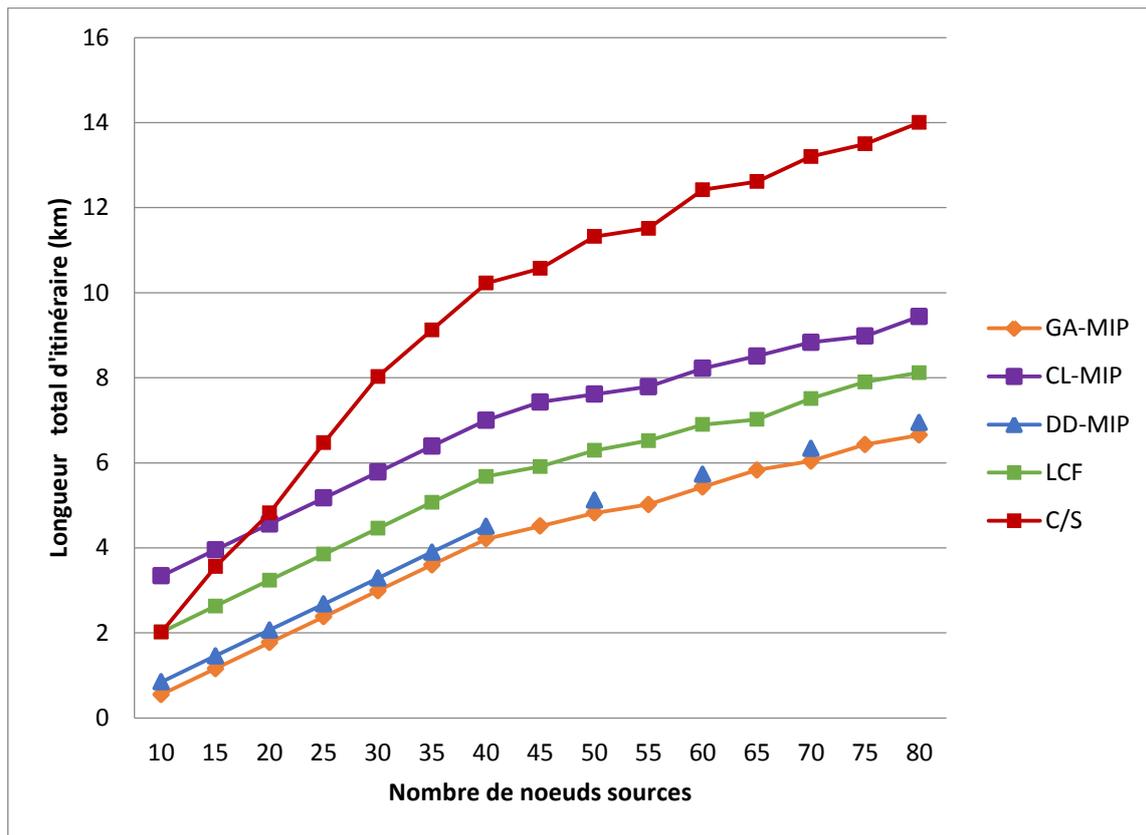


Figure V. 4 Longueur totale d'itinéraire pour DD-MIP, CL-MIP, GA-MIP, LCF et Client / Serveur.

V.5.3 .3 Coût de l'énergie

Dans la figure V.5, nous présentons les résultats de l'impact du nombre de nœuds sources sur le coût de l'énergie. Le DD-MIP consomme moins d'énergie que les autres modèles. La consommation d'énergie pour les modèles CL-MIP et LCF est plus proche de notre modèle DD-MIP. Cependant, la consommation d'énergie de l'algorithme GA-MIP est supérieure aux trois autres modèles, cela est dû à sa plus grande complexité de calcul. Pour le modèle Client / Serveur sa grande consommation d'énergie est dû au volume élevés des données puisqu'il ne procède pas à leurs fusion.

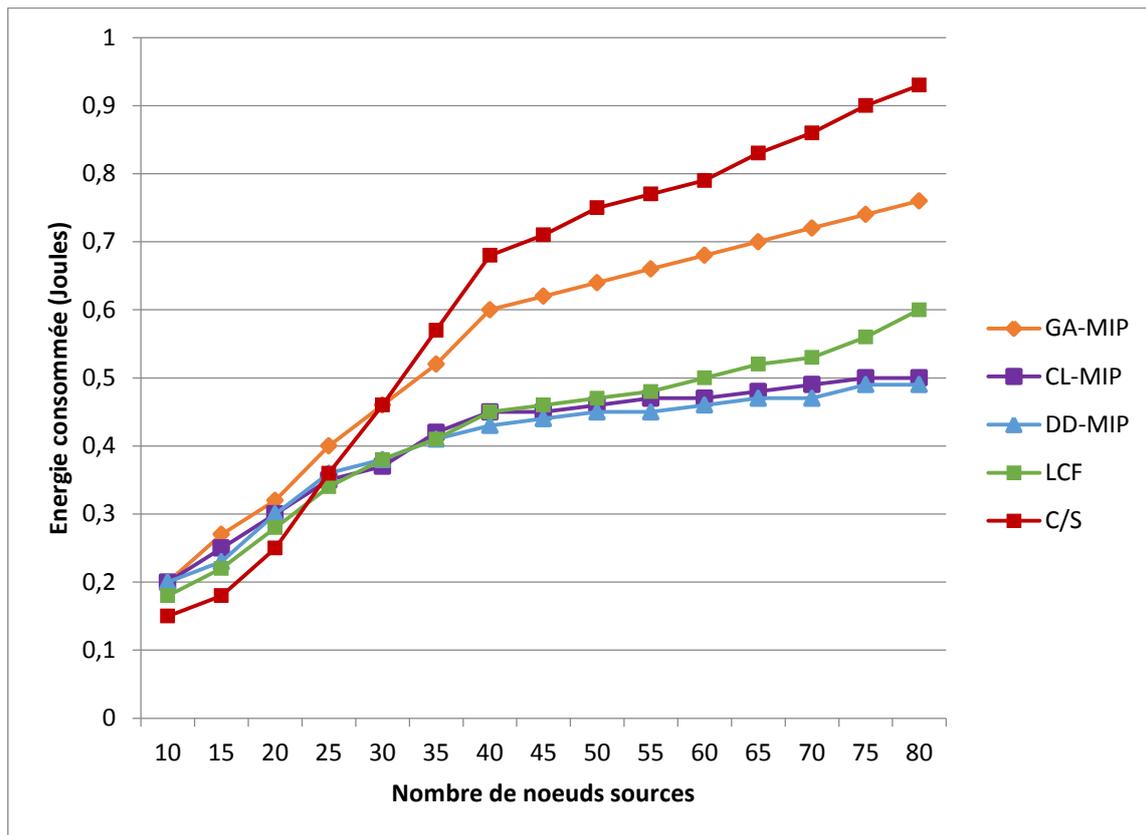


Figure V. 5 Impact de nombre de nœuds sources sur l'énergie consommée.

V.5.3 .4 Durée de la tâche

Concernant la durée de la tâche, la figure V.6 montre les résultats de l'impact du nombre de nœuds sources sur la durée de la tâche. Les résultats obtenus en utilisant l'algorithme DD-MIP sont très satisfaisant en termes de durée de la tâche. Ils sont proches de ceux de GA-MIP, CL-MIP et le modèle Client / Serveur. La raison derrière la performance de DD-MIP est dans la détermination des ensembles de nœuds sources en fonction de la distance géographique et la taille de données détectées afin de planifier l'itinéraire des agents. Par contre, les résultats sont distants de LCF qui prend plus de temps pour exécuter la tâche parce qu'il utilise un seul agent mobile qui circule dans tout le réseau.

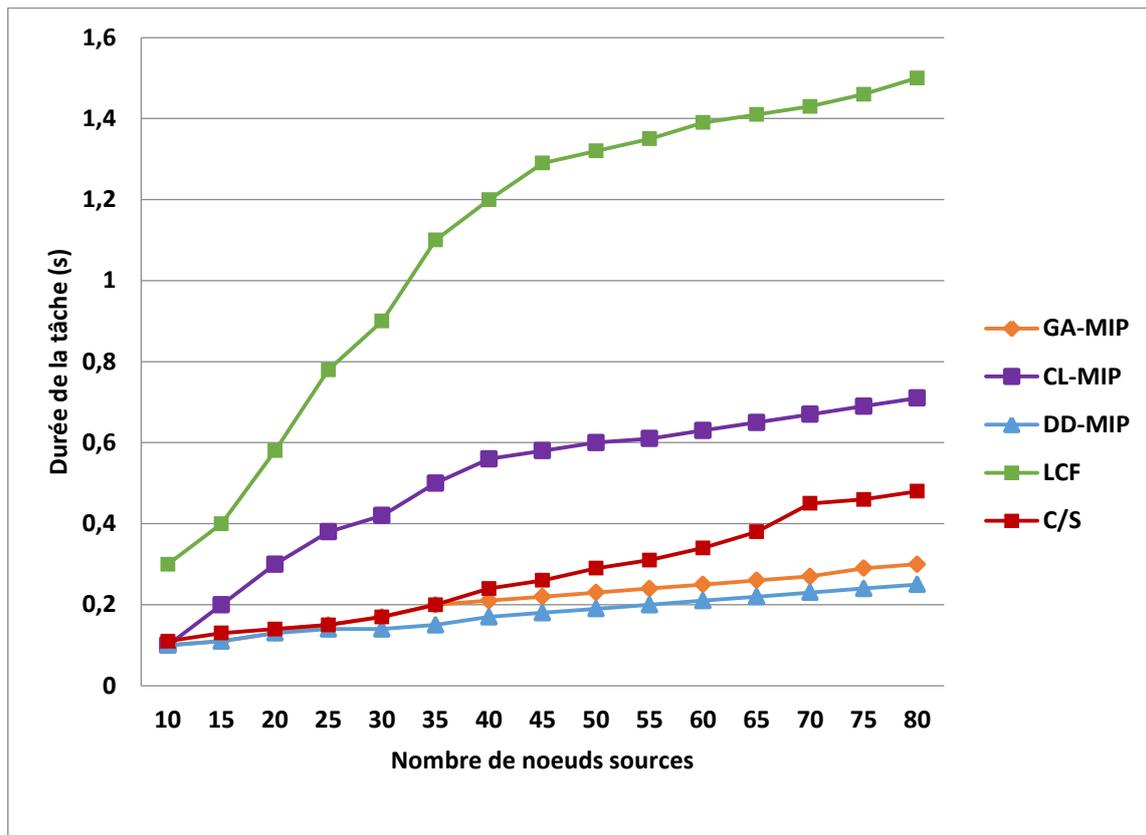


Figure V. Impact de nombre de nœuds sources sur la durée de la tâche.

V.6 Conclusion

Suite à notre partie conception présentée dans le chapitre 4 et la concrétisation de notre architecture, nous avons essayé de mettre en œuvre l'ensemble des idées qui caractérisent l'architecture proposée.

Par la suite, dans ce chapitre, nous avons exposé les résultats obtenus suite à nos recherches menées à ce jour. Par conséquent, Les résultats ont montré que la durée de la tâche a diminué de manière significative par rapport aux autres approches. En plus, le coût de l'énergie est en accord avec la réduction des problèmes associés à la technologie de réseau présentés dans le premier chapitre de cette thèse.

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

Table des matières

VI.1 Conclusion.....	86
VI.2 Limitations.....	87
VI.3 Futurs travaux.....	87

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

Ce chapitre passe en revue les objectifs de recherche de cette thèse et résume ses principaux résultats. A la fin, certaines remarques sur nos futurs travaux sont également présentées

VI.1 Conclusion

Dans notre étude, nous avons discuté le problème de planification d'itinéraire dans les réseaux de capteurs sans fil, en utilisant des multiples agents mobiles (problème de MIP). L'intérêt principal de cette recherche est établi sur deux points: i) améliorer la conservation de l'énergie et ii) réduire la durée de la tâche de collecte des données, en tenant compte des deux facteurs de base (distance géographique et taille des données) qui ont une grande influence sur la consommation d'énergie.

Dans le cadre de cette étude, nous avons proposé une nouvelle technique appelée DD-MIP (geographical **D**istance and **D**ata size based algorithm for **M**ultiple mobile agents **I**terinary **P**lanning). Le DD-MIP apporte des améliorations aux solutions de MIP actuels au niveau de partitionnement du réseau, de nombre d'agents mobiles et de construction d'itinéraire.

Dans l'étape de partitionnement du réseau, nous avons utilisé la méthode K-means, où le partitionnement se fait en fonction de la distance entre les nœuds capteurs (les nœuds les plus proches regroupés ensemble). Cette étape produit un ensemble de partitions; chaque partition peut recevoir plusieurs agents mobiles.

Dans l'étape de détermination de nombre d'agents mobiles, nous avons proposé une nouvelle stratégie afin de déterminer le nombre nécessaire d'agents mobiles pour chaque partition en fonction de la taille des données fournies par chacun des nœuds sources et de la distance géographique.

Concernant l'étape de la construction d'itinéraire, tout d'abord, nous avons produit la technique GDGM (**G**reatest **D**ata in the **G**reater **M**emory), ce qui permet de délimiter les

groupes de nœuds sources qui doivent être visités par chaque agent mobile en fonction de la taille des données fournies par ces nœuds. Ce principe prend en charge l'équilibrage entre les agents mobiles au niveau de la taille des données, ce qui optimise la durée de la tâche de collecte de données sur le réseau et aussi diminue le pourcentage de perte de ces données. Ensuite, nous avons identifié l'itinéraire pour chaque agent mobile selon l'algorithme heuristique GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure).

Les résultats de simulations ont prouvé l'efficacité de l'algorithme proposé DD-MIP en ce qui concerne la durée de la tâche et la quantité d'énergie consommée, pour résoudre le problème de MIP dans les réseaux de capteurs sans fil.

Le travail proposé dans cette thèse ouvre de nouveaux défis à l'avenir pour améliorer la robustesse de l'algorithme DD-MIP. Nous allons évaluer la performance de DD-MIP dans un réseau sans fil de réseaux de capteurs multimédias (WMSN), qui représente une taille de données plus élevée.

VI.2 Limitations

Les limites de cette recherche ainsi que des explications sur leur existence sont brièvement repris dans cette section. Deux principaux types de limitations sont évoqués :

- Les limites à l'analyse des nœuds mobiles.
- Les limitations à la manipulation des nœuds cachés.

VI.3 Futurs travaux

L'étude du réseau de capteurs à base d'agent mobile est un vaste domaine interdisciplinaire qui englobe localisation, sécurité, planification d'itinéraire et d'autres domaines. En tant que domaine de recherche actif, beaucoup de travail reste à faire, pour des problèmes dans le cadre de cette thèse, ainsi que ceux qui ne sont pas couverts. Nous identifions deux extensions significatives, correspondant à cette thèse.

- Les nœuds dans un RCSF fonctionnent généralement sans surveillance, donc ils sont vulnérables aux manipulations. Par conséquent, la capture d'un agent mobile par un adversaire est relativement facile et ses données recueillies peuvent alors être facilement récupérées. La recherche doit donc être dirigée vers des schémas à base d'agents mobiles avec un mécanisme de sécurité efficace et de faible complexité pour protéger les agents et leurs données transportées.

- Les réseaux de capteurs peuvent être menacés par déni de service (DoS : denial-of-service) (par exemple: brouillage, interférences ou épuisement des ressources) qui peut provoquer l'effondrement de l'ensemble du réseau. Les attaques par déni de service représentent une sérieuse préoccupation, en particulier dans les applications sensibles de RCSF (par exemple : surveillance d'un champ de bataille). Ainsi, un système de fusion de données à base d'agent mobile qui est capable de répondre aux attaques de déni de service sans perturber leurs tâches doit être dérivé.

Bibliographie

- [1] N. Meghanathan, “Grid Block Energy Based Data Gathering Algorithms for Wireless Sensor Networks”, *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, Vol. 2, No. 3, 2010.
- [2] M. Chen, S. Gonzalez, & V.C. Leung, “Applications and design issues for mobile agents in wireless sensor networks”, *IEEE Wireless Commun*, vol. 14, pp. 20–26, 2007.
- [3] M. Chen, T. Kwon, Y. Yuan, Y. Choi, & V. Leung, “MADD. Mobile agent-based directed diffusion in wireless sensor networks”, *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, doi:10.115/2007/36871, 2007.
- [4] Q. Wu, N.S.V. Rao, J. Barhen, & al, “On computing mobile agent routes for data fusion in distributed sensor networks”, *IEEE Trans. Knowl. Data Eng*, pp. 740–753, 2004.
- [5] X. Wang, M. Chen, T. Kwon, & H.C. Chao, “Multiple mobile agents’ itinerary planning in wireless sensor networks: survey and evaluation”, *IET Commun*, pp. 1769–1776, 2011.
- [6] M.Chen, S. Gonzlez, Y. Zhang, & V.C. Leung, “Multi-agent itinerary planning for sensor networks”, *Proc. IEEE Int. Conf. Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness, Las Palmas de Gran Canaria, Spain,2009*.
- [7] M. Chen, “Itinerary Planning for Energy-Efficient Agent Communications in Wireless Sensor Networks”, *Vehicular Technology, IEEE Transactions, Volume.60, Issue 7, 2011* .
- [8] W. Cai, M. Chen, T. Hara, L. Shu, “GA-MIP: genetic algorithm based multiple mobile agents itinerary planning in wireless sensor network”, *Proc. Fifth Int. Wireless Internet Conf. (WICON), Singapore, 2010*.
- [9] M. Chen, W. Cai, S. Gonzalez, & V.C. Leung, “Balanced itinerary planning for multiple mobile agents in wireless sensor networks”, *Proc. Second Int. Conf. Ad Hoc Networks (ADHOCNETS2010), Victoria, BC, Canada, 2010*.

- [10] D. Gavalas, A. Mpitziopoulos, G. Pantziou, & C. Konstantopoulos, “An approach for near-optimal distributed data fusion in wireless sensor networks”, Springer Wirel, pp. 1407–1425, 2009.
- [11] D. Gavalas, G. Pantziou, & C. Konstantopoulos, “New Techniques for Incremental Data Fusion in Distributed Sensor Networks”, In Proceedings of the 11th Panhellenic Conference on Informatics (PCI’2007), pp. 599–608, 2007.
- [12] H. Qi, F.Wang, “Optimal itinerary analysis for mobile agents in Ad Hoc wireless sensor networks”, Proc. IEEE 2001 Int. Conf. Communications (ICC 2001), Helsinki, Finland, 2001.
- [13] J.P. Nakache, J. Confais, “Approche pragmatique de la classification: arbres hiérarchiques, partitionnements”, Edition TECHNIP, ISBN 2-7108-0848-X Paris, 2005.
- [14] A. Mpitziopoulos, D. Gavalas, C. Konstantopoulos, G. Pantziou, “CBID: a scalable method for distributed data aggregation in WSNs”, Hindawi Int. J. Distrib. Sens. Netw, Article ID 206517, DOI: 10.1155/2010/206517, 2010.
- [15] A.N. Rani, L. Dole, “GA based optimal itinerary planning for multiple mobile agents in wireless sensor networks”, International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, Vol. 1, Issue 2, 2013.
- [16] Y. Xu, & H. Qi, “Mobile Agent Migration Modeling and Design for Target Tracking in Wireless Sensor Networks”, Ad Hoc Networks, vol. 6, pp. 1–16, 2008.
- [17] A. Sardouk, L. Merghem-Boulahia, & D. Gaïti, “Agent-Cooperation Based Communication Architecture for Wireless Sensor Networks”, The 1st IFIP wireless days conference, IEEE, 978-1-4244-2829, 2008.
- [18] C. Konstantopoulos, A. Mpitziopoulos, D. Gavalas, G. Pantziou, “Effective determination of mobile agent itineraries for data aggregation on sensor networks”, IEEE Trans. Knowl. Data Eng, pp. 1679–1693, 2010.

- [19] M. Chen, S. Gonzalez, V. Leung, “Directional source grouping for multi-agent itinerary planning in wireless sensor networks”, Proc. Int. Conf. ICT Convergence (ICTC), Jeju Island, Korea, 2010.
- [20] M. Dong, K. Ota, M. Lin, Z. Tang, S. Du, H. Zhu, “UAV-assisted data gathering in wireless sensor networks”, Springer Science+Business Media New York, DOI: 10.1007/s11227-014-1161-6,2014.
- [21] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Micro sensor Networks”, In proc of the Hawaii International Conference on Systems Science, vol. 8, pp. 8020, January 2000.
- [22] <http://www.opnet.com>.
- [23] T.A. FEO, M.G.C. RESENDE, “A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem”, Operations Research Letters 8 : 67-71, 1989.
- [24] S. Ziane and A. Mellouk. “A swarm intelligent scheme for routing in mobile ad networks”. Systems Communications, IEEE, Aug 2005.
- [25] Paolo Santi. “Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks”, Hardcover, july 2005.
- [26] S. Kumar, D. Shepherd, and F. Zhao. “Collaborative signal and information processing in micro-sensor networks”. IEEE Signal Processing Magazine, March 2002.
- [27] S.Narayanaswamy, V. Kawadia, R.S. Sreenivas, and P.R. Kumar. “Power control in ad-hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the Compowprotocol”, European Wireless Conference, 2006.
- [28] H. Namgoog, D. Lee, and D. Nam. “Energy efficient topology for wireless microsensor networks”. ACM, PE-WASUN, October 2005.
- [29] W.Ye, J.Heidemann, and D. Estrin. “Medium access controle with coordinated adaptative sleeping for wireless sensor networks”. IEEE/ACM trans.Netw, vol. 12, no.3, pp 493-506, Jun 2004.

- [30] A.Imene, K.Okba, K.Laid, S.Sylvie, “A new Itinerary Planning Approach Among Multiple Mobile Agents in Wireless Sensor Networks (WSN) to Reduce Energy Consumption”, International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS), Vol. 7, No. 2, pp.116-122 August 2015.
- [31]I. Akyildiz, W. Su, E. Cayirci, Y. Sankarasubramaniam. “A survey on sensor networks”, IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA. Août 2002.
- [32] M. Badet, W. Bonneau. “Mise en place d’une plateforme de test et d’expérimentation”, Projet de Master Technologie de l’Internet 1ere année, Université Pau et des pays de l’Adour. 2006.
- [33] M. Ilyas and I. Mahgoub. “Handbook of sensor networks Compact wireless and wired Sensing Systems”, ISBN 08493196864. CRC PRESS LLS, USA, 2005.
- [34]Chérif DIALLO, “Techniques d’amélioration du routage et de la formation des clusters multi-sauts dans les réseaux de capteurs sans fil”, thèse de doctorat, Ecole Doctorale EDITE, septembre 2010.
- [35]R. Kacimi, R. Dhaou, A.-L. Beylot, A. Delye de Mazieux, V. Gauthier, M. Marot, J. Vaudour, and M Becker, “Etat de l’art sur les réseaux de capteurs sans”, In Livrable Projet CAPTEURS, SP1, V1.2, IRIT-ENSEEIH et INT, Rapport de recherche INT n_05001 RST, 2006.
- [36] R. Kacimi, “Techniques de conservation d’énergie pour les réseaux de capteurs sans”, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, septembre 2009.
- [37] <http://www.businessweek.com/datedtoc/1999/9935.htm>.21 ideas for the 21st century.
- [38] M. Younis and T. Nadeem. “Energy efficient MAC protocols for wireless sensor networks”, Technical report, university of Mryland baltimre County, USA, 2004.

- [39] Clément SAAD, “Quelques contributions dans les réseaux de capteurs sans fil : Localisation et Routage”, thèse de doctorat de École Doctorale 166 « I2S Mathématiques et Informatique» Laboratoire d’Informatique (EA 4128), Année 2009.
- [40] A. Perrig, R. Szewczyk, J. D. Tygar, V. Wen, and D. E. Culler, “Spins : Security Protocols for Sensor Networks”, *Wirel. Netw.* 8 (2002), no. 5, 521–534.
- [41] C. Intanagonwiwat and R. Govindan and D. Estrin, “Directed Diffusion : a Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks”, *ACM MobiCom 2000*, Boston, MA (2000).
- [42] F. Ye et al., “A Scalable Solution to Minimum Cost Forwarding in Large Sensor Networks”, *10th Int. Conf. Comp. Commun. and Networks* (2001), 304–309.
- [43] D. Braginsky and D. Estrin, “Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks”, *1st Workshop. Sensor Networks and Apps.*, Atlanta, GA (2002).
- [44] Akyildiz I. F. Su W., Sankarasubramaniam Y. et Cayirci E. “Wireless sensor networks: a survey”, *Computer Networks*. Vol. 38(4). - pp. 393-422, 2002.
- [45] K. OKBA, “UN SYSTEME MULTI-AGENTS POUR L’E.I.A.O ”, *Courrier du Savoir – N°02*, Juin 2002, pp. 67-78.
- [46] Brustoloni, J. C. (1991) “Autonomous agents: characterisation and requirements”, *Carnegie Mellon Technical Report CMU-CS-91-204*, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- [47] Smith, D. C., Cypher, A. and Spohrer, J. “Kidsim: programming agents without a programming language”, *Communications of the ACM*, Vol. 37, No. 7, pp. 54–67, (1994).
- [48] Maes, P. “Agents that reduce work and information overload”, *Communications of the ACM*, Vol. 37, No. 7, pp. 30-40,(1994).

- [49] <http://www.networking.ibm.com/wbi/wbisoft.htm>
- [50] Sara BOUCHENAK. “Mobilité et Persistance des Applications dans l’Environnement Java”, thèse de doctorat de l’institut national polytechnique de Grenoble 19 octobre 2001.
- [51] Dag Johansen, Fred B. Schneider, and Robbert van Renesse, “Operating system support for mobile agents”. Edition Wesley, 1998.
- [52] Robert S. Gray, George Cybenko, David Kotz, Ronald A. Peterson and Daniela Rus. “D’Agents: Applications and Performance of a Mobile-Agent System”, 28November, 2001.
- [53] Mostefa BENDJIMA et Mohamed FEHAM, “Multi Mobile Agent Itinerary for Wireless Sensor Networks ” IJETTCS Vol. 1, Issue 1, May-June 2012.
- [54] Y. Tseng et al., “Location Tracking in a Wireless Sensor Network by Mobile Agents and Its Data Fusion Strategies” *Comp. J.*, vol. 47, no. 4, July 2004, pp. 448–60.
- [55] Y. Xu et H. Qi, “Mobile Agent Migration Modeling and Design for Target Tracking in Wireless Sensor Networks” *Ad Hoc Networks*, vol. 6, no. 1, Jan. 2007, pp. 1–16.
- [56] Cesare Alippi, Giuseppe Anastasi, Cristian Galperti, Francesca Mancini, and Manuel Roveri, “Adaptive sampling for energy conservation in wireless sensor networks for snow monitoring applications”, In Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS'07), pages 1_6, Pisa, Italy, October 2007.
- [57] Giuseppe Anastasi, Eleonora Borgia, Marco Conti, Enrico Gregori, and Andrea Passarella, “Understanding the real behavior of mote and 802.11 ad hoc networks: An experimental approach”, *Pervasive and Mobile Computing*, pp. 237_256, 2005.
- [58] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco, and Andrea Passarella, “Energy conservation in wireless sensor networks : A survey. *Ad Hoc Networks*”, pp.537_568, 2009.

- [59] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Andrea Passarella, and Luciana Pelusi, “Mobile-relay forwarding in opportunistic networks”, In M. Ibnkahla, editor, *Adaptation and Cross Layer Design in Wireless Networks*. CRC Press, New York, USA, 2008.
- [60] Glenn O. Allgood, Wayne W. Manges, and Stephen F. Smith, “It's time for sensors to go wireless”, *Sensors Magazine*, April 1999.
- [61] Jaap C. Haartsen. “The bluetooth radio system”, *IEEE Personal Communications*, pp. 28_36, February 2000.
- [62] Zigbee Alliance, “ Zigbee Speci_cations”, April 2005.
- [63] J. Norair, “Introduction to dash7 technologies”, *Dash7Alliance Low Power RF Technical Overview*, 2009.
- [64] Francis Van Aeken, “Les systèmes multi-agents minimaux- Un Modèle Adapté à l'Etude de la Dynamique Organisationnelle dans les Systèmes Multi-Agents Ouverts”, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 30 mars 1999.
- [65] Joan Ametller, Sergi Robles, and Joan Borrell. “Agent migration over FIPA ACL messages”, In *MATA*, pages 210–219, 2003.
- [66] Fabio Bellifemine, Agostino Poggi, and Giovanni Rimassa, “JADE —A FIPA compliant agent framework”, In *Proceedings of the 4th International Conference on the Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAM-99)*, pages 97–108, London, UK, 1999.
- [67] Robert S. Gray, George Cybenko, David Kotz, Ronald A. Peterson, and Daniela Rus, “D'agents : Applications and performance of a mobile-agent system”, *Softw., Pract. Exper.*, pp.543–573, 2002.
- [68] Guy Bernard, “Technologie du code mobile : état de l'art et persepective”, In *Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles (CFIP'99)*, Nancy, France, Avril 1999.

- [69] S. Campadello, H. Helin, O. Koskimies, P. Misikangas, M. Mäkelä, and K. Raatikainen, “Using mobile and intelligent agents to support nomadic users”. In Proceedings of the 6th International Conference on Intelligence in Networks (ICIN2000), pp.199–204, Bordeaux, France, January 2000.
- [70] R. S. Gray, G. Cybenko, D. Kotz, and D. Rus, “Mobile agents : Motivations and State of the Art”, AAAI/MIT-Press, 2001.
- [71] David Chess, Colin Harrison, and Aaron Kershenbaum, “Mobile Agents : Are They a Good Idea ? ”, Technical Report RC 19887, IBM Research Division, T.J. Watson Research Center, 1994.
- [72] Christophe Cubat et Dit Cros, “Agents Mobiles Coopérants pour les Environnements Dynamiques”, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse ,2 décembre 2005.
- [73] Akyildiz, I.F., W.Su, Y.Sankarasubramaniam, E.Cayirci, “ A Survey on sensor Network”, IEEE Communications Magazine, August, 102-114 (2002).
- [74] Gérard CHALHOUB, “Les réseaux de capteurs sans fil”, thèse de doctorat, Institut d’Informatique, de Modélisation et des Applications (ISIM), 2009.
- [75] W.B. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “Energy-efficient communication protocol for wireless micro sensor networks”, In 33rd annual Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS, pages 3005_ 3014, 2000.
- [76] Malek RAHOUAL, Patrick SIARRY, « Réseaux informatiques : conception et optimisation », Edition TECHNIP, ISBN 10 : 2-7108-0877-3X Paris, 2006.
- [77] Cedric BEAUSSE, Mohamed BOUGUERRA, Hong Yu GUAN, El Ayachi MOKTAD, “Réalisation d’un réseau de capteurs de température sans fil basé sur le protocole ZigBee”, Projet avancé en systèmes embarqués, Ecole Nationale Supérieur d’Electronique, Informatique & Radio communications de de bordeaux (ENSEIRC), 2006/2007.

- [78] XUE Yong, GONZALEZ Andres AGUILAR Andres, BARROUX Mickaël, “Agrégation de données dans les réseaux de capteurs”, Rapport final de Projet SR04, Université de technologie Compiègne, 2010.
- [79] Julien FAYOLLE, “Compression de données sans perte et combinatoire analytique”, thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2006.
- [80] Curt Schurgers, Vlasios Tsiatsis, and Mani B, “Srivastava. STEM: Topology management for energy efficient sensor networks”, IEEE Aerospace Conference, volume 3, pages 7889, Big Sky, Montana, USA, 2002.
- [81] A. Manjeshwar and D. P. Agarwal. “Apteen : A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks”, Parallel and distributed processing Symposium. Proceedings International, IPDPS, pp. 195-202, 2002.
- [82] Min Chen, Taekyoung Kwon, Yong Yuan, and Victor C.M. Leung, “ Mobile Agent Based Wireless Sensor Networks”, JOURNAL OF COMPUTERS, VOL. 1, NO. 1, APRIL 2006.