MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ FARHAT ABBAS –SÉTIF- (UFAS) ALGÉRIE

MÉMOIRE

Présenté à la faculté des Sciences de l'ingénieur
Département d'Informatique
Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

École Doctorale

de **S**ciences et **T**echnologies de l'**I**nformation et de la **C**ommunication
Option: **I**ngénierie des **S**ystèmes **I**nformatiques

Par

M. Raouf Ouanis Lakehal-Ayat

THÈME:

Approche pour la modélisation des réseaux de capteurs sans-fil à travers les systèmes multi-agents

Soutenu le: ..... Devant la commission d'examen:

M. Abdallah Boukerram, MC, UFAS	Président
M. Abdallah Khababa, MC, UFAS	Rapporteur
M. Abdelouahab Moussaoui, MC, UFAS	Examinateur
M. Mohamed Touahria, MC, UFAS	Examinateur

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة فرحات عباس -سطيف- الجزائر
UNIVERSITÉ FARHAT ABBAS -SÉTIF (UFAS)- ALGÉRIE

كلية علوم المهندس
Faculté des Sciences de l'ingénieur
قسم الإعلام الآلي
Département d'informatique

مدرسة الدكتوراه في الإعلام الآلي تخصص أنظمة معلوماتية
École Doctorale
Des Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication
Option : Ingénierie des Systèmes Informatiques

مذكرة تخرج لنيل شهادة ماجستير في الإعلام الآلي

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MAGISTER EN INFORMATIQUE

THÈME:

Approche pour la modélisation des réseaux de capteurs sans-fil à travers les systèmes multi-agents

Présenté par
Raouf Ouanis Lakehal-Ayat

Année universitaire 2009-2010 السنة الجامعية

DÉDICACES

Á mes chers parents
Á ma femme bien aimée
Á mes frères : Mounir Nazim & Mehdi
Á toute ma famille
Á tous mes amis

Mais aussi !!

Aux martyres qui se sont sacrifiés pour ce pays
Aux membres de l'équipe d'Algérie de football qui nous ont apporté tant de bonheur

Raouf Ouanis Lakehal-Ayat

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans la volonté de DIEU qui m'a offert santé, force, courage et volonté jusqu'au dernier moment. Je te remercie DIEU pour ça et pour tout le reste.

Je tiens aussi à remercier :

- M. Abdallah Khababa, non seulement pour avoir accepté de m'encadrer et ainsi me faire profiter de ses connaissances, mais aussi pour sa patience et pour la totale confiance qu'il m'a accordée.
- Messieurs le président et les membres du jury, d'avoir bien voulu me faire l'honneur de juger mon travail.
- Enfin, mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à l'accomplissement de ce très modeste travail, à leur tête M. Abdelhakim.

RÉSUMÉ

"Dans ce mémoire nous décrivons comment et pourquoi les technologies des systèmes multi agent ont été utilisées dans les réseaux de capteurs sans fil (RdC s-f) en mettant l'accent sur les avantages de cette utilisation. Dans la réalité, les réseaux de capteurs sont souvent confrontés à des problèmes de gestion des ressources à cause du compromis: taille du nœud/autonomie qui constitue un véritable dilemme pour les concepteurs. Le défi consiste à optimiser le fonctionnement du réseau avec des nœuds de la taille d'une grosse pièce de monnaie. Les technologies systèmes multi-agent (SMA) aident les concepteurs à prendre des décisions dans ce sens. Nous passons en revue les principales caractéristiques des deux technologies précitées et des protocoles spécifiques aux RdC s-f. Nous proposons enfin, une approche pour la conception d'un système de réseau de capteurs sans fil en se basant sur le modèle agent"

Mots clés : *réseaux de capteurs sans fil, Systèmes multi-agent, SMA, modélisation des systèmes.*

ABSTRACT

"In this thesis we describe how and why the technologies of multi-agent systems have been used in wireless sensor networks with emphasis on the benefits of such use. In reality, sensor networks are often faced with resource management problems because of the compromise: (size of the node / autonomy) which is a real dilemma for the designers. The challenge is to optimize the operation of the network with nodes whose size does not exceed that of one coin. Multi-agent technology helps designers to make decisions in this direction. We review the main characteristics of the two above-mentioned technologies and protocols specific to wireless sensor networks (WSN). Finally, we propose an approach for designing a wireless sensor network system based on the agent model."

Keywords: *Agents, multi-agent, wireless sensor networks (WSN), Modeling systems***.**

ملـــــخـــص

"نقوم من خلال هذه المذكرة بمناقشة الدوافع التي شجعت الباحثين على إدماج تقنيات مايعرف بـ: الأنظمة المتعددة الوكلاء (MAS) في سبيل تطوير و تحسين استغلال الشبكات المعلوماتية اللاسلكية الخاصة بعمليات التحسس و الإستشعار (WSN)، و نظرا لحداثة هذا التوجه التكنولوجي، فقد تم إحصاء توجهات متعددة و مختلفة فيما بينها في هذا المجال نحاول ذكر بعضها و تصنيفها حسب الإختصاص، لكن الملاحظة البارزة هي كونها تصب جميعها في اتجاه واحد يمكن اختصاره في كلمتين: إقتصاد الطاقة. بما أن الحجم الضئيل جدا لوحدات الإستشعار التي تتوزع داخل الشبكة (قد لايتعدى حجم البعض منها قطعة نقد صغيرة) لا يسمح بتجهيزها بمولدات طاقة ذات سعة كبيرة، و من هنا تبرز أهمية الحفاظ على الطاقة. كخاتمة للموضوع، نحاول رسم الخطوط العريضة لما يمكن أن يكون مستقبلا برنامجا لمحاكاة شبكات الإستشعار اللاسلكية باستعمال الأنظمة المتعددة الوكلاء"

الكلمات المفتاحية: الأنظمة المتعددة الوكلاء، شبكات الإستشعار اللاسلكية باستعمال، تصميم الأنظمة المعلوماتية.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale 12

C h a p i t r e 1 : Notions de base sur les réseaux de capteurs sans fil..... 15

1.1 Introduction..... 15

1.2 Les réseaux sans fil..... 16

1.2.1 L'avenir des réseaux sans fil..... 17

1.3 Les types de réseaux sans fil..... 18

1.3.1 Réseaux WPAN..... 18

13.2 Réseaux WLAN..... 19

1.3.3 Réseaux WMAN..... 19

1.3.4 Réseaux WWAN..... 20

1.3.5 Réseaux sans fil avec infrastructures..... 21

1.3.6 Réseaux sans fil sans infrastructures (Ad-Hoc)..... 21

1.3.6.1 Définition..... 21

1.3.6.2 Caractéristiques et contraintes des Réseaux Ad-Hoc 22

1.4 Les réseaux de capteurs sans fil..... 24

1.4.1 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil..... 25

1.4.2 Comparaison entre les réseaux de capteurs sans fil et Ad-Hoc..... 26

1.4.3 Architecture d'un capteur..... 29

1.4.4 Les deux grandes catégories des réseaux de capteurs sans-fil..... 30

1.4.5 Les couches protocolaires d'un réseau de capteurs sans-fil..... 30

a. Couche physique..... 31

b. Couche liaison de données..... 32

c. Couche réseau..... 34

d. Couche transport..... 34

e. Couche application..... 35

f. Gestion d'énergie..... 35

g. Gestion de mobilité..... 36

1.4.6 Contraintes conceptuelles d'un réseau de capteurs sans fil..... 36

a. La robustesse (tolérance aux pannes)..... 36
b. Système d'exploitation sur mesure..... 36
c. Les nœuds à caractère autonome..... 37
d. Sécurité physique limitée..... 37
e. Coût de production..... 37
1.4.7 Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil..... 37
• Classification des protocoles de routage selon la structure du réseau..... 38
• Classification selon le fonctionnement du protocole..... 39
1.5 Conclusion..... 40

C h a p i t r e 2 : Notions de base sur les systèmes multi agents..... 41
2.1 Introduction..... 41
2.1.1Définitions..... 41
2.1.2 Classification des agents..... 44
a. Agents communicants..... 44
b. Agents cognitifs..... 44
2.1.2.1 Classification selon la structure de l'agent..... 45
2.1.2.2 Agents à base de connaissances (Agents logiques)..... 45
2.1.2.3 Agents mobiles (MA: Mobile Agent)..... 45
2.1.3 Méthodes de raisonnement..... 46
2.1.3.1 Raisonnement déductif..... 46
2.1.3.2 Raisonnement Means-Ends..... 46
2.1.3.3 Système de raisonnement procédural (PRS)..... 46
2.1.4 Communications entre agents..... 46
2.1.5 Coordination..... 47
2.1.5.1 Planification globale ou partielle..... 47
2.1.5.2 Coordination sur la base de buts communs..... 47
2.1.5.3 Modélisation mutuelle..... 47
2.1.5.4 Coordination basée sur les lois sociales..... 47
2.1.6 L'apprentissage..... 48
2.1.6.1 L'apprentissage supervisé..... 48

2.1.6.2 L'apprentissage non supervisé 48
2.1.6.3 L'apprentissage par renforcement 48
2.2 Plateformes pour les SMA. 48
2.2.1 AgentBuilder 49
2.2.2 LEAP 49
2.2.3 MadKit 49
2.2.4 MASK 50
2.2.5 Zeus 50
2.2.6 Dima 50
2.2.7 JADE 51
2.3 Conclusion 51

C h a p i t r e 3 : Systèmes multi agents pour réseaux de capteurs sans fil 53
3.1 Introduction 53
3.2 Transposition du modèle agent sur les RdC s-f 53
3.2.1 Classification des agents dédiés aux RdC s-f 56
3.2.1.1 Agents d'information 56
3.2.1.2 Agents autonomes 56
3.2.1.3 Agents mobiles 56
3.2.2 Travaux sur les SMA pour les RdC s-f 56
3.2.2.1 Première approche: chaque capteur est un agent 57
3.2.2.2 Deuxième approche: un seul agent pour tout le réseau 59
3.2.2.3 Troisième approche: les agents mobiles 60
3.3 Conclusion 64

C h a p i t r e 4 : Modélisation d'un réseaux de cap. sans fil suivant le modèle agent. 65
4.1 Introduction 65
4.2 Hypothèses 66
4.3 La conception 68
4.3.1 La modélisation des capteurs 68
4.3.1.1 La classe agent 68
4.3.1.1 Les capteurs modélisés par des agents 71

1. Le serveur (station de base)..... **71**

2. Agents pour les capteurs du réseau..... **73**

4.4 Conclusion..... **78**

CONCLUSION FINALE **79**

RÉFÉRENCES **81**

ANNEXE: Agrégation de données dans les réseaux de capteurs s-f **87**

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1: La communication sans fil…….. **15**

Fig. 1.2: Débits et portées des différents types de réseaux sans fil…….. **19**

Fig. 1.3: Illustration d'un réseau Ad-Hoc…….. **21**

Fig. 1.4: Les capteurs de plus en plus petits…… **25**

Fig. 1.5: Déploiement d'un réseau de capteurs sans-fil…… **25**

Fig. 1.6: Architecture d'un capteur…… **29**

Fig. 1.7: Couches protocolaires d'un réseau de capteurs sans-fil…… **30**

Fig. 1.8: Energie consommée par les sous-systèmes d'un capteur…… **35**

Fig. 1.9: Classification des protocoles de routage des réseaux de capteurs sans-fil…. **38**

Fig.2.1: Les influences et les implications des systèmes multi-agents…….. **42**

Fig.2.2: Interaction entre l'agent et l'environnement…….. **43**

Fig.3.1: Agents mobiles dans les réseaux de capteurs sans-fil…….. **61**

Fig.3.2: Le modèle Agilla…….. **63**

Fig. 4.1: Le modèle d'architecture réseau utilisé…… **66**

Fig.4.2: Diagramme de classe d'un agent…… **68**

Fig.A.1: Agrégation de données dans un réseau de capteurs sans-fil…… **89**

LISTE DES TABLEAUX

Tab. 1.1: Typologie des réseaux sans fil…….…….. **23**

Tab. 1.2: Comparaison entre les RdC s-f et les réseaux Ad-Hoc…….…… **24**

Tab. 3.1: Caractéristiques des agents applicables aux nœuds d'un RdC s-f…..…… **55**

Introduction générale

Les dernières années ont connu une croissance exponentielle de la communication sans fil à travers le monde, cette tendance s'explique par le désir de connectivité provoqué par l'envie d'échanger des données sans se passer pour autant de la mobilité. Que ça soit dans les services Internet tels que le World Wide Web, e-mail, transfert de fichiers et de données, ou dans le domaine de l'informatique industrielle, tels que la surveillance et la détection, la sécurité militaire, la gestion de chaîne d'approvisionnement, le domaine de l'agriculture intelligente et le domaine de la santé.

Il est toute fois indispensable de noter la différence qui existe entre les réseaux sans fils utilisés dans les domaines publiques et ceux utilisés en informatique industrielle, car si dans le domaine d'internet et des réseaux domestiques, les débits se mesurent au-delà du 1 Mbit/s, voir même en plusieurs centaines de Mbits/s, comme c'est notamment le cas du tout récent* standard IEEE 802.11n avec ses 600 Mbits/s théoriques, qui constitue la dernière évolution de la technologie Wi-Fi.

C'est loin d'être le cas dans le domaine industriel, où l'échelle des mesures dégringole pour atteindre dans certains cas le niveau des bits par jour voir même des bits par semaine [1]. En effet, certains domaines d'application ont assoupli les exigences en termes de « débit », ce dernier est passé au second plan dans l'ordre des facteurs importants dans la fiabilité du réseau, au détriment d'un autre facteur qui est la consommation d'énergie. Dans ce type de réseau, où les nœuds sont de très petite taille et sont le plus souvent alimentés par des piles, il est plus important de consommer le moins d'énergie possible tout en assurant un débit minimum, que d'envoyer rapidement les données et gaspiller inutilement les ressources, l'objectif alors est d'économiser l'énergie, ceci est surtout réalisé par un choix adéquat du protocole de communication. En d'autres termes, les protocoles utilisés dans les réseaux industriels ne peuvent pas être les mêmes que ceux utilisés dans les réseaux à haut débit.

* Les spécifications de la norme sont publiées depuis le 11 septembre 2009 sur le site web de l'IEEE.

Les réseaux de capteurs sans fil (Wireless sensor network en Anglais) appartiennent à cette catégorie de réseaux à contrainte énergétique.

Les réseaux de capteurs sans fil (RdC s-f*) sont maintenant très utilisés dans plusieurs secteurs là où on a besoin de surveiller, d'intercepter des informations, de détecter, de mesurer…etc. Ces tâches peuvent parfaitement être accomplies par l'homme, mais lorsqu'il s'agit de s'exposer à des risques dus à des phénomènes naturels dangereux ou à des contraintes environnementales ou temporelles inadaptées à l'être humain, il est plus judicieux de recourir à la machine et plus exactement à des capteurs de petite taille.

La connexion réseau entre les capteurs favorise le travail coopératif grâce aux échanges de données entre les nœuds.

La technologie des réseaux de capteurs ne cherche donc qu'à être perfectionnée après s'être largement imposée, car il faut bien croire que cette technologie n'en est qu'à ses débuts et que beaucoup de travail reste à accomplir surtout au niveau de la durée de vie et de la longévité d'un capteur.

Plusieurs technologies bien connues du domaine de l'informatique ou de l'électronique ont été proposées à fin d'améliorer la conception des RdC s-f tant au niveau hard qu'au niveau soft, parmi lesquelles, les systèmes multi-agents (SMA). Les techniques des SMA proposent des alternatives intéressantes afin de répondre aux besoins d'autonomie, d'apprentissage, d'adaptation, de communication, et de coopération des capteurs. Cette association semble presque évidente d'autant plus que les agents sont parfaitement adaptés pour simuler le fonctionnement d'un réseau de capteurs dans son environnement et ainsi, prévoir les améliorations à apporter au système.

Dans ce document:

Il est proposé d'abord d'étudier les différentes implications des technologies des agents dans les réseaux de capteurs sans fil, en se basant sur les propositions faites par la communauté scientifique à ce jour ; un travail de catégorisation est réalisé. Il s'agit par la

* Par souci de concision, on va convenir d'utiliser cette abréviation dans la suite de ce document pour désigner les réseaux de capteurs sans fil.

suite de décrire une démarche pour la modélisation d'un réseau de capteur en se basant sur le paradigme agent.

Ce document est divisé en quatre chapitres, les deux derniers traitent les deux points ci-dessus, les deux autres étalent des notions essentielles sur les réseaux de capteurs sans-fil et les systèmes multi-agents, ils permettent de mieux appréhender les chapitres 3 et 4. Enfin, un mini chapitre sur l'agrégation de données dans les réseaux de capteurs sans-fil est proposé comme annexe.

Chapitre 1

Notions de base sur les réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

Les progrès scientifiques réalisés dans le domaine des réseaux sans fil avec l'augmentation des débits de transmission de données, et dans le domaine de la microélectronique avec la miniaturisation des appareils électroniques, ont ouvert la voie à une nouvelle génération de systèmes de capture et de détection basés sur le mariage des deux technologies, moins coûteux et capables d'atteindre un haut degré de précision et d'efficacité. Ces systèmes à base de réseaux de capteurs sans fil (en Anglais Wireless Sensor Network) sont donc une révolution technologique avec des secteurs d'application qui ne cessent de s'élargir et de se diversifier. Les réseaux de capteurs sans fil (RdC s-f) sont un type particulier de réseaux sans fil qui appartient à la grande famille des réseaux dits "sans infrastructures".

Dans la suite de ce chapitre, il sera question de traiter quelques notions sur les réseaux sans fil et les différents types qui existent pour situer les RdC s-f, une description non exhaustive des domaines d'application et de l'architecture et la pile protocolaire s'en suivra.

1.2 Les réseaux sans fil

De nos jours, chaque seconde qui s'écoule, c'est plusieurs millions de personnes dans le monde qui s'échangent des données, par la voie de réseaux câblés en utilisant un téléphone conventionnel ou un ordinateur, ou à travers les ondes radio des réseaux sans fil, en utilisant un ordinateur portable, un assistant personnel ou ordinateur de poche (plus connu sous le sigle anglais PDA pour *Personal Digital Assistant*), un téléphone cellulaire ou d'autres appareils de communication sans fil.

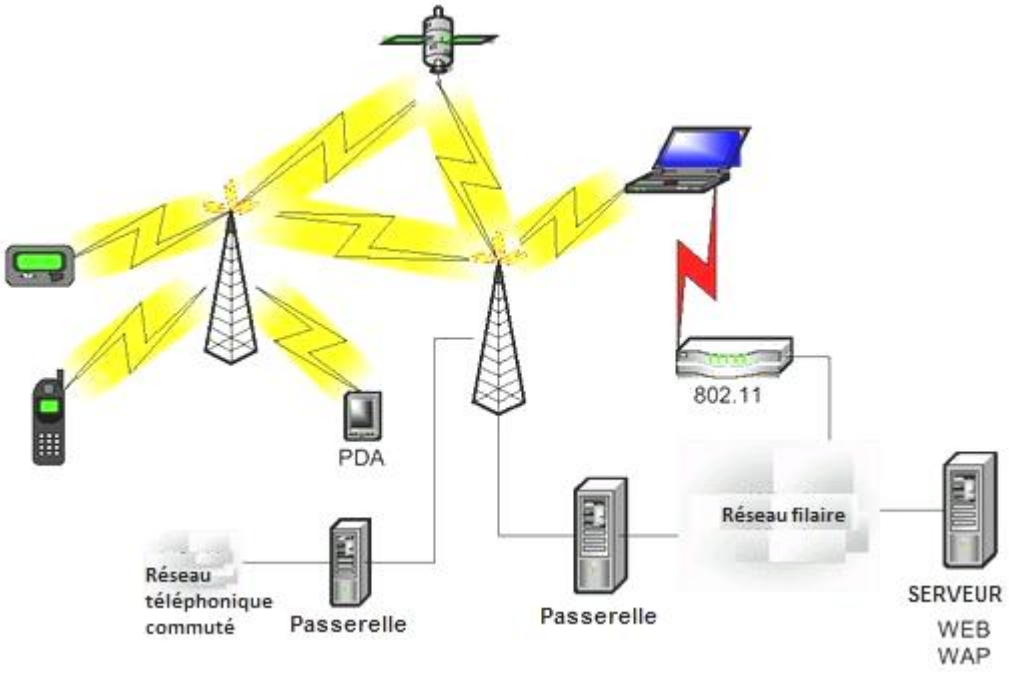

Fig. 1.1: La communication sans fil [8]

Bien que des solutions sans fils pour transmettre de la voix notamment existent depuis une vingtaine d'années dans l'industrie de la téléphonie, l'engouement pour la communication sans fil n'a commencé qu'à la fin des années 90 et au début des années 2000, tant au niveau public qu'au niveau de la recherche scientifique ; la démocratisation d'internet et l'introduction de la norme IEEE 802.11 ayant joué un rôle majeur. Depuis lors, les avantages et les possibilités que les réseaux sans fil peuvent offrir aux utilisateurs sont devenus énormes. Cela dit, la technologie sans fil ne peut pas encore prétendre remplacer la technologie filaire qui a encore de beaux jours devant elle et reste de loin la plus rapide (des débits de 111 Gbits/s [2] ont été atteints avec des câbles en fibre optique contre 600 Mbits/s seulement pour le dernier standard IEEE 802.11n [3] qui est à ce jour la norme qui offre le

débit le plus élevé parmi les normes de la connexion sans fil) elle reste aussi la plus sure avec moins de problèmes d'interférences et de bruit ou d'atténuation, et donc, la mieux adaptée dans de nombreux domaines d'application. Mais la réussite de la communication sans fil s'explique par le fait qu'elle offre un confort d'utilisation impossible à envisager avec une liaison filaire, les utilisateurs peuvent accéder à l'information à tout moment et surtout: n'importe où ; les ménages, les entreprises, les établissements académiques, les campus universitaires, les places publiques (aéroports, gares, stades…etc.), les laboratoires de recherche, et les hôtels dans beaucoup de régions à travers le monde optent de plus en plus pour les réseaux sans fil.

Le succès rencontré par les réseaux sans fil est tel qu'ils sont en passe de remplacer les technologies utilisées dans l'industrie de la téléphonie [4] pour les réseaux (dits de quatrième génération) qui devront assurer un transport de la voix et des données avec des débits élevés en s'appuyant sur la norme IP, c'est le principe de la "voix sur réseau IP" ou *VoIP* pour *Voice over Internet Protocol*. Les dernières technologies comme la norme IEEE 802.16 plus connue sous son nom commercial WiMax vont d'ailleurs dans ce sens en proposant des débits de 74 Mbits/s sur des portées pouvant atteindre une cinquantaine de kilomètres.

1.2.1 L'avenir des réseaux sans fil

La recherche scientifique porte ces dernières années un intérêt particulier sur un nouveau type de réseau sans fil dit "sans infrastructures" ou encore *Ad Hoc* qui est appelé à compléter les réseaux sans fil actuels [5] qui sont eux au contraire "à infrastructures", les infrastructures en question sont les stations de base fixes qui font relayer les informations entre les nœuds d'un réseau sans fil. Les recherches et les travaux consacrés au développement des réseaux sans fil traditionnels sont encore considérables, mais la communauté scientifique et l'industrie des télécommunications ont récemment adopté une approche plus difficile des réseaux sans fil dans laquelle un groupe d'unités mobiles équipées d'émetteurs-récepteurs radio pouvant communiquer sans aucune infrastructure fixe.

1.3 Les types de réseaux sans fil

La catégorisation des réseaux sans fil se base sur deux critères qui sont : la portée et le taux de transmission radio disponibles (la couverture du réseau), et l'architecture du réseau. Le premier critère donne lieu à quatre catégories de réseaux sans fil: les réseaux personnels (Personal Area Network), les réseaux locaux (Local Area Network), les réseaux métropolitains (Metropolitan Area Network) et les réseaux étendus (World Area Network), et dans chaque catégorie sont appliquées des technologies de communication qui se démarquent par le débit, la plage de fréquence utilisée et la portée de communication.

1.3.1 Réseaux WPAN

Les réseaux personnels sans fil ou *Wireless Personal Area Network* (WPAN) sont les réseaux sans fil à faible portée: de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Ce type de réseau sert généralement à relier des périphériques (imprimante, téléphone portable, appareils domestiques,...) ou un assistant personnel (PDA: Personal Digital Assistant) à un ordinateur sans liaison filaire ou bien à permettre la liaison sans fil entre deux machines très peu distantes. Pour mettre en œuvre de tels réseaux, plusieurs technologies existent dont :

- La norme IEEE 802.15.1 [6] et son nom commercial "*Bluetooth*": Elle fut proposée par Ericsson en 1994 et fournit un taux de transmission radio théorique de 1 Mbit/s pour une portée maximale d'une trentaine de mètres. Elle est très peu gourmande en énergie ce qui la rend particulièrement intéressante pour être intégrée dans de petits équipements autonomes sans fil comme les PDA.

- L'infrarouge: elle permet de créer des liaisons sans fil de quelques mètres avec des débits pouvant monter à quelques mégabits par seconde. Cette technologie est notamment utilisée pour les télécommandes mais souffre toutefois des perturbations dues aux interférences lumineuses, ce qui nécessite une vision directe entre les éléments souhaitant communiquer ce qui la limite souvent l'usage de cette technologie.

- La norme IEEE 802.15.4 [7] et son nom commercial "ZigBee": Cette technologie a pour but la communication de courte distance telle que le propose déjà la technologie Bluetooth, tout en étant moins chère et plus simple.

1.3.2 Réseaux WLAN

Le réseau local sans fil WLAN (pour Wireless Local Area Network) est un réseau permettant de couvrir l'équivalent d'un réseau local d'entreprise, soit une portée d'environ une centaine de mètres. Il permet de relier les terminaux présents dans la zone de couverture entre eux. Il existe plusieurs technologies concurrentes:

- La norme IEEE 802.11 "Wifi": Ce standard soutenu par l'alliance WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance), est très connu actuellement, son nom vient de l'expression anglaise « *Wireless Fidelity »*. Un certain nombre de normes dérivées ont été crées. La technologie WiFi permet de créer un WLAN à haut débit. Ce dernier varie entre 11Mbps pour la norme 802.11b et 600Mbps pour la norme 802.11n.

- L'hiperLAN2 (HIgh Performance Radio LAN 2.0) Norme européenne élaborée par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute), permet d'obtenir un débit théorique de 54 Mbps sur une zone d'une centaine de mètres dans la gamme de fréquence comprise entre 5 150 et 5 300 MHz [9].

- DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunication) Norme des téléphones sans fils domestiques. Alcatel et Ascom développent pour les environnements industriels, telles les centrales nucléaires, une solution basée sur cette norme qui limite les interférences. Les points d'accès résistent à la poussière et à l'eau. Ils peuvent surveiller les systèmes de sécurité 24/24h et se connecter directement au réseau téléphonique pour avertir le responsable en cas de problème [9].

1.3.3 Réseaux WMAN

Les réseaux métropolitains sans fil ou Wireless Metropolitan Area Network (WMAN) également appelés boucle locale radio (BLR) étaient à l'origine prévus pour interconnecter des zones géographiques difficiles d'accès à l'aide d'un réseau sans fil. Actuellement ces réseaux sont utilisés dans certaines villes pour fournir un accès internet aux habitants.

Les réseaux basés sur la norme IEEE 802.16 ont une portée de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres (50km de portée théorique annoncée) et un taux de transmission radio théorique pouvant atteindre 74 Mbit/s pour IEEE 802.16-2004 [10] plus connue sous le

nom commercial de WiMAX. C'est également dans cette catégorie que peuvent être classés les réseaux téléphoniques de troisième génération utilisant la norme UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) pour transmettre de la voix et des données. Cette norme UMTS propose des taux de transmission radio théoriques pouvant aller jusqu'à 2 Mbit/s sur des distances de plusieurs kilomètres.

1.3.4 Réseaux WWAN

Les réseaux sans fil étendus ou Wireless Wide Area Network (WWAN) regroupent notamment les différents réseaux téléphoniques de première et deuxième génération mais également les réseaux satellitaires. Les principales technologies sont les suivantes:

- GSM (Global System for Mobile Communication): est un standard de téléphonie mobile utilisé principalement en Europe, en Afrique et en Asie.
- GPRS (General Packet Radio Service): est une évolution du GSM. Cette technologie permet l'accès à de nombreux services multimédia, accessible en WEB ou en WAP.
- DVB-S (Digital Video Broadcasting-Satellite): réseaux satellites pour transmettre l'information et proposent des débits élevés (de l'ordre de 40 Mbit/s).

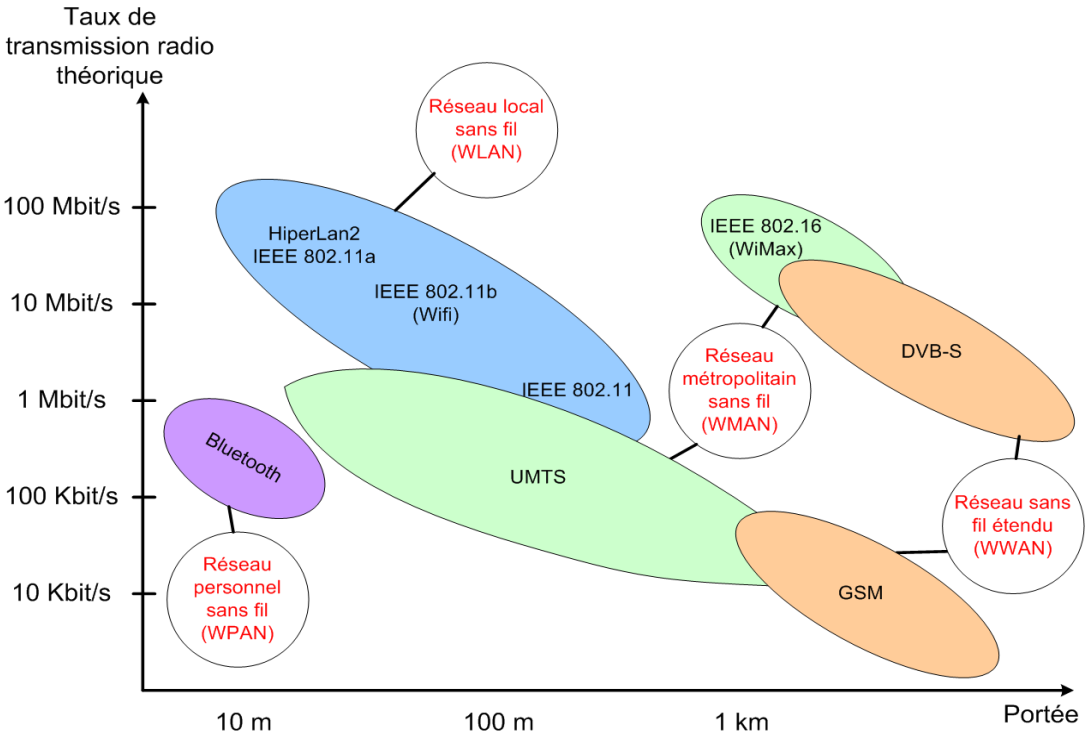

Fig. 1.2: Débits et portées des différents types de réseaux sans fil [4]

Le deuxième critère de catégorisation des réseaux sans fil basé sur l'architecture, propose différents types d'architectures allant des structures de réseaux sans fil simples aux réseaux ad-hoc. Cette évolution a suivi un ordre chronologique.

1.3.5 Réseaux sans fil avec infrastructures

Les réseaux sans fil avec infrastructure sont également appelés réseaux cellulaires. Ces réseaux se composent de deux types de terminaux : les stations de base ou points d'accès et les terminaux mobiles ou nœuds mobiles. Les points d'accès sont des terminaux fixes reliés en général à une source d'énergie illimitée et chargés de relayer les informations qui circulent dans leur cellule. Ils jouent le rôle de serveur pour chaque terminal mobile présent dans la cellule. Les terminaux mobiles se déplacent librement mais ne communiquent jamais directement les uns avec les autres. Toutes les communications se font systématiquement vers le point d'accès le plus proche qui se charge ensuite de les relayer à la destination. Ces réseaux sont donc une réponse au problème d'affaiblissement du signal. En effet, en déployant plusieurs points d'accès on peut étendre la couverture globale du réseau. Tous les points d'accès sont reliés entre eux par un réseau filaire qui se charge de la partie routage ainsi que de la plupart des fonctions d'administration (authentification centralisée par exemple).

Ce type de réseau est de plus en plus utilisé dans les entreprises et les universités comme dernier bond d'un réseau d'accès à l'Internet. Ces réseaux sont souvent retenus pour leur simplicité d'administration. En effet comme les points d'accès sont fixes et n'ont pas de problème d'énergie, la topologie du réseau demeure dans l'ensemble assez stable. De plus, les problèmes de routage sont ici réduits à leur plus simple expression dans la mesure où toutes les communications (sur la partie sans fil) se font en un bond.

1.3.6 Réseaux sans fil sans infrastructures (Mobile Ad-Hoc NETworks)

1.3.6.1 Définition

Les réseaux MANET (Mobile Ad-Hoc NETworks) sont des réseaux distribués et spontanés se composant uniquement de terminaux mobiles. Dans ce type de réseaux, chaque nœud du réseau joue à la fois le rôle d'élément terminal et le rôle de routeur pour

relayer les messages de ses voisins vers un nœud qui n'est pas situé dans le voisinage immédiat. Ce sont un type particulier des réseaux sans fil, qui étendent la notion de mobilité pour lui donner un sens beaucoup plus fort. La principale caractéristique qui fait la différence entre ce type de réseaux sans fil et un réseau sans fil classique est l'absence d'une infrastructure préexistante.

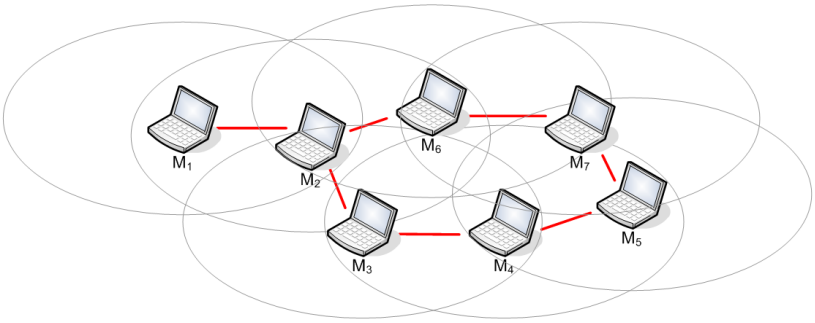

Fig. 1.3: Illustration d'un réseau Ad-Hoc [4]

On dit qu'un nœud B est voisin d'un autre nœud A, si B se trouve dans la zone d'émission de A. Donc, il faut définir des règles de gestion d'accès. En ce sens, lorsqu'un nœud émet, tous ses voisins ne peuvent être qu'en mode réception. A cause de la limite de la portée de transmission des nœuds, des relais (appelés aussi messagers) doivent être définis pour assurer la communication entre deux nœuds qui ne s'entendent pas (hors de la portée l'un de l'autre). Ce processus est appelé routage multi-sauts (ou Multi-hop routing). Ainsi, tous les nœuds d'un réseau Ad hoc coopèrent pour assurer les services fournis habituellement par les stations de base dans les réseaux avec infrastructure.

1.3.6.2 caractéristiques et contraintes des Réseaux Ad-Hoc

Les réseaux mobiles ad hoc présentent plusieurs caractéristiques dont les principales sont les suivantes :

Topologie dynamique et auto-organisation : Les unités mobiles sont libres de se déplacer arbitrairement dans ce type de réseau. Par exemple, un nœud peut joindre un réseau, changer de position tout en gardant la même adresse ou quitter le réseau. Par conséquent, un réseau Ad-Hoc doit s'organiser automatiquement de façon à se reconstituer rapidement et pouvoir s'adapter aux conditions de propagation, au trafic et aux différents mouvements pouvant intervenir au sein des unités mobiles.

Hétérogénéité des nœuds : Un nœud mobile peut être équipé d'une ou plusieurs interfaces radio ayant des capacités de transmission variées et opérant dans des plages de fréquences différentes. Cette hétérogénéité de capacité peut engendrer des liens asymétriques dans le réseau. De plus, les nœuds peuvent avoir des différences en terme de capacité de traitement (CPU, mémoire), de logiciel, de taille (petit, grand) et de mobilité (lent, rapide).

Taille du réseau : Elle est souvent de petite ou moyenne taille (une centaine de nœuds). Le réseau est utilisé pour étendre temporairement un réseau filaire, comme pour une conférence ou en cas de catastrophes naturelles.

Contrainte d'énergie : Les hôtes d'un réseau ad hoc sont destinés à être portables et mobiles et donc à être alimentés par des sources d'énergie autonomes comme les batteries ou les autres sources consommables (par exemple l'énergie solaire). La durée de vie des batteries est limitée, par conséquent les services et les applications supportées par chaque nœud.

Multi-sauts : Un réseau ad hoc utilise souvent des sauts multiples pour éviter les obstacles et minimiser la consommation d'énergie, ou lorsque le récepteur n'est pas dans la portée de communication de l'émetteur.

Absence d'infrastructure centralisée [11]: Chaque nœud travaille dans un environnement pair à pair distribué, et agit en tant que routeur pour relayer des communications, ou génère ses propres données.

Bande passante limitée : L'utilisation d'un médium de communication sans fil partagé fait que la bande passante réservée à un hôte soit modeste.

Faible débit : Les contraintes physiques et la faible bande passante rendent les réseaux ad hoc moins performants que les réseaux filaires en terme de débit.

Portée limitée : La portée d'un nœud fait souvent référence à sa zone de communication ou à sa zone de transmission, où tout signal est parfaitement compris et traité par ce nœud. Plusieurs facteurs limitent la portée d'une transmission sans fil, comme

la faible puissance du signal et les obstacles qui empêchent, atténuent, ou réfléchissent les signaux.

Non sécurisé : Les réseaux mobiles ad hoc sont très sensibles aux menaces physiques. De part la nature immatérielle du support physique, l'écoute passive, usurpation d'identité et déni de service sont très faciles.

Le tableau ci-dessous résume les types de réseaux sans fil:

Types de réseaux sans fil					
Selon la couverture				**Selon l'architecture**	
WPAN Bluetooth Infrarouge ZigBee	**WLAN** Wifi HiperLan2 DECT	**WMAN** WiMAX UMTS	**WWAN** GSM GPRS DVB-S	**Infrastructures de points d'accès au réseau fixes**	**Tous les nœuds sont des points d'accès (sans infrastructures)** MANET

Tab. 1.1: Typologie des réseaux sans fil

1.4 Les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks)

Les réseaux de capteurs sans fil sont très proches des réseaux sans fil sans infrastructures (Ad-Hoc) de par leur aspect décentralisé et l'utilisation des ondes radio pour la communication [11]. Comme son nom l'indique, un RdC s-f est un réseau dont les nœuds sont des capteurs (ou des actionneurs [24]), soit de minuscules appareils possédant des ressources très limitées, mais qui leur permettent d'acquérir des données de leur environnement immédiat.

Un capteur est un dispositif électronique qui convertit un phénomène physique en un signal électrique [12]. Il représente une partie de l'interface entre le monde physique et les appareils électriques capables d'interpréter ces signaux, tels que des ordinateurs. L'autre partie de cette interface est représentée par des actionneurs, qui réalisent la fonction inverse, c'est à dire : la conversion des signaux électriques en phénomènes physiques. Un capteur possède également le matériel nécessaire pour effectuer des communications sans fil [17].

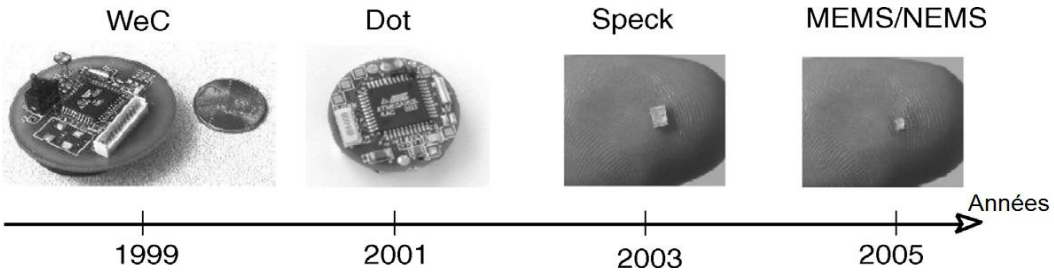

Fig. 1.4: Les capteurs de plus en plus petits [13]

Contrairement aux réseaux traditionnels qui sont généralement conçus pour transférer des données entre les nœuds, un réseau de capteurs est étendu pour réaliser des différentes fonctions. Plusieurs nœuds dans un réseau de capteurs combinent les données capturées localement, et les communiquent à l'utilisateur. L'utilisateur ne s'intéresse pas à l'envoie d'une requête à un nœud particulier, mais plutôt, à la récupération des informations à partir d'une région ou d'un ensemble de nœuds. [14]

Ce type de réseau n'a pas d'adresse IP et est conçu pour se fondre dans l'environnement et travailler avec les réseaux traditionnels. Le nombre de nœuds qui composent un réseau de capteurs varie entre quelques dizaines de capteurs et plusieurs millions, selon les besoins de l'application. La figure **Fig. 1.5** montre un exemple de déploiement d'un réseau de capteurs sans fil (WSN).

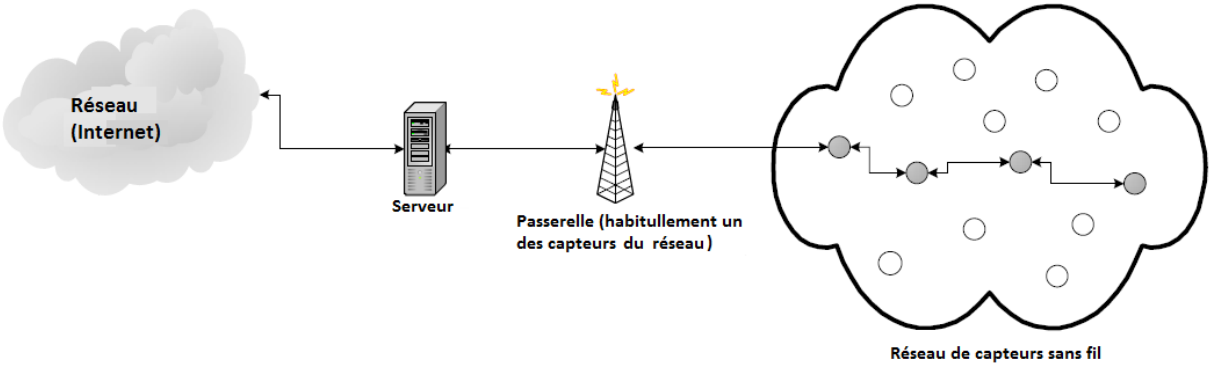

Fig. 1.5: Déploiement d'un réseau de capteurs sans fil

1.4.1 Les domaines d'application des réseaux de capteurs sans-fil

Les RdC s-f présentent des intérêts considérables pour le secteur industriel, mais aussi pour les organisations civiles où la surveillance et la reconnaissance de phénomènes physiques sont une priorité. En effet, un réseau de capteurs peut être mis en place dans le but de surveiller une zone géographique plus ou moins étendue pour détecter l'apparition de phénomènes ou mesurer une grandeur physique (température, pression, vitesse...).

De nombreux domaines font appel aux réseaux de capteurs sans-fil, et de ce fait, plusieurs types de capteurs ont vu le jour tels que les capteurs sismiques, les capteurs à ondes magnétiques, les capteurs thermiques, les capteurs visuels, les capteurs à infrarouge, les capteurs acoustique…etc. Ces capteurs sont en mesure de contrôler une grande variété de données environnementales telles que [15]:

- La température
- L'humidité
- La circulation de véhicules
- La foudre
- La pression
- La composition du sol
- Les niveaux de bruit
- La présence ou l'absence de certains types d'objets
- Les niveaux de stress mécanique sur les objets
- La vitesse, direction, et la taille d'un objet.

Les capteurs peuvent être utilisés pour la détection en temps réel et offrent au serveur des données comme: la nature de l'événement détecté, le lieu et le temps de la détection [16]. Parmi les domaines d'utilisation des RCS-F on peut citer les suivants:

- Le domaine militaire.
- L'observation de l'environnement.
- La santé.
- L'usage domestique.
- les secteurs commerciaux.
- Le domaine de la chimie.
- Le domaine spatial.
- la météo.
- L'agriculture.
- L'industrie.

1.4.2 Comparaison entre les RdC s-f et les réseaux Ad-Hoc

Les MobileAd-ocNETworks et les Réseaux de Capteurs s-f partagent beaucoup de points communs mais quelques fois avec un poids différent. Parmi lesquels, nous trouvons: L’utilisation de médium de communications sans fil et de sources d’énergie limitées, la possibilité de défaillance des liaisons, une faible bande passante, une communication multi-saut, la possibilité d’auto-organisation et sécurité physique limitée [14].

Dans ce qui suit, nous présentons quelques points caractérisant mieux, les réseaux de capteurs par apport aux réseaux ad hoc:

- Un grand nombre de nœuds: en tenant compte de l'avantage de la petite taille des capteurs et leur faible coût dû à l'évolution de la technologie MEMS, un réseau de capteurs peut contenir des milliers de nœuds. La gestion de cet énorme nombre de nœuds est un problème majeur qu'on doit prendre en considération pendant la conception des réseaux de capteurs.

- Traitement collaboratif des signaux: un autre facteur qui distingue ce type de réseaux des réseaux ad hoc traditionnels est que l'objectif final est de détecter ou d'estimer un certain nombre d'évènements de l'objet intéressé, et pas seulement la communication.

- Une utilisation efficace de la mémoire: à cause de leur petite taille, les ressources mémoires des capteurs sont restreintes. Donc à la conception des capteurs, les problèmes des tables de routage et la réplication des données doivent être pris en considération.

- Une gestion efficace de l'énergie: La contrainte d'énergie est un aspect critique dans les réseaux de capteurs. Généralement, le réseau est déployé dans une région difficile d'accès, ce qui rend presque impossible de changer les batteries des nœuds. La durée de vie d'un réseau de capteurs est liée à sa réserve d'énergie. Pour augmenter cette durée une meilleure gestion de la consommation d'énergie doit être instaurée.

- Une auto-organisation: un réseau de capteurs doit avoir un haut niveau de tolérance aux panes. Les nœuds sont dans la plus part des cas sujets aux pannes, ou à l'épuisement de leurs réserves d'énergie. Le coût du remplacement d'une batterie étant très élevé dans les réseaux de capteurs, les nœuds sont à éliminer du réseau. Donc le seul moyen d'assurer les fonctionnalités du réseau est d'ajouter d'autres nœuds pour couvrir les régions épuisées ce qui exige une réorganisation des nœuds du réseau.

- Data-centric: contrairement aux réseaux ad hoc traditionnels qui ont un mode de communication "any to any", la destination dans les réseaux de capteurs est connue et les communications se font normalement de plusieurs sources de données vers une station de bases (many to one) [15]. L'objectif n'est donc pas de maximiser le taux de données communiquées, mais de maximiser la quantité d'informations utiles transmises vers les destinations, ce qui ne nécessite pas une large bande passante [18].

- Agrégation des données[1]: Un grand nombre de nœuds peut encombrer le réseau avec les informations communiquées. Pour résoudre ce problème, quelques nœuds peuvent effectuer l'agrégation des données avant de les rediffuser vers les autres nœuds.

- Réseaux orientés applications: contrairement aux réseaux traditionnels (filaires ou sans fil) qui sont attendus de couvrir une grande variété d'applications, les réseaux de capteurs sont généralement déployés pour accomplir des tâches spécifiques. donc le type d'applications a une grande influence sur les caractéristiques du capteur, la topologie du réseau, et les protocoles utilisés.

Le tableau suivant résume les similitudes et les différences entre les réseaux de capteurs et les réseaux ad hoc mobiles:

Réseau de capteurs sans fil	Réseau MANET
▪ Utilisation d'un médium sans fil.	▪ Utilisation d'un médium sans fil.
▪ Type Ad Hoc.	▪ Type Ad Hoc.
▪ Robuste aux pannes des nœuds (Auto-organisation)	▪ Robuste aux pannes des nœuds (Auto-organisation)
▪ Routage multi-saut.	▪ Routage multi-saut
▪ La mobilité des nœuds est restreinte.	▪ Mobilité des nœuds.
▪ Grand nombre de nœuds (des centaines ou des milliers voir des millions).	▪ Nombre de nœud moyen (de l'ordre de cents).
▪ Des petits nœuds plus susceptibles aux pannes, avec moins capacité de traitements et de stockage.	▪ Des nœuds ayant plus de capacité de traitements et de stockage.
▪ Data-centric: souvent pas d'adresses uniques, les messages sont envoyé à tous les nœuds.	▪ Adress-centric: une adresse unique pour chaque nœud utilisée pour réaliser la communication entre les nœuds.
▪ Utilisation du broadcast.	▪ Communication point à point.
▪ Flot de données « Many-to-one ».	▪ Flot de données « Any-to-any ».
▪ L'énergie est un facteur déterminant	▪ Un gros débit.
▪ Les nœuds collaborent pour remplir un objectif commun.	▪ Chaque nœud a son propre objectif.
▪ Les nœuds font l'agrégation des données avant de les transmettre	▪ Généralement pas d'agrégation de données.
▪ Les protocoles de routage doivent prendre en considération certaines contraintes: le grand nombre de nœuds, moins de ressources mémoire et de calcul, la consommation d'énergie.	▪ Plusieurs types de protocoles de routage peuvent être utilisés.

Tab. 1.2: Comparaison entre les RdC s-f et les réseaux Ad-Hoc

[1] Une annexe est consacrée à l'agrégation de données à la fin de ce document

1.4.3 Architecture d'un capteur

Comme présenté dans Fig. 1.6, un capteur est généralement composé de quatre éléments de base [17]:

- Unité de détection
- Unité de traitement
- Un émetteur/récepteur
- Unité d'alimentation

Selon son utilisation, un capteur peut aussi comprendre des composants supplémentaires, tels qu'un système de localisation, une unité supplémentaire d'alimentation et un stabilisateur. L'unité de détection est généralement composée de deux sous-unités: les capteurs et les convertisseurs analogique-numérique (CAN). Les signaux analogiques produits par les capteurs à la suite d'une observation d'un phénomène sont convertis en signaux numériques par les CANs, et sont ensuite introduits dans l'unité de traitement. L'unité de traitement, qui est généralement associée à une petite unité de stockage, exécute les procédures qui permettent au capteur de collaborer avec d'autres capteurs afin d'effectuer les tâches de détection. L'émetteur est chargé de connecter le capteur au réseau. Le système est alimenté par l'unité d'alimentation qui est parfois soutenue par des cellules à énergie solaire.

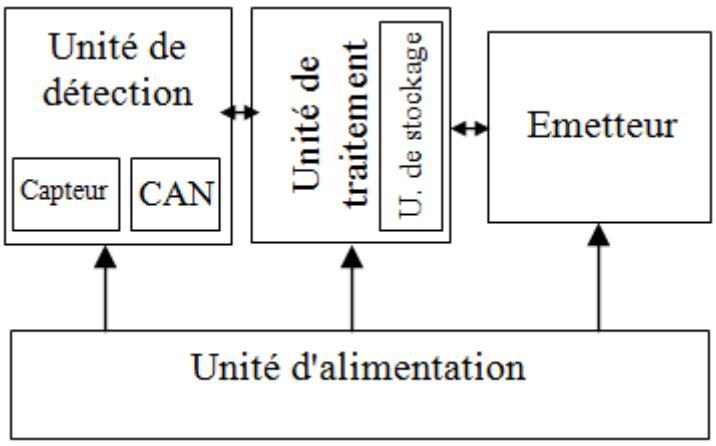

Fig. 1.6: Architecture d'un capteur

1.4.4 Les deux grandes catégories des RdC s-f

Deux grandes catégories de réseaux de capteurs se trouvant sur les marchés sont à distinguer [14]:

Catégorie 1 (C1WSNs): Sont le plus souvent des systèmes basés sur la topologie à maillage avec une connectivité radio sans fil multi-sauts entre les capteurs, et l'utilisation du routage dynamique dans la partie sans fil du système ainsi que dans la partie filaire. Ce type de RdC s-f est destiné pour des usages militaires.

Catégorie 2 (C2WSNs): Systèmes basés sur la topologie en étoile et sur la communication point à point ou multipoint-à-point à saut unique entre capteurs, utilisant le routage statique sur la partie sans fil du réseau; généralement, Ce type de RdC s-f est destiné pour des usages domestiques.

1.4.5 Les couches protocolaires d'un RdC s-f

Comme dans les réseaux filaires, l'architecture de communication dans les réseaux de capteurs est divisée en couches. Chaque couche a ses rôles et ses protocoles qui opèrent en dessus. Puisque l'objectif d'un réseau de capteurs n'est pas la communication elle même et que la consommation d'énergie est un critère très important, d'autres unités doivent exister afin de gérer la consommation d'énergie, la mobilité des nœuds et l'ordonnancement des tâches comme le montre la figure suivante:

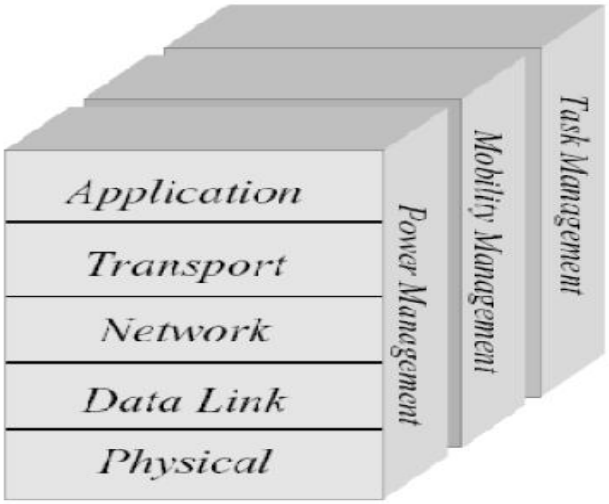

Fig. 1.7: couches protocolaires d'un réseau de capteurs sans-fil [17]

a- Couche physique

Dans cette couche on gère le support qui achemine les données communiquées entre les nœuds. Comparativement aux autres couches, moins de travaux existent pour la couche physique. Quelques techniques de modulation pour les RdC s-f sont discutées dans [19] et [20]. Deux différents médias peuvent être utilisés dans un réseau de capteurs sans fil: les infrarouges et les radiofréquences [21].

- **Infrarouge**

Les systèmes infrarouges sont simples et peu coûteux. Ils sont capables de fournir des débits très élevés à des coûts relativement faibles et une bande passante très large. Il existe deux types de faisceaux infrarouges:

- ***Directifs:*** ils autorisent des débits plus élevés. Ces faisceaux nécessitent que l'émetteur et le récepteur soient en vue directe. La portée d'un tel système peut atteindre quelques kilomètres avec un débit de plusieurs dizaines de mégabit par seconde.
- ***Diffusants:*** ils ont une portée et un débit limités. Par contre, leur utilisation est relativement simple puisque les faisceaux peuvent se réfléchir sur les murs.

- **Radiofréquence**

Le principe est d'émettre des ondes électromagnétiques qui constituent la porteuse du signal à transmettre. Le spectre radio est découpé en bandes de fréquences divisées en canaux. Aujourd'hui, on peut utiliser les bandes ISM (Industrial, Scientific and Medical) pour les réseaux sans fil. Ces bandes sont gratuites mais avec des contraintes en taux d'utilisation (rapport entre le temps d'émission et le temps total) et en puissance d'émission.

Afin de limiter la puissance d'émission tout en ayant un débit efficace, des techniques, d'étalement de spectre, sont obligatoires dans certaines bandes.

- **Etalement de spectre par séquence directe (DSSS)**

Dans la technique DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), la porteuse est modulée par le signal utile (l'information) et un pseudo code aléatoire du débit le plus important.

- **Etalement de spectre par saut de fréquence (FHSS)**

La technique FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) consiste à partager la bande passante en de nombreux petits sous-canaux. Le signal saute de sous-canal en sous-canal et transmet des données sur un canal spécifique pendant un court instant.

- **UWB (Ultra Wide Band) - Ultra Large Bande**

La terminologie UWB vient de la communauté du RADAR et désigne au départ des formes d'ondes sans porteuses (carrier-free) et d'impulsions de durée très courte (< ns). Dans ce contexte, une définition communément admise est que ces signaux ont un rapport, largeur de bande sur fréquence centrale ou Fractional Bandwidth (FB), supérieur ou égal à 0,20 et une largeur de bande supérieure à 500 MHz.

Plusieurs standards en cours de normalisation s'appuient sur l'UWB car elle présente des caractéristiques intrinsèques très avantageuses. En effet, l'UWB donne déjà des débits très supérieurs à ceux donnés par les techniques de transmissions classiques. De plus, cette technique permet de faire de la géo localisation qui peut être très utile dans un contexte de réseau ad hoc.

b- Couche liaison de données

En générale, cette couche est responsable du multiplexage du flux de données, la détection des frames de données, le contrôle d'accès aux média (MAC: Media Access Control), et le control des erreurs. Elle assure une connexion fiable point-à-point ou point-à-multi-point. Le type de l'application, la topologie du réseau, et les contraintes physique des nœuds, tel que l'énergie et la limitation de traitement des données, déterminent la manière d'accomplir ces responsabilités [15].

- **Sous couche MAC (Medium Access Control)**

Puisque l'un des grandes sources de gaspillage de l'énergie et la couche MAC, plusieurs protocoles ont été proposé afin de minimiser la consommation d'énergie dans cette couche. Les méthodes d'accès utilisées par la couche MAC sont divisées en deux classes [21]:

- **Accès centralisé:** il existe trois méthodes d'accès centralisé.

- **FDMA (frequency Division Multiple Access)**

En FDMA, la bande passante et découpée en plages de fréquence qui seront allouées aux nœuds communicants de manière équilibrée.

- **TDMA (Time Division Multiple Access)**

En TDMA, les canaux sont multiplexés sous forme d'intervalles de temps de telle manière que chaque utilisateur accède à toute la bande passante allouée pour le système de transmission durant un intervalle donné.

- **CDMA (Code Division Multiple Access)**

En CDMA, chaque utilisateur émet sur une large bande, avec le principe classique de l'étalement de spectre par séquence directe (DSSS), obtenu au moyen d'un pseudo code aléatoire personnel. Ainsi tous les utilisateurs utilisent simultanément la même bande de fréquences. Cette technique est très souple au niveau des débits transmis, mais relativement complexe car elle peut nécessiter une égalisation sur le récepteur et un contrôle de la puissance d'émission.

- **Accès distribué:** il existe deux méthodes d'accès distribué.

- **ALOHA**

ALOHA est une technique d'accès très simple, utilisée au départ par l'université d'Hawaï, pour relier les centres informatiques dispersés sur plusieurs îles. Cette technique est le plus souvent utilisée dans les réseaux satellitaires vu son faible taux d'accès au canal qui avoisine les 20%. Le principe est le suivant: les stations émettent, de façon inconditionnelle, des paquets dès qu'ils sont en leur possession, il n'y a pas d'écoute du support avant la transmission. Dans le cas d'une collision, la station va retransmettre les paquets après un délai aléatoire.

- **CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance)**

Le principe de base du CSMA/CA est d'écouter avant d'émettre puis de tenter d'obtenir l'accès: si le canal est inoccupé lorsqu'une station cherche à transmettre des données, celle-ci envoie ses paquets. Sinon, la station attend la fin de sa temporisation pour

gagner le droit d'accès au medium. Lorsque sa temporisation expire, si le canal est inoccupé, la station envoie ses paquets.

- **Le contrôle des erreurs**

Les réseaux de capteurs sont utilisés pour des applications très sensibles, donc avoir des données fiables est très important. Il existe deux catégories pour les mécanismes de contrôle des erreurs: FEC (Forward Error Correction) et ARQ (Automatic Repeat reQuest) [15].

Le contrôle des erreurs basé sur ARQ gère la perte des données par la retransmission des paquets erronés. Il est évident que cela va surcharger le réseau vu le nombre important des nœuds, donc il est déconseillé de l'utiliser pour les réseaux de capteurs à grande densité. D'autre part, les schémas FEC procèdent par le décodage des données ce qui est plus complexe et nécessite des ressources de traitements considérables. Donc la solution consiste à avoir des codes de contrôle d'erreurs simples avec moins de complexité de codage/décodage.

c- Couche réseau

Les capteurs sont déployés avec grande densité dans la surface observée. Ainsi ils peuvent être très proches entre eux. Dans une telle situation une communication multi-saut est la plus adéquate. De plus les nœuds doivent consommer moins d'énergie en transmettant les messages ce qui rend l'utilisation des protocoles de routage traditionnels des réseaux Ad hoc impraticable. Plusieurs technique sont utilisées dans le routage telles que: le data-centric, l'agrégation des données et le clustering.

d- Couche transport

La couche transport constitue une interface entre la couche d'application et la couche réseau, les principaux objectifs de cette couche sont [15]:

- Multiplexer et démultiplexer les messages entre les applications et la couche réseau.
- Réaliser un control de haut niveau des données.
- Réguler la quantité des données injectées dans le réseau.

Puisque les réseaux de capteurs sont orientés application et de nature collaborative, la grande quantité de données prend un seul sens (des nœuds capteurs vers la station de base). Dans l'autre sens circulent surtout les commandes et les requêtes. Donc les protocoles de la couche transport doivent prendre en considération cette différence. Dans [22] nous trouvons une taxonomie des différents protocoles de la couche transport.

e- Couche application

Elle représente l'ensemble des applications implémentées sur un réseau de capteurs. Elles doivent fournir des mécanismes pour permettre à l'utilisateur d'interagir avec le réseau (éventuellement, par l'intermédiaire d'un réseau étendu comme Internet) tout en permettant de rendre transparents le matériel et les logiciels utilisés dans les couches inférieurs. Ceci, en lui fournissant des interfaces pour la création et la diffusion des requêtes et un moyen d'interpréter les réponses reçues.

f- Gestion d'énergie

Les fonctions qui se trouvent dans ce niveau sont responsables de gérer l'énergie consommée par les capteurs. Un capteur peut par exemple éteindre son interface de réception des qu'il reçoit un message d'un nœud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués. De plus, quand un nœud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser un message aux autres capteurs pour ne pas participer aux taches de routage, et conserver l'énergie restante aux fonctionnalités de capture [17]

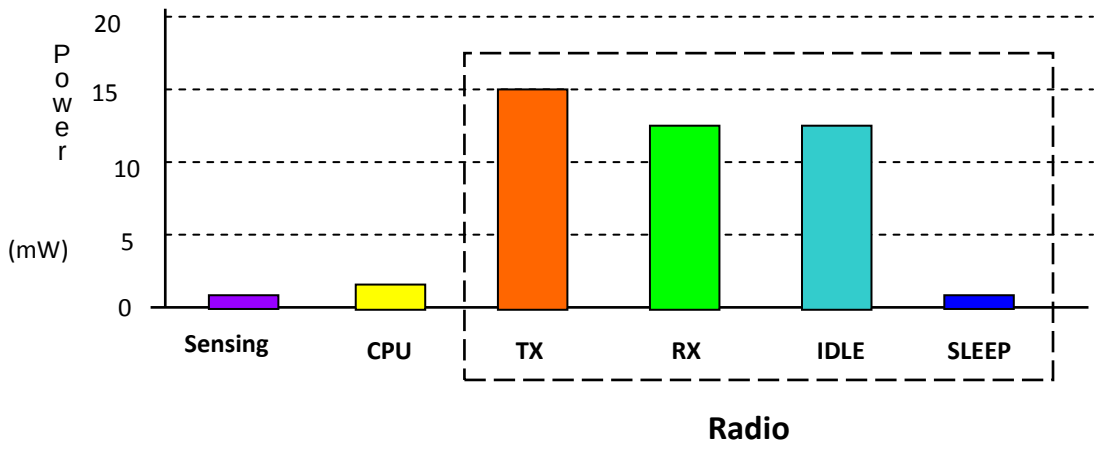

Fig. 1.8: Energie consommée par les sous-systèmes d'un capteur [23]

g- Gestion de mobilité

Puisque les nœuds peuvent être mobiles, un système de gestion de mobilité doit exister. Un tel système doit être capable d'enregistrer les mouvements du nœud afin de l'aider à se localiser. Parfois l'utilisateur souhaite changer l'emplacement du nœud, ou bien une nouvelle topologie du réseau nécessite une auto-organisation des nœuds. Dans ce cas, le système de gestion de mobilité doit être capable de commander les nœuds pour réaliser les mouvements nécessaires.

1.4.6 Contraintes conceptuelles des Réseaux de Capteurs sans-fil

Plusieurs contraintes et exigences se posent lors la conception d'un Réseau de capteurs sans-fil:

a- La robustesse (tolérance aux pannes)

Les capteurs doivent être capables de s'adapter facilement aux changements climatiques (par exemple, de continuer à travailler même si certains des nœuds du réseau subissent une défaillance complète ou partielle). Cette défaillance peut être aussi causée par une perte d'énergie (épuisement de la batterie) ou par des problèmes de communication liés à la radio. Le degré de tolérance du système dépend du degré de criticité de l'application et des données échangées

b- Un système d'exploitation sur mesure

TinyOS (le système d'exploitation minuscule) est "LE" système d'exploitation par excellence pour les réseaux de capteurs. Conçu par l'université américaine de BERKELEY, son caractère open-source lui permet d'être régulièrement enrichie par une multitude d'utilisateurs. Il respecte une architecture basée sur une association de composants, réduisant ainsi la taille mémoire nécessaire à sa mise en place. Sa bibliothèque de composants est particulièrement complète puisqu'on y retrouve des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données. Enfin, TinyOS s'appuie sur un fonctionnement événementiel, c'est-a-dire qu'il ne devient actif qu'a l'apparition de certains événements, par exemple l'arrivée d'un message radio. Le reste du temps, le capteur se trouve en état de veille, garantissant une durée de vie maximale des capteurs.

c- Les nœuds à caractère autonome

Les capteurs doivent être autonomes et doivent être capables de travailler sans être soumis à une surveillance constante. [68]

d- Sécurité physique limitée

Les réseaux de capteurs sans-fil sont plus touches 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 minimise.

e- Coût de production

Le cout de production d'un seul capteur est tres important pour l'évaluation du cout global du réseau. Si ce dernier est supérieur a celui nécessaire pour le déploiement des capteurs classiques, l'utilisation de cette nouvelle technologie ne serait pas financièrement justifiée. Par conséquent, réduire le cout de production jusqu'a moins de 1 dollar par nœuds est un objectif important pour la faisabilité de la solution des réseaux de capteurs sans-fil [10].

1.4.7 Le routage dans les RdC s-f

La communication dans un réseau de capteur à une grande influence sur la consommation d'énergie. L'utilisation de protocoles de communication conçus pour les réseaux ad hoc traditionnels est inappropriée. Ceci est dû aux caractéristiques des réseaux de capteurs qui les différentient des autres types de réseaux. Donc, il a fallu concevoir de nouveaux protocoles. Le domaine de recherche des réseaux de capteurs reste encore instable, et il existe peu de standard, ce qui a provoqué une explosion du nombre de protocoles proposés.

La conservation de l'énergie qui a une grande influence sur la durée de vie du réseau, est considérée, relativement, plus importante que les performances du réseau. Donc les protocoles de routages doivent permettre une consommation minimale de l'énergie sans dégrader considérablement les performances du réseau.

Il existe différents types de protocoles de routage comme le montre ce schéma:

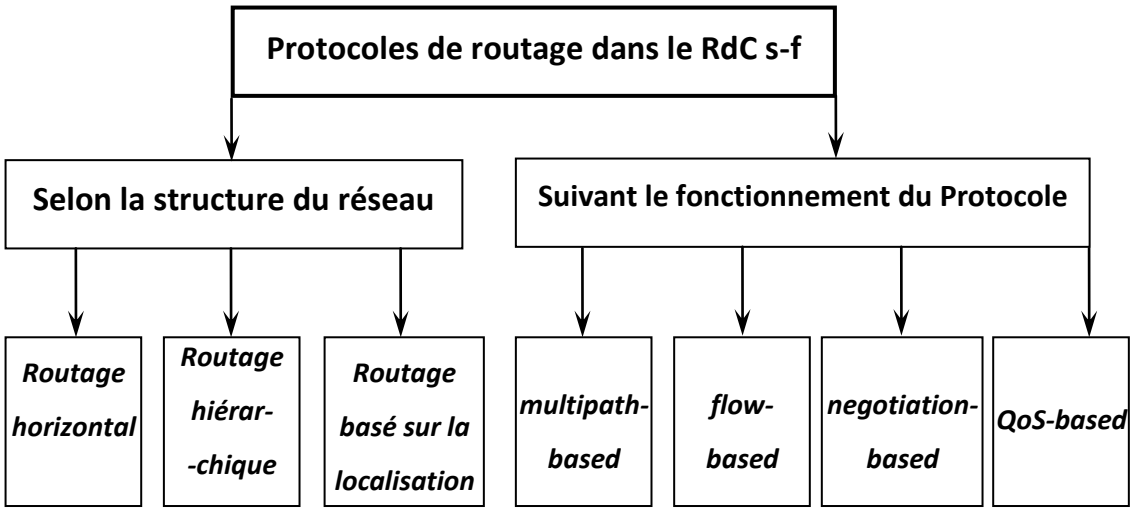

Fig. 1.9: Classification des protocoles de routage des RdC s-f [25]

- **Classification selon la structure du réseau**

Les protocoles de routage basés sur la structure du réseau peuvent être classifiés en trois catégories: protocoles horizontales (Flat based routing), protocoles hiérarchiques (Hierarchic based routing) et protocoles basés sur la localisation géographique (Location based routing).

- **Routage horizontal:** basé sur le principe de centration sur les données (Data-centric) [26] où tous les nœuds ont le même rôle et collaborent entre eux pour accomplir la tâche de routage. En raison du grand nombre de tels nœuds, il est impossible d'affecter un identificateur global à chaque nœud.

- **Routage hiérarchique**: Les protocoles du routage hiérarchiques sont chargés généralement d'établir des cluster-heads[1] et de définir la manière dont laquelle les nœuds décident quel cluster-head est à joindre. Le but principal du routage hiérarchique est de maintenir l'efficacité de consommation d'énergie des nœuds capteurs en les impliquant dans la communication multi-sauts avec un cluster particulier et en réalisant l'agrégation de données afin de diminuer le nombre de messages transmis à la destination.

[1] Des capteurs jouant le rôle de chef de groupe.

- **Routage basé sur la localisation:** La plupart des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs nécessitent la localisation des nœuds capteurs. En général, ces informations sont nécessaires pour calculer la distance entre deux nœuds particuliers de sorte que la consommation d'énergie puisse être estimée. Puisque il n'y a aucun système d'adressage pour les nœuds dans les réseaux de capteurs (comme les adresses IP) et comme ils sont déployés dans une région d'une manière aléatoire, l'information de localisation de ces nœuds peut être utilisée dans le routage des données d'une manière efficace en termes d'énergie.

- **Classification selon le fonctionnement du protocole**

Les protocoles de routage peuvent être classifiés selon leurs fonctionnalités en quatre catégories: routage basé sur la Qualité de Service, routage basé sur le flux de données dans le réseau (Network flow based routing), routage basé sur des multi-chemins (Multi-path based routing), et routage basé sur la négociation (Negociation based routing).

- **Routage basé sur la QoS:** Dans les protocoles de routage basés sur la QoS, le réseau doit s'équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité de données. En particulier, le réseau doit satisfaire une certaine métrique de QoS, par exemple : largeur de la bande passante. [27]
- **Routage basé sur le flux de données:** Dans cette approche, la phase d'établissement de routes est modélisée et résolue comme un problème de demande de flux de données où le flot représente la route que les paquets prennent, et la demande représente le taux auquel les paquets sont produits par les différents nœuds. [28] [29] [30]
- **Routage basé sur le multi chemin:** les protocoles de routage utilisent des chemins multiples plutôt qu'un chemin simple afin d'augmenter la performance du réseau. La tolérance aux fautes d'un protocole est mesurée par la probabilité qu'un chemin alternatif existe entre une source et une destination quand le chemin primaire soit défaillant. Ceci peut être augmenté en maintenant les chemins multiples entre la source et la destination aux dépens d'une consommation d'énergie et d'une génération du trafic. Ces chemins alternatifs sont maintenus par l'envoi périodique des messages. Par conséquence, la fiabilité du réseau peut être augmentée en maintenant les chemins alternatifs les plus récents. [31][28]

- **Routage basé sur la négociation:** Ces protocoles utilisent des descripteurs de données de niveau élevé afin d'éliminer les transmissions de données redondantes par la négociation. Cette dernière est utilisée aussi pour prendre les décisions de communication en se basant sur les ressources disponibles. [32][11]

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, des notions essentielles sur les réseaux de capteurs sans fil ont été abordées de manière non exhaustive. Ça permet de mieux situer cette technologie par rapport au vaste domaine des réseaux informatiques, et aussi d'être en mesure de comprendre ses aboutissements et les améliorations à apporter à l'avenir. Sur ce dernier point, il apparait clairement que la technologie des réseaux de capteurs n'en est qu'à ses premiers pas, il n y à qu'à regarder le nombre très restreint des standards qu'ils lui sont dédiés. Cela explique l'engouement de la communauté scientifique ces dernières années pour ce type particulier des réseaux "Ad-Hoc".

Chapitre 2

Notions de base sur les Systèmes Multi Agents

2.1 Introduction

Les systèmes multi-agents (SMA) apportent des solutions intéressantes pour la représentation des systèmes complexes. Leur architecture décentralisée permet de retranscrire les comportements des systèmes basés sur les interactions de leurs plus simples entités. Une entité peut percevoir, communiquer, prendre des décisions, agir et réagir dans son environnement. Dans les SMA, cette entité est appelée "Agent".

Dans ce qui suit, nous passeront en revue les principales notions élémentaires des systèmes multi agents. Le but étant de souligner l'importance de ces systèmes pour des fins de modélisation d'un réseau de capteurs sans-fil.

2.1.1 Définitions

Les concepts des systèmes multi-agents (SMA) sont essentiellement issus de deux courants en informatique: l'intelligence artificielle et le génie informatique. La figure suivante montre les influences et les implications des systèmes multi-agents.

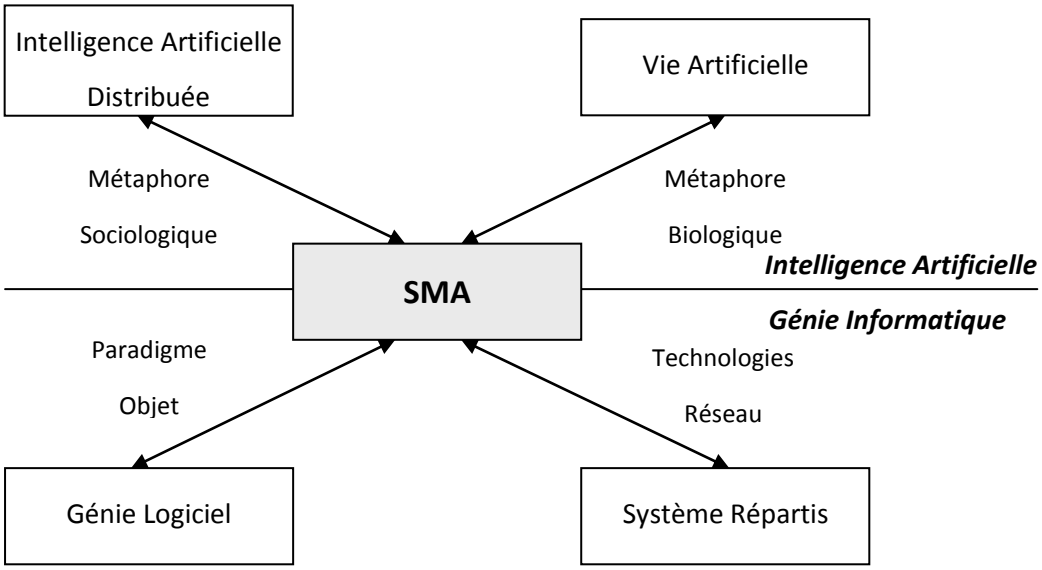

Fig.2.1: Influences et implications des systèmes multi-agents [33]

Comme tous les concepts de l'IA, la grande diversité des applications possibles réalisées à l'aide de la modélisation agent à donné plusieurs définitions qui dépendent le plus souvent du domaine applicatif.

- Pour [34], Un ***Système Multi-Agents (SMA)*** est constitué d'un ensemble d'agents ou d'organisations d'agents situés dans un environnement composé d'objets qui ne sont pas les agents du système. Ce système communique avec son environnement par l'action d'agents spécifiques dits agents d'interface. Un système multi-agents peut être vu selon quatre axes AEIO comme le montre la formule suivante [35]:

SMA = Agents + Environnement + Interactions + Organisation

Où:

- **Agents:** modèles ou architectures utilisées pour la partie active de l'agent, depuis un simple automate jusqu'à un système complexe à base de connaissances.
- **Environnement:** milieux dans lesquels évoluent les agents.
- **Interactions:** englobent les infrastructures, les langages et les protocoles d'interactions entre agents.

- **Organisation:** structure des agents en groupes, hiérarchies, relations…etc.

Plusieurs définitions ont été données pour les agents, la définition adoptée par la plupart des documentations est celle donnée par Russell and Norvig [36]. D'après eux, "***un agent*** *est toute chose qui perçoit des données de son environnement à l'aide des capteurs et agit sur cet environnement à l'aide des membres*".

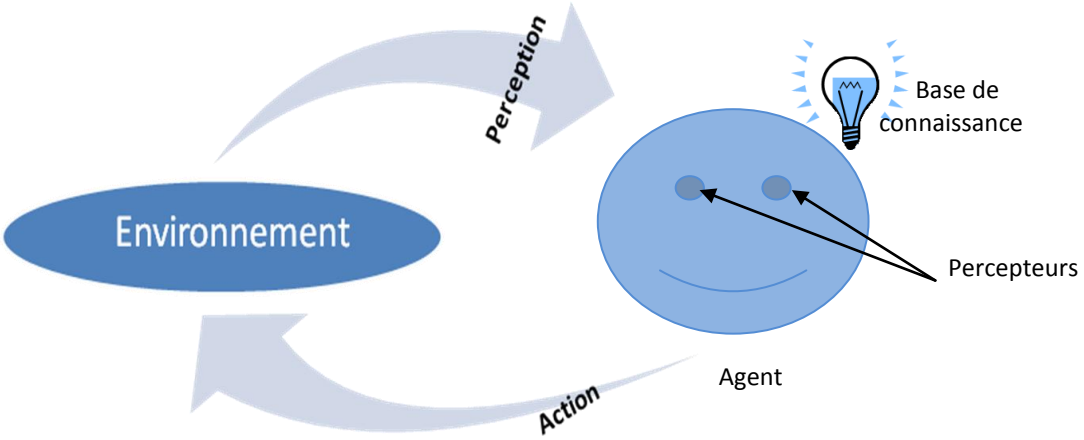

Fig.2.2: Interaction entre l'agent et l'environnement

Des définitions données par Ferber [37] et Wooldridge [38], nous pouvons tirer les propriétés suivantes d'un agent:

- *Autonomie:* les agents agissent sans intervention directe des humains, et possèdent leurs propres ressources et un moyen de contrôle de leurs actions et de leur état interne.
- *Réactivité:* les agents perçoivent, de manière limitée, leur environnement, et répondent de manière opportune à ses changements.
- *Capacité social:* les agents interagissent avec les autres agents (et éventuellement avec les humains) via un langage de communication agent.
- *Proactivité:* les agents n'agissent pas seulement en réponse à leur environnement, ils sont capables d'avoir des comportements orienté-objectif en prenant l'initiative.

Dans un système multi-agents, on appelle ***environnement*** l'espace commun aux agents du système [38]. D'après [36], l'environnement à les propriétés suivantes: *Accessibilité, Déterministe ou non, Statique vs dynamique, Continu vs discret*.

Les ***interactions*** proviennent de la mise en relation dynamique de plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques.

D'après Jacques Ferber [37], les ***organisations*** constituent à la fois le support et la manière dont se passent les interrelations entre les agents, c'est-à-dire dont sont réparties les tâches, les informations, les ressources et la coordination d'actions.

2.1.2 Classification des agents

Il existe plusieurs critères de classification des agents. Dans ce qui suit, nous allons citer les types d'agents les plus utilisé dans la littérature.

a. Agents communicants

- Un agent purement communicant est un système ouvert qui détient ses propres ressources. Il est conduit par l'ensemble de ses propres objectifs, et il peut communiquer avec d'autres agents. Son comportement est lié aux communications qu'il reçoit [33].
- Un agent purement situé ne communique pas directement avec d'autres agents. les interactions se font via l'environnement. Sa position dans l'environnement est celle qui détermine son comportement. Il peut se déplacer et se reproduire [33].

b. Agents cognitifs

- Les agents à capacités cognitives s'inspirent du modèle humain. Ces agents possèdent une représentation explicite de leur environnement, des autres agents, et d'eux-mêmes. Ils sont aussi dotés de capacités de raisonnement et de planification ainsi que de communication.
- Les agents à capacités réactives ne possèdent pas de moyen de mémorisation et n'ont pas de représentation explicite de leur environnement: ils fonctionnent selon un modèle stimuli/réponse. En effet, dès qu'ils perçoivent une modification de leur environnement, ils répondent par une action programmée.

2.1.2.1 Classification selon la structure de l'agent

D'après [36] chaque agent est décomposé en architecture et programme. Selon la structure de l'agent on peut trouver distinguer les types suivant:

- ***Agent à réflexe simple (Simple reflex agent):*** caractérisé par les règles condition-action: ***if (condition) then action.***
- ***Agent à réflexe basé sur un modèle d'état (Model-based reflex agent)***: l'agent combine entre les perceptions courantes et l'historique des états internes (dit modèle interne) afin de construire une description de l'état courant.
- ***Agent basé sur le but (Goal-based agent)***: L'agent utilise les connaissances sur l'état courant et des informations décrivant la situation désirable afin d'agir sur l'environnement.
- ***Agent basé sur l'utilité (Utility-based agent)***: Durant le chemin vers le but destination on peut assigner à chaque état d'une configuration particulière de l'environnement une valeur d'utilité afin d'aboutir à un comportement de bonne qualité.
- ***Agent d'apprentissage (Learning agent)***: Afin d'améliorer la décision de l'agent, on lui donne le pouvoir d'apprendre au fur et à mesure ce dont il a besoin.

2.1.2.2 Agents à base de connaissances (agents logiques)

Ce sont des agents basés sur les connaissances disponibles concernant l'environnement et un raisonnement (logique) portant sur les actions possibles dans cet environnement.

2.1.2.3 Agents mobiles (MA: Mobile Agent)

Les agents mobiles sont des agents capables de se déplacer (programme et état) à travers un réseau, et recommencer leurs exécutions au site distant. La motivation principale derrière les agents mobiles est de remplacer les RPC (remote procedure calls). Quelques problèmes techniques doivent être pris en considération [38]:

- ***Sérialisation:*** comment coder l'agent dans une forme convenable pour être transmis dans le réseau, et quel aspect de l'agent va être sérialisé (programme et données).
- ***Exécution locale et distante:*** comment est exécuté un agent arrivé à sa destination.
- ***Sécurité:*** quand un agent est envoyé d'un hôte à un autre, il peut perturber l'exécution des processus de l'hôte distant.

2.1.3 Méthodes de Raisonnement

Le raisonnement est la manière de pensé d'un agent pour résoudre le problème en démarrant des hypothèses pour aboutir aux résultats. Plusieurs méthodes existent :

2.1.3.1 Raisonnement déductif

Les connaissances de l'agent sur l'environnement sont traduites en une description symbolique adéquate et précise appelé base de connaissances. Puis un processus de déduction est y appliqué afin d'aboutir au résultat.

2.1.3.2 Raisonnement Means-Ends

Cette méthode est connue sous le nom "Planning raisonnement" dans laquelle l'agent suit un plan (séquence d'actions) généré par un système de planification [38].

Plan = P ("But ou intention", "état courant de l'environnement", "actions possibles»).

2.1.3.3 Système de raisonnement procédural (PRS)

Le système de raisonnement procédural (SRP) est peut être la première architecture d'agent utilisant le paradigme BDI (belief-desire-intention). Dans un SRP, l'agent est équipé d'une bibliothèque précompilée de plans construits manuellement par le programmeur.

2.1.4 Communications entre agents

La communication est toujours considérée comme un sujet très important pour un système multi-agents. Elle permet aux agents d'échanger les différentes informations et de coopérer afin d'atteindre un but commun. Comme exemples d'ACLs (Agent Communication

Language) nous pouvons citer [40]: KIF (Knowledge Interchange Format), KQML (Knowledge Query and Manipulation Language) et le langage de communication d'agent de FIPA.

2.1.5 Coordination

L'un des problèmes les plus importants dans le travail coopératif est la coordination. Elle concerne la gestion des interdépendances entre les activités des agents. Plusieurs approches sont développées pour des activités de coordinations dynamiques [38].

2.1.5.1 Planification globale ou partielle

Le principe est d'échanger les informations entre les agents coopérants afin d'atteindre des conclusions communes dans le processus de résolution du problème. La planification est partielle parce que le système ne génère pas un plan pour le problème entièrement. Elle est globale parce que les agents échangent des plans locaux et coopèrent afin d'atteindre une vue globale.

2.1.5.2 Coordination à base de buts communs

Quand un groupe d'agent sont engagés dans une activité de coopération, ils ont un but commun en plus de leurs buts individuels. Levesque et al [41] ont défini la notion de but persistant commun (JPG: Joint Persistent Goal).

2.1.5.3 Modélisation mutuelle

Chaque agent se met à la place de l'autre et essaye de savoir ses croyances et ses intensions afin de prédire les actions à faire. L'un des systèmes d'agents qui implémente cette idée est le système *MACE* [42]. Dans MACE chaque agent maintient un modèle de relations contenant une représentation des autres agents: leurs capacités, intérêts, leurs compétences...

2.1.5.4 Coordination basée sur les lois sociales

Les agents utilisent des normes, comparables à nos normes sociales de coordination, qui sont soit prédéfinis (inchangeable) ou bien change dans la vie du système (dans ce cas les nouvelles normes seront émergés vers tous les agents).

2.1.6 Apprentissage

L'apprentissage induit des changements de contenu et d'organisation de la base de connaissances d'un système susceptibles d'améliorer ses performances pour une tâche particulière ou pour un ensemble de tâches. Il y a apprentissage lorsque le système acquiert de nouvelles connaissances ou lorsqu'il réorganise ses connaissances actuelles pour en faire un meilleur usage. Il existe trois grandes familles d'apprentissage [36]:

2.1.6.1 Apprentissage supervisé

Processus dans lequel l'apprenant reçoit des exemples d'apprentissage comprenant à la fois les valeurs d'entrée et de sortie.

2.1.6.2 Apprentissage non-supervisé

Contrairement à l'apprentissage supervisé, on ne fournit ici qu'une base d'entrées, et c'est le système qui doit déterminer ses sorties en fonction des similarités détectées entres les différentes entrées (règle d'auto organisation).

2.1.6.3 Apprentissage par renforcement

Dans cette méthode, l'agent apprend sans supervision et tout le temps. L'apprentissage est basé sur le principe de rétro-action: lorsque l'agent est confronté à une certaine situation, il choisit une action. Sa réaction est alors jugée par rapport à un objectif prédéfini, et l'agent reçoit une récompense déterminée par la qualité de sa réponse par rapport à la réponse optimale.

2.2 Plateformes pour les systèmes multi-agents

Une plate-forme de développement des systèmes multi-agents est une infrastructure de logiciels utilisée comme environnement pour le déploiement et l'exécution d'un ensemble d'agents. Elle devrait fournir des manières confortables pour créer et tester des agents et agir en tant qu'un médiateur entre le système d'exploitation et les applications (agents) tournant dessus.

Plusieurs plates-formes multi-agents existent: les plates-formes de simulation, les plates-formes de développement et les plates-formes d'exécution. Elles ont été un courant notable d'influence pour les méthodes orientées agent.

2.2.1 AgentBuilder

AgentBuilder [45] est une suite intégrée d'outils permettant de construire des agents intelligents, il a été développé en JAVA par Reticular Systems Inc. L'élaboration du comportement des agents se fait à partir du modèle BDI et du langage AGENT-0. KQML est utilisé comme langage de communication entre les agents. Par contre on peut créer des fichiers «.class » et les exécuter sur une JVM standard.

AgentBuilder est composé d'une interface graphique et d'un langage orienté agent permettant de définir des croyances, des engagements et des actions. Il permet également de définir des ontologies et des protocoles de communications inter-agents. Un agent crée avec cet outil est typiquement un agent d'interface, chargé de faciliter la recherche d'information ou la réalisation de certaines tâches à la place de son utilisateur. Un tel agent sera capable de filtrer l'information, de négocier des services avec d'autres agents et dialoguer avec son utilisateur.

2.2.2 LEAP

LEAP (Lightweight Extensible Agent Platform) [43] est une plate-forme FIPA[1], comme elle a été conçue à l'origine avec Java pour des appareils à ressources limitées elle pourrait être adaptée pour une utilisation dans un réseau de capteurs sans-fil, mais le problème est que l'utilisation de Java sur les nœuds d'un RdC s-f est encore matière de recherche.

2.2.3 MadKit

MadKit (Multi-Agents Developpement Kit) [44] est une plateforme multi-agents modulaire et scalable écrite en Java et conçue selon le modèle d'organisation Alaadin AGR

[1] Foundation for intelligent physical agents: comité de standardisation de l'IEEE dont le but est de promouvoir les technologies basées sur les agents.

(Agent/Group/Role): des agents sont situés dans les groupes et jouent des rôles. MadKit est développée en 1996 par Olivier GUTKNECHT et Michel FERBER au Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM) de l'Université Montpellier II. Il s'agit d'une plate-forme libre pour l'utilisation dans l'éducation. Un moteur d'exécution est utilisé dans MadKit où chaque agent est construit en partant d'un micro-noyau. Chaque agent a un rôle et peut appartenir à un groupe. MadKit est dotée d'un environnement de développement graphique qui permet facilement la construction des applications.

2.2.4 MASK

Mask (Multi-Agent System Kernel) est un environnement de développement de systèmes multi-agents expérimental développé depuis 1993 dans l'équipe MAGMA. Il est fondée sur l'approche d'analyse et de conception Voyelles a constitué le premier support logiciel de cette méthode. L'objectif est de fournir des bibliothèques d'Agent, de manipulation d'Environnements, d'Interactions, et d'Organisations ainsi que des outils d'aide à la programmation. Les modèles implémentés sont des architectures d'agents hybrides (ASTRO) et réactifs (PACORG), des modèles d'interaction à protocoles (IL) et à forces (PACO), et un modèle d'organisation statique (RESO). Ces modèles intègrent des éditeurs permettant d'éditer les instances de ces modèles.

2.2.5 Zeus

Zeus [46] est un environnement intégré pour la construction rapide d'applications à base d'agents collaboratifs. Il est développé par l'Agent Research Program du British Telecom Intelligent System Research Laboratory. La documentation de Zeus est abondante, et insiste particulièrement sur l'importance des aspects méthodologiques de Zeus « The agent creation methodology is vital to the use of the Zeus toolkit ». La méthodologie de Zeus utilise décomposition en quatre étapes pour la construction d'agents nommées respectivement: analyse du domaine, conception, réalisation et support d'exécution.

2.2.6 Dima

DIMA (Développement et Implémentation de Systèmes Multi-Agents) [47] est un environnement de développement de systèmes multi-agents dont le développement a

débuté en 1993. Il se caractérise par une approche résolument orientée Objets, l'objectif étant d'étendre les Objets pour en faire des Agents, en leur donnant les propriétés manquantes, en particulier l'autonomie, la proactivité, l'adaptation et la sociabilité. L'architecture proposée est modulaire. Un Agent est composé de différents composants, chacun implémentant un comportement de l'agent. Ces comportements peuvent être réactifs (passifs) ou cognitifs (proactifs). L'orientation objet permet la composition et l'héritage des comportements. Les agents sont adaptatifs, grâce à un mécanisme de méta-comportement qui leur permet de choisir le comportement le plus adapté.

2.2.7 JADE

JADE [48] est une plate-forme multi-agents développée en entier en JAVA, par F. Bellifemine & A. Poggy, G. Rimassa, P. Turci pour la société CSELT (Italie) en 1999 [49], qui a comme but de faciliter le développement des applications agent d'optimiser les performances d'un système d'agent distribué.

La plateforme JADA est conforme aux spécifications FIPA97 (Fondation for Intelligent Physical Agents), et inclus tous les agents rôles qui constituent la plateforme, c'est le ACC (Agent Communication Canal), AMS (Agent Management System)et le DF (Directory Facilitor), tous les communications entre agents est faite par l'envoi de message, ou le FIPA ACL (Agent Communication Language) est le langage utiliser pour écrire ces messages.

2.3 Conclusion

Le but de la recherche sur les systèmes multi agents est de trouver des méthodes qui permettent de développer des systèmes complexes composés d'entités autonomes capables de collaborer entre elles pour réaliser les tâches globales d'un système, avec pour chacune d'elle, un nombre assez limité de ressources.

Le modèle basé sur les agents a été globalement inspiré de la biologie (colonie de fourmis ou d'abeilles) et a été ensuite adopté par différents courants de la recherche, notamment celui de l'intelligence artificielle qui l'a enrichi par de nombreuses idées et par de nombreux algorithmes. Il a donc été étendu et a gagné beaucoup plus d'attention, et trouvé de plus en plus de domaines d'application, et c'est en toute logique qu'il soit très

utilisé maintenant dans la modélisation des systèmes informatiques complexes. En effet, les systèmes multi agents sont devenus un outil de choix pour les concepteurs des systèmes à l'instar des automates à états finis ou à événements finis, les réseaux de Petri, les « state charts » , les modèles à base de files d'attente, les modèles stochastiques, les modèles fonctionnels ou encore les équations différentielles.

Les plates-formes de développement des systèmes multi-agents offrent un environnement pour le déploiement et l'exécution des agents. Cependant, les plates-formes d'agents actuelles ne sont pas appropriées pour les réseaux de capteurs sans-fil en raison de leur consommation élevée des ressources (mémoire, gestion de l'énergie..).

Chapitre 3

Les systèmes multi agent pour les réseaux de capteurs sans fil

3.1 Introduction

L'idée qui consiste à utiliser des agents dans un RdC s-f est très intéressante [70], car elle propose de combiner des caractéristiques propres aux capteurs avec celles qu'elles leurs sont proches dans le modèle agent. Par utilisation, on désigne l'injection dans le réseau de code qui représente un ou plusieurs agents (suivant l'architecture). Les agents sont appropriés pour les environnements qui présentent un haut degré de dynamisme et une limitation des ressources et avec des informations partielles et/ou imprécises (situations très habituelles dans un RdC s-f).

Le modèle agent présente certaines analogies avec le modèle habituel d'un capteur. Un agent reçoit une série de stimuli de son environnement, les données obtenues sont traitées pour déterminer les actions à entreprendre par l'intermédiaire de quelques actionneurs. De même, les nœuds d'un RdC possèdent chacun une unité de détection (comme décrit dans 1.4.3) qui recueille les informations du monde extérieur (mais elle peut également l'obtenir auprès d'autres nœuds en échangeant des messages).

3.2 Transposition du modèle agent sur les RdC s-f

Beaucoup d'attributs qui caractérisent le comportement des agents (voir 2.1.1) sont utilisables dans un RdC s-f. Parmi les attributs soumis à une application dans un RdC s-f on a:

- **Réactivité:** Les agents sont capables de détecter et de réagir à des stimuli en traitant l'information qu'ils reçoivent de l'extérieur (obtenue par l'unité de détection dans le cas d'un RdC s-f) et offrir une réponse par rapport au traitement.

- **Capacité de travailler de manière asynchrone:** Les agents entrent en activité après la réception d'un stimulus. Dans un RdC s-f, cette caractéristique favorise la mise en œuvre de techniques garantissant les économies d'énergie du réseau (e.g. Méthodes de changement d'état: sleep - awake).

- **Autonomie:** Cette qualité permet à un agent de maintenir un certain type de contrôle sur ses actions (décide de l'action à effectuer, gère les conflits, etc.). Dans un RdC s-f, cette caractéristique est très utile, car si un nœud du réseau tombe en panne (e.g. capteur qui a épuisé sa batterie), le réseau doit être capable de continuer à fonctionner sans le nœud défectueux.

- **Proactivité:** Le comportement d'un agent est orienté-objectif. Cette caractéristique est essentielle dans un RdC s-f, parce qu'un nœud doit gérer les informations fournies par son unité de détection, et mener à bien sa tâche.

- **Aptitude à la communication:** Un agent est capable d'interagir avec d'autres agents. Dans un RdC s-f cette capacité est reflétée dans la répartition des informations obtenues par un capteur à d'autres nœuds du réseau.

- **Collaboration et coopération:** L'agent est capable d'accomplir des tâches en coopérant avec d'autres agents. dans un RdC s-f, ce fait se manifeste lorsqu'un nœud doit fournir des informations et attendre pour y obtenir d'autres par les autres nœuds du réseau. De cette manière, les nœuds forment un environnement distribué, conçue pour apporter une solution à un problème donné.

- **Mobilité:** La capacité de migration d'un agent peut être appliquée dans un RdC s-f. La nature instable de ce type de réseau exige des tâches de reconfiguration et de réadaptation de la topologie; Par conséquent, le transfert du code de traitement serait une excellente solution à ce problème.

Le tableau **Tab. 3.1** résume les principales caractéristiques des agents qui sont transposables aux fonctionnalités des nœuds impliqués dans un réseau de capteurs sans fil:

	Agents	**Capteur dans un RdC s-f**
Réactivité	Capacité de proposer une prévision à partir de certaines informations.	Capacité d'anticiper les faits, avant la défaillance d'un ou plusieurs nœuds.
Travail asynchrone	Caractéristique qui fait que les agents n'entrent en fonctionnement qu'à la réception de certaines informations.	Détecter les stimuli environnementaux auxquels ils doivent répondre.
Autonomie	Capacité de mener à bien une tâche sans aucun type de contrôle.	Capacité d'accomplir les fonctionnalités désirées sans l'intervention de quelconque composant.
Proactivité	Grâce à cette fonction, les agents sont en mesure de s'acquitter de leurs tâches en se basant sur certaines informations.	Les informations fournies par les nœuds doivent être utilisées pour atteindre les objectifs du réseau.
Communication	Capacité d'un agent d'interagir avec les autres agents.	Capacité d'un capteur d'interagir avec les autres capteurs.
Collaboration et coopération	Chaque agent fournit des informations à un autre agent pour mener à bien une tâche conjointement.	Les nœuds doivent travailler ensemble pour réduire le nombre de communications
Mobilité	Capacité de migrer d'un endroit vers un autre	Capacité d'envoyer un nouveau code de traitement du nouvel état du réseau en vue des tâches de reconfiguration.

Tab. 3.1: Caractéristiques des agents applicables aux nœuds d'un réseau de capteurs sans-fil

3.2.1 Classification des agents dédiés aux RdC s-f

Selon les caractéristiques associées aux différents types d'agents, on peut faire une classification de ceux qui sont les plus appropriés pour un RdC s-f:

3.2.1.1 Agents d'information

La capacité à gérer l'information dans ces agents est utile pour un RdC s-f, en particulier dans l'agrégation et le filtrage des données, ce qui permet de déterminer quelle information est importante avant l'opération d'envoi. Cela a pour effet de diminuer le nombre de communications

3.2.1.2 Agents autonomes

Ces agents sont capables dans des moments bien déterminés de prendre des décisions par eux-mêmes. Dans un RdC s-f, les agents de ce type peuvent être utiles, en particulier dans les cas de défaillance de certains des nœuds du réseau, le réseau peut atteindre son objectif, sans une intervention externe.

3.2.1.3 Agents mobiles

Bien qu'il existe certains auteurs qui ont produit des applications avec des agents mobiles [69] [70], leur utilisation dans les réseaux de capteurs exige une attention particulière, car la migration du code de traitement entraîne un coût d'énergie qui peut être évitable. Toutefois, leur utilisation est nécessaire parce qu'ils garantissent une facilité d'adaptation aux besoins de l'environnement (comme par exemple, le changement de topologie du réseau).

3.2.2 Travaux sur les SMA pour les RdC s-f

De nombreux travaux ayant utilisé le paradigme agent dans les réseaux de capteurs sans fil on été réalisés. Selon [56] on peut distinguer 3 approches d'utilisation, basée sur le nombre et le type d'agent utilisés: la première ayant considéré chaque capteur comme étant un agent ; la deuxième ayant un seul agent qui travaille avec tout les nœuds du réseau ; la troisième modélise les messages de données et les messages d'envoi du code de traitement entre les capteurs par des agents mobiles.

3.2.2.1 Première approche: chaque capteur est un agent

Un réseau de capteur sans-fil est un système distribué constitué de nœuds autonomes où chaque nœud est capable de maintenir un certain type de contrôle sur ses actions et est capable aussi à partir de certaines informations, de prendre des décisions locales qui auront un impact sur les performances du système en entier.

Le modèle agent dans le contexte des RdC s-f voit les capteurs du réseau comme étant des agents capables de collaborer entre eux afin d'établir le meilleur chemin de communication, gérer l'énergie, réaliser les agrégations des données, et répondre aux changements de la topologie du réseau.

Plusieurs approches ont été proposées dans ce contexte. Tong et al [50] ont proposé une architecture à grande échelle pour les réseaux de capteurs à faible consommation d'énergie, désignée sous le nom de SENMA "**SE**nsor **N**etworks with **M**obile **A**gents". SENMA fait introduire des agents mobiles, qui communiquent de façon opportuniste avec un grand nombre capteurs. L'ajout d'agents mobiles au réseau de capteurs transfère les tâches complexes de calcul intensif, depuis les capteurs primitifs à des agents mobiles beaucoup plus puissants, ce qui permet de réaliser les taches du système de manière beaucoup plus efficace dans les cas à forte contraintes énergétiques.

Tynan et al [52] [55] ont proposé pour minimiser la consommation d'énergie dans un réseau de capteurs une approche basée sur des agents intelligents. L'idée consiste à minimiser le plus possible le nombre de nœuds intervenant sur le processus de capture. Pour cela, l'approche utilise la technique d'interpolation qui consiste à estimer la valeur d'une fonction entre deux valeurs. Donc si l'agent, avec l'information qu'il contient en collaboration avec les agents voisin, peut estimer la valeur demandée pour un point donné et avec une certaine exactitude, il décide de ne pas interroger les nœuds se trouvant près de ce point.

Tynan et al proposent aussi dans [55] une plateforme d'agents mobiles pour la gestion de l'énergie dans un réseau de capteurs. Les agents fonctionnent selon le paradigme BDI (Belief, Desire and Intention). La première propriété représente les connaissances de l'agent sur sont état et son environnement, la deuxième représente les buts à atteindre, et la

troisième représente les étapes nécessaires pour atteindre le but. Pour chaque agent un état logique est défini, cet état résulte de l'agrégation des trois propriétés précitées. Afin de garantir la création d'agents complètement fonctionnels, une plateforme d'agents analogue à une machine virtuelle fournit aux agents des services permettant d'accéder aux ressources hardware. L'une des propriétés importantes de cette plateforme est l'adaptabilité de l'agent qui lui permet de s'exécuter sur des nœuds hétérogènes et de se déplacer entre les différents nœuds.

Beyens et al [67] assimilent un réseau de capteurs à un système multi agents. Les agents sont les capteurs et les actions sont les paquets transmis vers les capteurs voisins. Chaque agent essaye d'apprendre les actions nécessaires qui minimisent la consommation d'énergie en appliquant une technique d'apprentissage basée sur l'algorithme Q-Learning appelé Q-RC (Q-Routing with Compression). Une stratégie d'agrégation et de compression des paquets de données est appliquée afin de réduire la quantité de données circulant dans le réseau.

JaeWan et al [51] ont proposé EAR (**E**fficient **A**gent-based **R**outing protocol) un protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans-fil basé sur les agents pour résoudre efficacement le problème de transmission de données aux stations de base mobiles. Quand une station de base change son emplacement, elle choisi le nœud voisin le plus proche pour être un *Agent* qui va jouer le rôle d'une station de base fictive, cet Agent reçoit les données des autres nœuds et les redirige vers la station de base réelle. Ce mécanisme réduit considérablement le nombre de messages et évite les reconfigurations des nœuds par rapport à la nouvelle position de la station de base, cela permet de gagner en consommation d'énergie.

La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs est aussi le point essentiel dans les travaux de Pandana et al [53]. Ils ont proposé une approche basée sur des agents apprenants. Leur travail se concentre sur la communication point-à-point. Avant chaque transmission, un agent de control intelligent exécute un algorithme d'apprentissage par renforcement pour avoir des connaissances sur son environnement lui permettant de prendre les décisions appropriées.

Mertsock et al [54] utilisent le modèle agent pour modéliser le comportement des capteurs, ils proposent une vision du RdC s-f comme étant un réseau de nœuds autonomes distribué ayant chacun la capacité de prendre des décisions. Ils proposent également l'utilisation des stratégies de l'intelligence artificielle sur les nœuds afin de permettre la prise de décision, en travaillant avec un système expert basé sur des règles d'inférences. Ils proposent également une technique visant à incorporer des stratégies de détection des défaillances afin que les nœuds puissent détecter les nœuds voisins défectueux et prendre des décisions de routage en utilisant cette information.

3.2.2.2 Deuxième approche: un seul agent pour tout le réseau

Dans cette approche, tous les nœuds du réseau travaillent avec un seul agent généralement logé à la station de base. Le point fort est qu'il existe un seul point de contrôle les avantages étant la possibilité d'accéder au réseau entier et une augmentation considérable de l'efficacité, puisque la transmission à partir de ce point central garantit une meilleure synchronisation et le nombre de collisions s'en trouve réduit en conséquence. La synchronisation des transmissions est d'autant plus importante que lorsque qu'on sache qu'elle minimise les collisions avec un minimum de consommation énergétique, contrairement à d'autres techniques de transmissions qui minimisent les collisions avec un coût énergétique élevé. Par conséquent, la synchronisation rapporte des économies d'énergie.

Il y a, toutefois, un certain nombre de limitations à ce modèle [57]. La première difficulté est rencontrée lors de l'évolution du réseau. Dans ce modèle, l'agent demande à chaque nœud de lui envoyé les données qu'il a pu intercepter dans son environnement, dans certains cas, le nombre de nœuds du réseau augmente de manière continuelle, et de ce fait, le temps nécessaire à un agent pour effectuer les prétraitements sur les données à envoyer (agrégation), en plus du temps nécessaire pour l'opération de transmission elle-même, peut s'avérer trop long, ce qui peut entraîner des retards importants et déstabiliser tout le système. En plus, dans les grands réseaux, le routage le plus adéquat est celui basé sur la communication multi-sauts (voir 1.3.6.2). Cela accroitra davantage les temps de latence et les répercussions sur la consommation d'énergie ne peuvent être que mauvaises.

Un deuxième problème est observé dans les cas où il y a un besoin d'utiliser plus d'un agent pour pouvoir accéder à un nœud en particulier ou à plusieurs nœuds du réseau simultanément, par exemple, lorsqu'il s'agit d'exécuter une application multi tâches sur le réseau. Une augmentation du temps de latence se produit parce qu'un agent doit attendre l'autre pour achever sa tâche avant qu'il puisse accéder au réseau.

En résumé, ce modèle peut être décrit comme utilisant une approche de traitement centralisé. Les données sont transmises à un point central (UN AGENT) pour un traitement ultérieur.

3.2.2.3 Troisième approche: les agents mobiles

Selon [74] Un agent mobile est une section de code qui peut mettre en œuvre les tâches des utilisateurs de manière autonome. Il peut suspendre son exécution sur un nœud, pour migrer vers un autre nœud sur le réseau en transférant son code et en sauvegardant l'état des données, puis, reprendre l'exécution sur le nouveau nœud. Lorsque la tâche est accomplie, l'agent mobile communique les résultats vers le nœud source. Chaque nœud fournit un environnement d'exécution pour un ou plusieurs agents, et le réseau physique sous-jacent fournit les moyens pour les agents qui occupent les différents nœuds du réseau , de communiquer et de migrer.

Un agent mobile est donc en mesure de migrer vers un nœud pour effectuer les opérations de collecte de données, d'agrégation de données et de transmission de messages à la station de base ou à un autre noeud. Un premier avantage ici est la réduction du coût de calcul puisqu'un seul nœud est actif à la fois. Un deuxième avantage est que le coût de la communication est relativement faible puisque la migration d'un agent ne coûte qu'un événement d'envoi/réception unique.

Le principal inconvénient, toutefois, c'est que si le nœud vers qui un agent a migré tombe en panne, alors toutes les données recueillies jusque là seront perdu [57]. Il y a toutefois des techniques qui pourraient être mises en œuvre pour résoudre ce problème, par exemple en laissant des copies des données des nœuds précédemment visités afin que l'agent soit capable de rétablir leurs états si nécessaire. Un deuxième inconvénient est le manque de coopération dans cette approche. Dans les grands réseaux, en particulier, cela

pourrait être un problème si l'agent prend beaucoup de temps pour recueillir toutes les données requises pour accomplir une tâche donnée.

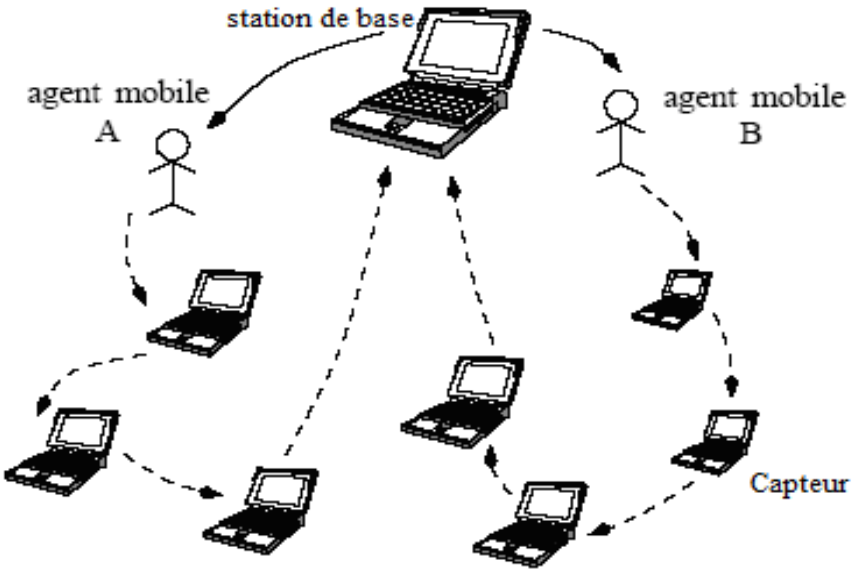

Fig. 3.1: Agents mobiles dans les réseaux de capteurs sans-fil [73] [59]

On peut relever deux catégories de travaux sur les agents mobiles: le message de données est un agent mobile, ou bien le code de traitement est un agent mobile.

a. Message de données comme agent mobile

L'agent mobile peut jouer le rôle d'un message de données entre les nœuds d'un réseau de capteurs sans-fil, le but reste toujours l'économie d'énergie en prenant en compte l'état de chaque nœud.

Parmi les travaux réalisés dans ce sens on trouve dans [60] une approche proposée pour la collecte des données en utilisant des agents mobiles. Un algorithme génétique est utilisé pour le routage des agents mobiles. Chaque agent empreinte le chemin calculé par l'algorithme génétique. La consommation d'énergie est adaptée selon les états des nœuds sources et cibles et ceux sur lesquels l'agent a effectué un saut, en minimisant une fonction de coût relative à l'énergie consommée.

Long al. [58] ont proposé une solution de routage dans les réseaux de capteurs dans laquelle les paquets de données sont routés depuis un nœud jusqu'à la station de base en utilisant des agents mobiles de données, ils sont capables de prendre des décisions de routage et choisir le meilleur chemin dans le réseau en se basant sur des informations

locales. L'agent prend en compte le coût du saut sur le prochain nœud en termes de quantité d'énergie disponible.

Dans [61] une solution est proposée pour le problème de routage d'un agent mobile vers ou depuis un nœud qui fait l'agrégation de données dans un réseau de capteurs. D'après les auteurs, L'ordre de visite des nœuds a une influence majeure sur le coût et sur la qualité de l'opération d'agrégation des données. La solution consiste à utiliser un modèle analytique simplifié pour exprimer le routage en termes d'une fonction objective directement proportionnelle à la force du signal et inversement proportionnelle à la perte de données et la consommation d'énergie. Un algorithme génétique est utilisé pour résoudre la fonction objective.

b. Le code de traitement comme agent mobile

Il s'agit maintenant de donner plus d'importance à l'opération d'agrégation de données qui est exécutée par la majorité des nœuds d'un réseau de capteur sans-fil. Cette opération vise à réduire la quantité de données qui circule dans le réseau sans affecter l'information propre (plus de détails dans l'annexe de ce document). En effet, le traitement des données permet de réaliser des économies sur l'énergie lors de leur transmission dans le réseau.

Dans [62] il est proposé de faire envoyer depuis les stations de base des agents mobiles spécialisés dans les opérations d'agrégation de données, à chaque fois qu'un capteur du réseau s'apprête à envoyer des données vers la station de base, cette dernière, fait exécuter un code correspondant à un agent mobile agrégateur qui migre vers le nœud en question pour effectuer les traitements nécessaires sur les données avant l'opération d'envoi. Les auteurs ont prouvé que le coût énergétique qui résulte de la migration de l'agent et de l'opération d'agrégation en plus de la communication des données traitées, était inférieure au coût de la communication sans traitement préalable. Les auteurs dans [63] ont approuvé cette solution et ajoutent qu'elle permet aussi de réduire le temps de latence dans le réseau par rapport à une architecture client-serveur habituelle.

Dans [64] les auteurs décrivent une machine virtuelle centrée sur la communication conçue pour les RdC s-f. cette machine propose une interface de haut niveau qui permet aux programmes qui l'utilise (algorithme de routage, agrégation..) d'être efficaces tout en étant

de taille minuscule (en dessous des 100 octets). Ceci réduit le coût énergétique de la transmission de code sur un réseau. Une fois qu'une instance du programme est introduite dans le réseau, elle est automatiquement envoyée vers tous les nœuds. Une contrainte de cette machine virtuelle est qu'elle ne permet pas l'exécution de plusieurs codes en même temps.

Dans [65] les auteurs proposent *Agilla* (voir **Fig. 3.1)** qui est une plateforme Intergicielle qui favorise le déploiement d'agents mobiles dans un réseau de capteurs pour exécuter des tâches bien déterminées. Agilla permet d'injecter des codes représentant des agents mobiles au réseau de capteur, les agents peuvent collaborer entre eux pour réaliser des tâches ensemble. Elle offre aussi la possibilité d'envoyer plusieurs agents sur un seul capteur, ce qui permet de faire exécuter plusieurs applications en même temps sur le réseau de capteurs sans-fil.

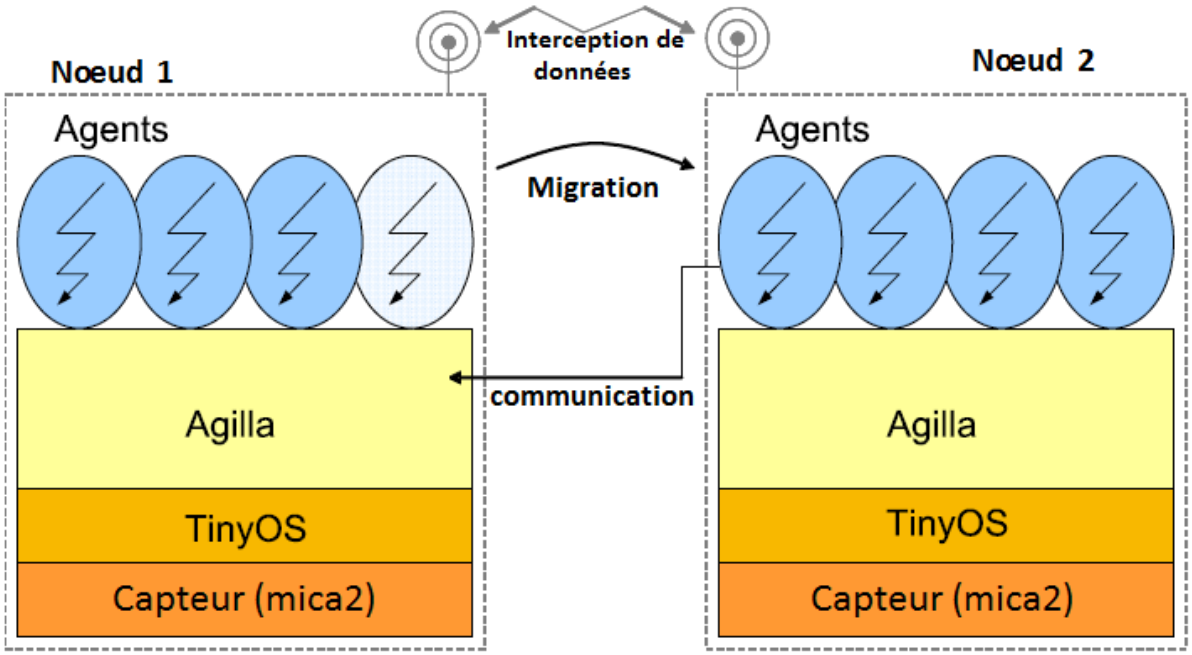

Fig. 3.2: Le modèle Agilla [65]

Dans [66] on trouve une proposition de protocole basé sur les agents mobiles pour la capture des objets en mouvement par un réseau de capteurs sans-fil. Une fois qu'un mouvement est détecté sur l'objet cible, un agent mobile sera lancé à sa poursuite en migrant à chaque fois vers le capteur le plus proche de l'objet. Les auteurs expliquent que l'utilisation des agents mobiles dans leur protocole de traquage permet de réaliser des économies sur le nombre de communications.

3.3 Conclusion

Qu'il s'agisse de création de protocoles dédiés aux RdC s-f, d'envoi de message, de routage, de traitement des données interceptées ou bien tout simplement de simulation du fonctionnement d'un RdC s-f, les agents sont de plus en plus utilisés dans les réseaux de capteur sans-fil. Le mot d'ordre étant "économie d'énergie". En effet, la majorité des travaux sur ce domaine exploitent le caractère "intelligent" des agents pour minimiser le coût énergétique sur ce type de réseaux.

Chapitre 4

Modélisation d'un Réseau de capteurs sans-fil suivant le modèle Agent

4.1 Introduction

Il a été question tout au long de ce document de démontrer les avantages de l'utilisation du modèle basé sur les agents dans les réseaux de capteurs sans-fil. Cette association est reprise ces dernières années dans beaucoup de travaux de recherche. Mais le modèle agent est utilisé de différentes manières et les types d'agents utilisés varient d'une utilisation à une autre. Cela dit, l'objectif reste toujours le même, quelque soit le type de l'agent utilisé ou la manière d'utilisation, l'économie sur les ressources énergétiques du réseau est le point de mire de tous les travaux dans ce domaine.

Par ailleurs, Les plateformes multi agents capables de simuler un réseau de capteurs sans-fil en vue d'une intégration des agents dans celui-ci ne sont pas légion, en plus, les simulateurs dédiés aux réseaux de capteurs sans-fil sont très rare, encore moins ceux qui offre la possibilité d'injecter du code "agent" dans le système. Toutefois, il est possible d'utiliser des simulateurs de réseaux conventionnels pour les réseaux de capteurs sans-fil.

Notre travail est une première étape vers la conception d'une plateforme de simulation des déploiements des agents dans un réseau de capteurs sans-fil, où chaque agent peut être considéré comme un capteur. Plusieurs types d’agents sont utilisés suivant le rôle du nœud qui peut être une station de base, un simple capteur, ou un cluster-head

(dans chaque groupe il ya un élément responsable de l'agrégation de l'information à partir des nœuds qui en dépendent, ce point est désigné par "cluster-head", le nœud qui joue ce rôle a généralement une plus grande capacité). Une modélisation à base d'agents est proposée ainsi qu'une méthode de conception des protocoles et des applications pour un réseau de capteurs sans-fil. Les hypothèses sur lesquelles est basé note travail sont décrites dans le paragraphe suivant.

4.2 Hypothèses

L'architecture du réseau est très liée à la phase de conception, donc on est obligé de prendre une décision quant à la topologie du réseau à modéliser, sans quoi, la conception n'aurai aucun sens si on essai de la rendre plus générale, puisque le moindre changement dans le réseau mettrait en cause la conception en entier.

L'architecture physique du RdC s-f utilisée est celle décrite dans [68] et [75] et [76] (voir **Fig. 4.1**).

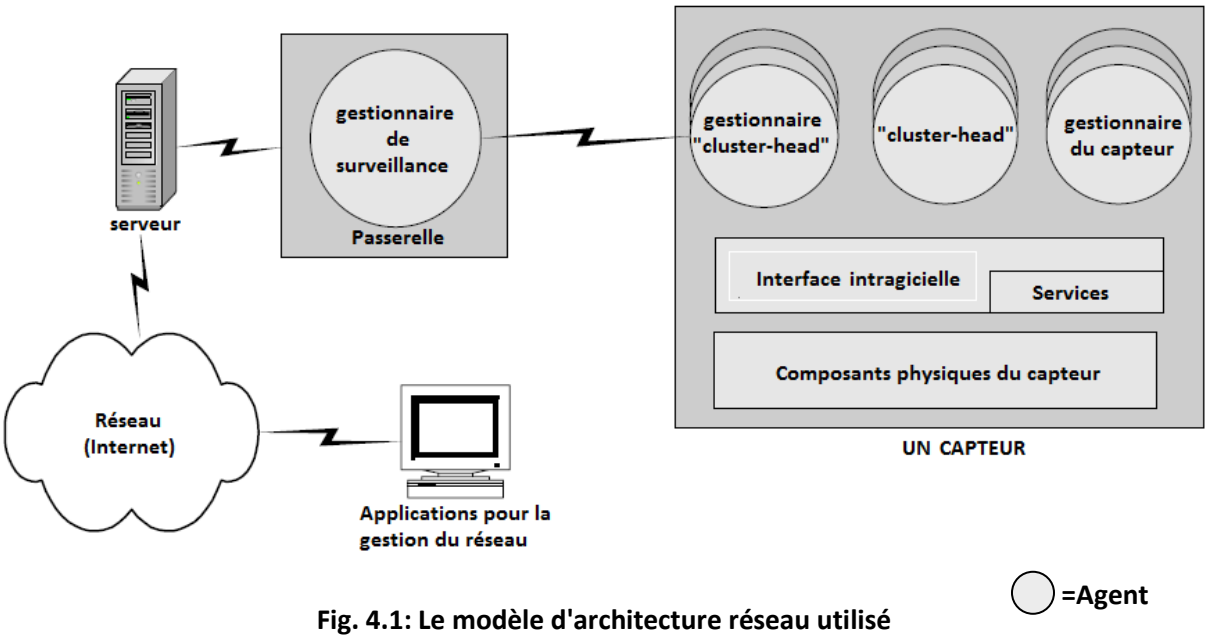

Fig. 4.1: Le modèle d'architecture réseau utilisé

Dans ce type de topologie, chaque nœud est associé et géré par un ou plusieurs agents. Le choix de cette organisation a été motivé par les raisons suivantes:

- Adaptation dynamique avec les changements sur le réseau ; un changement dans un nœud n'a pas d'effets majeurs sur tout le système, ce qui facilite l'évolutivité du réseau [68].

- Permet l'établissement d'une relation hiérarchique dans laquelle les nœuds se spécialisent dans certaines fonctions, de sorte que la communication ne soit plus nécessaire entre tous les agents. L'interaction entre agents s'effectue en fonction de leur situation hiérarchique, c'est-à-dire, leur catégorie. Les agents avec la plus grande capacité de traitement occupent les nœuds présentant des restrictions.

- Elle diminue l'interaction entre les nœuds et par conséquent le traitement par les agents, car elle centralise et réduit la circulation de l'information.

- Elle offre un Intergiciel (middleware) d'adaptation pour agents sur chaque capteur qui est chargé d'adapter et de livrer des informations aux agents et de suivre leur traitement par la voie des messages reçus de la part d'autres agents

Les agents sont chargés de faciliter l'interaction entre les nœuds du réseau, la passerelle (habituellement un capteur) et la station de base. Sur la base des approches décrites dans le chapitre 3 et les particularités de la topologie susmentionnée on définit les types d'agents suivants :

Gestionnaire du capteur: C'est l'agent chargé du filtrage des données dans un capteur, il envoie des données au réseau uniquement lorsque les données sont valides. En cas de défaillance d'un ou de certains de ses nœuds voisins, ou de son propre capteur, il se comporte comme un agent autonome en signalant la défaillance au cluster-head. Cet agent agira comme un agent mobile pour la reconfiguration du réseau.

Cluster-head: C'est l'agent responsable de l'agrégation et du traitement des données à partir d'un groupe de capteurs. En cas de défaillance de l'un des capteurs du groupe sous son contrôle, il se comporte comme un agent autonome, en assurant le fonctionnement du réseau sans le capteur défaillant. Cet agent agira aussi comme un agent mobile en attendant la reconfiguration du réseau.

Gestionnaire d cluster-head: Est l'agent chargé de coordonner entre les cluster-head, ainsi que de l'agrégation des données des cluster-heads associés. En cas de défaillance d'un des

cluster-head, l'agent se comporte comme un agent autonome, et il agira aussi comme un agent mobile pour la reconfiguration des cluster-head.

4.3 La conception

Dans cette approche, chaque nœud du réseau se voit comme un agent ayant ses propres caractéristiques et comportements par-rapport aux évènements qui se produisent dans son environnement. Tous les agents ne sont pas égaux, en effet, les cluster-heads sont plus puissants parce qu'ils effectuent les opérations d'agrégation de.

4.3.1 La modélisation des capteurs

Chaque nœud du réseau est représenté par un agent décrivant les caractéristiques et les comportements du nœud.

4.3.1.1 La classe Agent

On peut représenter un agent par un diagramme de classe comme décrit dans les travaux de Bernhard Bauer [77]:

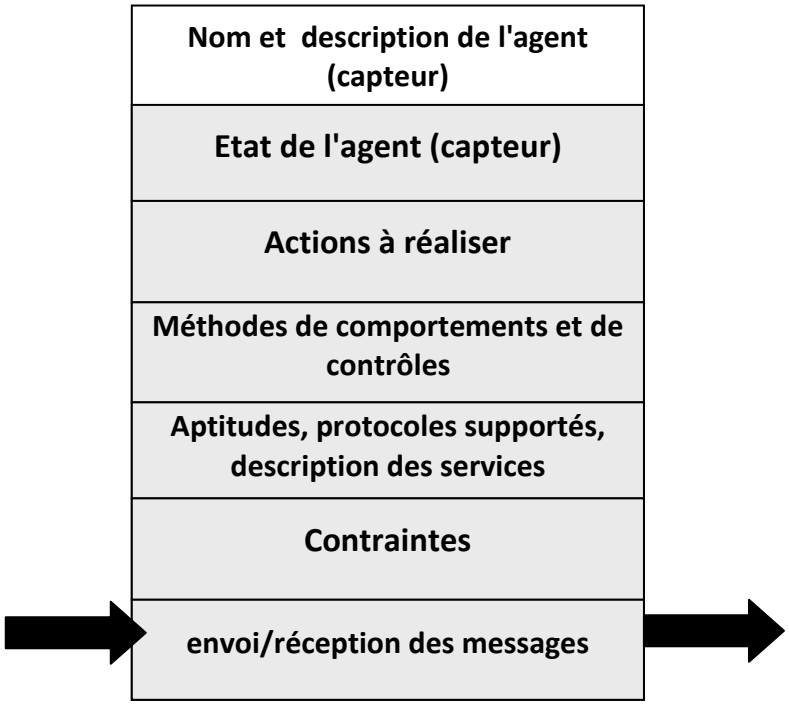

Fig.4.2: Diagramme de classe d'un agent

L'agent est une instance de la classe qui représente les caractéristiques d'un agent, les parties les plus importantes sont:

a. Nom et description de l'agent (capteur): Contient des informations liées au fabricant du nœud e.g: dénomination, date de fabrication, etc... Dans cette partie, nous décrivons les composants matériels du capteur modélisé par l'agent et leurs caractéristiques. Chaque variable de cette partie fait référence à un objet qui est une instance de la classe qui modélise le même composant. Par exemple, la classe *CPU_Unit* modélise le composant "unité de traitement" en définissant ses propriétés (fréquence d'horloge, mémoire cache etc.), les méthodes de la classe permettent la manipulation de ses propriétés.

On trouve dans cette partie aussi, des informations relatives au réseau dans lequel le capteur est déployé, on trouve par exemple des informations sur: la position du capteur, la liste des capteurs voisins, et la table de routage.

b. Méthodes de comportements et de contrôles: Cette partie définie l'ensemble des méthodes permettant la manipulation des caractéristiques de l'agent. Elles permettent d'accéder aux propriétés des composants constituant le capteur (l'état du composant, l'énergie consommée par chaque composant, etc...), de vérifier l'état du capteur et d'effectuer une migration si nécessaire, de mettre à jour la liste des capteurs voisins ainsi que la table de routage,

c. Envoi et réception des messages: définie l'ensemble des méthodes permettant d'implémenter les actions à accomplir par un agent lors de la réception d'un évènement. On peut distinguer entre deux types d'évènements

Évènements internes: c'est l'ensemble des évènements liés au changement de l'état interne du capteur, ou au transfert de données entre les composants ou les constituants du capteur, e.g: si l'énergie restante sur un capteur atteint un seuil critique, l'un des composants change son état et envoie un message à un autre composant. On peut voir la chose comme une transmission de données depuis la couche physique jusqu'à la couche application.

Évènements externes: c'est l'ensemble des évènements reçus de l'extérieur du capteur parmi lesquels on peut citer:

- La réception d'une requête par la station de base à partir d'un utilisateur du réseau.
- La détection d'un évènement de l'environnement par l'unité de capture installée sur le capteur (e.g. changement brusque de température).
- Envoi de messages entre les capteurs du réseau (les réseaux de capteurs peuvent utiliser une communication multi-sauts, et les capteurs sont souvent sollicités pour relayés des messages.
- Changement dans la topologie du réseau et replacement de certains nœuds (après la défaillance ou l'épuisement d'énergie d'un ou plusieurs capteurs).

Lorsque un évènement interne ou externe se produit, une méthode de comportement qui dicte au capteur les actions à accomplir est lancée automatique. Voici quelques exemples explicatifs:

- Changement d'état du capteur:

  e.g: **If** *Battery.curr_energ == limit_enrg* **then** *Radio.state= Off*

- Traitement de mesures de captures:

  e.g: **If** *Temp* > 19 **then** *save (time,temp)*

- Envoi de messages aux capteurs voisins/

  e.g: **If** *event* **then** *send (msg, neihbor _sensor list)*

La représentation ci-dessus prend en considération toutes les informations nécessaires pour la modélisation d'un capteur. Cependant, dans la plupart des cas le concepteur n'a pas besoin de définir toutes les informations, en traduisant cette modélisation vers un environnement de simulation, c'est-à-dire la génération des fichiers source XML de configuration à intégrer dans l'environnement, seules les informations définies par le concepteur qui seront mises dans ces fichiers. Cela permet d'optimiser le nombre d'informations et les méthodes de contrôle utilisées.

4.3.1.2 Les capteurs modélisés par des agents

D'après l'architecture du réseau décrite plus haut, nous allons modéliser le serveur et deux types de capteurs:

1. Le serveur (station de base)

Dans un réseau de capteurs sans-fil, le mot serveur n'a pas le même sens que dans un réseau à infrastructures, l'aspect client-serveur ne prime pas dans ce type de réseaux, bien que le serveur serve aussi de point d'accès aux nœuds du réseau mais, les nœuds sont tout à fait capables de communiquer entre eux indépendamment du serveur, ce dernier joue le rôle d'interface entre l'administrateur humain et les capteurs du réseau, il diffuse les requêtes correspondant aux tâches du systèmes sur tout le réseau selon un protocole de routage adapté aux contraintes des RdC s-f, et il reçoit les données interceptées par les nœuds en vue de leur interprétation. Un serveur est caractérisé par ses capacités de traitement de données, et l'interprétation des données est affichée sur une interface ou communiquée à d'autres applications.

Les serveurs peuvent être stationnaires ou mobiles, et dans les deux cas, un serveur ne pose pas de contraintes liées à la consommation d'énergie, puisqu'un serveur doit être alimenté en permanence, il est donc nullement nécessaire de définir un modèle mathématique pour la consommation d'énergie sur un serveur

Dans ce qui suit, nous allons schématiser les comportements à modéliser pour un serveur dans un RdC s-f.

- **Le traitement:** le serveur se charge de faire les traitements nécessaires sur les données en vue de leur exploitation par un administrateur humain ou un système informatique relié au réseau de capteurs. A la différence des autres traitements liés au protocole de routage, Cette fonctionnalité est réalisée au niveau de la couche "application" de la pile protocolaire.
- **La communication:** Comme décrit plus haut, Le serveur communique avec les capteurs du réseau et avec l'administrateur humain (via une interface homme-machine). Pour les Communications avec l'homme: deux fonctions principales sont schématisées:

  Request_reception (request ,source). Pour recevoir les requêtes de l'administrateur.

response Send (response, destination). Pour répondre aux requêtes.

Pour les communications avec les capteurs: ce type est lié au protocole de routage utilisé. Ce point sera repris avec plus de détails dans la section consacrée à la modélisation des protocoles.

L'agent qui représente le serveur doit être capable d'identifier la source des requêtes communiquées à travers le réseau en utilisant une table de requêtes et répondre de manière exacte suivant les priorités.

- **Implémentation des requêtes:** L'agent qui représente le serveur construit plusieurs tables de requêtes qui circulent sur le réseau selon le type données sur lequel les requêtes ont été utilisées. Il construit une autre table pour ses capteurs voisins qui ont la capacité de communiquer des données au serveur, cette table est régulièrement mise à jour afin d'accompagner les changements qui se produit sur le réseau (défaillance d'un capteur, reconfiguration des capteurs etc…)

Voici quelques exemples de requêtes depuis le serveur:

- Dans un système de traquage, le serveur demande aux capteurs d'envoyer des informations sur un objet se trouvant dans un périmètre P, pendant une période de temps T, et les informations sont rafraichies dans un intervalle de 100 ms

Une description simplifiée de l'exemple précédent, avec *T = 30 minutes*, pourrait être de cette forme:

```
type = objet_Cible            // le type de la cible à traquer.
intervalle = 100 ms            // envoi de nouvelles données toutes les 100 ms.
Periode = 30 minutes           // La période de capture dure 30
nodes = [1,100]               // nœuds concernés par la tâche.
```

Les informations renvoyées par les capteurs au serveur durant la tâche traquage de l'objet cible pourrait être de cette forme:

```
type = objet_Cible       // le type de la cible à traquer.
location = [5,20]       // coordonnées du capteur.
pertinence = 0.99       // degré de pertinence de l'information.
time: 00:20:40:99      // heure exacte de l'envoi de l'information.
```

- **Déplacement:** Ce comportement est propre aux serveurs mobiles. Certains réseaux de capteurs sont équipés d'un serveur mobile. Il est capable de se déplacer dans le réseau vers les différents capteurs, parfois sur demande de l'administrateur humain, et d'autrefois d'une manière autonome en réaction aux changements qui peuvent se produire dans le réseau.

2. Agents pour les capteurs du réseau

Comme décrit dans le début de ce chapitre, les capteurs d'un réseau n'ont pas tous les mêmes fonctions ni la même influence bien qu'ils soient tous capables de réaliser les opérations de détection et de transmission des messages. De nombreux facteurs ont une influence sur les caractéristiques et les comportements du capteur, de ce fait, avant d'essayer de schématiser les comportements à modéliser pour un serveur dans un RdC s-f, on doit d'abord connaitre ces facteurs influents:

- L'un des facteurs influant sur le comportement de l'agent, est l'ensemble des composants qui constituent le capteur. Par exemple, les composants physiques d'un capteur doté de capacités pour effectuer les opérations d'agrégation et de filtrage de données ne peuvent pas être les mêmes pour un capteur qui ne réalise pas ces opérations.

  - **Modélisation des composants d'un capteur**

Comme décrit dans (1.4.3) les composants d'un capteur sont principalement: Une unité de détection pour intercepter des informations à partir de l'environnement, un émetteur/récepteur pour communiquer avec la station de base et les autres capteurs, une unité d'alimentation en énergie pour assurer le fonctionnement du dispositif. Selon son utilisation, un capteur peut aussi comprendre des composants supplémentaires, tels qu'une unité de traitement pour effectuer les traitements sur les données (agrégation, filtrage, fusion etc..) un système de localisation, une unité supplémentaire d'alimentation, un stabilisateur et un mobilisateur qui permet au capteur de se déplacer à l'intérieur du périmètre du réseau.

Pour chaque composant on peut utiliser le modèle de la classe de l'agent décrite dans (4.3.1.1) La classe exprime les caractéristiques du composant ainsi que les méthodes de

comportements et de contrôles agissant sur ces caractéristiques. Cette modélisation offre au concepteur la possibilité d'ajouter à ces agents des comportements intelligents qui favorisent une meilleure gestion du composant, si on affecte par exemple un agent au composent responsable de l'émission et de la réception, cet agent peut intervenir et diminuer la puissance du signal radio lorsqu'il reçoit des informations provenant de l'agent responsable de l'unité d'alimentation faisant état d'un affaiblissement d'un déclin important des réserves énergétiques. Pour simuler le fonctionnement d'un composant modélisé à l'aide d'une classe, on doit définir un modèle mathématique qui doit être le plus proche possible du composant tel qu'il est dans la réalité.

- Un autre facteur influant sur le comportement de l'agent est le protocole de communication utilisé, il est responsable de la façon avec laquelle se fait la communication. Certains protocoles favorisent les échanges de données entre tous les capteurs du réseau alors que d'autres ne permettent les communications qu'entre les cluster-head et le serveur ; le cluster-head reçoit les données à partir des capteurs qui constituent son groupe, ceux-là ne peuvent pas communiquer entre eux. C'est le cas du protocole LEACH.

  - **Implémentation des protocoles de communication**

Chaque couche dans la pile protocolaire (voir 1.4.5) contient un certain nombre de protocoles différents. Pour tous les protocoles le principe est le même, chaque paquet de données qui traverse la couche protocolaire dans un sens en dans l'autre, subit une opération d'encapsulation (ajout d'un en-tête spécifique à la couche) ou de décapsulation (suppression de l'en-tête).

Les paquets de données traversent la couche protocolaire selon l'ordre de leur arrivée, cela implique l'utilisation d'une file d'attente des paquets, lorsqu'un protocole termine un traitement sur un paquet (encapsulation ou décapsulation), il lit le premier paquet sur la file d'attente, si l'en-tête du paquet est celle d'un protocole de la même couche, cela veut dire que le paquet provient d'une couche supérieur, le protocole décapsule l'en-tête et envoie le paquet à la couche inférieure, si l'en-tête du paquet est celle d'un protocole d'une couche inférieure, le protocole fait l'opération d'encapsulation et ajoute un en-tête au paquet avant de l'envoyer à la couche supérieure.

Donc si on définit une classe agent pour chaque couche protocolaire, toutes les couches auraient la même classe puisque tous les protocoles des différentes couches exécutent la même opération d'encapsulation et de décapsulation en plus de l'opération qui consiste à lire les paquets à partir d'une liste d'attente.

La définition d'un protocole est faite par la description de l'entête ajouté sur un paquet qui arrive sur une couche protocolaire, et par l'implémentation des méthodes de traitement réalisées sur le paquet:

- **La définition de l'en-tête:** Dans cette partie, une description de l'entête et de sa taille est faite. À partir de cette description, On crée une sous-classe de la classe d'agent qui représente la couche, elle contiendra une représentation des champs de l'en-tête ainsi que les méthodes qui agissent sur ces champs.

e.g: l'en-tête d'un paquet contient généralement des bits qui représente la source du paquet, On peut par exemple définir un champ nommé *source,* ainsi que deux méthodes pour les opérations d'encapsulation et de décapsulation: *get_source* pour l'encapsulation et la décapsulation et *set_destination* pour l'encapsulation seulement.

- **L'implémentation des méthodes:** Trois méthodes sont implémentées pour réaliser les différentes opérations sur les paquets qui traversent les couches: *get*, *process* et *transmit*. Chaque méthode peut exécuter deux traitements différents sur les paquets, suivant qu'ils proviennent d'une couche supérieure ou d'une couche. Le paramètre de la méthode est bien entendu le paquet de données mais on peut définir des paramètres supplémentaires dans le corps de la méthode. Nous pouvons résumer les méthodes de base d'un protocole dans les points suivants.

Nous pouvons définir les méthodes d'un protocole comme suit:

get_upper: cette méthode est exécutée lorsqu'un paquet de données est reçu à partir de la couche supérieure, elle prépare le paquet à être exécuté pour une autre méthode de traitement spécialisée dans la décapsulation.

get_lower: cette méthode est exécutée lorsqu'un paquet de données est reçu à partir de la couche supérieure, elle prépare le paquet à être exécuté pour une autre méthode de traitement spécialisée dans l'encapsulation.

process_upper: cette méthode est exécutée pour effectuer la décapsulation des paquets traités par la méthode *get_upper*.

process_lower: cette méthode est exécutée pour effectuer l'encapsulation des paquets traités par la méthode *get_lower*.

transmit_upper: cette méthode est exécutée pour transmettre les paquet traités par la méthode process_lower vers une couche supérieure.

transmit_lower: cette méthode est exécutée pour transmettre les paquet traités par la méthode process_upper vers une couche inférieure.

D'autres méthodes peuvent être rajouté dans la classe selon les particularités des protocoles utilisés dans les différentes couches, il suffit de définir le nom et les paramètres et le code de la nouvelle méthode.

Une classe d'agent supplémentaire est nécessaire pour vérifier et tester le bon fonctionnement des opérations de routage, cela est d'autant plus nécessaire que lorsque le réseau est sujet à de nombreux changements de topologie, en effet, certains protocoles fonctionnent mieux dans certains types de topologies, mais leurs performances diminuent avec des topologies différentes. L'agent est donc chargé de suivre l'évolution du réseau et changer le protocole utilisé si nécessaire.

- Un dernier facteur déterminent est la façon avec laquelle les capteurs sont déployés sur le réseau. Dans l'architecture décrite dans (4.2) les capteurs qui se trouvent sur les extrémités du réseau au plus bas de la hiérarchie sont des capteurs chargés uniquement de l'opération de capture alors que les capteurs qui sont placés au milieu du réseau (plus hauts hiérarchiquement que les capteurs chargés seulement de la capture) sont capables en plus de la capture et de la transmission, de réaliser le traitement de données.

- **Définition de l'architecture**

Le réseau est défini par: le périmètre de capture, les capteurs qui le constituent, les applications exécutées par les capteurs et le protocole de communication utilisé pour acheminer les données depuis les capteurs sources vers les autres capteurs ou vers le serveur. Au vu de ce qui a été décrit plus haut, Il ne reste donc plus qu'à définir le périmètre de capture, où les agents seront déployés.

- **Périmètre de capture**

Le périmètre de capture représente la surface dans laquelle les agents représentants les capteurs seront déployés, il peut être définit par plusieurs points avec des coordonnées (x,y), chaque point est une limite du périmètre, en joignant les points les uns aux autres, on obtient notre périmètre.

Nous pouvons diviser le périmètre de capture en sous périmètres, où chacun peut avoir ses propres agents pour le serveur et pour les capteurs, et son propre déploiement des capteurs.

- **Déploiement des agents**

Cette étape consiste à définir le déploiement des agents représentants les nœuds du réseau. Comme décrit précédemment, les nœuds peuvent être des serveurs ou des capteurs:

Serveur: on définit les différents types d'agents serveurs ainsi que leur nombre et leurs positions dans le périmètre de capture, on doit aussi leur attribuer la table des requêtes qui peuvent être exécutées sur les données, et les méthodes à acquérir pour réaliser les traitements.

Capteurs du réseau: on définit les différents types d'agents capteurs qui vont être déployés dans le périmètre de capture et la manière de déploiement. On Choisit un protocole de communication pour le routage, cela se fait par l'attribution aux agents des méthodes pour le routage des données dans le réseau (comme décrit dans la section Implémentation des protocoles de communication).

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé une approche qui peut servir de modèle pour la réalisation d'une plateforme de simulation des déploiements des agents dans un réseau de capteurs sans-fil, où chaque agent peut être considéré comme un capteur ou un serveur. Le choix de l'architecture du réseau sur laquelle est basée la conception est déterminent, car il est imprudent de réaliser une conception "généraliste" au risque d'arriver à des conclusions erronés.

Ce modèle peut être complété par une réécriture des différentes descriptions dans un langage machine orienté objet, et construire ainsi une bibliothèque de composants utilisable dans l'implémentation d'une plateforme de simulation.

Conclusion finale

De nos jours, les réseaux de capteurs sans fil sont devenus une technologie très importante, elle est impliquée dans de nombreux domaines et dans de nombreuses applications. Contrairement aux réseaux traditionnels qui sont généralement conçus pour transférer des données entre les nœuds, un réseau de capteurs est étendu pour réaliser d'autres fonctions supplémentaires, en effet, plusieurs nœuds dans un réseau de capteurs sans fil sont capables de combiner les données capturées localement, et de les traiter avant de les communiquer à l'utilisateur.

Ces fonctionnalités supplémentaires ajoutées au fait que les capteurs soient de très petite taille et que la communication ne soit pas filaire, font de la consommation d'énergie un problème de taille pour les concepteurs de ce type de systèmes.

Les études sur les réseaux de capteurs sans fil se sont focalisées sur ce dernier point et de nombreuses contributions ont vu le jour pour permettre d'améliorer la durée de vie de ces systèmes. Dans ce contexte, on a pu voir des recherches visant à utiliser les techniques des systèmes multi agents dans les RdC s-f, du fait que beaucoup d'attributs qui caractérisent le comportement des agents sont utilisables dans un RdC s-f.

Dans ce mémoire, nous avons d'abord présenté quelques notions de bases sur les réseaux sans fil et les différents types qui existent pour situer les réseaux de capteurs sans fil avec une description non exhaustive des domaines d'application et de l'architecture et de la pile protocolaire, ensuite nous avons abordé le thème des systèmes multi-agents (SMA) en insistant sur les alternatives intéressantes qu'ils peuvent offrir pour la représentation des systèmes complexes. Nous avons aussi essayé d'énumérer les principaux travaux de la communauté scientifique ayant utilisé le paradigme agent dans les réseaux de capteurs sans fil ; un travail de catégorisation assez détaillé a été réalisé en insistant sur les types d'agents utilisés ainsi que la manière avec laquelle ces solutions ont utilisé les agents.

Enfin, dans l'approche proposée pour la modélisation des RdC s-f à travers le modèle agent, il a était question de décrire plusieurs types de classes *agents* qui représentent les

différents composants physiques et logiques d'un réseau de capteurs sans fil. Cette modélisation servira de prototype pour la réalisation d'une plateforme de simulation des déploiements des agents dans un RdC s-f.

RÉFÉRENCES

[1] J. A. Gutierrez, M. Naeve, E. Callaway, M. Bourgeois, V.Mitter, and B. Heile. “IEEE 802.15.4: a developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks”, *IEEE Network*, vol. 15, pp. 12–19, September–October 2001.

[2] M. S. Alfiad, D. van den Borne, T. Wuth, M. Kuschnerov, B. Lankl, C. Weiske , E. de Man A. Napoli, H. de Waardt. “*111 Gb/s POLMUX-RZ-DQPSK Transmission over 1140 km of SSMF with 10.7 Gb/s NRZ-OOK Neighbours*”, ECOC 2008, 21-25 September 2008, paper Mo.4.E.2.

[3] IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers**.** http://standards.ieee.org/prod-serv/80211n.html, Novembre 2009.

[4] E. Conchon. "*Définition et mise en œuvre d’une solution d’émulation de réseaux sans fil* " Thèse de doctorat en informatique, Institut National polytechnique de Toulouse, France, 2006.

[5] Interstices.info, site de culture scientifique de l’INRA, Institut national de recherche en informatique et en automatique (France). http://interstices.info/jcms/c_7460/reseaux-sans-fil-de-nouvelle-generation?part=3, Novembre 2009.

[6] Bluetooth SIG, *"Specification of the Bluetooth system: Core"*, 2001.

[7] Draft 802.15.4. "*Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPAN)*". 2003.

[8] Hervé Shcauer consultants. Network Security Consulting Agency. http://www.hsc.fr, Novembre 2009

[9] Dominique Dhoutaut. *"Etude du standard IEEE 802.11 dans le cadre des réseaux Ad hoc*: de la simulation à l’expérimentation". Thèse pour obtenir le grade de Doctorat en Informatique. 2003.

[10] IEEE Standard 802.16-2004 : IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. New York, 2004.

[11] F. Ingelrest. "*Protocoles localisés de diffusion et économie d'énergie dans les réseaux Ad-Hoc et de capteurs*". Thèse de Doctorat en Informatique. Université de Lille, France, 2006.

[12] Scott Carson and Joseph Macker. *"Mobile ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Consideration*". RFC 2051. 1999.

[13] Jon S. Wilson. *“Sensor technology HANDBOOK"*. Arizona: Elsevier Newnes edtion, 2005.

[14] Kazem Sohraby, Daniel Minoli, and Taieb Znati. "*Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*". John Wiley & Sons, Inc.edition, 2007.

[15] Mohammad Ilyas and Imad Mahgoub. "*Handbook of sensor networks: compact wireless and wired sensing systems"*. CRC Press 2004.

[16] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, S. Kumar, "*Next century challenges: scalable coordination in sensor networks*". *ACM MobiCom’99*, Washingtion, USA, 1999,pp. 263–270.

[17] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "*Wireless Sensor Networks: A Survey*". *Computer Networks (Elsevier) Journal*, pp.393-422, March 2002.

[18] Wei-Peng Chen and Lui Sha. *"An Energy-Aware Data-Centric Generic Utility Based Approach in Wireless Sensor Networks*". Pages 215-224, IPSN'O4, April 26-27, 2004, Berkeley, California, USA. ACM 2003.

[19] C. Schurgers, V. Tsiatsis, S. Ganeriwal, and M. Srivastava. *"Optimizing Sensor Networks in the Energy-Latency-Density Design Space*". IEEE Transactions on Mobile Computing, vol.1, no.1, January-March 2002.

[20] A. Y. Wang, S. H. Cho, C. G. Sodini, and A. P. Chandrakasan. *"Energy Efficient Modulation and MAC for Asymmetric RF Microsensor Systems*". In Intl. Symp. On Low Power Electronics and Design (ISLPED '01), pages 96–99, August 2001.

[21] Mounir Achir. "*Technologies basse consommation pour les réseaux Ad Hoc"*. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'INPG. Institut National Polytechnique de Grenoble. juillet 2005.

[22] Chonggang Wang and Kazem Sohraby. "*A Survey of Transport Protocols for Wireless Sensor Networks".* University of Arkansas, Bo Li, The Hong Kong University of Science and Technology, Mahmoud Daneshmand, AT&T Labs Research, Yueming Hu, South China Agricultural University. June 2006.

[23] Carlos Pomalaza-Rez. "*Wireless Ad Hoc & Sensor Networks"*. University of Oulu, Finland, 2004.

[24] Holger Karl, Andreas Willig. "*Protocols And Architectures For Wireless Sensor Networks*". Willey edition, 2007

[25] Jamal N. Al-Karaki, Ahmed E. Kamal. *"Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey"*. Iowa State University, USA, 2004.

[26] B. Krishnamachari, D. Estrin, and S. Wicker. "*Modelling data-centric routing in wireless sensor networks*". *IEEE INFOCOM*, 2002.

[27] T. He, J. A. Stankovic, C. Lu, and T. Abdelzaher. "*SPEED : A stateless protocol for realtime communication in sensor networks*". *Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), pp. 46-55*, 2003.

[28] J. H. Chang and L. Tassiulas. "*Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks*". *Proceedings. IEEE, INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Vol. 1*, 2000.

[29] Q. Li, J. Aslam, and D. Rus. "*Hierarchical power-aware routing in sensor networks*". *Proceedings of the DIMACS Workshop on Pervasive Networking*, Mai 2001.

[30] C. K. Toh. "Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad-hoc networks". *IEEE Communications Magazine, Vol. 39, No. 6, pp. 138-147*, Juin 2001.

[31] M. Achir and L. Ouvry. "*A routing protocol for wireless ad-hoc sensor networks : Multi-Path Source Routing Protocol (MPSR)*". *ICN'05: 4th International Conference on Networking (IEEE), Ile de la Réunion*, Avril 2005.

[32] W. Heizelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan. "*Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks*". *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 174-185*, 1999.

[33] Joël Quinqueton. Cours: Fondements des Systèmes Multi-Agents. LIRMM 2003.

[34] Alain Cardon. *"Etude de la conception et du contrôle comportemental d'une organisation massive d'agents*". LIH, Faculté des Sciences Université du Havre. 2002.

[35] Jean-Paul Jamont. DIAMOND: "*Une approche pour la conception de systèmes multi-agents embarqués"*. Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Mathématiques Sciences et Technologies de l'Information. Institut National Polytechnique de Grenoble. 2005.

[36] Stuart J. Russell and Peter Norvig." *Artificial Intelligence.A Modern Approach*". Prentice-Hall, Inc. A Simon & Schuster Company Englewood Cliffs, New Jersey 07632. 1995.

[37] Jaques Ferber. "*Les Systèmes Multi-Agents: vers une intelligence collective*". Inter Editions. 1995.

[38] Michael Wooldridge. *"An Introduction to Multiagent Systems*". JOHN WILEY & SONS, LTD. England. 2002.

[39] Sébastien Fournier. "*Intégration de la dimension spatiale au sein d'un modèle multi-agents à base de rôles pour la simulation: Application à la navigation maritime".* Thèse de doctorat. École doctorale: Mathématiques, Télécommunications, Informatique, Signal, Système et Electronique (MATISSE). L'Université de Rennes 1. 2005.

[40] Marian Nodine and Damith Chandrasekara. "*Agent Communication Languages for Information-Centric Agent Communities".* MCC Technical Report MCC-INSL-096-98. 1998.

[41] H. J. Levesque, P. R. Cohen, and J. H. T. Nunes. *"On acting together*". In Proceedings of the 8th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-90), Boston, MA, pages: 94-99. 1990

[42] L. Gasser, C. Braganza, and N. Herman."*Implementing distributed AI systems using MACE"*. In Proceedings of the 3rd IEEE Conference on AI Applications, pages. 3 15-320. 1987

[43] *Lightweight Extensible Agent Platform. Disponible sur: http://www.leap.crm-paris.com.*

[44] O. Gutknecht, J. Ferber, F. Michel. *"MADKIT: Une plate-forme multi-agents générique"*. Laboratoire d'Informatique, Robotique et Microélectronique de Montpellier, 2000.

[45] *Agentbuilder.* http://www.agentbuilder.com/

[46] *Midas and Agentcities Research projects.* http://labs.bt.com/projects/agents/zeus/

[47] Zahia Guessoum, Thomas Meurisse, Jean-Pierre Briot."*Construction modulaire d'agents et de systèmes multi-agents adaptatifs en DIMA*". Techniques et Sciences Informatiques, Vol. 1, n° 1, 2001.

[48] Fabio Bellifemine, Agostino Poggi, Giovanni Rimassa. "*JADE – A FIPA-compliant agent framework*". CSELT S.p.A. Via G. Reiss Romoli, 274, 10148, Torino Italy. 99.

[49] *Plate-forme JADE: Java Agent Development Framework*, 2000. http://jade.cselt.it

[50] L. Tong, Q. Zhao, and S. Adireddy, "*Sensor networks with mobile agents*," in Proc. IEEE Military Communications Conference (MILCOM '03), vol. 1, pp. 688-693, Boston, Mass, USA, October 2003.

[51] Jae Wan Kim, JeongSik In, SungHwa Hong, ByoungKug Kim, HyeJin Lee, and DooSeop Eom. "*An Efficient Agent-based Routing Algorithm For Multiple Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks".* Department of Electronics and Computer Engineering, Korea University, 5-1 Anam-Dong, Seongbuk-Gu, Seoul, 136-701, Korea. 2003.

[52] Richard Tynan, David Marsh, Donal O'Kane, G. M. P. O'Hare. "*Intelligent Agents for Wireless Sensor Networks"*. International Conference on Autonomous Agents. Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems table of contents. The Netherlands 2005.

[53] Charles Pandana and K. J. Ray Liu. "*Near-Optimal Reinforcement Learning Framework for Energy-Aware Sensor Communications"*. Institute of System Research, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Maryland, College Park, MD 20742 USA. IEEE 2005.

[54] Michael Mertsock and David Stawski. "*Wireless sensor nodes as intelligent agents: Using expert systems with directed diffusion*", 2005.

[55] Richard Tynan David Marsh Donal O'Kane G.M.P. O'Hare."*Agents for Wireless Sensor Network Power Management*". Proceedings of the 2005 International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW'05).

[56] Richard Tynan, G. M. P. O'Hare, David Marsh, and Donal O'Kane. "*Multi-agent system architectures for wireless sensor networks*". Computational Science - ICCS 2005. 5th International Conference. Proceedings, Part III (Lecture Notes in Computer Science Vol. 3516), pages 687–94, Atlanta, GA, USA, 2005.

[57] Tessa Daniel "*Information Extraction from Large-scale WSNs - A Complex Querying Perspective*". Technical report number COGENT.002, Cogent Computing Applied Research Centre, 2008.

[58] Long Gan, Jiming Liu, and Xiaolong Jin. "*Agent-Based, Energy Efficient Routing in Sensor Networks*". Department of Computer Science, Hong Kong Baptist University, Kowloon Tong, Hong Kong. 2002.

[59] S. Sitharama Iyengar, Qishi Wu, Nageswara S.V. Rao. *"Paradigm for Distributed Sensor Networks*". Proceedings of the Second IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology & Applications. IDAACS'2003.

[60] Daniel Massaguer. *"Multi Mobile Agent Deployment in Wireless Sensor Networks*". Thesis Master of science in Electrical and Computer Engineering. University of California, Irvine. 2005.

[61] Qishi Wu, Nageswara S.V. Rao, Jacob Barhen, S. Sitharama Iyengar, Vijay K. Vaishnavi, Hairong Qi, and Krishnendu Chakrabarty. *"On Computing Mobile Agent Routes for Data Fusion in Distributed Sensor Networks*". IEEE Computer Society 2004.

[62] Hairong Qi, Yingyue Xu, Xiaoling Wang. "*Mobile-Agent-Based Collaborative Signal and Information Processing in Sensor Networks*". Department of Electrical and Computer Engineering,University of Tennessee, Knoxville, TN 37996-2100 USA. IEEE 2003.

[63] Mohammed Ketel Numan S. Dogan Abdollah Homaifar. *"Distributed Sensor Networks based on Mobile Agents Paradigm*". Dept. of Electrical & Computer Eng.North Carolina A&T State University Greensboro, NC 2741 1. IEEE 2005.

[64] P. Levis and D. Culler. "*Mate: a virtual machine for tiny networked sensors*". In Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS), 2002.

[65] Chien-Liang Fok, Gruia-Catalin Roman, and Chenyang Lu. *"Mobile Agent Middleware for Sensor Networks: An Application Case Study*". In Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'05), 2005.

[66] Yu-Chee Tseng, Sheng-Po Kuo, Hung-Wei Lee and Chi-Fu Huang. "*Location Tracking in a Wireless Sensor Network by Mobile Agents and Its Data Fusion Strategies*". Ad Hoc Networks Volume 6 Issue 1 Pages: 1-16, 2008.

[67] P Beyens, M Peeters, K Steenhaut, A Nowe."*Routing with Compression in Wireless Sensor Networks: A Q-Learning approach"*.Proceedings of the 5th European Workshop on Adaptive Agents and MultiAgent Systems AAMAS 2005.

[68] José-F Martínez, Ana-B García, Antonia-M. Sanz, Lourdes López, Vicente Hernández, Antonio Dasilva. "*An approach for applying multi-agent technology into wireless sensor networks*". Proceedings of the 2007 Euro American conference on Telematics and information systems. New York, NY, USA 2007.

[69] R.A. Flores-Mendez. "*Towards a Standardization of Multi-Agent System Frameworks*". 1999. Disponible sur: http://www.acm.org/crossroads/xrds5-4/multiagent.html

[70] Chien-Liang Fok, Gruia-Catalin Roman, and Chenyang Lu, "*Rapid Development and Flexible Deployment of Adaptive Wireless Sensor Network Applications*" International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'05), Columbus, OH, June 2005.

[71] Source web: http://searchsqlserver.techtarget.com/definition/data-aggregation page visitée le 30/05/2009.

[72] E. Alzaid, H Foo, and Gonzalez Nieto, J.M. (2008). "*Secure Data Aggregation in Wireless Sensor Network: a survey*" In Proc. Sixth Australasian Information Security Conference (AISC 2008), Wollongong, NSW, Australia. CRPIT, 81. Brankovic, L. and Miller, M., Eds. ACS. 93-105.

[73] S. Sitharama Iyengar, Qishi Wu, and K. Chakrabarty. "*Distributed multi-resolution data integration using mobile agents*". volume vol.3 of *2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat.No.01TH8542)*, pages 3–1133, Big Sky, MT, USA, 2001.

[74] R. Chadha, G. Lapiotis, S. Wright, "*Policy-Based Networking*", IEEE Network special issue, March/April 2002, Vol. 16 No. 2, guest editors.

[75] V. Lesser, C.L. Ortiz Jr., M. Tambe (Eds.). "*Distributed Sensor Networks: A Multiagent Perspective*". Kluwer Academic, 2003.

[76] M. Kuorilehto, M. Hännikäinen, T.D. Hämäläinen. "*A middleware for task allocation in wireless sensor networks"*. 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, IEEE, 2005.

[77] Bernhard Bauer, "*UML Class Diagrams Revisited in the Context of Agent-Based Systems". 2001*

ANNEXE I

Agrégation de données

Dans les

Réseaux de capteurs sans-fil

A.1 Introduction

Un réseau de capteurs sans-fil est sensé d'abord recueillir des informations du monde extérieur ; lorsque un capteur intercepte un événement de son environnement, il se met tout de suite en marche et commence à convertir les signaux analogiques interceptés en signaux numériques en vue de leur traitement, s'en suit alors une nouvelle étape qui consiste à envoyer les données numériques vers des capteurs chargés de l'opération de l'agrégation de données.

A.2 Agrégation de données: définition

L'agrégation de données est un processus dans lequel l'information est recueillie et est exprimée par la suite sous une forme synthétique plus objective [71]. Le but d'un tel processus est d'obtenir plus d'informations fiables à partir de sources différentes et d'éviter la redondance des données.

A.3 Contexte des réseaux de capteurs sans-fil

La consommation d'énergie étant un facteur crucial dans les réseaux de capteurs sans-fil, Les techniques d'agrégation des données peuvent grandement aider à réduire la consommation d'énergie par l'élimination des données redondantes transmises entre les nœuds d'un RdC s-f. L'agrégation de données est aussi efficace lorsqu'il s'agit de problèmes liés la sécurité, tels que l'intégrité des données, la confidentialité et la fiabilité des données. C'est souvent le cas lorsque le RdC s-f est déployé dans des environnements hostiles ou lorsque les capteurs sont sujets à des défaillances.

L’agrégation exige, non seulement, la transmission des données mais aussi les messages de contrôle, ce qui impose des contraintes sur l’architecture du réseau. Pendant l’agrégation nous devons aussi prendre en considération quelques problèmes: Les erreurs dans les messages, les messages perdus, la redondance des données, la synchronisation entre les nœuds …etc.

A.3.1 Principe de fonctionnement

Dans un réseau de capteurs sans-fil, ce ne sont pas tout les capteurs qui réalisent les tâches d'agrégation de données, les capteurs responsables de cette fonction sont appelés agrégateurs. Les agrégateurs recueillent les données interceptées d'un sous-ensemble du réseau, ils réalisent ensuite l'agrégation des données en utilisant une fonction d'agrégation, et enfin, ils transmettent les résultats à d'autres capteurs du réseau, à la station de base, ou un utilisateur externe qui a la permission d'interagir avec le réseau en fonction de l'architecture du réseau.

Exemple:

Le réseau de capteurs dans la figure **Fig. A.1** contient 16 nœuds capteurs, une fonction d'agrégation est utilisée afin de minimiser la consommation d'énergie en réduisant le nombre de bits envoyés à la station de base. Le nœud 7, et les nœuds 10 à 16 sont des nœuds chargés de la collecte de données, ces données sont renvoyées à une partie supérieure composée de nœuds agrégateurs qui sont les nœuds 1 à 6, le nœud 8 et le nœud 9, ils sont chargés d'effectuer l'opération d'agrégation des données et en même temps agir comme les autres nœuds de la partie inférieure c.-à-d. en faisant la collecte de données . Dans cet exemple 16 paquets transitent au sein du réseau et un seul paquet est transmis à la station de base. Sans l'opération d'agrégation de données, le nombre de transmissions de paquets augmenterait à 50 transmissions.

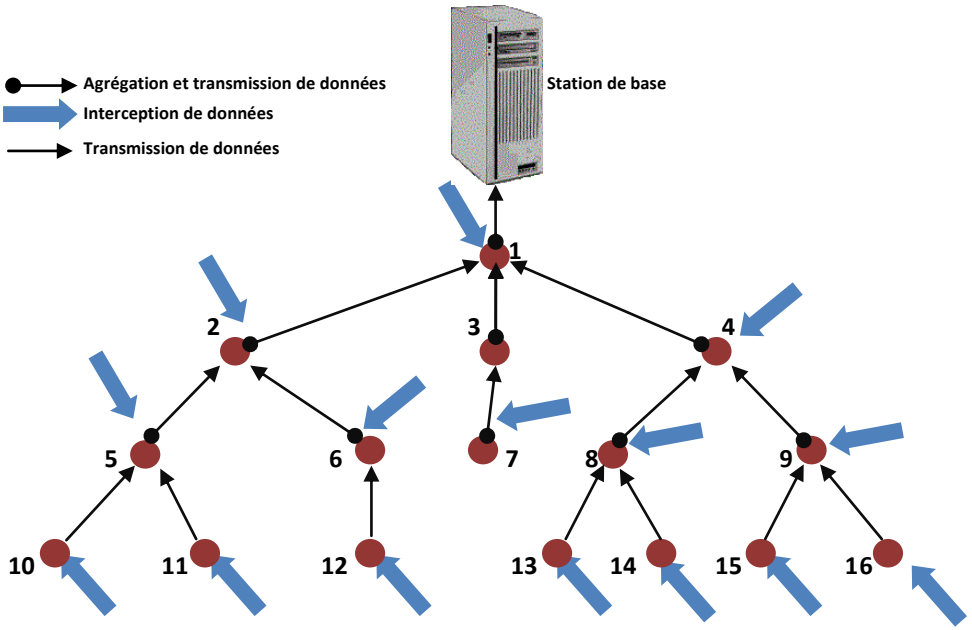

Fig. A.1: Agrégation de données dans un réseau de capteurs sans-fil

A.4 Conclusion

L'agrégation de données est une technique capitale pour les réseaux de capteurs sans-fil, elle permet de réduire les consommations d'énergie en effectuant un traitement sur les données préalablement aux opérations d'envois de données, le gain en nombre de transmissions est conséquent, ce qui permet de réduire les coûts du système et par conséquent, d'augmenter ses performances.