الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté des Sciences

Département Mathématiques et Informatique

Projet de Fin D'étude

Présenté pour l'obtention du Diplôme De Master en Informatique

Option : Ingénierie des Systèmes et Technologie du Web

THEME

Le Fonctionnement Optimal du Réseau de Capteurs Sans Fil sous la variation de la température par déploiement hétérogène

Réalisé par :

M^{elle} : **KHORCHEF Nor el Houda**

Proposé et dirigé par :

M.**GAGUI A**li

Année Universitaire 2016-2017

Remerciements

Le travail réalisé tout au long de ce projet n'a été possible qu'avec l'aide et le soutien de nombreuses personnes. Je profite de l'occasion qui m'est donnée pour leur exprimer toute ma gratitude.

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Mes remerciements les plus sincères en premier lieu vont à Monsieur GAGUI.A Pour son encadrement, sa disponibilité, son sérieux et son ambition, qui m'ont permis d'avancer et de progresser ainsi que les nombreux et précieux conseils qu'il m'a prodigués au cours de ce projet. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et mon admiration pour ses qualités scientifiques.

Je remercie également Mon père pour m'avoir encouragée, conseillée et surtout pour la confiance qu'il m'a témoignée. Puissent ces quelques mots être l'expression de ma plus profonde reconnaissance

Je remercie très chaleureusement les membres de jurys. Pour m'avoir fait l'honneur et le plaisir d'accepter et juger mon travail.

Je remercie aussi tous les enseignants du département de Mathématique et Informatique.

Un grand merci à tous mes collègues et amies qui n'ont pas manqué de me soutenir durant toutes ses années d'étude, et pour les moments agréables que nous avons passés ensemble.

Finalement, je ne saurai terminer sans que soient remerciées toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail.

À toute ma famille

Résumé

Les variations de la température ont un impact significatif sur les réseaux de capteurs sans fil à faible puissance. En effet, les liaisons de communication sans fil se détériorent considérablement lorsque la température augmente. Un bon déploiement doit s'adapter à son fonctionnement et économiser plus d'énergie et des ressources lorsque la température diminue. Dans ce projet, l'objective d'étudier l'effet global de la température sur le bon fonctionnement du réseau (dépoilement hétérogène) dans un environnement de radio stable , et de proposés des algorithmes simples et totalement distribués prennent l'effet de la température sur la connectivité et de montrer que plus d'énergie peut être économisée en permettant à certains nœuds de ce mettre en mode veille prolongée ou par l'utilisation de la puissance de transmission la plus faible lorsque la température diminuée.

Mots clés : Réseaux de capteur sans fil, température, énergie, déploiement

Abstract

The variations of the temperature have a significant impact on the networks of low power wireless sensors. Indeed, the connections of wireless communication deteriorate considerably when the temperature increases. A good deployment has to adapt itself to its functioning and save more energy and resources when the temperature decreases. In this project, the objective to study the global effect of the temperature on the smooth running of the network (heterogeneous deployment) in an environment of stable radio, and to propose simple and totally distributed algorithms take the effect of the temperature on the connectivity and to show that more energy can be saved by allowing certain knots to put itself in sleep mode extended or by the use of the power of the lowest (weakest) transmission when the decreased temperature.

Keywords: Wireless sensor network, temperature, energy, deployment.

الملخص

التغيرات في درجة الحرارة لها تأثير كبير على شبكات استشعار لاسلكية منخفضة الطاقة. والواقع ان وصلات الاتصالات اللاسلكية تتدهور بشكل كبير عندما تزداد درجة الحرارة . و يجب أن يتكيف النشر الجديد مع عملياته و أن يوفر المزيد من الطاقة و الموارد عندما تنخفض درجة الحرارة. في هذا المشروع الهدف هو دراسة التأثير الكلي لدرجة الحرارة على اداء الشبكة (النشر غير المتجانس) في بيئة مستقرة الراديو و اقتراح خوارزميات بسيطة متوزعة بالكامل تأخذ تأثير الحرارة و تبين انه يمكن اقتصاد الطاقة بالسماح لبعض اجهزة الاستشعار بأخذ وضع السبات او عن طريق استخدام قوة ارسال ضعيفة عند انخفاض درجة الحرارة

كلمات البحث: شبكات الاستشعار اللاسلكية، ودرجة الحرارة، والطاقة، والنشر

Remercîment

Dédicace

Résumé

Abstract

الملخص

Liste des figures

Liste de tables

Liste des acronymes

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralité sur les réseaux de capteur sans fil

I.1. Introduction 3

I.2. Les réseaux Ad Hoc1 3

I.2.1.Définition 3

I.2.2.Carastéristique de réseaux Ad Hoc 4

I.3. Réseau de capteur sans fil 5

I.3.1. Définition de capteur 5

I.3.2. Architecture physique d'un capteur 6

I.3.2.1.Unité énergie 7

I.3.2.2.Unité de captage 7

I.3.2.3.Unité de traitement 8

I.3.2.4.Unité de communication 8

I.3.3.Définition de réseaux de capteur sans fil (RCSF) 9

I.4. Classification RCSF 11

I.4.1.Selon le mode d'acquisition et de livraison de données au puits 11

I.4.2.Selon la distance entre les nœuds capteur et puits. 12

I.4.3.Selon le modèle de mobilité dans le réseau 12

I.4.4.Selon les capacités des nœuds de réseau 13

I.5. Domaine d'application de RCSF 14

I.5.1. Applications militaires. 14

I.5.2.Applications médicales 15
I.5.3.Applications commerciales 15
I.5.4.Applications environnementales 15
I.5.5.Applications domestiques 15
I.5.6.Applications dans domaines sportifs 16
I.5.7.Autres applications 16
I.6. Communication dans RCSF 17
I.6.1. File protocolaire 17
I.6.1.1.Couche physique 18
I.6.1.2.Couche liaison 19
I.6.1.3.Couche réseau 19
I.6.1.4.Couche transport 19
I.6.1.5.Couche application 19
I.6.1.6.Plan gestion 19
I.6.2.Zigbee 20
I.7. Caractéristiques des RCSF : défis et exigences 20
I.8. Comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad Hoc classiques 21
I.9. Conclusion 23

Chapitre II : Consommation d'énergie et effet de la température sur les RCSF

II.1. Introduction 24
II.2. Consommation d'énergie 24
II.2.1.Unité capture 25
II.2.2.Unité de traitement 25
II.2.3.Unité de communication 25
II.3. Facteurs intervenant dans la consommation d'énergie dans RCSF 26
II.3.1.Etat module radio 27
II.3.2. Accées au medium de transmission 28
II.3.2.1.La retransmission 28
II.3.2.2.L'écoute active 28
II.3.2.3.La surécoute 28
II.3.2.4.La surcharge 29
II.3.2.5.La surémission 29

II.3.2.6.Taille paquet 29
II.3.3.Modéle de propagation radio 30
II.3.4.Routage de données 30
II.4. Techniques de la minimisation de la Consommation d'énergie 30
II.5. Protocole de communication dans RCSF 32
II.5.1. Protocole de routage 32
II.5.1.1.Selon la topologie de réseau 34
II.5.1.1.1.Topologie plate 34
II.5.1.1.2.Topologie hiérarchique 34
II.5.1.2.Selon fonctionnement des nœuds 35
II.5.1.2.1.Routage basé sur qualité de service 36
II.5.1.2.2.Routage basé sur la négociation 36
II.5.1.2.3.Routage basé sur le multi chemins 36
II.5.1.2.4.Routage basé sur les requêtes 36
II.5.1.3.Selon paradigme de communication 37
II.5.1.3.1.Centré-donnée 37
II.5.1.3.2.Ceentré-noeuds 37
II.5.1.3.3.Basé-localisation 37
II.5.1.4.Selon l'établissement de la route 38
II.5.1.4.1.Protocole réactif 38
II.5.1.4.2.Protocole proactifs 38
II.5.1.4.3.Protocole hybride 38
II.5.1.5. Exemples de protocole de routage 39
II.5.2. Protocole MAC 39
II.5.2.1.Les caractéristiques d'un protocole MAC convenable aux RCSF 40
II.5.2.2.Exemples de protocoles MAC pour les RCSF 42
II.5.2.2.1.S-MAC 42
II.5.2.2.2.B-MAC 43
II.5.2.2.3.TRAMA 44
II.6. Condition météorologique dans les RCSF 44
II.6.1.Effet de la température sur les RCSF 45
II.7. Conclusion 46

Chapitre III : Déploiement dans les RCSF

III.1. Introduction **47**
III.2. La durée de vie, la couverture et la connectivité dans les RCSFs **47**
III.2.1.La durée de vie **47**
III.2.1.1.La durée de vie basé sur le nombre de nœuds vivants/morts **48**
III.2.1.2. La durée de vie basé sur la couverture/connectivité **48**
III.2.2.Couverture dans les RCSFs **50**
III.2.3.Connectivité dans les RCSFs **51**
III.2.3.1.Définition **52**
III.2.3.2.But de connectivité **54**
III.3. Déploiement dans les RCSFs **55**
III.3.1.Type déploiement dans RCSFs **56**
III.3.1.1.Déploiement déterministe **56**
III.3.1.2.Déploiement aléatoire **56**
III.3.1.3.Comparaison entre les types des déploiements **57**
III.3.2 Topologies pour les RCSFs. **57**
III.3.2.1.Déploiement aléatoire **57**
III.3.2.2.Déploiement d'une topologie circulaire **58**
III.3.2.3.Déploiement square **59**
III.3.2.4.Déploiement hexagonale **60**
III.3.2.5.Star topologie (déploiement en étoile) **60**
III.3.3.Travaux existant. **61**
III.4. Conclusion **63**

Chapitre IV : Conception

IV.1. Introduction **64**
IV.2.Liens Radio **64**
IV.3. Rayon de communication **66**
IV.4. Effet de la température sur la puissance de communication **68**
IV.5. Variation de température en fonction de temps **69**
IV.6. Connectivité de réseau **70**

IV.7. Déploiement de RCSFs 70
IV.8. Technique de conservation d'énergie sous effet de la température 72
IV.8.1. Stop Operate **72**
IV.8.2. Power Control **74**
IV.8.3. Stop Operate et Power Control **77**
IV.9. Conclusion 78

Chapitre V : Implémentation et expérimentation

V.1. Introduction 79
V.2. Environnement de travail 79
V.2.1. Choix de simulateur **79**
V.2.2. Ns3 ..... **80**
V.2.3. Eclipse **80**
V.2.4. NetAnim **81**
V.3. Métriques d'évaluation 81
V.3.1. Puissance drainée à l'émetteur et récepteur **81**
V.3.2. Puissance globale drainée pour assurer une couverture complète de la zone **82**
V.3.3. Puissance moyenne consommé en mode actif/vielle **82**
V.3.4. Puissance moyenne drainée par chaque nœuds utilisant Stop Operate **83**
V.3.5. Puissance moyenne drainée par chaque nœuds utilisant Power Control **84**
V.3.6. Puissance moyenne drainée par chaque nœuds utilisant SOPC **85**
V.4. Expérimentation 85
V.4.1. Puissance moyenne globale drainée **87**
V.4.2. Consommation d'énergie **90**
V.4.3. Puissance consommé en transmission **91**
V.5. Paramètres utilisés dans la simulation 93
V.6. Conclusion 94
Conclusion générale 95
Bibliographie

Figure I.1. Réseau Ad hoc sans infrastructure 4

Figure I.2. Capteur sans fil 6

Figure I.3. Architecture matérielle d'un capteur sans fil 7

Figure I.4. Unité de captage d'un capteur 8

Figure I.5. Unité de traitement 8

Figure I.6. Unité de communication 8

Figure I.7. Architecture générale d'un RCSF 10

Figure I.8. Les types de Sink 11

Figure I.9. Exemples d'application de RCSF dans un dépoilement réel 14

Figure I.10. Domaine d'application des RCSF 17

Figure I.11. Pile protocolaire 18

Figure II.1. Consommation d'énergie en capture, traitement et communication 26

Figure II.2. Diagramme de transition d'état du nœud capteur 27

Figure II.3. La surécoute dans une transmission 29

Figure II.4. Les techniques de conservation d'énergie 31

Figure II.5. Classification de protocole de routage pour RCSF 33

Figure II.6. Routage plat dans les RCSF 34

Figure II.7. Routage hiérarchique dans RCSF 35

Figure II.8. Protocole MAC 40

Figure III.1. Rayon de couverture et rayon de communication d'un nœud capteur 50

Figure III.2. Couverture d'une zone et couverture de points 51

Figure III.3. Communication a sauts multiples 52

Figure III.4. But de connectivité 54

Figure III.5. La relation entre la connectivité et la couverture 55

Figure III.6. Stratégie de dépoilement des nœuds 56

Figure IIII.7. Dépoilement aléatoire 58

Figure III.8. Dépoilement d'une topologie circulaire 59

Figure III.9. Dépoilement square 59

Figure III.10. Dépoilement hexagonale. 60

Figure III.11. Dépoilement en étoile 61

Figure IV.1. Rayon de communication sous variation de température 68

Figure IV.2. L'effet de la température sur la puissance et la sensibilité en CC2400 69

Figure IV.3. La variation de la température en 24 heures 70

Figure IV.4. Organigramme Stop Operate 74

Figure IV.5. Organigramme Power Control 76

Figure IV.6. Organigramme de la combinaison entre SO et PC 77

Figure V.1. Interface de l'animateur NetAnim. 81

Figure V.2. Déploiement aléatoire 86

Figure V.3. Déploiement hors de l'exécution de PC 86

Figure V.4. Déploiement hors de l'exécution de SO 86

Figure V.5. Déploiement hors de l'exécution de SOPC 87

Figure V.6. Puissance moyenne globale drainée en SOPC vs SMAC 87

Figure V.7. Puissance moyenne globale drainée en PC vs SMAC. 87

Figure V.8. Puissance moyenne globale drainée en SO vs SMAC. 88

Figure V.9. Puissance consommé en déploiement hors de l'utilisation de SO 88

Figure V.10. Variation de rayon de communication en fonction de température 88

Figure V.11. Le nombre de nœuds en mode actifs hors de l'utilisation de SO 89

Figure V.12. Consommation d'énergie hors de l'utilisation de SMAC 90

Figure V.13. Consommation d'énergie hors de l'utilisation de SOPC 90

Figure V.14. Consommation d'énergie hors de l'utilisation de SO 91

Figure V.15. Consommation d'énergie hors de l'utilisation de PC. 91

Figure V.16. Puissance consommé en transmission après l'utilisation de PC. 91

Figure V.17. Puissance consommé en transmission après l'utilisation de SOPC. 91

Figure V.18. Puissance consommé en transmission après l'utilisation de SO 92

Tableau I.1. Defis et mécanisme nécessaire aux RCSF **.....21**

Tableau I.2. Comparaison entre RCSF et réseaux MANET **.....22**

Tableau II.1. Exemples de protocole de routage**.....39**

Tableau III.1. Compraraison entre les types de déploiements **.....57**

Tableau V.1. Paramètres utilisés dans la simulation **.....93**

ACK : Acquittement

ADCS: **A**nalog **D**igital **C**onverters

CAN: **A**nalog to **D**igital **C**onverters

CCA : **C**lear **C**hannel **A**ssessment

CDF: **F**onction de **D**istribution **C**umulée

CSIP : Collaborative **S**ignal and **I**nformation **P**rocessing

DVS : Dymanic **V**oltage **S**caling

ECG: **E**lectro**C**ardio**G**ramme

GPS: **G**lobal **P**ositioning **S**ystem

GSM : Global **S**ystem for **M**obile

IBM: Internet **B**uisness **M**achine

IP: **I**nternet **P**rotocol

LPL: **L**ow **P**ower **L**istening

LQI: **L**ink **Q**uality **I**ndicator

MAC: **M**edium **A**ccess **C**ontrol

MANET: **M**obile **A**d Hoc **Net**work

MBS: **M**odular **S**ensor **B**oard

MCFA: Minimum **C**ost **F**orwarding **A**lgorithm

NACK: Acquittement **N**egatif

NS : **N**etwork **S**imulator

PA: **P**ower **A**mplifier

PC: **P**ersonal **C**omputer

PDA: **P**ersonal **D**igital **A**ssistant

PER: **P**acket **E**rror **R**ate

PPP:Point to **P**oint **P**rotocol

QOS: **Q**uality **O**f **S**ervice

RCSF: **R**éseau de **C**apteur **S**ans **F**il

REQ : Requete

RF: **R**adio **F**requenc

RSSI: **R**eceived **S**ignal **S**trength **I**ndicator

RTS/CTS: **R**equest **T**o **S**end, **C**lear **T**o **S**end

SAR: Sequential **A**ssignment **R**outing

SMAC : **S**ensor **MAC**

SPIN: Sensor **P**rotocol for **I**nformation via **N**egotiation

TCP: **T**ransmission **C**ontrol **P**rotocol

TRAMA: **Tr**affic **A**daptive **MA**C Protocol

UDP: User **D**atagram **P**rotocol

WATS: **W**ide **A**rea **T**racking **S**ystem

WIFI: **W**ireless **F**idelity

WLAN: Wireless **L**ocal **A**rea **N**etwork

WPAN: **W**ireless **P**ersonal **A**rea **N**etwork

WSN: **W**ireless **S**ensor **N**etwork

XML: e**X**entinsible **M**arket **L**angage

Introduction générale

Au cours de ces dernières années, le développement technologique des réseaux de communication sans fil, a connu un essor important grâce aux avancés technologiques dans divers domaines, tels que la micro-électronique et la miniaturisation. C'est ainsi que de nouvelles voies d'investigation ont été ouvertes, avec l'émergence des réseaux de capteurs sans fil.

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont des réseaux ad hoc généralement constitués d'entités autonomes miniaturisées appelés nœuds capteurs pouvant communiquer entre eux par liaison radio. Les RCSF ont suscité beaucoup d'engouement dans la recherche scientifique en raison notamment des nouveaux problèmes de routage sous forte contrainte de durée de vie du réseau et de faibles capacités des nœuds. Malgré la miniaturisation et la réduction du coût de fabrication, ces capteurs sont généralement dotés de ressources limitées en termes de puissance de transmission, de capacité de traitement et de stockage des données et d'énergie

Dans ce réseau, le déploiement varie d'une application à une autre, mais généralement les nœuds sont sans surveillance et doivent fonctionner en longues périodes de temps sans intervention. Par conséquent, les nœuds doivent consommer le moins d'énergie tout en assurant que le réseau continu à fonctionner correctement. Dans sa forme de base, le bon fonctionnement du réseau peut être atteint que si la couverture et la connectivité sont préservées. La couverture assure que l'ensemble de la zone de déploiement est surveillée afin qu'aucun événement ne soit pas capturé, et la connectivité signifie que le réseau ne soit pas fragmenté afin que les données transmises peuvent atteindre tous les nœuds dans le réseau.

Le bon déploiement doit prendre en compte les conditions les plus défavorables. Cependant, ces conditions ne peuvent se produire dans un nombre limité d'occasions de temps à autre. Dans le reste du temps, les conditions sont plus favorables et le réseau doit adapter son mode de fonctionnement pour économiser plus d'énergie et des ressources.

La température est l'une de ces conditions qui affectent la puissance de transmission et la sensibilité de réception du RCSF de manière significative, en particulier la qualité des liaisons sans fil entre les nœuds capteurs. En fait, les nœuds capteurs sont équipés d'émetteurs-récepteurs à faible coût et de faible puissance dont la performance dépend de la température dans lequel ils opèrent. Tel que, lorsque la température augmente, les deux la puissance de transmission et la sensibilité de réception diminuent ce qui conduit à la dégradation des liens de communication sans fil, et donc la connectivité globale du réseau.

Dans ce mémoire, nous proposons d'étudier Le Fonctionnement Optimal du Réseau de Capteurs Sans Fil sous la Variation de la Température par déploiement hétérogène.

I. Organisation de mémoire

Chapitre I. Généralité sur les réseaux de capteurs sans fil : Ce chapitre représente une introduction au domaine des réseaux de capteurs sans fil, nous retraçons les principales notions de base des réseaux Ad hoc, les RCSF telles que l'architecture physique d'un nœud capteur, et nous présentons quelques domaines d'application, la communication dans les RCSFS et nous terminons le chapitre par une petite comparaison entre les réseaux de capteurs et les réseaux Ad-Hoc classiques.

Chapitre II. Consommation d'énergie et effet de la température sur les RCSF : Ce chapitre est une étude sur la problématique de la consommation d'énergie dans les RCSF. Nous présentons aussi les techniques de conservations d'énergie proposées pour minimiser la consommation d'énergie dans le RCSF. Nous terminons le chapitre par une présentation de l'effet de la température sur les RCSF.

Chapitre III. Dépoilement dans RCSF : Ce chapitre est une présentation de notions de durée de vie, connectivité et couverture dans les RCSF , nous présentons aussi le déploiement dans les WSN avec quelque topologies nous terminons par les travaux existants dans le contexte de dépoilement.

Chapitre IV. Conception : Ce chapitre est dédié à la conception de système. Dans ce chapitre nous explorons les méthodes de conservation d'énergie proposées pour les RCSF, nous voyons aussi l'effet de la température sur les liaisons de communication sans fil, la puissance de transmission et la sensibilité.

Chapitre V. Implémentation et Expérimentation : Ce chapitre est consacré à la présentation de notre approche de conservation d'énergie pour les RCSFs. Nous présentons également les métriques d'évaluation et les résultats des simulations réalisées

Finalement nous clôturons ce mémoire par une conclusion qui rappelle le travail réalisé dans cette mémoire. Nous présentons également les perspectives de recherche des travaux réalisés.

Chapitre I : Généralité sur les réseaux de capteurs sans fil

I.1. Introduction

Les récentes avancées technologiques dans le domaine des communications sans fil ont permis le développement à faible coût de minuscules systèmes micro-électromécaniques, appelés capteurs, capables de détecter, mesurer et rapporter des données physiques liées à leur environnement. Ces capteurs sont caractérisés par de faibles ressources (énergie, capacité de calcul, mémoire, etc.) et de faible consommation énergétique. Parmi les types spéciaux de réseaux ad hoc on trouve les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont des réseaux sans infrastructure composés d'un nombre important de capteurs, généralement destinés à être déployés en grand nombre, pour couvrir des surfaces plus ou moins larges. Leurs applications potentielles diversifiées, dans les domaines militaire, industriel et domestique, sont la source de l'intérêt qu'ils suscitent, aussi bien dans la communauté scientifique qu'industrielle.
L'objet de ce premier chapitre est d'exposer un état de l'art général sur les réseaux de capteurs sans fil.

I.2. Les réseaux Ad Hoc

I.2.1. Définition

Les réseaux ad hoc forment une catégorie importante des réseaux avec relais, L'infrastructure n'est composée que des stations elles-mêmes qui jouent le rôle d'émetteur, de récepteur et de routeur .Le routage permet le passage de l'information d'un terminal vers un autre, sans que ces terminaux soient reliés directement. [1]

Il est très fréquent d'entendre parler des réseaux sans fil ad hoc mobiles (MANET), ce sont des ensembles de nœuds mobiles (PC portables, PDAs, téléphones mobiles, véhicule, etc.) interconnectés par une technologie sans fil, WiFi par exemple, formant un réseau temporaire sans aucune administration, ni support fixe.

En résumé, un réseau ad hoc est un réseau spontané, capable de se construire et de s'organiser sans aucune intervention humain. La création de ce type de réseau se fait dès qu'un besoin de communication est senti par les nœuds.

La figure I.1 montre un réseau ad hoc sans infrastructure, il faut juste préciser que les réseaux ad hoc fonctionnent suivant le principe de poste à poste (peer to peer), donc il suffit que deux nœuds soient à proximité pour qu'ils puissent communiquer entre eux.

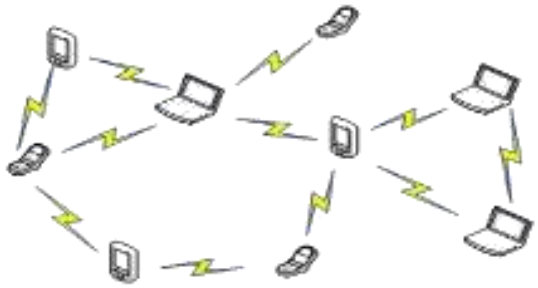


Figure I. 1.Réseau ad hoc sans infrastructure

I.2.2. Caractéristiques de Réseaux Ad hoc

Les réseaux mobiles ad hoc sont caractérisés par ce qui suit :

Mobilité (Une topologie dynamique) : Les unités mobiles du réseau, se déplacent d'une façon libre et arbitraire. Par conséquent la topologie du réseau peut changer, à des instants imprévisibles, d'une manière rapide et aléatoire. Les liens de la topologie peuvent être unis ou bidirectionnels.

Liaisons sans fil (Une bande passante limitée) : Un des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé. Ce partage fait que la bande passante réservée à un hôte soit modeste.

Autonomie des nœuds (Des contraintes d'énergie) : Les hôtes mobiles sont alimentés par des sources d'énergie autonomes comme les batteries ou les autres sources consommables. Le paramètre d'énergie doit être pris en considération dans tout contrôle fait par le système.

Vulnérabilité (Une sécurité physique limitée) : Les réseaux mobiles ad hoc sont plus touchés par le paramètre de sécurité, que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé.

L'absence d'infrastructure : Les réseaux ad hoc se distinguent des autres réseaux mobiles par la propriété d'absence d'infrastructures préexistante et de tout genre d'administration centralisée. Les hôtes mobiles sont responsables d'établir et de maintenir la connectivité du réseau d'une manière continue.

I.3. Réseaux de capteurs sans fil

I.3.1. Définition de capteur

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale et la transformer à une mesure généralement électrique qui sera à son tour traduite en une donnée binaire exploitable et compréhensible par un système d'information.

Parmi les différents types de mesures enregistrées par les capteurs, on peut citer entre autres la température, l'humidité, la luminosité, l'accélération, la distance, les mouvements, la position la pression, la vision (capture d'image), le son, etc…

La notion de capteur s'est évoluée avec le temps puisque leur domaine d'application est élargi. Les premiers capteurs n'étaient dédiés qu'à un unique type de mesure, les capteurs contemporains sont la combinaison de plusieurs dispositifs capables de mesurer différentes mesures physiques. En outre, à ces possibilités de mesures multiples, les capteurs actuels ont vu se gérer des fonctionnalités qui leur permettent, en plus de l'enregistrement et de la détection d'événements mesurables, le traitement de ces données et leur communication vers un autre dispositif. On parle alors de capteur intelligent, capable à la fois de mesurer des données et de les communiquer avec d'autres capteurs au sein d'un réseau, tel qu'il est caractérisé par sa capacité à effectuer une collecte des mesures, les traiter et à les communiquer au monde extérieur [2]



Figure I.2 Capteur sans fil.

I.3.2. Architecture physique d'un capteur

Suivant le type d'application, il existe une multitude de capteurs sur le marché: les capteurs de température, d'humidité, de pression, etc. Malgré cette diversité apparente, ils restent dotés d'une architecture matérielle similaire. Les capteurs sans fil sont généralement dotés de quatre composants élémentaires : une unité de captage, une unité de traitement, une unité de communication et unité d'énergie **[3]**. La figure I.3 illustre les composants physiques élémentaires d'un capteur sans fil.

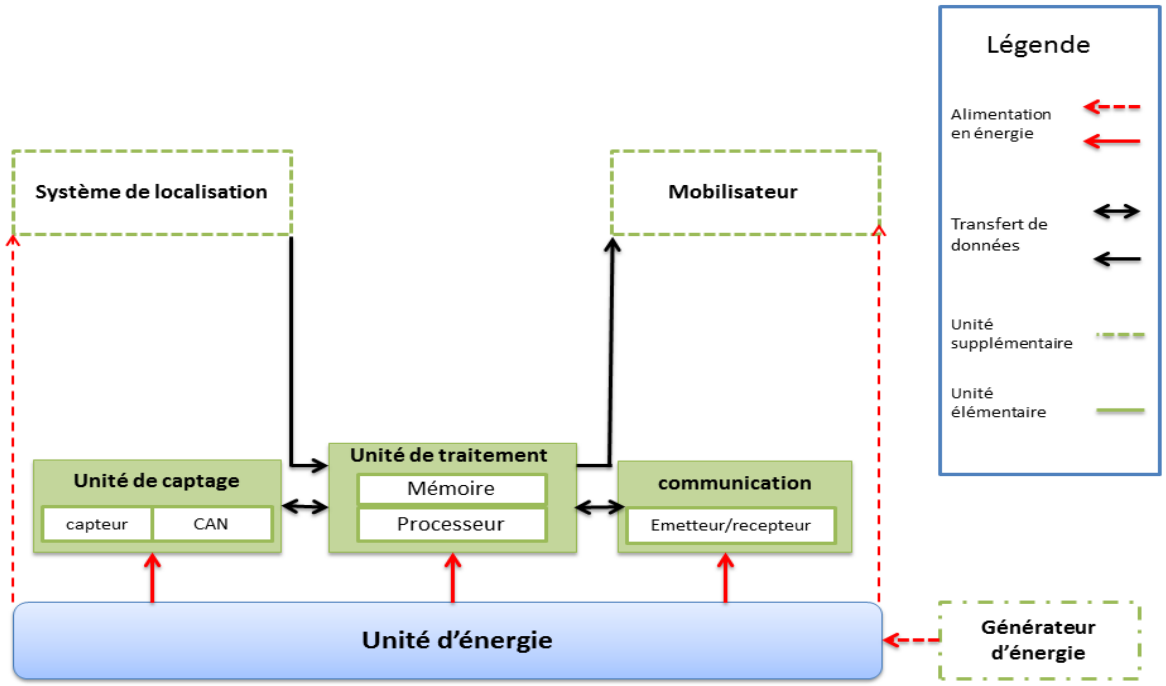


Figure I. 3 Architecture matérielle d'un capteur sans fil.[3]

Les composants additionnels peuvent être ajoutés selon le domaine d'application, comme par exemple un système de localisation tels qu'un GPS, un générateur d'énergie (exemple : cellules solaires) ou un mobilisateur lui permettant de se déplacer. Ces éléments principaux et optionnels (représentés par les traits discontinus) sont visibles sur la Figure I.3.

I.3.2.1. Unité d'énergie : Dispose souvent sous forme de batteries pouvant alimenter les unités citées et sont souvent non rechargeable et non remplaçable. C'est l'unité critique dont dépend la durée de vie de nœud capteur et par conséquent celle du réseau tout entier.

I.3.2.2. Unité de captage : C'est le composant principal d'un nœud sans fil qui se distingue de tout autre système embarqué avec ces capacités de communication. L'unité de captage peut inclure généralement plusieurs sondes, qui fournissent des informations collectées du monde physique. Chaque unité est responsable de collecter les informations d'un certain type, tel que la température, l'humidité, ou la lumière. L'unité de captage est habituellement composée de deux convertisseurs de capteur et de convertisseurs analogique-numérique (CAN, ADCS). Les signaux analogiques produits par les capteurs sur la base du phénomène observé sont convertis en signaux numériques par le CAN, puis alimentés dans l'unité de traitement. [3]. Figure I.4



Figure I. 4 Unité de captage d'un capteur

I.3.2.3. Unité de traitement : L'unité de traitements est le contrôleur principal du nœud sans fil. Elle se compose d'une mémoire à bord ou peut être associée à une petite unité de stockage intégrée sur la carte. L'unité de traitement contrôle les procédures qui permettent au nœud d'exécuter des opérations de détection, des algorithmes associés et de collaborer avec les autres nœuds par la communication sans fil. Figure I.5



Figure I. 5 Unité de traitement

I.3.2.4. Unité de communication : Cette unité est en charge d'émettre et de recevoir les données produites par l'unité de traitement, fournissant ainsi aux capteurs la capacité de communiquer avec les autres composants du réseau. Les différents choix de média de transmission incluent la Radiofréquence (RF), Le laser et l'infrarouge. [4]. Figure I.6



Figure I. 6 Unité de communication.

Suivant le domaine d'application, le capteur peut contenir d'autres unités telles que [5]

Système de localisation : Fournit des informations sur la localisation de cible.

Générateur d'énergie : Permet de générer l'énergie à partir de l'environnement.

Mobilisateur : Indispensable, si les nœuds doivent se déplacer. Il leur donne la possibilité de changer l'emplacement durant leurs mouvements fréquents.

I.3.3. Définition réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ou wireless sensor network (WSN) :

Un RCSF est constitué de milliers de nœuds appelés nœuds de capteur sans fil. Leur principale fonction est de capter des informations collectées dans différents environnements et de les transmettre. Ces nœuds peuvent avoir des positions fixes ou bien peuvent être déployés aléatoirement dans des environnements hostiles ou difficiles d'accès. Un réseau de capteurs fonctionne de la manière suivante : les nœuds sont déployés dans une zone appelée zone d'intérêt (zone de captage) pour pouvoir la surveiller. Ces nœuds sont souvent déployés par voie aérienne à l'aide d'avions ou hélicoptères. Afin de résister aux déploiements, ces capteurs doivent être très solides et de plus, ils doivent aussi pouvoir survivre dans les conditions les plus extrêmes dictées par leur environnement d'utilisation (feu ou eau par exemple). Lorsqu'un nœud détecte un événement, il a la possibilité de le traiter localement ou de l'acheminer vers des nœuds spéciaux appelés nœuds-puits « Sinks» via une communication multi-sauts. Ces noeuds-Sink possèdent plus de ressources matérielles que les nœuds capteurs. Ces données sont ensuite envoyées vers un centre de traitement des données via Internet ou par satellite pour l'analyse des informations remontées par les différents capteurs et la prise de décision ultérieure **[6]**. Une passerelle est utilisée pour adapter le type des données an canal. Ce processus est illustré dans la figure I.7

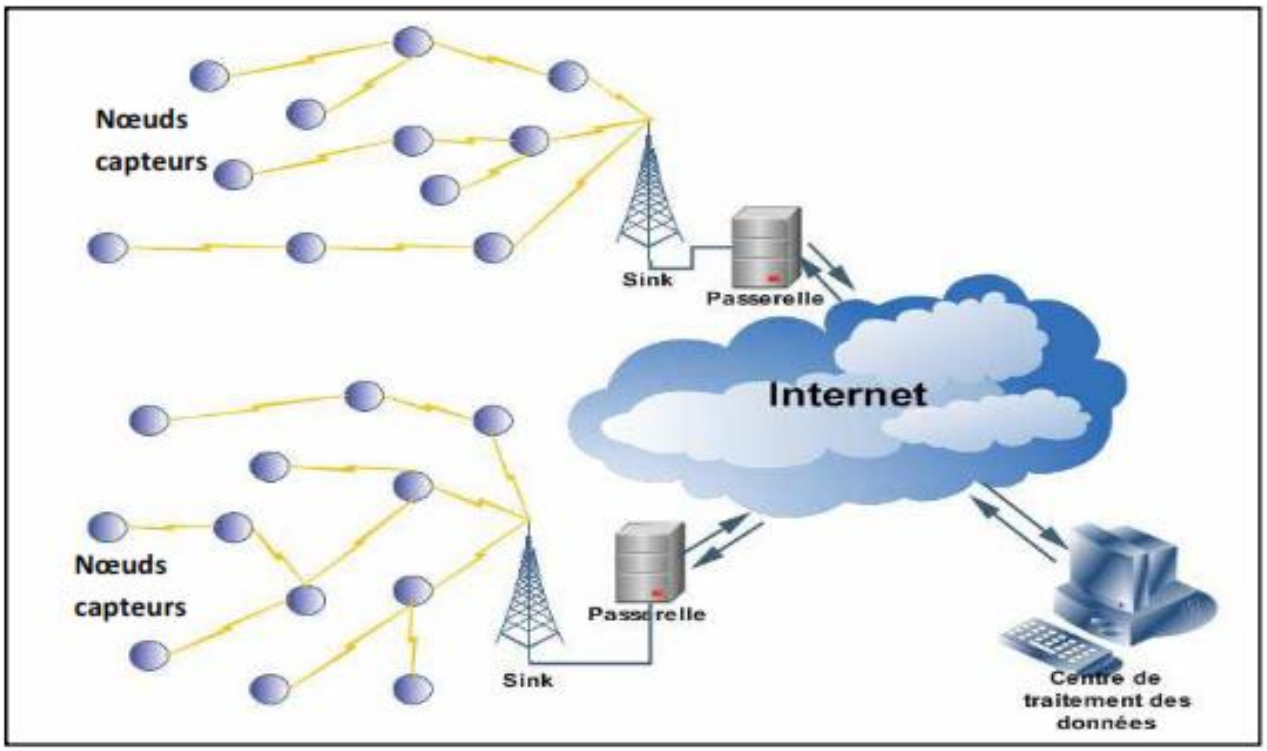


Figure I. 7 Architecture Générale d'un RCSF

Un RCSF est constitué essentiellement de plusieurs nœuds capteurs, un nœud Sink et un centre de traitement

- **Nœuds** : Ceux sont des nœuds capteurs, leur type, leur architecture et leur disposition géographique dépendent de l'exigence de l'application. Leur énergie est limitée puisqu'ils sont alimentés par des batteries.
- **Nœud Puits (Sink)** : C'est un nœud particulier du réseau. Il est chargé de la collecte des données issues des différents nœuds du réseau. Il doit être toujours actif puisque l'arrivée des informations est aléatoire. C'est pourquoi son énergie doit être illimitée. Dans un RCSF plus ou moins large et à charge peu élevée, nous pouvons trouver deux Sink ou plus pour alléger la charge, Il existe principalement trois types de Sink que nous pouvons voir sur la Figure I.8.

- Un nœud appartenant au réseau comme n'importe quel autre nœud.

- Une entité extérieure au réseau. Par exemple, un ordinateur portatif ou un PDA interagissant avec le réseau.

- Une passerelle (Gateway) vers un autre réseau (Internet par exemple), où la demande d'information vient d'un centre de traitement lointain.

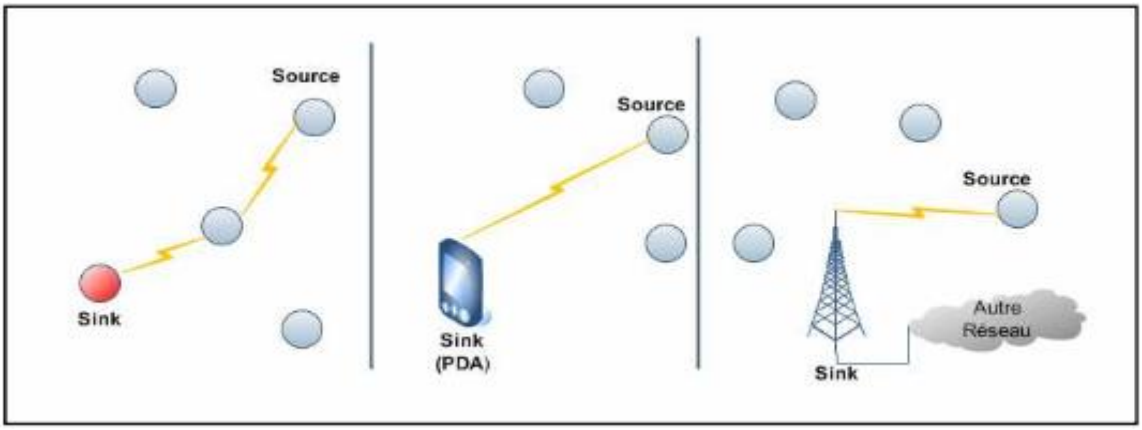


Figure I. 8 Les types de Sink

- **Centre de traitement des données**: C'est le centre vers lequel les données collectées par le Sink sont envoyées. Ce centre a pour rôle de regrouper les données issues des nœuds et les traiter de façon à en extraire de l'information utile et exploitable. Le centre de traitement peut être éloigné du Sink, alors les données doivent être transférées à travers un autre réseau, c'est pourquoi nous introduisons une passerelle entre le Sink et le réseau de transport afin d'adapter le type de données au type de canal comme illustré dans la Figure I.7.

I.4. Classification de RCSF

Il existe plusieurs critères pour classifier les réseaux de capteurs **[7, 8, 9]**. En effet, pour chaque type d'application, ces réseaux ont des caractéristiques différentes. Ils se distinguent par le mode d'acquisition et de livraison des données au puits, la distance entre les nœuds capteurs et le puits, le modèle de mobilité dans le réseau, les capacités des nœuds du réseau, etc.

I.4.1. Selon le mode d'acquisition et de livraison des données au puits

Dans les réseaux de capteurs, le modèle d'acquisition et de livraison des données au puits dépend de l'application et de ses exigences. Il peut être : continu *(time-driven)*, événementiel *(event-driven)*, à base de requête *(query-driven)*, ou hybride.

Dans le modèle continu, les nœuds doivent périodiquement (intervalle de temps constant) réveiller leurs émetteurs pour envoyer les données captées au puits. Le type d'application visé

concerne les applications de type “surveillance” où le but principal est d’avoir une information régulière de la zone surveillée. Dans le modèle orienté événements, les capteurs envoient leurs mesures seulement lorsqu’il y a un évènement qui se produit. Ce type de modèle est recommandé pour les applications de surveillance d’évènements critiques où le but principal est l’obtention d’une information sur l’évènement le plus rapidement possible. Dans le modèle orienté requêtes, les capteurs mesurent des phénomènes et stockent ces mesures dans leur mémoire. Ils envoient ces mesures seulement lorsqu’ils reçoivent des requêtes de la station de base. Le modèle hybride est une combinaison des trois modèles précédents.

I.4.2. Selon la distance entre les nœuds capteurs et le puits

Dans cette classification, on distingue les réseaux multi-sauts (multi-hop WSN) des réseaux à un seul saut (Single-hop WSN). Dans un réseau de capteur à un simple saut, les nœuds capteurs sont dans le voisinage immédiat du puits. Ils envoient alors leurs données captées directement au puits sans passer par aucun autre nœud intermédiaire.

Dans le réseau de capteur multi-sauts, où distance entre les quelques nœuds capteurs et le puits dépasse leur portée maximale. Pour envoyer leurs données au puits, ils doivent le faire par l’intermédiaire d’autres nœuds. Ce type de réseau a une large gamme d’application mais est difficile à mettre en œuvre [9].

I.4.3. Selon le modèle de mobilité dans le réseau

Cette classification consiste en une combinaison entre la mobilité des nœuds capteurs et celle du puits. Par cette combinaison, nous pouvons distinguer deux grandes catégories de réseaux : *réseaux statiques* et *réseaux dynamiques ou mobiles* (static and mobile networks). On peut par exemple avoir un réseau constitué d’un ensemble de nœuds capteurs mobiles et d’un puits fixe (réseau à puits statique et à nœuds capteurs mobiles).

Le but de tels réseaux est la plupart du temps l’exploration de zones inaccessibles ou dangereuses. Un autre exemple c’est le réseau constitué de capteurs fixes servant à la surveillance d’occurrence d’événements sur une zone géographique et d’un puits fixe (réseau statique).

I.4.4. Selon les capacités des nœuds du réseau

Dans cette classe, on distingue les réseaux “homogènes” des “hétérogènes” **[9, 10]**.

Dans un réseau de capteurs homogène, tous les nœuds du réseau (nœuds capteurs, le(s) puits, les passerelles) ont les mêmes capacités du point de vue énergie, calcul et stockage. Alors que, dans un réseau de capteurs hétérogène il y a quelques nœuds sophistiqués qui ont plus de capacité de traitement et de communication que les nœuds normaux. Cela améliore l'efficacité énergétique et prolonge la vie de réseau. L’avantage d’un tel réseau est que ces nœuds sophistiqués peuvent être utilisés pour exécuter les tâches plus complexes comme les coordinateurs, les chefs du cluster (cluster head), etc.
Son inconvénient est qu’il est difficile de mettre en place un tel réseau du fait qu’au moins chaque type de nœuds du réseau aura un code (programme) propre à lui. Ce qui augmente le coût de développement.

I.5. Domaine d'application de RCSF

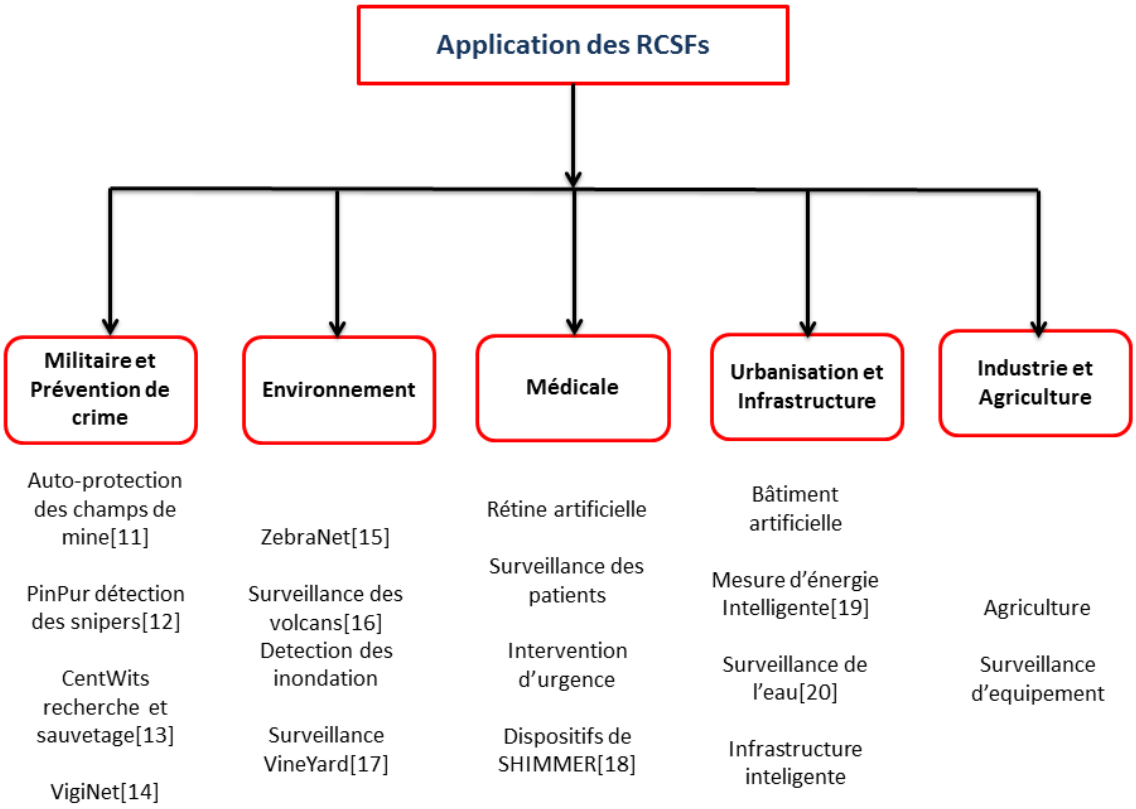


Figure I. 9. Exemples d'applications de RSCF déployés dans un environnement réel

I.5.1. Applications militaires : L'utilisation des capteurs dans le domaine militaire est en pleine expansion. Ces dispositifs peuvent être utilisés dans les opérations de surveillance des champs de bataille, la détection d'intrusion et reconnaissance des forces amies et ennemies, un déploiement dans un endroit stratégique ou difficile d'accès, afin de surveiller toutes les activités des forces ennemies ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (par la détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations par exemple). Parmi les travaux concrétisés dans ce domaine, nous pouvons citer les projets phares suivants: le projet WATS pour la détection des dispositifs nucléaires développés par le laboratoire Lawrence Livermore National [21].

I.5.2.Applications médicales : Dans le domaine médical, les capteurs sont utilisés pour la surveillance des données physiologiques d'un patient. A titre d'exemple, la référence **[22]** propose une nouvelle plateforme pour la surveillance des personnes cardiaques en utilisant les capteurs pour la collecte des données à partir d'un Électrocardiogramme ECG (la durée QRS, la durée entre deux piques R, l'amplitude du pique R) et le téléphone mobile pour la détection des pathologies cardiaques.

I.5.3.Applications commerciales : Dans les entreprises, les RCSFs permettent de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré. Grâce aux réseaux de capteurs, les entreprises peuvent offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant les coûts, en évitant les pannes et ceci en surveillant l'état des machines **[23,24].**

I.5.4.Applications environnementales : Les RCSF peuvent être utilisés pour surveiller les changements environnementaux. Ils servent à déterminer les valeurs de certains paramètres à un endroit donné, comme par exemple : la température, la pression atmosphérique, à surveiller le taux de pesticides dans l'eau potable, le degré d'érosion, le niveau de pollution de l'air en temps réel etc. En dispersant des nœuds capteurs dans la nature, nous pouvons détecter des événements tels que des feux de forêts, des tempêtes ou des inondations. Ceci permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours. Avec les RCSF, nous pouvons contrôler la pollution, par exemple en déposant des capteurs au- dessus d'un emplacement industriel pour détecter et surveiller des fuites de gaz ou de produits chimiques. Dans la référence **[25]**, les auteurs décrivent leurs efforts de mise en œuvre d'un RCSF sur le volcan « Reventator » dans la partie occidentale de l'amazone en Équateur. Un autre exemple concernant les applications environnementales est le projet ARGO **[26]**. Le but de ce projet est de surveiller l'eau de l'océan, sa température, sa salinité ainsi que sa vélocité.

I.5.5. Applications domestiques : Les RCSF peuvent également être utilisés dans la domotique et l'environnement intelligent. Ils jouent un rôle essentiel dans les grandes usines et les entrepôts en surveillant les changements climatiques. Par exemple, des capteurs peuvent être utilisés pour contrôler les vibrations susceptibles d'endommager la structure d'un bâtiment. Dans la référence **[27]**, les auteurs décrivent une application qui surveille l'état de grandes structures comme des

immeubles administratifs. Ils exploitent les avantages d'un réseau de capteurs tels que le déploiement rapide (environ une demi-heure face à plusieurs jours pour l'installation des réseaux filaires). Un RCSF a été déployé dans un campus universitaire **[28]**, permettant aux différentes machines (serveurs, imprimantes, etc) de tous les départements de communiquer ensemble.

I.5.6. Applications dans le domaine sportif : L'évolution des RCSF est utilisée de plus en plus dans le domaine sportif, à savoir les systèmes de surveillance, les systèmes de calcul de trajectoires (par exemple dans le tennis, ils utilisent un système appelé Hawk eye : l'œil du Faucon) **[29]**, les systèmes de détection d'erreurs d'arbitrage (dans le football, ils indiquent si le balle a franchi la ligne de but).

I.5.7. Autres applications : Parmi les autres applications de RCSF, nous avons: l'agriculture, où des capteurs sont incorporés dans la terre pour donner des informations sur l'état du champ. La protection des barrages pourrait être accomplie en y introduisant des capteurs. Grâce aux RCSF, les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant leurs coûts. Les RCSF peuvent également être utilisés pour surveiller l'infrastructure, contrôler le trafic, détecter des intrusions, contrôler les stocks [6 ,30]. Nous trouvons aussi la gestion de crises et de catastrophes naturelles (séismes, inondations, éruptions volcaniques, glissements de terrains, tempête, tsunamis, incendies de forêts, cyclones...). En effet ces phénomènes, en nette accentuation de nos jours, corroborent les prévisions de leur aggravation dans le futur avec comme principal facteur le changement global du climat et exigent l'intervention rapide et efficace des secours. La Figure I.10 représente plusieurs domaines d'application des RCSF.



Figure I. 10. Domaine d'Applications des RCSF

I.6. Communication dans les RCSF

I.6.1. Pile Protocolaire

La pile de protocoles utilisée par le puits (Sink) ainsi que par tous les nœuds-capteurs est donnée dans la Figure I.11. Cette pile de protocoles combine routage, gestion d'énergie et intègre les données avec les protocoles réseaux. Elle communique de manière efficace (en termes d'énergie) à travers le support sans fil et favorise les efforts de coopération entre les nœuds-capteurs.

La pile de protocoles comprend une couche application, une couche transport, une couche réseau, une couche liaison de données, une couche physique, un plan de gestion d'énergie, un plan de gestion de mobilité et un plan de gestion de tâches. Selon les tâches de détection, différents types de logiciels d'application peuvent être construits et utilisés dans la couche application. La couche transport contribue au maintien du flux de données si l'application du RCSF l'exige. La couche réseau s'occupe de l'acheminement des données fournies par la couche transport. Comme l'environnement est sujet au bruit et que les nœuds-capteurs peuvent être mobiles, le protocole MAC doit tenir compte de la consommation d'énergie et doit être en mesure de réduire les collisions entre les nœuds voisins lors d'une diffusion par

exemple .La couche physique répond aux besoins d'une modulation simple mais robuste, et de techniques de transmission et de réception.

En outre, les plans de gestion d'énergie, de mobilité et des tâches surveillent et gèrent la consommation d'énergie, les mouvements, et la répartition des tâches entre les nœuds-capteurs. Ces plans aident les nœuds-capteurs à coordonner les tâches de détection et à réduire l'ensemble de la consommation d'énergie [31]

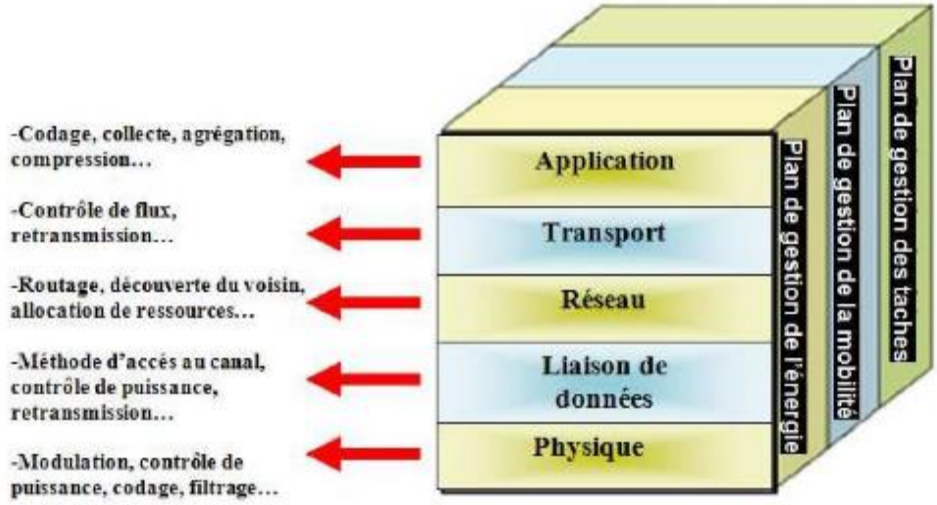


Figure I. 11.Pile Protocolaire des RCFS

I.6.1.1. Couche physique : Certains circuits radio permettent de paramétrer leur modes d'opération à l'instar du CC1101 de Texas Instruments [32 ,33]. Parmi ces modes, nous trouvons le choix de la modulation, le type de codage correcteur et la puissance de transmission. Ces éléments de configuration permettent d'influer sur la fiabilité et le débit des communications. Elle s'occupe de la transmission des bits de façon brute sur un canal de communication. Cette couche doit garantir la parfaite transmission des données.

I.6.1.2. Couche liaison : Dans la pile de communication, la couche MAC définit le protocole d'accès aux ressources radio. Elle définit ainsi l'ensemble des opérations qui mènent à la transmission d'une trame d'information entre deux nœuds à portée de communication. Le protocole d'établissement d'une communication affecte de manière évidente la fiabilité et le délai de transmissions.

I.6.1.3. Couche réseau : La couche réseau, et plus particulièrement le protocole de routage définit la succession de transmissions qui doivent être exécutées afin d'acheminer une information d'un nœud à un autre dans un réseau multi-sauts. Cette tâche est assurée par deux mécanismes : Le plan de contrôle, qui construit et maintient la topologie de routage, et le plan de données, qui assure l'acheminement des trames dans la topologie.

I.6.1.4. Couche transport : La couche transport est en charge du contrôle de bout en bout de la communication entre un émetteur et son destinataire. Traditionnellement, dans les réseaux filaires, la Qualité de Service est implémentée à ce niveau. Les protocoles associés peuvent, à l'instar de TCP [34], prendre en charge le contrôle du flux de données en implémentant un ordonnancement des trames de données, des mécanismes d'acquittement (ACK, NACK), et du contrôle de congestion, etc.

I.6.1.4. Couche application : Afin de compléter le recensement des mécanismes de Qualité de Service, nous citons ceux propres à l'application. Une application peut en effet intégrer dans son fonctionnement des mécanismes d'acquittement de données, de contrôle d'erreur sur les trames, et ce, similairement aux mécanismes disponibles dans la couche liaison.

I.6.1.5. Plans de gestion

Les plans de gestion d'énergie, de mobilité et de tâche contrôlent l'énergie, le mouvement et la distribution de tâche au sein d'un nœud capteur. Ces plans aident les nœuds capteurs à coordonner la tâche de captage et minimiser la consommation d'énergie. Ils sont donc nécessaires pour que les nœuds capteurs puissent collaborer ensemble, acheminer les données dans un réseau mobile et partager les ressources entre eux en utilisant efficacement l'énergie disponible. Ainsi, le réseau peut prolonger sa durée de vie.

- **Plan de gestion d'énergie** : Contrôle l'utilisation de la batterie. Par exemple, après la réception d'un message, le capteur éteint son récepteur afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus. En outre, si le niveau d'énergie devient bas, le nœud diffuse à ses voisins une alerte les informant qu'il ne peut pas participer au routage. L'énergie restante est réservée au captage.

- **Plan de gestion de mobilité** : Détecte et enregistre le mouvement du nœud capteur. Ainsi, un retour arrière vers l'utilisateur est toujours maintenu et le nœud peut garder trace de ses nœuds voisins. En déterminant leurs voisins, les nœuds capteurs peuvent balancer l'utilisation de leur énergie et la réalisation de tâche.

- **Plan de gestion de tâche** : Balance et ordonnance les différentes tâches de captage de données dans une région spécifique. Il n'est pas nécessaire que tous les nœuds de cette région effectuent la tâche de captage au même temps, certains nœuds exécutent cette tâche plus que d'autres selon leur niveau de batterie.

I.6.2. ZigBee

Est un protocole de haut niveau permettant la communication de petites radios, à consommation réduite, basée sur la norme IEEE 802.15.4 [36] pour les réseaux à dimension personnelle WPAN. [35]

I.7. Caractéristiques des RCSF : Défis et exigences

La nature collaborative des RCSF apporte plusieurs avantages par rapport aux réseaux Ad hoc Sans fil classiques, par exemple l'auto-organisation, le déploiement rapide, la souplesse et une capacité de traitement intelligent inhérent. Toutefois, les caractéristiques uniques des RCSF représentent de nouveaux défis dans la conception matérielle, les protocoles de communication ainsi que les applications de conception. Une technologie de RCSF doit relever ces défis pour réaliser les nombreuses applications envisagées. Cela nécessite la modification des protocoles existants pour les réseaux Ad-hoc sans fil classiques [38] ou la conception de nouveaux protocoles de communication et d'algorithmes efficaces [39,40].

Tableau I.1. Défis vs Mécanismes nécessaires aux RCSFs

Défis	Mécanismes utilisée
Les contraintes de ressources	Utilisation efficace des ressources
Conditions d'environnement dynamique e extrêmes	Conditions d'environnement dynamique et extrêmes
Redondance des données	Fusion et compression des données, traitement localisé
Communication sans fil peu fiable	Mécanisme de fiabilité
Identification non globale (ID) pour les nœuds capteurs	Paradigme de communication des données centrées
Défaillance des nœuds capteurs	Tolérance aux fautes
Déploiement à grande échelle	Faible coût, petite taille des capteurs avec auto configuration et auto-organisation

I.8. Comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad hoc classiques.

Les MANET et les WSN partagent quelques points communs mais quelques fois avec des points différents. Parmi lesquels, nous trouvons:

L'utilisation de médium de communications sans fil, 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.

Le tableau suivant résume les similitudes et les différences entre les réseaux de capteurs et les réseaux ad hoc ordinaires.

Tableau I.2. Comparaison entre RCSF et réseaux MANET.

RCSF	Réseau MANET
Utilisation d'un médium sans fil.	Utilisation d'un médium sans fil.
Déploiement Ad Hoc.	Déploiement Ad Hoc.
Robuste aux panes des nœuds (Auto-organisation).	Robuste aux panes des nœuds (Auto-organisation).
Routage multi-saut.	Routage multi-saut.
La mobilité des nœuds est restreinte.	La mobilité des nœuds.
Grand nombre de nœuds (de l'ordre de mille.)	Nombre de nœuds moyen (de l'ordre de cents).
Des petits nœuds plus susceptibles aux pannes, avec moins capacité de traitements et de stockage.	De nœuds ayant plus de capacité de traitement et de stockage.
Data-centric : souvent pas d'adresses uniques, les requêtes sont envoy à tous les nœuds.	Adress-centric : une adresse unique pour chaque nœud utilisé pour réaliser la communication entre les nœuds.
Utilisation de broadcast.	Communication point à point.
Flot de données « Many-to-one».	Flot de données « Any-to-any».
L'énergie est un facteur déterminant.	Débit est majeur
Nœuds collaborant pour remplir un objectif commun.	Chaque nœud a son propre objectif.
Les nouds agrègent les données avant de les transmettre.	Généralement pas d'agrégation de données.
Les protocoles de routage doivent prendre en considération certains contraints : le grand nombre de nœuds, moins de ressources mémoires et de calcule, la consommation d'énergie.	Plusieurs types de protocoles de routage peuvent être utilisés.

I.9. Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant vu la diversité de ces applications : santé, environnement et industrie.

Dans ce chapitre nous avons présenté brièvement les RCSF, leurs architectures de communication, la pile protocolaire des capteurs, leurs diverses applications.

Dans le prochain chapitre nous allons mettre l'accent sur le problème de la consommation d'énergie dans les RCSF.

Chapitre II : Consommation d'énergie et effet de la température sur les RCSF

II.1. Introduction

La consommation d'énergie est sans doute le problème le plus important lorsque les capteurs sont déployés dans des zones hostiles et inaccessibles, c'est-à-dire lorsqu'il est difficile de changer les batteries des capteurs quand elles sont déchargées. Les capteurs sont conçus pour fonctionner durant des mois voire des années. Ainsi, la capacité énergétique des capteurs doit être utilisée efficacement afin de maximiser la durée de vie du réseau. A noter qu'une fois qu'un nœud capteur a épuisé son énergie, il est considéré comme défaillant. Ainsi, il y a une forte probabilité de perdre la connectivité du réseau. Donc, la gestion de la consommation d'énergie dans le cadre des réseaux de capteurs sans fil constitue un défi majeur.
Dans ce chapitre nous présentons la consommation d'énergie dans les RCSFs et les différents protocoles de communication ainsi que l'effet des conditions météorologiques spécialement la température sur les réseaux de capteurs sans fils.

II.2. Consommation d'énergie

L'économie d'énergie est une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. En effet, la recharge des sources d'énergie est souvent trop coûteuse et parfois impossible. Il faut donc que les capteurs économisent au maximum l'énergie afin de pouvoir fonctionner. En effet, un réseau de capteurs ne peut pas survivre si la perte de nœuds est très importante car ceci engendre des pertes de communications dues à une très grande distance entre les nœuds restants.

Les nœuds-capteurs sont alimentés principalement par des batteries. Ils doivent donc fonctionner avec un bilan énergétique modéré. En outre, ils doivent le plus souvent avoir une durée de vie de l'ordre de plusieurs mois, voire de quelques années, Afin de concevoir des solutions efficaces en énergie, il est extrêmement important de faire d'abord une analyse des différents facteurs provoquant la dissipation de l'énergie d'un nœud capteur. [31]
L'énergie consommée par un nœud capteur est due essentiellement aux opérations suivantes : la capture, le traitement et la communication de données [41]

II.2.1. Unité de capture

Cette unité fournit des signaux analogiques, à partir du phénomène observé, au CAN. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement. Pour réaliser ces transformations, cette unité a besoin d'énergie. Cette énergie sera proportionnelle au type d'information récoltée. En effet, la puissance consommée sera faible pour des applications simples comme la détection de température ou la lumière. Elle sera plus importante pour des applications acoustiques ou magnétiques. Et cette consommation sera beaucoup plus importante si on va récolter des images ou de la vidéo.

L'énergie de capture est dissipée pour accomplir les tâches suivantes : échantillonnage, traitement de signal, conversion analogique/numérique et activation de la sonde du capture. En général, l'énergie de capture représente un faible pourcentage de l'énergie totale consommé par un nœud. [98]

II.2.2. Unité de traitement

Cette unités a besoin pour fonctionner un système d'exploitation, alimenter l'unité de stockage et faire tourner les applications.

L'énergie de traitement se divise en deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel).

Par contre l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En général, l'énergie de traitement est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication [98]

II.2.3. Unité de communication

Cette unité est généralement composée d'un module émetteur récepteur RF. Donc elle nécessite l'énergie pour :

- La transmission RF.
- L'amplificateur de puissance.
- Traitement numérique du signal en bande de base.

La consommation de cette unité dépend directement de l'architecture du module RF et du protocole de communication utilisé.

L'énergie de communication se décline en deux parties : l'énergie de réception et l'énergie de l'émission. Cette énergie est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance. Quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Notons que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur.

Solution : La minimisation consommation d'énergie pendant la communication est principalement liée aux protocoles développes pour la couche MAC et la couche réseau. Le but des protocoles de cette dernière est de trouver les routes optimales en termes de consommation d'énergie. En effet, la perte d'énergie due à un mauvais acheminement des paquets de données a un impact sur la durée de vie du réseau. [99]

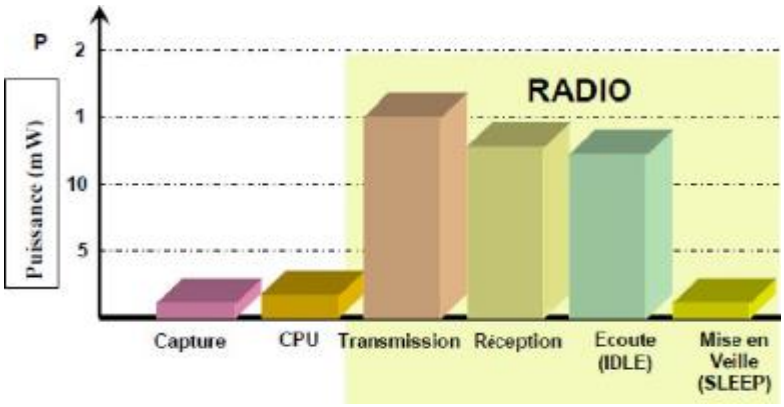


Figure II. 1. Consommation d'énergie en capture, traitement, et communication.

II.3. Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie

La consommation d'énergie dépend de plusieurs facteurs qui sont expliqués ci-dessous.

II.3.1. Etat du module radio

Le module radio est le composant du nœud capteur qui consomme le plus d'énergie, puisque c'est lui qui assure la communication entre les nœuds. On distingue quatre états des composants radio (transmetteur et récepteur) : actif, réception, transmission et sommeil

- **Etat actif (run)** : la radio est allumée, mais elle n'est pas employée. En d'autres termes, le nœud capteur n'est ni en train de recevoir ni de transmettre. Cet état provoque une perte de l'énergie suite à l'écoute inutile du canal de transmission. Pour éviter cette perte d'énergie, un capteur doit s'activer qu'en cas de nécessité, et le reste du temps il doit se mettre dans l'état sommeil.
- **Etat sommeil** : la radio est mise hors tension.
- **Etat transmission** : la radio transmet des paquets.
- **Etat réception** : la radio reçoit des paquets.

Il est aussi à noter que le passage fréquent de l'état actif à l'état sommeil peut avoir comme conséquence une consommation d'énergie plus importante que de laisser le module radio en mode actif. Ceci est dû à la puissance nécessaire pour la mise sous tension du module radio. Cette énergie est appelée l'énergie de transition. Il est ainsi souhaitable d'arrêter complètement la radio plutôt que de transiter dans le mode sommeil. Le changement d'état du module radio doit être géré par un protocole de la couche MAC. [41]

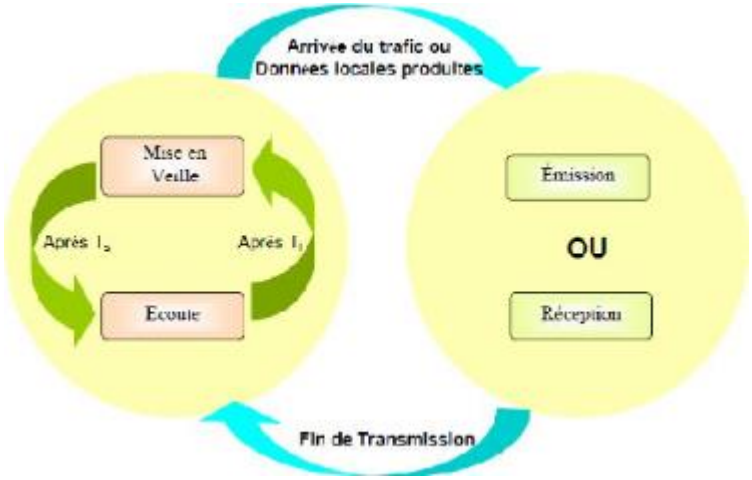


Figure II. 2. Diagramme de transition d'état du nœud capteur

II.3.2. Accès au medium de transmission.

La sous couche MAC assure l'accès au support de transmission, la fiabilité de transmission, le contrôle de flux, la détection d'erreur et la retransmission des paquets. Puisque les nœuds partagent le même médium de transmission, la sous-couche MAC joue un rôle important pour la coordination entre les nœuds et la minimisation de la consommation d'énergie. En effet, minimiser les collisions entre les nœuds permet de réduire la perte d'énergie. [41]

II.3.2.1. La retransmission

Les nœuds capteurs possèdent en général une seule antenne radio et partagent le même canal de transmission. Par ailleurs, la transmission simultanée des données provenant de plusieurs capteurs peut produire des collisions et ainsi une perte de l'information transmise. La retransmission des paquets perdus peut engendrer une perte significative de l'énergie. [41]

II.3.2.2. L'écoute active

L'écoute active (*idle listening*) du canal pour une éventuelle réception de paquet qui ne sera pas reçu peut engendrer une perte importante de la capacité des nœuds en énergie. Pour éviter ce problème, il faut basculer les nœuds dans le mode sommeil le plus longtemps possible. [41]

II.3.2.3. La surécoute

Le phénomène de surécoute (*overhearing*) se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés (voir Figure II.3). La surécoute conduit à une perte d'énergie additionnelle à cause de l'implication des autres capteurs dans la réception des données. [41]

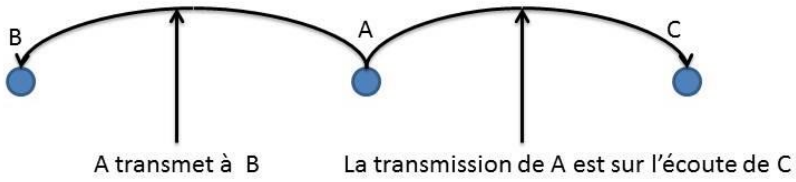


Figure II. 3. La surécoute dans une transmission

II.3.2.4. La surcharge

Plusieurs protocoles de la couche MAC fonctionnent par échange de messages de contrôle (*overhead*) pour assurer différentes fonctionnalités : Signalisation, connectivité, établissement de plan d'accès et empêchement de collisions. Tous ces messages nécessitent une énergie additionnelle. [41]

II.3.2.5. La surémission

Le phénomène de surémission (*overemitting*) se produit quand un nœud capteur envoie les données à un destinataire qui n'est pas prêt à les recevoir. En effet, les messages envoyés sont considérés inutiles et consomment une énergie additionnelle. [41]

II.3.2.6. La taille des paquets

La taille des messages échangés dans le réseau a un effet sur la consommation d'énergie des nœuds émetteurs et récepteurs. Ainsi, la taille des paquets ne doit être ni trop élevée ni trop faible. En effet, si elle est petite, le nombre de paquets de contrôle (acquittement) généré augmente l'*overhead*. Dans le cas contraire, une grande puissance de transmission est nécessaire pour des paquets de grande taille. [41]

II.3.3. Modèle de propagation radio

Le modèle de propagation représente une estimation de la puissance moyenne reçue du signal radio à une distance donnée d'un émetteur. La propagation du signal radio est généralement soumise à différents phénomènes : la réflexion, la diffraction et la dispersion par divers objets. Généralement, la puissance du signal reçue est de l'ordre de $1/d^n$, où d est la distance entre l'émetteur et le récepteur, n un exposant de perte d'un chemin (Exemple : n=2 dans le vide, de 4 à 6 dans un immeuble) [42].

II.3.4. Routage des données

Le routage dans les réseaux de capteurs est un routage multi-sauts. L'acheminement des paquets d'une source donnée à une destination se fait à travers plusieurs nœuds intermédiaires. Ainsi, un nœud consomme de l'énergie soit pour transmettre ces données ou pour relayer les données des autres nœuds. Dans ce contexte, une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau.

II.4. Techniques de minimisation de la consommation d'énergie

La Figure II.4 est une présentation globale de différentes techniques utilisées pour minimiser cette consommation.

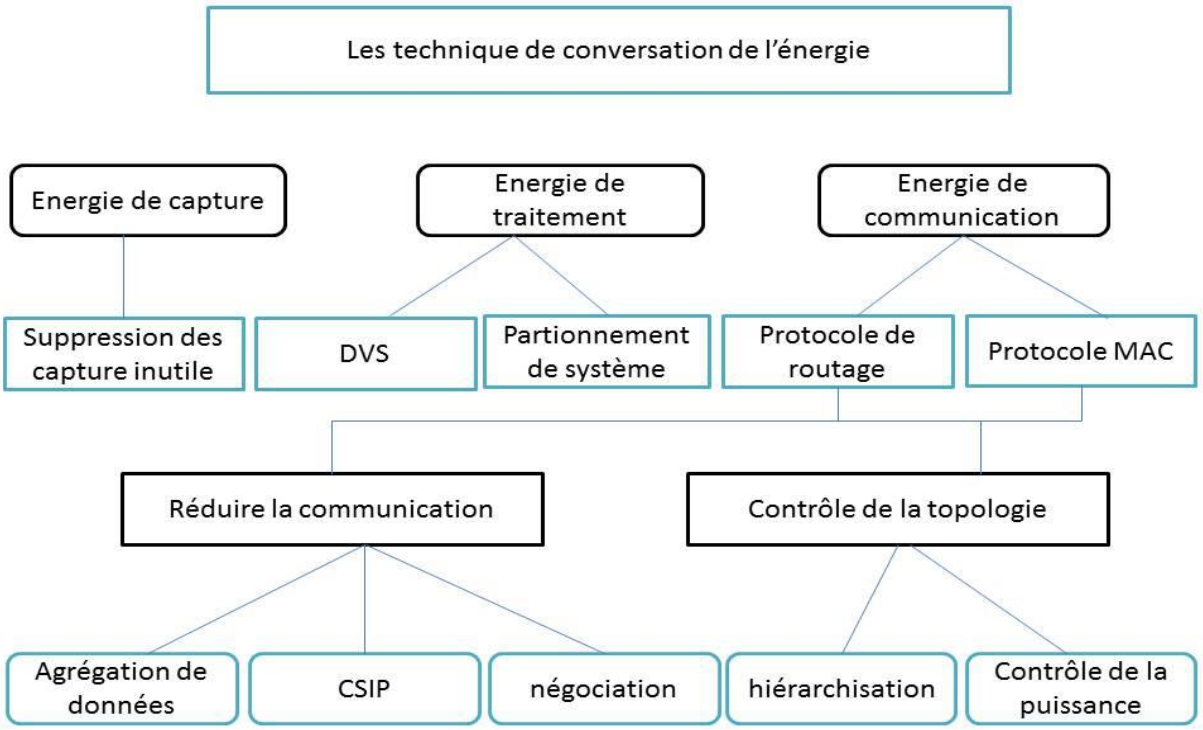


Figure II. 4. Les techniques de conservation d'énergie

L'énergie de capteur peut être économisée soit au niveau de capture, au niveau de traitement ou au niveau de communication.

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

b- L'énergie de traitement peut être optimisée en utilisant deux techniques

- **L'approche partitionnement du système** : Consiste à transférer un calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul
- **L'approche DVS** : Consiste à ajuster de manière adaptative la tension d'alimentation et la fréquence du microprocesseur pour économiser la puissance de calcul sans dégradation des performances.

c- La minimisation de la consommation d'énergie pendant la communication est étroitement liée aux protocoles développés pour la couche réseau et la couche MAC. Ces protocoles se basent sur plusieurs techniques : agrégation de données, négociation et CSIP. Cette dernière technique est une discipline qui combine plusieurs domaines [43] : la communication et le calcul à basse puissance, traitement de signal, algorithmes distribués et tolérance aux fautes, systèmes adaptatifs et théorie de fusion des capteurs et des décisions. Ces techniques ont pour but de réduire le nombre d'émission/ réception des messages.

Par contre, le contrôle de la topologie [44] permet l'ajustement de la puissance de transmission et le regroupement des nœuds capteurs (hiérarchisation).

- Le contrôle de la puissance de transmission n'a pas seulement un effet sur la durée de vie de la batterie d'un nœud capteur, mais aussi sur la capacité de charge du trafic qui est caractérisée par le nombre de paquets transmis avec succès vers une destination. En outre, il influe sur la connectivité et la gestion de la densité (le nombre de nœuds voisins). Ainsi, il peut conserver l'énergie à deux niveaux : explicitement par l'application de puissances faibles d'émissions et implicitement en réduisant le conflit avec d'autres nœuds transmetteurs. Le module de contrôle de la puissance est souvent intégré dans les protocoles soit de la couche réseau soit de la couche MAC [45].

- La hiérarchisation consiste à organiser le réseau en structure à plusieurs niveaux. C'est le cas, par exemple, des algorithmes de groupement (*clustering*), qui organisent le réseau en groupes (*clusters*) avec des chefs de groupe (*cluster head*) et des nœuds membres [42]

II.5. Protocoles de communication dans RCSF

Les protocoles en adéquation avec les contraintes des RCSF et plus précisément la contrainte d'économie d'énergie se fait au niveau des couches liaison de données et réseau car la minimisation de la consommation d'énergie pendant la communication est étroitement liée aux protocoles développés pour ces deux couches. Une forte consommation d'énergie est observée dans la sous couche MAC et dans la couche réseau contrairement aux autres couches

de la pile protocolaire (couche physique, couche transport et la couche application) où la consommation d'énergie est négligeable

II.5.1. Protocoles de routage

Les protocoles de routage au sein des RCSF sont influencés par un facteur déterminant à savoir : La minimisation d'énergie sans une perte considérable de l'efficacité.

Pour cela de nombreuses stratégies de routage ont été créés pour les réseaux de capteurs. Certaines sont des adaptations de stratégies qui existaient pour d'autre types de réseaux (réseaux sans fil au sens le plus large) tandis que d'autres ont été conçues spécialement pour les réseaux de capteurs sans fil.

Les protocoles de routage proposés pour les RCSF peuvent être classifiés selon quatre manières : Selon la topologie, l'établissement de la route, les paradigmes de communication et le fonctionnement du protocole.

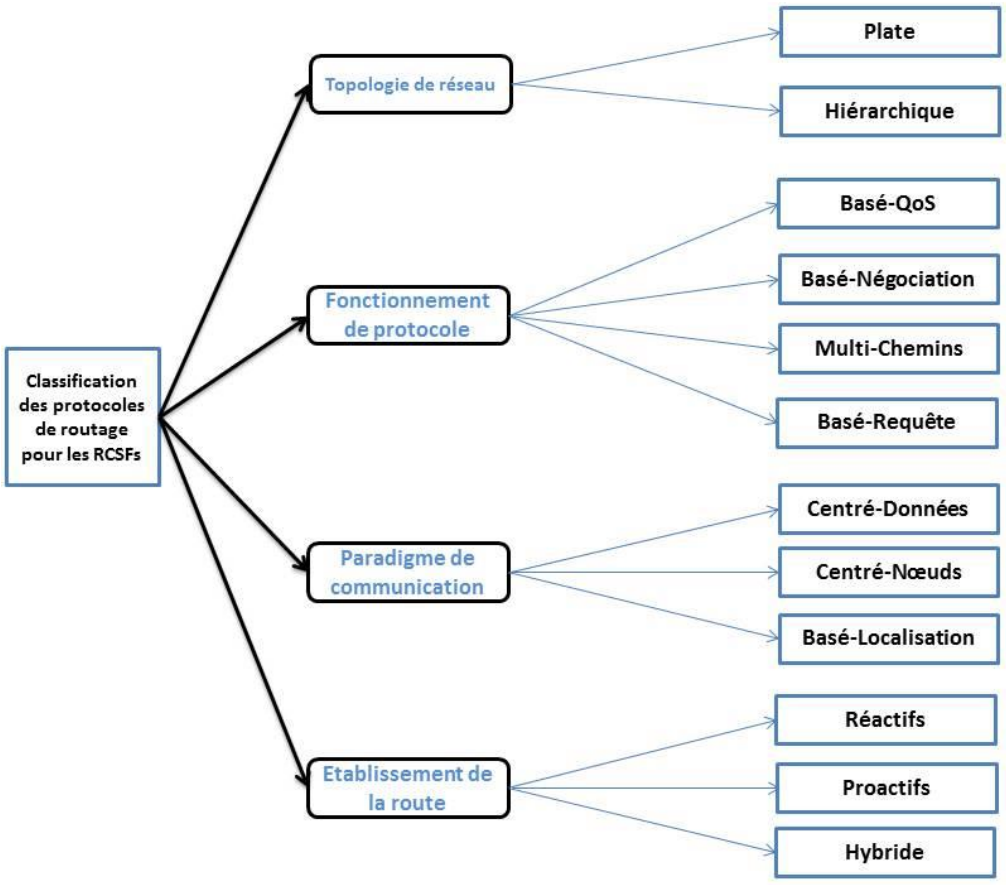


Figure II.5. Classification des protocoles de routages pour les RCSFs

II.5.1.1. Selon la topologie de réseau

Les techniques de routages basés sur la topologie de réseau classifient les protocoles de routages en deux catégories : topologie plate et topologie hiérarchique.

II.5.1.1.1. Topologie plate

Dans la topologie plate ou horizontale, chaque nœud joue typiquement le même rôle et les nœuds capteurs collaborent pour accomplir la tâche globale du réseau**.** Les réseaux plats sont caractérisés par: La simplicité des protocoles de routage, un coût de maintien réduit, une grande tolérance aux pannes ainsi qu'une habilité à construire de nouveaux chemins suite aux changements de topologie. Cependant, Les nœuds proches du puits participent plus que les autres aux tâches de routage. De plus, ces réseaux présentent une faible scalabilité dû au fonctionnement identique des nœuds et d'une manière distribuée nécessitant ainsi un grand nombre de messages de contrôle. La figure suivante illustre l'organisation des capteurs dans une topologie plate

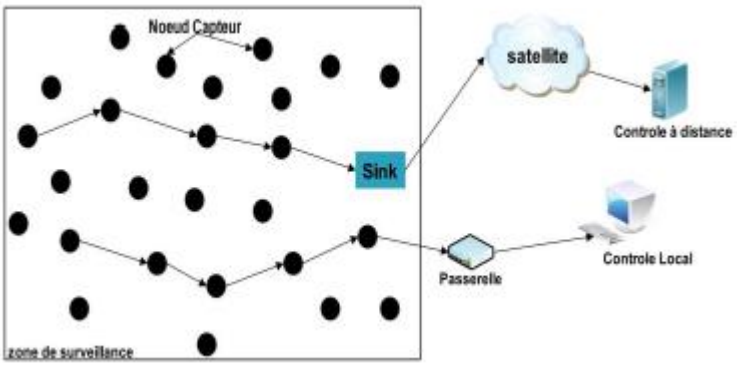


Figure II. 6. Routage plat dans les RCSFs

II.5.1.1.2.. Topologie hiérarchique

Dans une topologie hiérarchique, les nœuds ont des différents rôles. En effet, certains nœuds sont sélectionnés pour exécuter des fonctions particulières. Les méthodes de routage hiérarchique ont des avantages spéciaux liés à l'efficacité dans la communication. Par exemple, elles sont utilisées pour exécuter un routage avec économie d'énergie. Dans une architecture hiérarchique, des nœuds à grande énergie peuvent être employés pour traiter et envoyer l'information, alors que des nœuds à énergie réduite peuvent assurer la capture à

proximité de la cible. La création des clusters et l'assignation des tâches spéciales aux têtes de clusters peuvent considérablement renforcer l'augmentation de la durée de vie et l'efficacité énergétique du système global. Le routage hiérarchique est une manière efficace de réduire la consommation énergétique dans un cluster en exécutant l'agrégation et la fusion de données afin de diminuer le nombre de messages transmis à la station de base

Son inconvénient majeur est la surcharge des clusterheads qui induit un déséquilibre de la consommation d'énergie dans le réseau. Pour remédier à ce problème, les clusterheads peuvent être des capteurs spécifiques avec plus de ressources énergétiques et plus de capacités de traitement ou bien ils peuvent être élus dynamiquement et ainsi garantir un équilibre de la consommation d'énergie et augmenter la tolérance aux pannes

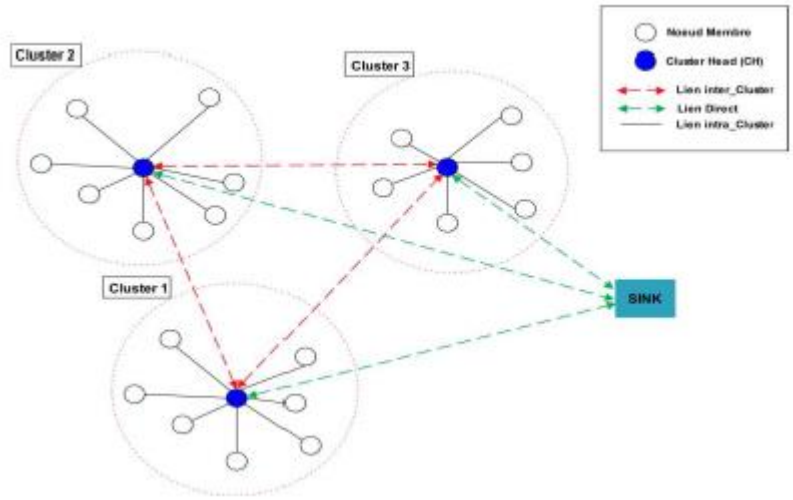


Figure II.7. Routage hiérarchique dans les RCSF

II.5.1.2. Selon le fonctionnement de protocole

Définit la manière avec laquelle les données sont propagées dans le réseau. Selon ce critère, les protocoles de routage peuvent être classifiés en quatre catégories : routage basé sur la Qualité de Service "QdS, QoS", routage basé sur les requêtes (query-based routing), routage multi- chemins (Multi-path routing), et routage basé sur la négociation (Negociation based routing)

II.5.1.2.1.Routage basé sur qualité de service (QoS based routing)

Dans les protocoles de routage basés sur QoS, le réseau doit équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité de données. En particulier, le réseau doit satisfaire certaines métriques de QoS, par exemple, retard, énergie, etc.

Ces protocoles adoptent des approches d'établissement de chemins en considérant la qualité de service. Les performances réseau sont prises en compte pour garantir un délai fiable qui répond aux besoins de l'application. On retrouve ces protocoles surtout dans le cadre d'applications industrielles et militaires.

II.5.1.2.2. Routage basé sur la négociation (Negociation based routing)

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 la disponibilité de ses ressources.

II.5.1.2.3.Routage basé sur multi-chemins (Multi-path based routing)

Dans cette catégorie, les protocoles de routage utilisent des chemins multiples plutôt qu'un chemin simple afin d'augmenter la performance de réseau. La tolérance des fautes (résilience) d'un protocole est mesurée par la probabilité qu'un chemin alternatif existe entre une source est 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. Par conséquence, la fiabilité de réseau peut être augmentée en maintenant les chemins alternatifs les plus récents

II.5.1.2.4. Routage basé sur les requêtes (Query based routing)

Dans ce type de routage. Les nœuds destinataires propagent une requête aux nœuds du réseau. Et par conséquence, le nœud ayant les données correspondantes à ces requêtes, va les envoyer aux nœuds, qui ont lancé la requête

II.5.1.3. Selon le paradigme de communication

Le paradigme de communication détermine la manière dont les nœuds sont interrogés. Dans les RCSF, il existe trois paradigme de communication : centré-nœuds, centré-donnée et basé sur la localisation.

II.5.1.3.1. Centré-Nœuds (Node-centric)

Ce paradigme est celui employé dans les réseaux conventionnels, ou il est nécessaire de connaitre et d'identifier les nœuds communicants (comme adresse IP) .Les réseaux Ad Hoc utilisent ce genre de paradigme qui s'intègre bien avec l'utilisation de ce type d'environnement. Cependant, pour les réseaux de capteurs, un routage basé sur une identification individuelle des nœuds ne reflète pas l'usage réel du réseau. Pour cela, un autre paradigme a été introduit : data centric. Néanmoins, le paradigme node centric n'est pas à écarter totalement, car certaines applications nécessitent une interrogation individuelle des capteurs.

II.5.1.3.2. Centré-donné (data-Centric)

Ces protocoles communiquent sans avoir d'adresses ou d'identifiant. La communication s'effectue à travers certaines régions, de proche en proche à travers le réseau. En général, pour effectuer une transmission de données, la source envoie sur le réseau une annonce de donnée à transmettre avant l'envoie des données puis les voisins étant intéressés par l'annonce envoie une requête d'obtention des données, une fois toutes les requêtes reçues à ce moment les données sont envoyées.

II.5.1.3.3.Basé-localisation (location-based)

Dans cette approche, les décisions de routage sont établies selon la position des nœuds. La distance entre les nœuds voisins peut être estimée sur la base de la puissance du signal arrivé. Un tel type de routage nécessite que les nœuds aient connaissance de leurs positions géographiques. Par conséquent, ce type de mécanismes nécessite un déploiement d'une solution de positionnement, dont le degré de précision requis dépend de l'application ciblée. L'utilisation du GPS reste trop coûteuse pour un RCSF. Néanmoins, d'autres méthodes de

localisation et de positionnement des capteurs ont été développées comme par exemple la triangulation.

II.5.1.4. Selon l'établissement de la route

Suivant la manière de création et la maintenance de routes lors de l'acheminement des données, les protocoles de routages peuvent être séparés en 3 catégories : protocoles proactifs, protocoles réactifs et protocole hybride

II.5.1.4.1.Protocoles réactifs

Les protocoles de routage réactifs (protocole de routage à la demande) créent et maintiennent des routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte de route est lancée.

II.5.1.4.2. Protocoles proactifs

Les protocoles de routage proactifs essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles (qui peuvent représenter l'ensemble de tous les nœuds du réseau) au niveau de chaque nœud de réseau. Les routes sont sauvegardées mêmes si elles ne sont pas utilisées. Avec ces protocoles, les nœuds du réseau maintiennent des tables de routage pour toutes les destinations indépendamment de l'utilité des routes ainsi calculées. La mise à jour de ces tables est assurée par la diffusion périodique des paquets de contrôle dans le réseau, ce qui induit un contrôle excessif surtout dans le cas des réseaux de grande taille.

II.5.1.4.3.Protocoles hybride

Les protocoles hybrides combinent les deux idées des protocoles réactifs et proactifs. Ils utilisent un protocole proactif pour apprendre le proche voisinage (par exemple le voisinage à deux ou trois sauts), ainsi ils disposent des routes immédiatement dans le voisinage. Au-delà de la zone de voisinage, le protocole hybride fait appel à un protocole réactif pour chercher des routes.

II.5.1.5. Exemples de protocoles de routage

Tableau II.1. Exemples de protocole de routage

Protocoles de routage	Description
Flooding	Diffuse les données à tous les nœuds voisins sans se soucier si elles les reçoivent avant ou pas.
Gossiping	Envoie les données à un voisin aléatoirement choisi
SPIN	Envoie les données aux nœuds capteurs seulement s'ils sont intéressants. Il existe deux types de messages (REQ ,DATA)
SAR	Crée des arbres multiples ou la racine de chaque arbre est un voisin d'un saut ou Sink.
LEACH	Formes des clusters pour réduire au minimum la dissipation d'énergie
Directed Diffusion	Installent des gradients pour que les données passent de la source vers le sink pendant une diffusion d'intérêt
MCFA	Recherchant le chemin minimal entre la source et le puits pour assurer : l'optimalité, la simplicité et la scalabilité

II.5.2. Protocole MAC

Les protocoles MAC gèrent l'activité du circuit radio et l'établissement d'une communication entre émetteurs et récepteurs, les protocoles de contrôle d'accès au médium permettent de conjuguer les contraintes de consommation d'énergie et la durée de vie des nœuds capteurs. La plupart des protocoles MAC pour les RCSF ont été proposés dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique en consommant moins d'énergie pendant la transmission des paquets entre les nœuds. Ces protocoles ont également comme objectifs la réduction du retard et la perte de paquets. Un protocole MAC décide, quand les nœuds concurrents peuvent accéder au support partagé, et tente de s'assurer que deux nœuds n'interfèrent pas entre eux.

L'objectif essentiel du protocole MAC dans un réseau cellulaire est de fournir une bonne qualité de service avec une bande passante efficace. Cependant, l'économie d'énergie dans un

tel réseau ne constitue pas une contrainte importante prise en compte par le protocole MAC étant donné que l'utilisateur peut recharger les batteries de son combiné lorsqu'il le voudra.

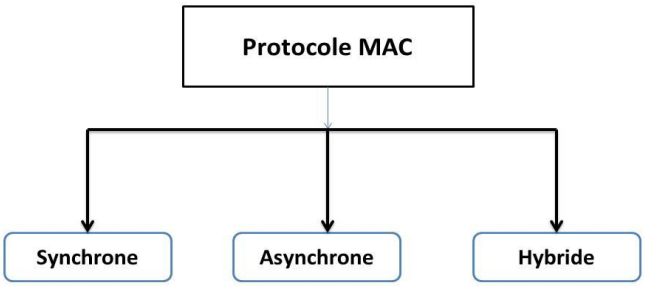


Figure II.8. Protocole MAC

- Protocole MAC synchrone : Les protocoles MAC à conservation d'énergie synchrone ont besoin d'un mécanisme pour établir un calendrier de régulation non contradictoire qui aide à décider « Quelle ressource utiliser et à quel moment l'utiliser».

- Protocole MAC Asynchrone : Les mécanismes asynchrones sont généralement fondés sur les préambules, longs ou courts, qui précèdent les transmissions

- Protocole MAC Hybride.

II.5.2.1. Les caractéristiques d'un protocole MAC convenable aux RCSF

Afin de concevoir le protocole MAC le mieux adapté avec les spécificités des réseaux de capteurs, on doit prendre en considération les propriétés suivantes :

- **Optimisation d'énergie** : Cette propriété est la plus importante dans le cas des RCSF. En effet, le fait qu'il est difficile de changer ou de recharger les batteries (source d'énergie) des nœuds, constitue un vrai handicap qui limite leur durée de vie.

  Comme la couche MAC contrôle les activités de la couche radio qui à son tour consomme le plus d'énergie, alors on peut déduire que la couche MAC peut gérer cette consommation en essayant d'empêcher les pertes de cette énergie.

- **L'empêchement des collisions** : Cette caractéristique constitue la mission principale de tous les protocoles MAC qu'ils s'agissent des réseaux filaires ou des réseaux sans fil.

- **Scalabilité et adaptabilité** (adaptation au chandgement) : Comme les réseaux de capteurs sont des réseaux dynamiques que ce soient aux niveaux de leurs tailles, leurs densités ou leurs topologies ; Alors dans ce cas, un protocole MAC efficace doit gérer rigoureusement ces changements sans qu'il y ait un dysfonctionnement du réseau (adaptation rapide avec succès).

- **Le « Throwghput »** : C'est la quantité de données transmises avec succès entre un émetteur et un récepteur dans un temps bien déterminé. Il constitue une caractéristique assez importante dans le cas des applications qui requièrent un bon « throughput »

- **La bande passante** (ou capacité du canal): C'est une caractéristique importante pour le cas des réseaux cellulaires (GSM) ou des réseaux locaux sans fils (WLAN), que dans le cas des réseaux de capteurs ; En effet le débit est un objectif secondaire pour les WSN.

- **Equité (Fairness)** : Elle reflète la capacité des nœuds capteurs à partager le canal d'une façon équitable. Dans le cas des WSN, cette propriété n'est pas prise en considération étant donné que tous les nœuds collaborent ensemble, indépendamment de la quantité d'informations émises par les différents nœuds, afin de remplir une tâche commune. Cependant, cette propriété est très importante dans les réseaux traditionnels du fait que chaque nœud désire avoir la même chance que les autres nœuds pour l'émission ou la réception des données.

- **Temps d'attente (Latency)** : C'est le délai entre l'instant d'émission d'un message et l'instant de sa réception avec succès. L'importance de cette caractéristique est dépendante du type d'application.

II.5.2.2. Exemples de protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil

II.5.2.2.1. S-MAC : Est un protocole MAC spécialement conçu pour les WSN. L'objectif essentiel de ce protocole est de réduire les pertes d'énergie dues aux causes qu'on a identifiées (idle-listening, collision, overhearing et control overhead.).

Le S-MAC consiste en trois parties :

Ecoute et sommeil périodique: Les nœuds voisins sont synchronisés pour s'endormir ensemble et d'écouter ensemble (forment un cluster virtuel).

Résolution de la collision et l'overhead: Le S-MAC adopte un schéma basé sur le conflit (contention-based) pour éviter les collisions. Dans chaque paquet transmis un champ est réservé pour indiquer la durée de transmission.

Le passage de messages: Des paquets volumineux sont divisés en frames. Cela minimise l'énergie consommée par l'overhead et le temps nécessaire à la retransmission des grands paquets perdus. [46]

Avantages

- L'énergie perdue causée par l'écoute inutile est réduite par l'ordonnancement du sommeil.
- Simplicité et synchronisation du temps.
- L'overhead peut être empêché.
- Le protocole est simple.

Inconvénients

- La diffusion n'utilise pas les trames RTS/CTS ce qui augmente la probabilité de collisions.
- Augmentation du temps d'attente.
- Peut causer l'overhead si le paquet n'est pas destiné au nœud qui écoute.
- Les périodes de sommeil/écoute sont prédéfinies et constantes, ce qui diminue l'efficacité du protocole si on a une charge de trafic variable.

II.5.2.2.2 B-MAC (Berkeley MAC) Il utilise le principe d'échantillonnage de préambule. Les nœuds se réveillent périodiquement pour échantillonner le canal en utilisant un mécanisme appelé LPL. S'il y a une activité, ils se réveillent pour recevoir le paquet. Ce mécanisme réduit l'écoute à un canal libre en augmentant les coûts de transmission et de réception, puisque l'émetteur doit envoyer un préambule de longueur plus grande que le cycle d'échantillonnage des nœuds. En plus, B-MAC a implémenté des interfaces qui permettent aux services du réseau d'ajuster les mécanismes de B-MAC comme CCA, l'acquittement, backoff pour l'arbitrage au canal et LPL pour la conservation d'énergie.

Avantages

- B-MAC évite l'overmiting en utilisant le préambule wake-up.
- B-MAC ne nécessite pas une synchronisation pour que les nœuds dorment et se réveillent en même temps.
- B-MAC est simple, scalable, flexible et s'adapte aux applications grâce à l'utilisation des interfaces.
- B-MAC est aussi évalué par une implémentation réelle d'un réseau de capteur sans fil.
- B-MAC augmente la capacité utile car il n'utilise pas le mécanisme RTS/CTS.

Inconvénients

- Aucune solution n'est donnée pour le problème du nœud caché.
- B-MAC minimise l'écoute au canal libre en augmentant le prix de la transmission et réception et de l'overhead.

II.5.2.2.3. TRAMA : Le protocole TRAMA est proposé pour réduire la consommation d'énergie en évitant les collisions de paquets de données transmis et il permet aux nœuds pour passer en mode de faible puissance quand ils ne sont pas dans la mode transmission et de mode réception [46].

Avantage:

- Une bonne utilisation du canal : expliqué précédemment.
- Le pourcentage du mode «mettre en veille» est élevé ce qui est avantageux en consommation d'énergie.
- La probabilité de collision est très faible.

Inconvénients:

- La période d'accès déterministe est sept fois plus grande que celle aléatoire.
- Tous les nœuds sont à l'état transmission ou réception lors de la période d'accès aléatoire pour échanger leurs « schedules ».

II.6. Condition météorologique dans les RCSF

Les déploiements varient d'une application à une autre, mais généralement les nœuds sont sans surveillance et doivent fonctionner dans condition météorologique sur de longues périodes de temps sans intervention ou l'assistance externe. Par conséquent, les nœuds doivent consommer le moins d'énergie tout en assurant que le réseau du capteur continu à fonctionner correctement. Dans sa forme de base, le bon fonctionnement du réseau peut être atteint que si la couverture et la connectivité sont préservées. La couverture assure que l'ensemble de la zone de déploiement est surveillée afin qu'aucun événement ne soit pas atteint, et la connectivité signifie que le réseau ne soit pas fragmenté afin que les données transmises puissent atteindre un nœud dans le réseau.

II.6.1. L'effet de la température sur les RCSF

L'effet des conditions météorologiques telles que la pluie, la neige, le vent, l'humidité et de la température sur la performance de communication sans fil a suscité l'intérêt d'un travail de recherche constant. Les premiers travaux sur l'effet de la météo sur la communication sans fil ont été réalisés dans [48] qui ont montré que l'effet de la température est parmi les plus importantes par rapport à d'autres conditions météorologiques. Les auteurs de [48] ont montré que les températures élevées affectent l'émetteur en provoquant une distorsion dans la forme d'onde de sortie lors de l'amplification de l'étage final ce qui entraîne un mauvais signal transmis

L'effet de la température sur les communications sans fil a également été étudié en [49] et [50] dans le cadre de réseaux de capteurs. Les auteurs de [49] et [50] ont montré par ses expériences que la température n'a pas d'effet sur l'antenne, mais touche plutôt l'amplificateur de la puissance PA à l'émetteur et l'amplificateur à faible bruit LNA au niveau du récepteur, ce qui entraîne un mauvais lien. Ils ont également montré que l'indicateur de l'intensité du signal reçu RSSI plancher de bruit diminue avec la température et mis en évidence l'effet important de la température sur les protocoles MAC que ceux-ci utilisent le plancher de bruit RSSI afin de déterminer si le canal de communication est libre ou occupé. Ils ont également montré par l'expérimentation avec deux plates-formes différentes, le plateforme de Tmote Sky utilisant CC2420 (fonctionnant en 2,4 GHz) et la plateforme de MSB-430 utilisant CC1020 (fonctionnant en 868 MHz), que la dépendance de température existe sur deux fréquences différentes. Comme une façon de faire face aux changements de température dans un déploiement industriel, ils ont proposé un protocole qui adapte la puissance de transmission en fonction de la température.

Un autre travail sur l'effet de la température sur les liaisons sans fil peut être trouvé dans [51] où les auteurs ont examiné le changement de la qualité du lien en fonction de la température à travers l'expérimentation empirique. Ils ont proposé un système de contrôle de puissance combinant à la fois la compensation de la qualité de liaison prenant en charge les température et un processus de rétroaction en boucle fermée pour adaptée le changement de qualité des liens.

Dans [52], l'effet de la température sur des liaisons sans fil a été étudié expérimentalement dans le cadre de réseaux de capteurs. Les auteurs de [52] cité une diminution de 3,5 dB de la puissance du signal lorsque la température augmente entre 20 et 50˚C. Pour faire face à cet effet, ils ont proposé un algorithme de commande de puissance de transmission qui vise à maintenir les liens sans fil tout en économisant la consommation d'énergie en utilisant la puissance de transmission minimum qui préserve un LQI supérieur à un certain seuil.

Au-delà de l'effet de la température sur les liens individuels, l'effet de la température sur les autres indicateurs globaux tels que la connectivité a été étudié dans [53], également dans le contexte des réseaux de capteurs. Les auteurs de [53] ont également montré que la température affecte à la fois émetteur et récepteur et cité une diminution de 5dB de la puissance mesurée à l'émetteur et une diminution de la sensibilité du récepteur de 3dB sur la plage de 40˚C. Ils ont également étudié, par simulation, l'effet de la température sur la connectivité réseau, la collecte de données et de localisation et ont recommandé que les protocoles existants doivent être améliorés pour tenir compte de l'effet de la température.
Le travail réalisé en [47] étudie l'effet de la température sur la connectivité globale et la couverture du RCSF en déploiement aléatoire.

II.7. Conclusion

Grâce à leur immense potentiel applicatif, les RCSF ont suscité beaucoup d'intérêt ces dernières années de la part des professionnels du domaine des réseaux, les industriels et même les décideurs. Bien que la technologie des RCSF a connu des avancés sensibles sur les aspects théorique notamment, certains problèmes importants comme par exemple la consommation d'énergie restent toujours posés. Dans ce chapitre nous avons présenté la consommation et conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, ainsi quelque protocole de routage. Terminant par l'effet de la température sur les RCSF.
La performance d'un réseau de capteur sans fil est considérablement influencée par le processus de déploiement des nœuds capteurs. Dans le prochain chapitre nous allons mettre l'accent sur ces deux contraintes.

Chapitre III : Dépoilement dans les RCSF

III.1. Introduction

Les déploiements varient d'une application à une autre, mais généralement les nœuds sont sans surveillance et doivent fonctionner sur de longues périodes de temps sans intervention ou assistance externe. Par conséquent, les nœuds doivent consommer moins d'énergie tout en assurant que le réseau de capteur continu à fonctionner correctement. Dans sa forme de base, le bon fonctionnement du réseau peut être atteint que si la couverture et la connectivité sont préservées. La couverture assure que l'ensemble de la zone de déploiement est surveillée afin qu'aucun événement ne soit pas atteint, et la connectivité signifie que le réseau ne soit pas fragmenté afin que les données transmises puissent atteindre un nœud dans le réseau.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à étudier le positionnement et le placement des nœuds capteurs dans un RCSF. Nous présentons la problématique de déploiement dans un RCSF ainsi nous détaillons, nous terminons les travaux de recherche les plus récents qui concernent les méthodologies de résolution de cette problématique.

III.2. La durée de vie, la couverture et la connectivité dans les RCSF

III.2.1. La durée de vie

La durée de vie du réseau est peut-être la métrique la plus importante pour l'évaluation des réseaux de capteurs. Bien sûr, dans un environnement aux ressources limitées, la consommation de chaque ressource limitée doit être prise en considération. Les études sur la durée de vie, sont d'abord venues parce que la recharge ou le remplacement des batteries n'est pas faisable dans de nombreux scénarios (trop de nœuds, environnement hostile, etc.), et ainsi la durée de vie du réseau ne peut être étendue à l'infini. La durée de vie d'un RCSF est généralement définie par le temps durant lequel le réseau est capable de maintenir assez de connectivité, couvrir la zone de captage ou garder son taux de perte de nœuds inférieur à un certain niveau. La durée de vie d'un RCSF est donc liée à la durée de vie des nœuds. Et la durée de vie d'un nœud dépend principalement de la durée de vie de sa batterie. Cette dernière dépend des énergies consommées par les différents modules qui composent le nœud, par la technologie de la batterie et la façon de s'en servir. Plusieurs définitions de durée de vie d'un

réseau de capteurs sans fil ont été proposées dans la littérature. Parmi les différentes définitions, on peut citer :

III.2.1.1. Durée de vie basée sur le nombre de nœuds vivants/morts

La durée de vie d'un réseau de capteurs est équivalente à la durée jusqu'à ce qu'un certain nombre de nœuds meurt. Par exemple elle est équivalente à :

– La définition la plus fréquemment trouvée dans la littérature est la durée de vie de n-sur-n. Dans cette définition, la durée jusqu'à ce que le premier nœud épuise toute son énergie [8] [54] [55].

– Une autre variante de la définition n-sur-n, définit la durée de vie comme le temps jusqu'à ce que la fraction de nœuds vivants tombe au-dessous d'un seuil prédéfini «β », ou la durée jusqu'à ce qu'il reste au moins k-sur-n nœuds sont vivants dans le réseau [56].

– Il est possible de définir la durée de vie d'un réseau comme le temps jusqu'à ce que tous les nœuds épuisent leur énergie, c'est-à-dire $\beta = 0$ [57].

– La durée jusqu'à ce que 50% des nœuds épuisent leurs batteries et s'arrêtent de fonctionner, c'est-à-dire $\beta = 50\%$ [8].

– la durée pendant laquelle un pourcentage donné de nœuds possède un chemin vers le puits ou coordinateur [58].

III.2.1.2. Durée de vie basée sur la couverture/connectivité

La durée de vie d'un réseau de capteurs peut être aussi liée à la zone de couverture, elle peut être aussi équivalente à la durée jusqu'à ce qu'une partie de la zone reste couverte par un certain nombre de nœud :

– La durée pendant laquelle la zone d'intérêt est couverte par au moins k nœuds [59],

– La durée pendant laquelle chaque cible ou l'ensemble de la zone est couverte par au moins un nœud [60] [61].

– La durée pendant laquelle la couverture tombe en-dessous d'un seuil prédéfini γ [62].

– La durée pour laquelle au moins une portion α de la zone est couverte par au moins un nœud [63].

– La durée jusqu'à la perte de la connectivité ou de la couverture totale [64] [65].

Il existe d'autres définitions coexistant. Une définition est présentée dans [66] dit qu'un réseau de capteur devient inutilisable lorsque la connectivité des nœuds est perdue ou lorsque le rôle de la mesure ne peut pas être assuré sur toute la surface à couvrir. Dans [67] ils définissent la durée de vie du réseau comme le temps cumulé d'activité du réseau. Dans [66] ils définissent la durée de vie du réseau par la durée de vie de premier nœud capteur à tomber en panne à cause d'une perte d'énergie ou un problème catastrophique. Dans [68] La durée de vie du réseau T_n se termine dès que le premier nœud échoue.

$$\boldsymbol{T_n = \min_{v \in V, v \neq Sink} T_v}$$

Ou $\boldsymbol{T_n}$: la durée de vie de réseau.

$\boldsymbol{T_v}$ **:** La durée de vie de nœud v.

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

Parmi ces différentes définitions, on remarque que la plupart suggère qu'une durée de vie de réseau de capteurs est relative à la consommation d'énergie de ses nœuds capteurs.

III.2.2. Couverture dans les RCSF

Parmi les méthodes utilisées dans la conservation d'énergie est l'ordonnancement des nœuds. Cet ordonnancement doit préserver une propriété très importante qui est la couverture de la surface. La couverture de surface est considérée comme une métrique d'évaluation de la performance du réseau.

On sait très bien qu'un nœud capteur permet de surveiller une zone d'intérêt appelé zone de couverture. La zone de couverture est souvent considérée comme un disque de rayon **r** appelé rayon de surveillance. Un nœud est capable de détecter n'importe quel événement qui se passe dans sa zone de couverture. D'un autre côté, la vision d'un capteur dépend du rayon de communication du nœud R la Figure III.1 montre les différents rayons associés au nœud capteur.

Beaucoup de travaux traitent le problème de la couverture [69], Généralement ces travaux tiennent en compte de la contrainte suivante :

Si $\mathbf{R \geq 2r}$ on dit que la surface est couverte.

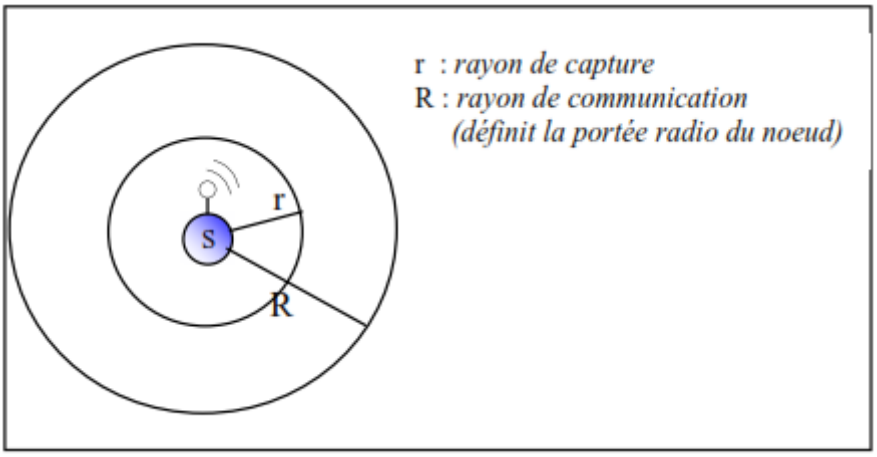


Figure III. 1. Rayon de couverture et rayon de communication d'un nœud capteur

Donc la couverture est la surface totale se trouvant en dessous de la marge ou de la portée de capture des données au moins d'un nœud.

- **Couverture d'un point :** On dit qu'un capteur C_i couvre un point q si et seulement si la distance d $(C_i , q) \leq r_i$
- **Couverture d'une zone :** On dit qu'un capteur couvre une zone A si et seulement si pour chaque point q dans A, la distance d $(C_i , q) \leq r_i$

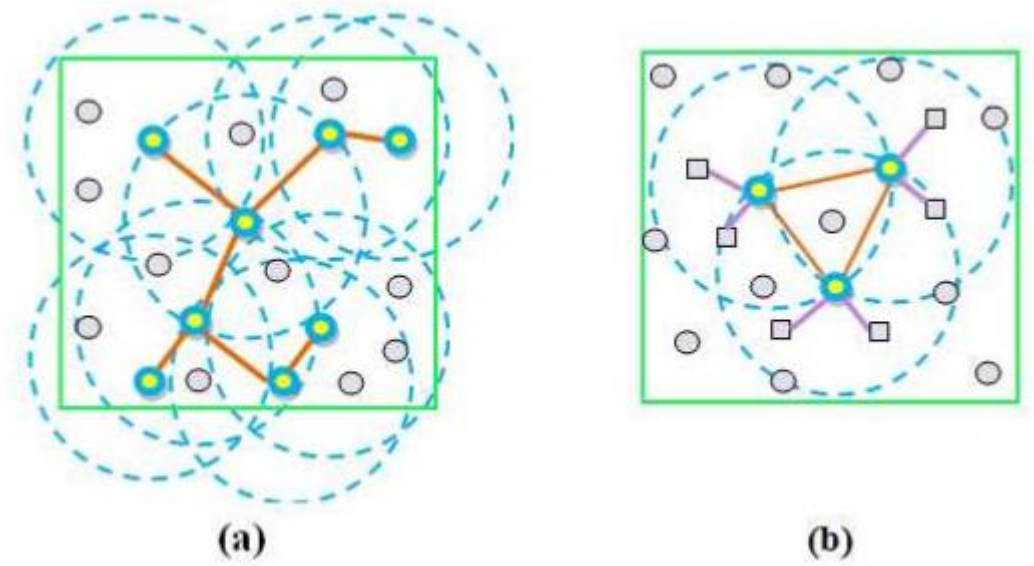


Figure III. 2. (a) couverture d'une zone. (b) couverture de points

Deux capteurs peuvent communiquer directement l'un à l'autre si et seulement si chaque capteur est à l'intérieur du porté de communication de l'autre.

- **Communication Directe** : Les capteurs $S_i$et S_j peuvent communiquer directement l'un à l'autre si et seulement si

$$d(S_i, S_j) \leq R_j \quad \text{et } d(S_j, S_i) \leq R_i$$

III.2.3. Connectivité dans les RCSF

Considérons un réseau de capteurs sans fil de communication à saut multiple (voir Figure III.3) où tous les nœuds coopèrent dans le but d'assurer des communications entre chacun Un tel réseau peut être représenté de la manière suivante :

Soit un graphe $G = (V, E)$représentant le réseau sans fil

Avec

- V l'ensemble des nœuds

- $\boldsymbol{E} \in \boldsymbol{V^2}$ les arcs donnant les communications directes possibles

$(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v})$ appartient à **E** si et seulement si $\boldsymbol{u}$ peut envoyer directement un message à $\boldsymbol{v}$ (on dit alors que v est voisin de u).

Les couples appartenant à $\boldsymbol{E}$ dépendent de la position des nœuds et de leur portée de communication.

Nous prenons l'hypothèse que la portée **R** de chaque nœud est identique. Soit **d($\boldsymbol{u}$, $\boldsymbol{v}$)** la distance entre les nœuds $\boldsymbol{u}$ et $\boldsymbol{v}$. L'ensemble **E** peut-être défini comme suit [70] :

$$\boldsymbol{E} = \{(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v}) \in \boldsymbol{V^2} \big| \boldsymbol{d}(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v}) \leq \boldsymbol{R}\}$$

Ce graphe est connu sous le nom de graphe disque unitaire [71], avec **R** comme rayon de transmission.

Dans ce graphe $\boldsymbol{G} = (\boldsymbol{V}, \boldsymbol{E})$, nous définissons $\boldsymbol{|V|}$ comme le nombre de nœuds dans le réseau.

Le voisinage **N(u)** d'un nœud **u** représente l'ensemble des nœuds voisins de **u**, défini par $\{\boldsymbol{v}/(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v}) \in \boldsymbol{E}\}$.

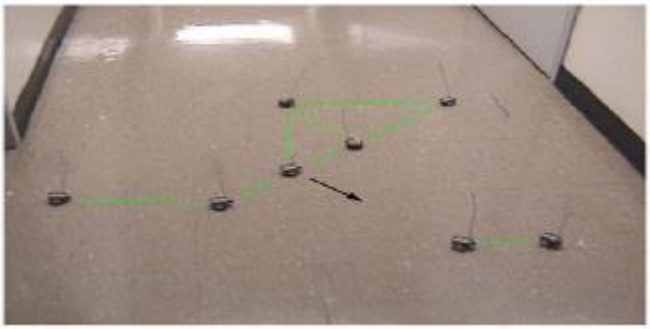


Figure III. 3. Communication à sauts multiples

III.2.3.1. Définition

Un réseau de capteurs est dit connecté si et seulement s'il existe au moins une route entre chaque paire de nœuds [72].

Un graphe G est dit k-(arc) connectés s'il y a au moins k disjoint chemins entre deux nœuds quelconques $u , v \in V$. La connectivité est une mesure de tolérance aux fautes ou de diversité

de chemin dans le réseau. La connectivité est une condition fondamentale pour que le réseau soit opérationnel. [73]

En effet la connectivité d'un réseau s'exprime de la façon suivante:

$$\boldsymbol{\mu(R) = \frac{N.\pi.R^2}{A}}$$

Où :

- **R** est le rayon de transmission d'un nœud
- **A** l'aire de calcul
- **N** le nombre de nœuds situé dans l'aire A

En effet la connectivité d'un réseau dépend de la densité du réseau [74], Kleinrock et Silverster [75] ont montré que lorsque la densité du réseau **µ(R)** atteignait 6 nœuds, la probabilité qu'un nœud soit connecté tend vers 1, ie que le réseau forme un graphe connexe. La démonstration faite par Kleinrock et Silverster montre qu'il n'est pas possible d'envisager la création de réseaux sans fil si les réseaux en question ne possèdent pas une densité égale à 6 nœuds ou supérieure à cette limite.

La connectivité dépend essentiellement de l'existence des routes. Elle est affectée par les changements de topologie dus à la mobilité, la défaillance des nœuds, les attaques, …etc. Ce qui a pour conséquences : la perte des liens de communication, l'isolement des nœuds, le partitionnement du réseau, ...etc.

Exemple :
Modélisation de la connectivité dans un réseau de capteurs sans fil

- Soit un déploiement de N capteurs, uniformément distribués dans une zone
- Deux nœuds capteurs n_1 et n_2 , de coordonnées respectives (x_1, y_1) et (x_2, y_2) , seraient reliés si et seulement si d(n_1 , n_2) $\leq R$.

d, étant la distance euclidienne, elle est définie par la formule suivante :

$$\boldsymbol{d(n_1, n_2) = \sqrt{((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2)}}$$

III.2.3.2. But de connectivité

Supposez qu'un événement (feu) est détecté dans une position x, et nous souhaitons transmettre cette occurrence de cet événement à un nœud y. Nous aimerions être capables de transmettre cette occurrence avec haute probabilité pour tout x, y quelconque. La situation est illustrée au-dessous:

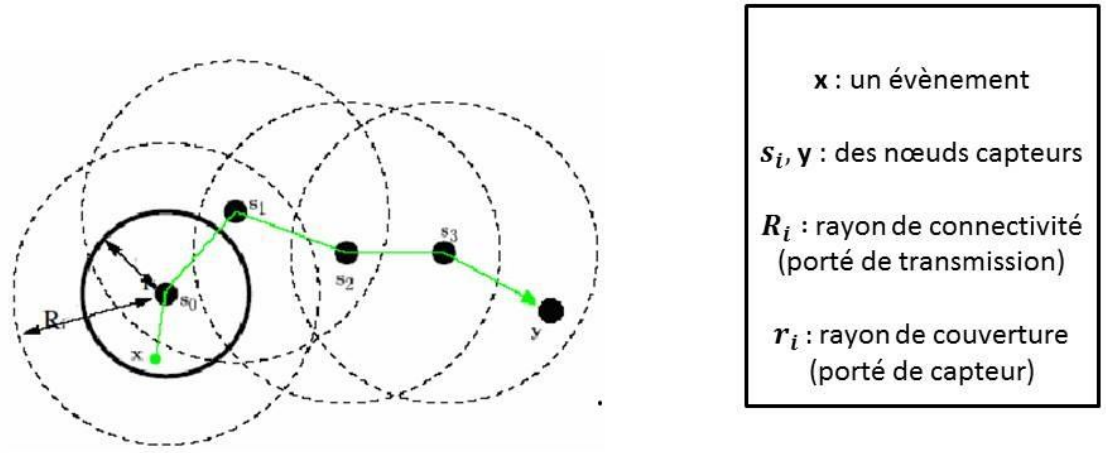


Figure III. 4. But de connectivité

Un chemin existe de x à y, si et seulement si il y a une séquence de nœuds dans un état de réception dans les positions $S_0, S_1 \dots \dots S_k$ tel que :

P1 : $\|X - S_0\| \leq r_i$ (X peut capturé)

P2 : $\|S_i - S_{i-1}\| \leq R_i$ (Pour i=1…k l'événement X peut être transmis de S_{i-1} à S_i si et seulement si S_i est en mode de réception)

P3 : $\|S_k - Y\| \leq R_i$ (S_k peut transmettre a Y)

On peut dire que le chemin est à k sauts. Et que le réseau et à chemin connectés si et seulement si pour tout x, y ; il existe un chemin connectant x et y.

Remarque :

- ✓ La connectivité est une mesure de tolérance aux fautes ou de diversité de chemin dans le réseau.
- ✓ La couverture mesure la qualité du service d'un réseau de capteurs.
- ✓ Si le rayon $R_t \geq 2r_c$ (R_t : rayon de transmission (de communication), r_c : rayon de couverture) et la région à surveiller est couverte, alors la connectivité des nœuds capteurs est assurée

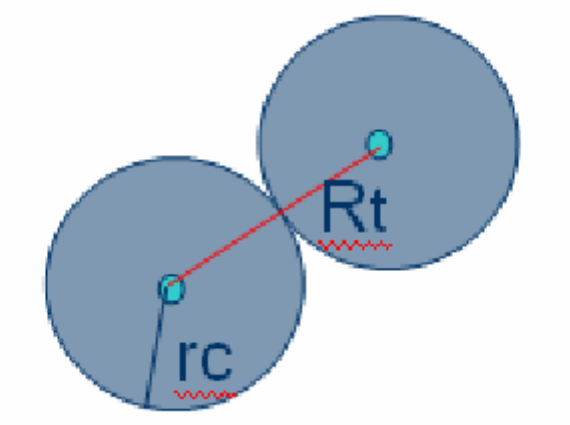


Figure III. 5. La relation entre la connectivité et la couverture

- ✓ L'algorithme de couverture doit prendre quelques contraintes en considération telles que la connectivité pour assurer que les données collectées puissent arriver à la station de base (Sink).

III.3. Dépoilement dans les RCSF

La performance d'un réseau de capteur sans fil est considérablement influencée par le processus de déploiement des nœuds capteurs. La problématique de déploiement ou de positionnement des nœuds capteurs dans un RCSF est une stratégie qui sert à définir la topologie du réseau, donc le nombre et la position des nœuds capteurs. La qualité de la surveillance, la connectivité, et la consommation d'énergie sont aussi directement affectées par la topologie de réseau. D'autre part, le problème de placement optimal des nœuds est un problème qui a été prouvé NP-difficile pour la plupart des formulations de déploiement des nœuds. Les capteurs peuvent être déployés d'une manière aléatoire ou déterministe (Figure III.6)

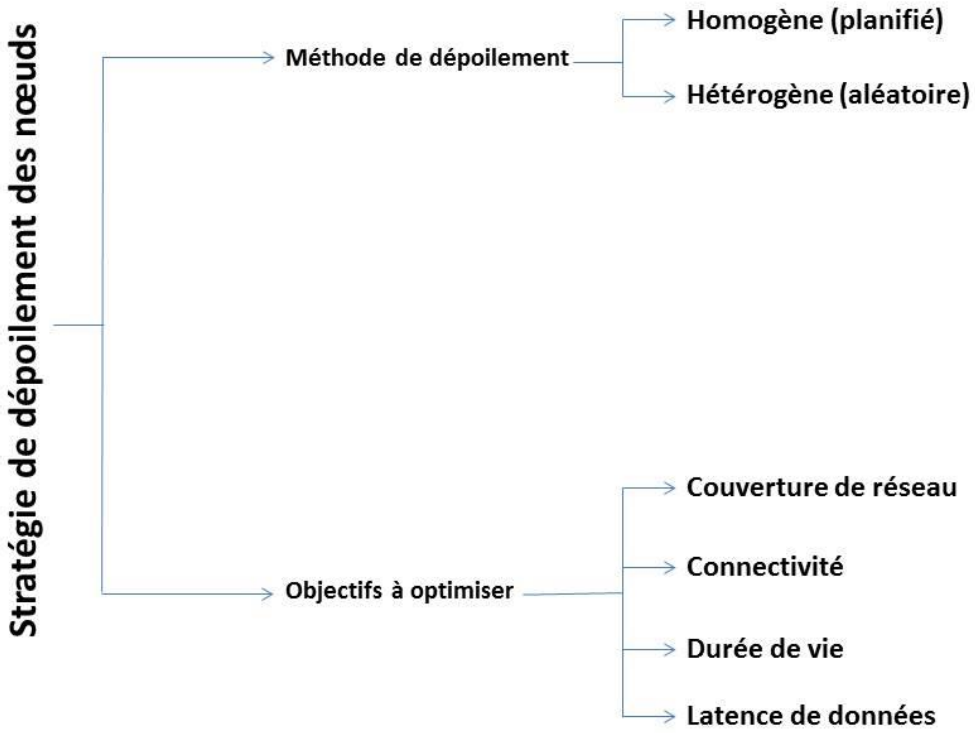


Figure III. 6. Stratégie de déploiement des nœuds

III.3.1. Types de déploiements dans les RCSF

III.3.1.1. Déploiement déterministe

Dans le cas une zone de déploiement accessible et non hostile [76], on peut placer les capteurs manuellement dans des points fixes; cela implique que les positions (coordonnes) des capteurs sont connues d'avance.

III.3.1.2 Déploiement aléatoire

Dans le cas contraire, une zone hostile par exemple un champ de bataille, on ne peut pas déployer les capteurs de manière déterministe donc on utilise d'autre procédure comme

déployer les capteurs de manière aléatoire [77], par avion par exemple; ce qui implique la non connaissance des positions des capteurs à priori.

III.3.1.3. Comparaison entre les types de déploiement

Une comparaison entre les deux types de déploiement de réseau de capteur dans le tableau (Tableau III.1.) Cette comparaison montre les différentes caractéristiques de déploiement des capteurs.

Tableau III.1. Comparaison entre les types de déploiement.

Déploiement	Coût	Temps	Localisation	Zone
Hétérogène	+	-	+	Non accessible
Homogène	-	+	-	Accessible

III.3.2.Topologies pour les RCSF

Le déploiement de nœud est l'un des problèmes fondamentaux des réseaux de capteurs. Un déploiement efficace des nœuds de capteurs dans un environnement hautement dynamique et hostile réduira le problème de couverture et la connectivité dans les réseaux de capteurs. La durée de vie d'un réseau dépend fortement de l'organisation des nœuds qui, à son tour, affecte la consommation d'énergie dans les RCSF. Diverses architectures et stratégies de déploiement de nœud ont été développées pour le réseau de capteurs sans fil, selon l'exigence d'application, j'ai concentré sur cinq schémas de déploiement pour les environnements de réseaux de capteurs, le déploiement aléatoire, le déploiement de grille, le déploiement en groupe et le déploiement du groupe de grille.

III.3.2.1. Déploiement aléatoire

Le déploiement aléatoire signifie que les positions des nœuds de capteurs sans fil est réalisé de manière aléatoire et indépendante dans la zone ciblée. D'autre part, dans un déploiement précis, les nœuds sont définis en positions exactes un par un selon la plage de communication des nœuds. Habituellement, les positions sont choisies pour minimiser le nombre de nœuds

requis pour atteindre l'objectif de déploiement. Cependant, une méthode de déploiement précise prend du temps même si elle coute le moins de nombre de nœuds. La méthode de déploiement aléatoire est rapide dans la pratique, mais elle demande un nombre relativement plus important de nœuds pour atteindre le même objectif de déploiement.

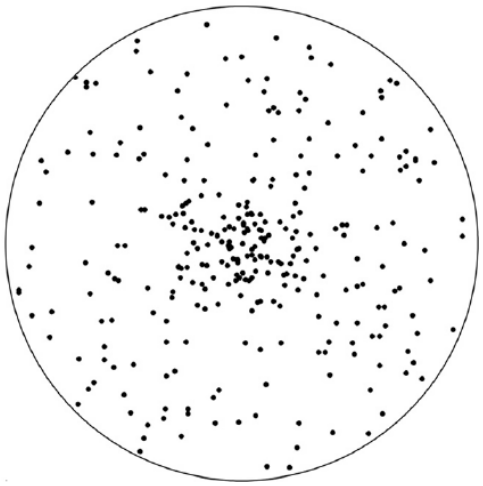


Figure III. 7. Déploiement aléatoire

Dans le déploiement aléatoire, chacun des n capteurs a une probabilité égale d'être placée en tout point à l'intérieur d'un domaine donné (Figure III.7). Par conséquent, les nœuds sont dispersés sur des sites qui ne sont pas connus avec certitude. Par exemple, un tel déploiement peut résulter de lancer des nœuds de capteurs à partir d'un air plain. En général, un déploiement aléatoire est supposé être facile, ainsi que rentable, ce qui explique pourquoi les applications de RCSF préfèrent souvent le déploiement de nœud aléatoire [78]

III.3.2.2. Déploiement d'une topologie circulaire

Dans cette topologie, il y a une zone de détection circulaire et que la zone de détection dispose d'un sink. Les nœuds de capteurs détectent la manifestation d'intérêt et de transmettre ces données à l'évier sink. Les nœuds sont déployés de manière aléatoire avec une densité uniforme tout autour de l'évier comme indiqué (Figure III.8.). Selon la distance d'un nœud de l'évier et la portée de transmission des nœuds, les données doivent traverser sauts simples ou multiples avant d'être reçu par le sink. La topologie web circulaire est facile à établir, facile à entretenir, et plus efficace [79].

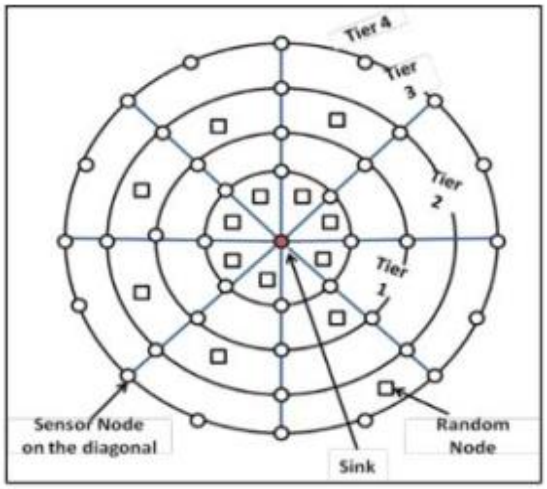


Figure III. 8. Déploiement d'une topologie circulaire

II.3.2.3. Déploiement square

Dans un déploiement carré, les capteurs sont placés à chaque coin du carré. La zone couverte par le réseau composé de N nœuds est donnée par $2ND^2$, où D est le rayon du cercle extérieur **[80]**

Le square déploiement est considéré comme un bon déploiement dans WSN, en particulier pour la performance de la couverture.

Dans une architecture réseau où les puits sont placés sur une grille carrée, une couverture de 100% peut être obtenue si la distance inter-puits est d <= 2r où r est le rayon d'un cluster

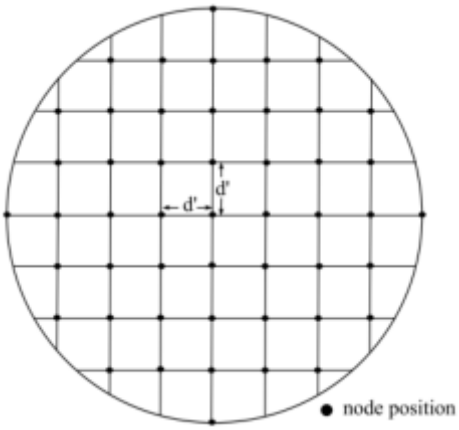


Figure III. 9. Déploiement square

II.3.2.4.Déploiement hexagonale

Un hexagone est une collection de six triangles équilatéraux, (Figure III.11) Chaque hexagone comporte 6 coins où un capteur est déployé. La superficie totale couverte par les nœuds N est donnée par $\frac{3}{4}\sqrt{3}ND^2$

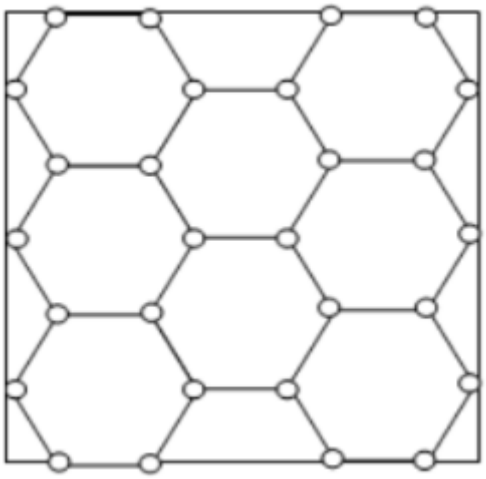


Figure III. 10. Déploiement hexagonale

III.3.2.5.Star topologie déploiement (topologie en étoile)

Les réseaux de Star sont connectés à un concentrateur de communication centralisé (sink) et les nœuds ne peuvent pas communiquer directement entre eux. L'ensemble de la communication doit être acheminé à travers le moyeu centralisé. Chaque nœud est alors un «client» tandis que le moyeu central est le "serveur ou un sink" (Figure III.11).

La topologie en étoile est un système uni-saut. Tous les nœuds envoient et reçoivent seulement des données avec la station de base. Cette topologie est simple et elle demande une faible consommation d'énergie, mais la station de base est vulnérable et la distance entre les nœuds et la station est limitée.

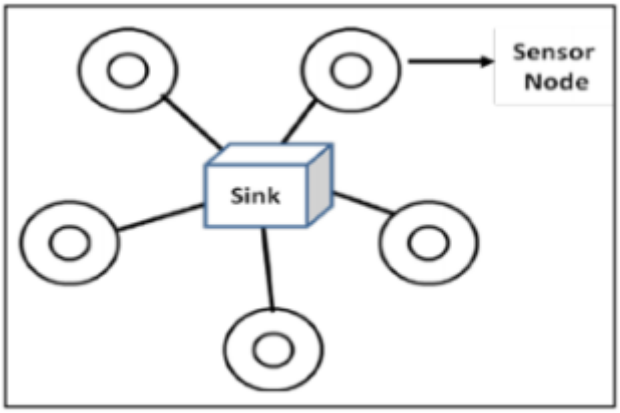


Figure III. 11.Topologie en étoile

III.3.3. Travaux existant

Le placement de capteurs est une discipline à part entière et de nombreux travaux de recherches ont été proposés dans ce domaine [83] [82] [81]. L'objectif principal de n'importe quelle stratégie est d'assurer que l'événement à contrôler soit à tout moment à la portée d'un capteur au minimum. Le choix d'une solution doit donc prendre en compte le type de capteurs à placer, l'environnement de déploiement et la finalité de l'application implémentée. Un placement adéquat permet donc d'optimiser les performances de celle-ci.

Plusieurs classifications existent : dans [82] les stratégies de déploiements sont classées en fonction de l'objectif de l'application (couverture, connectivité, topologie, durée de vie du réseau, etc), dans [83] c'est plutôt en fonction des caractéristiques de mobilité du réseau (statique et dynamique) , enfin , dans [81] les auteurs s'intéressent tout particulièrement aux capteurs à champs de capture directionnels et se focalisent sur les caractéristiques liées à ce dernier.

Lors de la conception d'une stratégie de déploiement, l'idéal est de satisfaire toutes les conditions suivantes :

- Déployer le nombre optimal de capteurs ;
- Eviter les chevauchements et donc la redondance de données ;
- Eviter les obstacles et tout type d'occlusions.

De nombreuses solutions existent pour le déploiement des capteurs à champs de capture omnidirectionnels [85] [84], elles ont pour objectif d'augmenter la couverture d'une zone d'intérêt en y arrangeant les cercles représentant ces champs. Dans [85], le problème de couverture est considéré comme un problème décisionnel. En effet, pour les applications à fortes contraintes comme la surveillance militaire, chaque surface de la zone d'intérêt doit être couverte par au moins k-capteurs, la valeur de k étant fixée en fonction de l'application. L'idée la plus simple est de considérer chaque surface comme étant le champ de capture d'un capteur, ensuite de comptabiliser le nombre d'intersections avec les champs d'autres capteurs. Dans ce cas, le nombre k correspondrait au nombre d'intersections.

Dans [86] le problème connu sous le nom du problème de la galerie d'art est traité. Dans cette solution l'objectif est d'obtenir le nombre d'observateurs nécessaire afin que chaque point d'une salle d'exposition soit surveillé par au moins l'un d'entre eux. Cette solution a trouvé de nombreuses applications dans des domaines différents tels que le placement d'antennes dans les réseaux cellulaires ou plus généralement le déploiement des réseaux de capteurs sans fil. Une autre approche utilisée lorsque la topologie de l'environnent est connue en avance consiste à placer les capteurs en fonction des zones à fortes fréquentations. Si on prend comme contexte applicatif le suivi de cible, le graphe de déplacement de celle-ci est réalisé à l'aide d'outils tel que le diagramme de Voronoi [87].

III.4. Conclusion

La durée de vie d'un RCSF est étroitement liée à la vie nodale. Cette dernière dépend fortement de la consommation d'énergie du nœud capteur. Dans ce dernier, l'énergie est consommée en assurant les fonctions suivantes : la capture, le calcul (traitement) et la communication. La communication représente une grande portion de l'énergie totale consommée. Dans ce chapitre, nous avons vu les définitions de la durée de vie de RCSF en termes de nombre des nœuds morts/vivants et en termes de connectivité/couverture, la couverture, la connectivité et nous avons présenté le dépoilement dans les RCSF et quelque topologie de dépoilement.

Plusieurs solutions protocolaires proposées partent de l'idée que l'énergie dépensées par la radio en phase de communication est plus élevée que celle due à l'échantillonnage ou au traitement de données. on a vu aussi qu'il y plusieurs travaux portés sur l'étude de l'effet des conditions météorologiques telles que la pluie, la neige, le vent, l'humidité et de la température sur la performance de communication sans fil, et comment adapter le fonctionnement du RCSF sur l'effet de ces conditions, et pour que la température est l'un de ces conditions la plus défavorable qu'affecte le fonctionnement du RCSF, on va voir dans le chapitre suivant la conception qui permettre aux RCSF de s'adapter aux variations de la température pour assurer que le réseau continue à fonctionner correctement avec moins consommation d'énergie.

Chapitre IV : Conception

IV.1. Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil utilisent des émetteurs-récepteurs de faible puissance pour permettre aux nœuds de communiquer à faible coût énergétique. Ces émetteurs-récepteurs sont sensibles aux variations de la température qui affectent à la fois leurs capacités de transmission et de réception. Dans ce chapitre, on va exploiter l'effet de la température sur les réseaux et on va voir comment économiser plus d'énergie en permettant aux nœuds qui ne sont pas au bon fonctionnement du réseau de passer en mode veille prolongée (hibernate mode) lorsque la température baisse et reprendre leur fonctionnement normal lorsque la température augmente. Nous supposons que le réseau continue à fonctionner correctement la couverture complète et la connectivité sont garanties. Une couverture complète est atteinte si toute la zone du déploiement est entièrement couverte de sorte qu'aucun événement ne sera raté, et un réseau connecté signifie qu'il y a un chemin vers n'importe quel nœud dans le réseau afin de détecter les données qui peuvent être signalées à n'importe quel nœud du réseau.

IV.2. Liens radio

La qualité de la liaison de communication sans fil entre deux nœuds émetteur-récepteur, est habituellement exprimée par le **PER** le taux d'erreur des paquets (Packet Error Rate). Le **PER** dépend principalement de l'intensité du signal mesuré au niveau du récepteur. L'intensité minimale de ce signal nécessaire pour atteindre un **PER** de moins de 1 % est appelée sensibilité. On suppose qu'il existe un lien si la puissance reçue $\boldsymbol{P_r}$ est égale à ou supérieure de la sensibilité $\boldsymbol{P_s}$. L'intensité de ce signal dépend de la puissance d'émission $\boldsymbol{P_t}$ rayonnée par l'émetteur et son atténuation au long du canal de communication. L'atténuation **A(d)** sur la distance d est le rapport entre $\boldsymbol{P_t}$ et $\boldsymbol{P_r(d)}$, où $\boldsymbol{P_r(d)}$ est la puissance du signal reçu par l'émetteur à la distance d. Lorsque $\boldsymbol{P_t}$ et $\boldsymbol{P_r(d)}$ sont exprimés en dBm, l'atténuation en dB [88] est :

$$\mathbf{A\ (d)} = \boldsymbol{P_t - P_r(d)} \qquad \textbf{(IV.1)}$$

L'atténuation comporte de trois composantes : $\boldsymbol{A_0}$, $\boldsymbol{A_1(d)}$et $\boldsymbol{A_2}$ de sorte que

$$\mathbf{A(d) = } \boldsymbol{A_0} + \boldsymbol{A_1(d)} + \boldsymbol{A_2} \qquad \textbf{(IV.2)}$$

Où,

- $\boldsymbol{A_0}$ est la perte de trajet à la référence de distance d_0, qui peut être obtenue par expérimentation, ou selon le modèle de propagation en espace libre,
- $\boldsymbol{A_1(d)}$ est la perte de trajet log-distance en fonction de distance d et la référence de la distance d_o
- $\boldsymbol{A_2}$est un variable aléatoire reflétant l'atténuation provoquée par fading.

$\boldsymbol{A_0}$, $\boldsymbol{A_0}$, et $\boldsymbol{A_2}$ sont exprimées en dB. En prenant A_0en fonction du modèle de propagation en espace libre, nous obtenons

$$\boldsymbol{A_0 = 20\ \log d_0 + 20 \log f - 27.55} \qquad \textbf{(IV.3)}$$

$$\boldsymbol{A_1(d) = \alpha 10 \log \left({}^{d}/_{d_0} \right)} \qquad \textbf{(IV.4)}$$

$$\boldsymbol{A_2 = \sim N(0, \sigma)} \qquad \textbf{(IV.5)}$$

Où,

– $\boldsymbol{f}$ est la fréquence (en MHz).

– $\boldsymbol{\alpha}$ est l'exposant de perte de chemin d'accès.

– $\boldsymbol{N(0, \sigma)}$est une variable aléatoire normale (en dB).

– $\boldsymbol{d_0}$est la distance de référence égale à 1 mètre.

IV.3. Rayon de communication

Nous définissons la portée de communication que la distance à laquelle moins de 1 % des paquets sont perdus (c-à-d correspondant à moins de 1 % PER). Le PER dépend de la puissance du signal reçu appeléeP_r. La puissance minimale qui permet d'atteindre 1% de PER est appelée sensibilitéP_s. La portée de communication est une variable aléatoire R avec la fonction de distribution cumulée FR(d) est définie [88] :

$$\boldsymbol{F_r(d) = P_r[R \geq d] = P_r[P_r(d) \geq P_s]}$$

$$\boldsymbol{= P_r[P_t - P_r(d) \leq P_t - P_s] = P_r[A(d) \leq P_t - P_s]} \qquad \textbf{(IV.6)}$$

On remplace A(d) par sa valeur eq **(IV.2)** ,on obtient :

$$\boldsymbol{F_r(d) = P_r[A_2 \leq P_t - P_s - A_0 - A_1(d)]} \qquad \textbf{(IV.7)}$$

A_2 est une variable aléatoire normale, nous avons :

$$\boldsymbol{P_r[A_2 \leq P_t - P_s - A_0 - A_1(d)]} \qquad \textbf{(IV.8)}$$

Où F_{A_2} est une fonction de distribution cumulée (CDF) de la variable aléatoireA_2, tel que $\boldsymbol{A_2 \sim N(0,\sigma)}$, on a :

$$\boldsymbol{F_{A_2}(P_t - P_s - A_0 - A_1(d)) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} erf\left(\frac{P_t - P_s - A_0 - A_1(d)}{\sigma\sqrt{2}}\right)} \qquad \textbf{(IV.9)}$$

Où $\boldsymbol{erf}$ est la fonction d'erreur définie comme suit :

$$\boldsymbol{erf = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt} \qquad \textbf{(IV.10)}$$

En utilisant les équations **IV.7**, **IV.8** et **IV.9**, on trouve :

$$\boldsymbol{F_{A_d} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} erf\left(\frac{P_t - P_s - A_0 - A_1(d)}{\sigma\sqrt{2}}\right)} \qquad \textbf{(IV.11)}$$

On note que, **IV.9** et **IV.11** ne sont pas valable que lorsque σ≠0, tel que lorsque σ = 0, A_2 devient égale à 0, Par conséquent, l'expression de $F_r(d)$ devrait être calculé à partir de **IV.7**. Ainsi, nous avons

$$\boldsymbol{F_r(d)_{\sigma=0} = P_r[0 \leq P_t - P_s - A_0 - A_1(d)]}$$

$$= \boldsymbol{P_r[A_1(d) \le P_t - P_s - A_0]} \quad \textbf{(IV.12)}$$

En remplaçant$A_1(d)$ avec sa valeur de **IV.5** et en prenant $d_0 = 1$, l'équation **IV.12** devient :

$$\boldsymbol{F_r(d)_{\sigma=0} = Pr\ \left[10\alpha \log\left({}^{d}/_{d_0}\right) \le P_t - P_s - A_0\right]}$$

$$\boldsymbol{= Pr\left[d \le 10^{P_t - P_s - A_0\ /10\alpha}\right]}$$

$$\boldsymbol{= \begin{cases} 1 & if\ \ d \le 10^{P_t - P_s - A_0\ /10\alpha} \\ 0 & elsewhere \end{cases}} \quad \textbf{(IV.13)}$$

En mettant,

$$\boldsymbol{R = 10^{{P_t - P_s - A_0}/{10\alpha}}} \quad \textbf{(IV.14)}$$

Et combiner **IV.9** avec **IV.13** nous obtenons

$$F_r(d) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\, er\, f\left(\frac{P_t - P_s - A_0 - A_1(d)}{\sigma\sqrt{2}}\right) & if\ \sigma < 0 \\ 1_{(-\infty,\mathrm{R}]}(d) & if\ \sigma = 0 \end{cases} \quad \textbf{(IV.15)}$$

Où $1_{(-\infty,R]}(d)$ est la fonction indicatrice, qui est égale à 1 quand d $R \lesssim d$R et 0 ailleurs. Notez que R représente le rayon de communication en l'absence de fading (c-à-d,quand σ= 0).

Notez que les dérivations antérieures s'appliquent également au modèle de two-ray-ground qui peut être plus approprié pour les environnements extérieurs. Les résultats du modèle de two-ray-ground peuvent être calculés en tenant $A_1(d) = \alpha 10 \log(\beta)$, α=4 , σ=0.

Où

– G_t(resp. G_r) est le gain de l'antenne à l'émetteur (resp. récepteur).

– H_t(resp. H_r) est la hauteur de l'antenne à la émetteur (resp. récepteur).

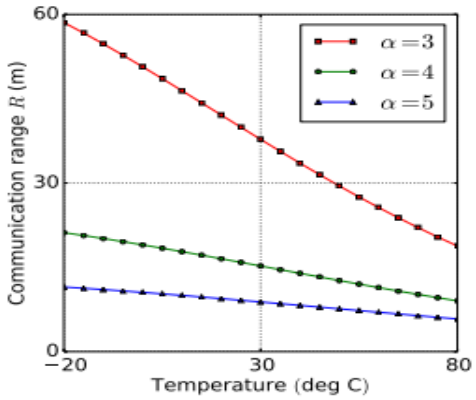


Figure IV. 1.Rayon de communication sous la variation de température

IV.4. Effet de la température sur la puissance de communication

Bannister et al [53] ont montré que les températures élevées affectent négativement la communication entre les nœuds capteurs. Dans des résultats de recherche indépendante (voir chapitre 2) et des données tirées des feuilles d'émetteurs/récepteurs de radio populaires tels que CC2400 [89], CC2530 [90] montrent que la température affecte à la fois la qualité de la transmission et de la réception.

L'effet de la température sur la puissance de transmission et la sensibilité de réception est étudié dans la littérature et la documentation des fiches techniques (data sheets), où on trouve que les valeurs du $P_s$et P_t varie avec la température T. Par conséquent, la valeur réelle de R dépend également à la température. L'impact de la température sur P_s et P_t dépend de l'émetteur/récepteur utilisé et est généralement fourni dans la fiche de donnée de l'émetteur/récepteur (data sheet).

Nous utilisons la notation $P_t(T_t)$ (resp. $P_r(T_r)$) pour d'écrire la puissance de transmission (resp. la sensibilité de réception) en fonction de la température $T_t(T_r)$ mesurée à l'émetteur (resp. récepteur). et pour simplifier on suppose que la température mesurée à l'émetteur et le récepteur est le même T, par l'utilisation une approximation linéaire pour interpoler les données de Data Sheet et quantifier la perte de puissance au niveau de l'émetteur et le récepteur (en dBm). On a obtenu les équations suivantes par interpolation de dégrée égal à 2 :

$$P_t(\mathrm{T}) = -0{,}0001.T^2 - 0{,}0676.\mathrm{T} + 1{,}6112 \ (\mathrm{dBm}) \qquad \text{(IV.16)}$$

$$P_s(\mathrm{T}) = 0{,}0005.\ T^2 + 0{,}0407.\mathrm{T} - 89{,}547 \ (\mathrm{dBm}) \qquad \text{(IV.17)}$$

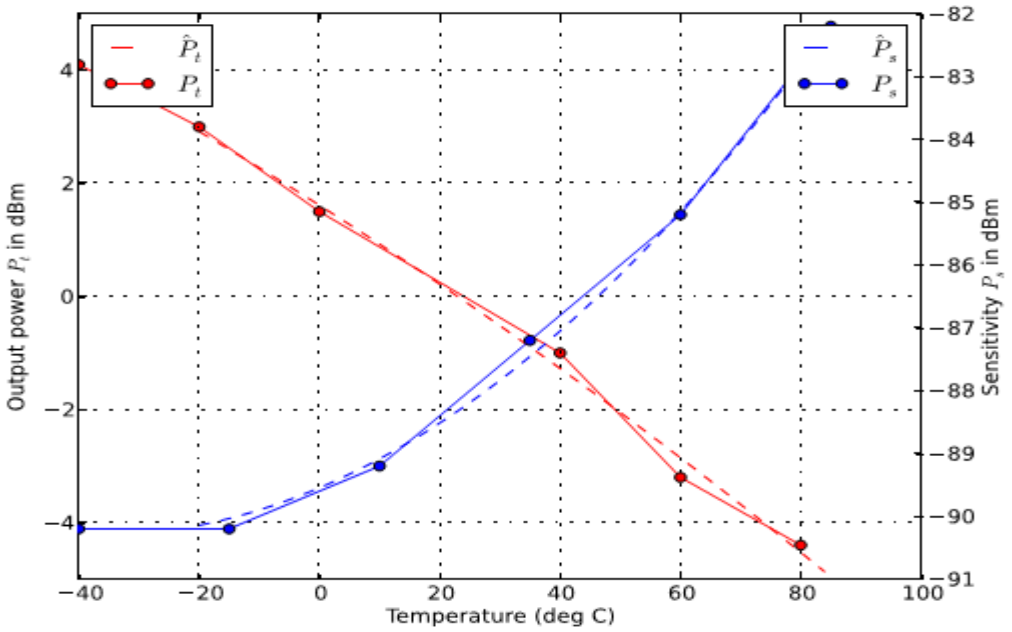


Figure IV. 2. L'effet de la température sur la puissance de transmission P_t et la sensibilité de réception P_s en CC2400. Les chiffres ont été généré par extrapolation à partir des valeurs de températures typiques fournies dans Data Sheet. [88]

IV.5. Variation de température en fonction de temps

Nous nous référons au modèle ERBS [91] comme décrivé dans [92]. Où la variation de la température diurne moyenne normalisée est représentée comme suit :

$$\begin{aligned}\tau(Y,m,t) = \tau(Y,m) \\ + A_\tau(Y.m)[0.4632\cos(r(t) - 3.805) \\ + 0.0984\cos(2\gamma(t) - 0.360) \\ + 0.0168\cos(3\gamma(t) - 0.822) \\ + 0.0138\cos(4\gamma(t) - 3.513).]\end{aligned}$$

Où,

– γ(t) = 2π(t − 1)/24, t est le temps en heures.

– τ(Y,m) est la température mensuelle de l'air.

– A_τ (Y,m) est l'amplitude thermique mensuelle en degrés Celsius [92]

Pour τ(Y,m) = A_τ (Y,m) = 25˚C , la figure IV.3 au-dessous montre la variation de température tout au long de la journée (temps en heures).

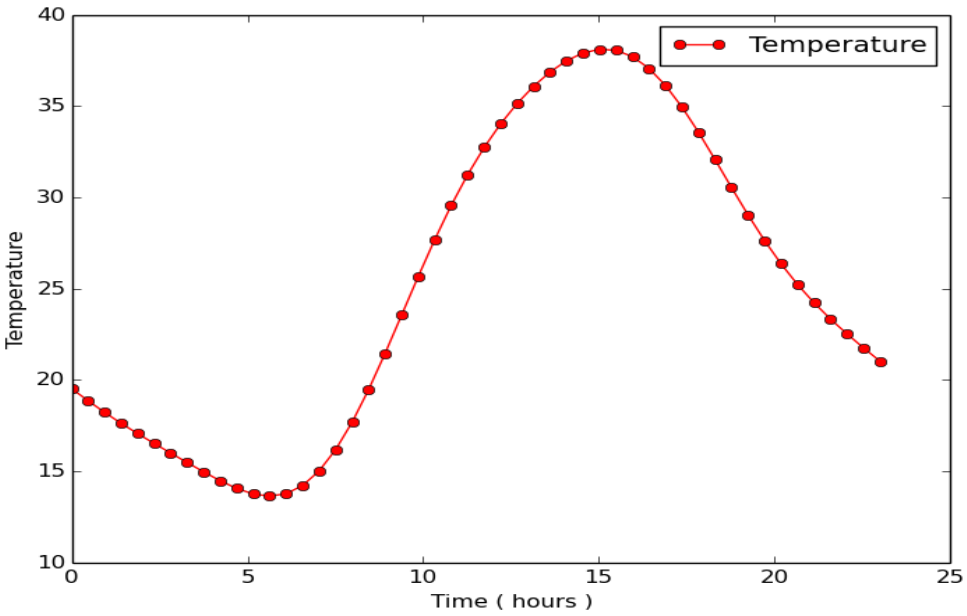


Figure IV. 3. La variation de la Température en 24 heures

IV.6. Connectivité des réseaux

Comme vu dans le chapitre III la connectivité d'un réseau s'exprime de la façon suivante :

$$\mu(R) = \frac{N.\pi.R^2}{A}$$

Où :

- **R** est le rayon de transmission d'un nœud
- **A** l'aire de calcul
- **N** le nombre de nœuds situé dans l'aire A

IV.7. Dépoilement du RCSF

Le défi de RCSF c'est la durée de vie, et celle-ci est liée à la consommation globale d'énergie par ses nœuds. Par conséquence, comme première solution on doit choisir un déploiement de RCSF qui minimise la consommation pour maximiser la durée de vie de RCSF.

Dans la littérature sur les déploiements des réseaux sans fils, dans [93] et [94] les chercheurs ont décrit que le déploiement aléatoire une stratégie de déploiement largement utilisée qui est utilisée dans les systèmes sensoriels. Mais cela peut conduire au problème des trous énergétiques dans le réseau, Les capteurs déployés dans un déploiement aléatoire ont une probabilité égale d'être placés à n'importe quel emplacement donné dans le champ du capteur. En cas de déploiement aléatoire des nœuds, ils sont dispersés de l'air. Ainsi, les nœuds sont viables pour être placés dans des endroits incertains. La densité du nœud en cas de déploiement aléatoire de nœuds capteurs n'est même pas dans le réseau. Cette stratégie est parfois considérée comme rentable, mais seulement si elle fournit une couverture souhaitée, bien sûr très rare en raison de la densité inégale des nœuds capteurs. Ce modèle trouve une application dans des endroits qui sont souvent inaccessibles et ont des conditions environnementales difficiles. On prend une température max Tmax = 50˚C selon le modèle de ERBS [91], et on choisit une zone de déploiement de largeur et longueur égale à 100m (AreaWidth = AreaLength = 100m).

Algorithme 1.déploiement aléatoire

```
Data AreaWidth , AreaLenght ;
                /* Définir le nombre de nœuds a déployé*/
1   NbrNoeuds ← 50 ;
                /*Area couvrage pour obtenir la couverture de zone*/
2   AreaCouvrage←false
3   K←0 ;
4   While Not AreaCouvrage Do
5       for (k=0 ; k ≤ NbrNode-1 ; k++)  Do
9           AddNode ((rand()/RAND_MAX * AreaWidth ) , rand()/RAND_MAX *
            AreaLenght)
10      End
20      AreaCouvrage←True;
23  End
```

IV.8. Techniques de conservation d'énergie sous l'effet de la Température

La puissance moyenne consommée augmente lorsque la température diminue. Cela est dû à l'augmentation de la portée de transmission causée par la diminution de la température, ce qui rend chaque nœud dépenser plus d'énergie pour recevoir plusieurs paquets, puis que chaque nœud aura un grand nombre des voisins, plus de connectivités.

On propose des algorithmes entièrement distribuées conçus pour fonctionner correctement dans des conditions extrêmes où la température est au niveau maximum et adapter le mode de fonctionnement lorsque la température diminue ou augmente de sorte que seule une petite quantité d'énergie est consommée :

1. Celui qui fonctionne en mettant nœuds en mode veille prolongée (StopOperate).

2. Un autre qui réduit la puissance de transmission des nœuds (PowerControl).

3. L'altérnation entre les deux techniques (StopOperate / PowerContol), à chaque fois on va choisir la stratégie qui est la meilleur en termes d'économie d'énergie.

Tous les algorithmes proposés peuvent être considéré comme des algorithmes de contrôle de topologie car ils fonctionnent par la modification de la topologie, cependant, ils sont fondamentalement diffèrent des algorithmes traditionnels par leur minimum surcharge qui consiste à mesurer la température de temps au temps pour prendre des décisions.

VI.8.1. Stop Operate

Dans cette approche une proportion des nœuds continue à fonctionner normalement et les restes doivent être mise en mode veille prolongée pour économiser l'énergie lorsque la température baisse, et reprendre leur fonctionnement normal lorsque la température augmente.

La sélection de ces nœuds qui doivent être mis en mode veille prolongée doit être faites comme suit tel que : Pour chaque itération de l'algorithme [2] les nœuds doivent changer leurs positions et continuent à fonctionner normalement si cette position ne dépasse pas la zone de couverture, sinon ils doivent être mis en veille prolongée pour économiser l'énergie comme montre la Figure IV.4 au-dessous.

- CoefX (resp. y) : coefficient pour la migration sur l'axe x (resp. y).

– AreaWith (res. AreaLength) : Largeur (res. Longueur) de la zone de déploiement.

Algorithme 2. Stop Operate (éxecuter par les noeuds)

```
Data Temperature AreaWidth , AreaLenght ;
        /* Obtentir le nouveau rayon de communication NewR*/
1   NewR← CommunicationRange(Temperature) ;
    /* Calculer la différence entre le nouveau et ancien rayon R*/
2   DiffR←NewR-OldeR
            /*Calculer les nouvelles coordonnées sur plan (x,y)*/
3   Node.GetPosition();
4   X←Node.X + Node.CoefX × DiffR ;
5   Y←Node.Y + Node.CoefY × DiffR
6       If (x ≤AreaWidth AND Y ≤AreaLenght) Then
            /* Déplacer selon ses coefficients sur l'axe x et y et continue à
            fonctionner normalement*/
7           Node.SetPosition (x,y);
8       Else
            /* Mise en veille prolongée*/
9           Node.SetRadio(off);
10      End
```

L'algorithme [2] il est totalement distribué, tel que chaque nœud s'exécute sans échanger aucun d'information avec ses voisins, et pour chaque période il doit mesurer la température et prendre des décisions sur place.

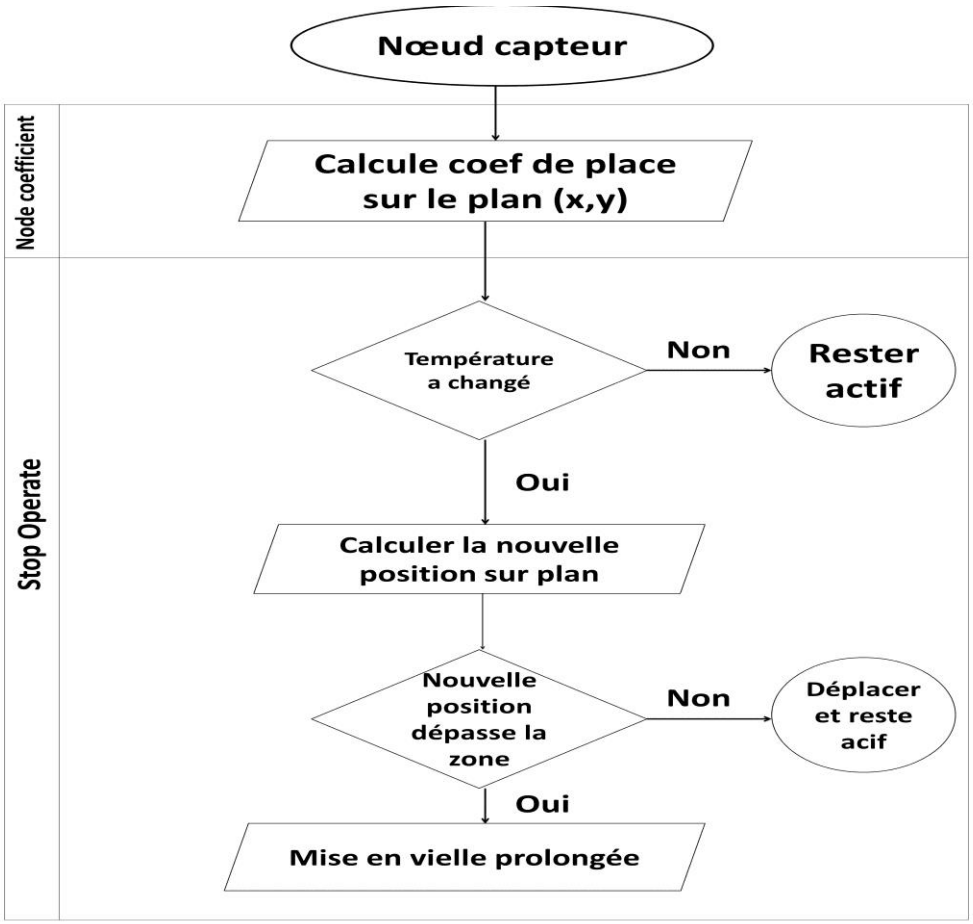


Figure IV. 4. Organigramme Stop Operate

VI.8.2. Power Contol

Dans cette approche les nœuds doivent utiliser la puissance de transmission la plus faible qui garantir le bon fonctionnement de réseau quand la température varie. Tel que lorsque la température diminue, la qualité de la liaison sans fil s'améliore et une puissance de transmission plus faible peut être utilisée pour économiser l'énergie tout en préservant le bon fonctionnement du réseau.

Dans le contexte de l'économie d'énergie, en utilisant la puissance de transmission plus faible peut réduire la consommation d'énergie globale du réseau. Trouver la puissance de transmission optimale, c'est-à-dire trouvé le courant d'entrée optimale, dépend de savoir si le modèle de consommation énergétique du protocole MAC est connu ou non. Quant on ne

connait pas le modèle, nous utilisons l'heuristique suivante: le plus petit I qui maintient le bon fonctionnement du réseau atteindra la consommation d'énergie la plus faible

L'idée de PowerControl est d'utiliser la puissance de transmission la plus faible qui donne 3-connectivités par un nœud. En utilisant une approximation linéaire pour interpoler les données de Data Sheet, on a obtenu l'équation **III.22** qui donne I en fonction du rayon de communication R :

$$\mathbf{I = 0{,}0003 \times R + 0{,}0126} \qquad \mathbf{(III.22)}$$

Chaque nœud peut donc utiliser le courant optimal I^*en transmission, où I^*est le courant qui donne la puissance de transmission optimale$P_\tau(I^*)$. C-à-d, le courant qui donne R $=d_{3connectivity}$, Où $d_{3connectivity}$ est la distance minimale qui donne 3 voisins au maximum.

Algorithme 4.Power-Control (Executer par chaque noeuds)

```
/*Prendre la distance minimale qui donne 3 voisin au maximum */
1  I* = 0.0003 × d_3connectivity + 0.0126;
   /*Utiliser I* en transmission*/
2  Node.SetCurrent(I*);
```

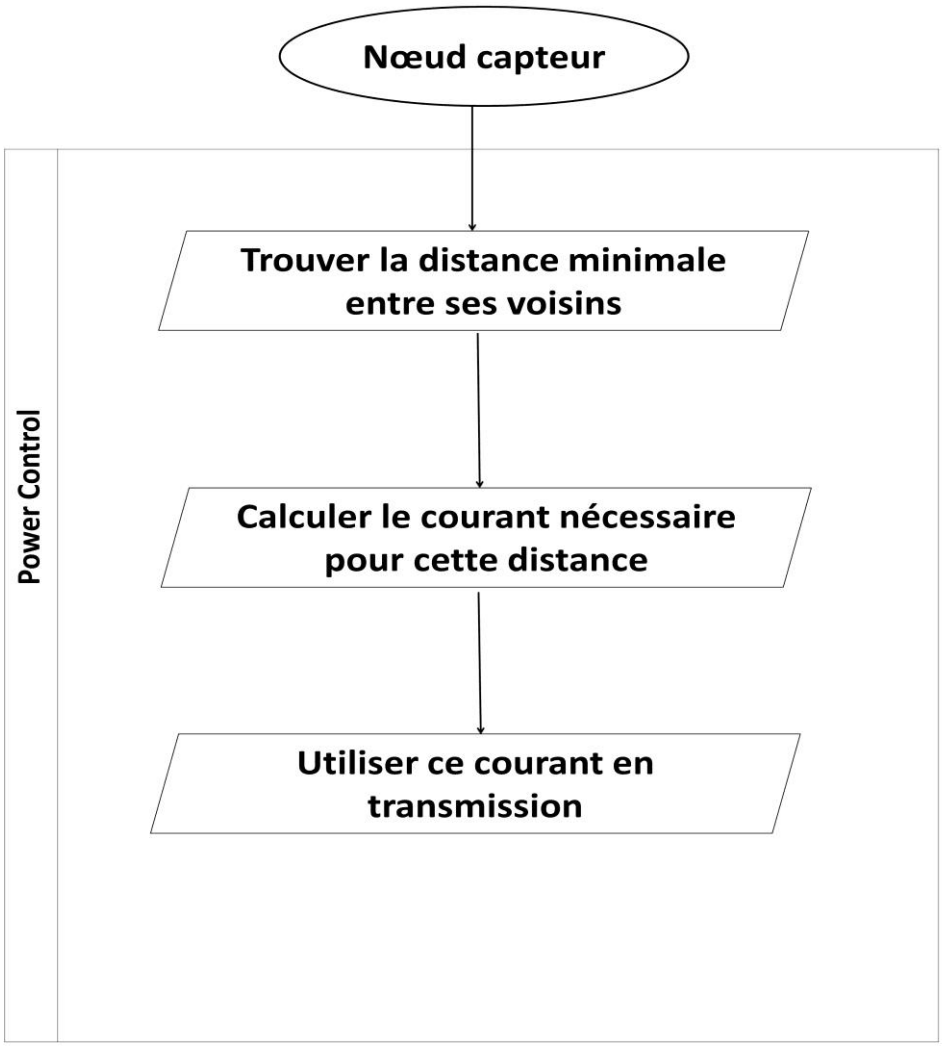


Figure IV. 5. Organigramme Power Control

VI.8.3. StopOperate et PowerControl

Cette technique est la combinaison de deux algorithmes [Stop-Operate] et [Power-Control], À chaque fois l'algorithme choisit la solution qui est la meilleure en termes d'économie d'énergie.

Algorithme 5. SOPC(Execution par chaque noeuds)	
$/*SO_{EnergieConsumpion}$ l'énergie consommée si le nœud utilise SO*/	
$/*PC_{EnergieConsumpion}$ l'énergie consommée si le nœud utilise PC */	
1	**If** $SO_{EnergieConsumpion} \leq PC_{EnergieConsumpion}$ **Then**
2	StopOperate();
3	**Else**
4	PowerControl();
5	**End**

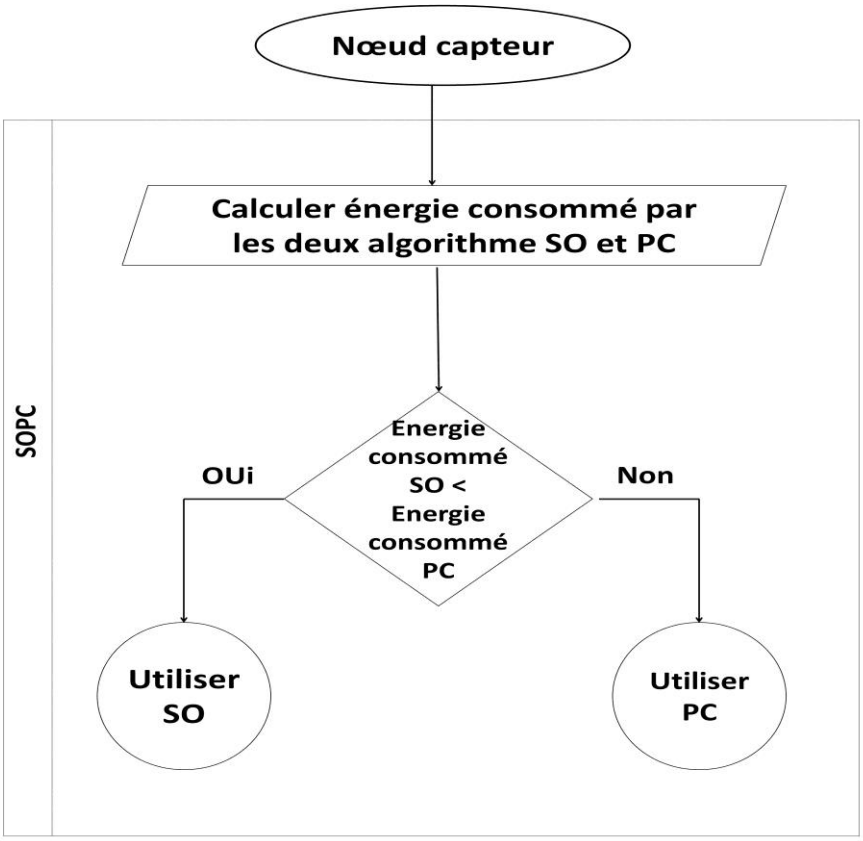


Figure IV. 6. Organigramme de combinaison entre StopOperate et power control

IV.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu l'effet de la température sur les liaisons de communication sans fil, la puissance de transmission, et la sensibilité de réception, et nous avons défini le rayon de communication, et après on a présenté les approches proposées pour minimiser la consommation d'énergie du RCSF et on a vu comment ces approches prennent en considération la connectivité et la couverture de RCSF dans leurs fonctionnement.

Dans le prochain chapitre on va simuler et évaluer nos approches SO, PC, et SOPC sur le protocole SMAC.

Chapitre V : Implémentation et Expérimentation

V.1. Introduction

Les réseaux informatique connaissent une expansion importante grâce à plusieurs moyens qui ont pu se développer au cours du temps, donc il est couteux de déployer un banc d'essai complet contenant plusieurs ordinateurs, des routeurs et des liaisons de données pour valider et vérifier un protocole de réseau ou un certain algorithme spécifique. C'est pour cela que les simulateurs de réseaux sont utilisés. Les simulateurs du réseau offrent beaucoup d'économie, de temps et d'argent pour l'accomplissement des tâches de simulation et sont également utilisés pour que les concepteurs des réseaux puissent tester les nouveaux protocoles ou modifier les protocoles déjà existants d'une manière contrôlée et productrice. La simulation des réseaux permettent d'imiter les communications du monde réel, permettant ainsi un développeur de découvrir les limites potentielles, problèmes, détecter des erreurs et les corrigez.

V.2. Environnement de travail

V.2.1. Choix de simulateur

Il existe plusieurs simulateurs pour simuler des RCSF. NS-2 et NS-3 semblent être les plus populaires pour simuler les protocoles de communication sans fil. Étant donné que NS-3 n'est pas rétro compatible avec NS-2, il fallait choisir un d'eux et bien que le nombre de modèles et codes d'apportées de NS-3 est limitée en comparaison de la NS-2, nous avons choisi NS-3 parce qu'il agit mieux que NS-2, dans de nombreux aspects comme expliqué ci-dessous :

1. NS-2, bi-langue (C + C++ / Tcl) rendre le système de débogage complexe, mais pour NS-3 tout est écrit en C++ ou Python (seule langue architecture est plus robuste dans long terme).

2. NS-3 est plus rapide en termes d'exécution par rapport à NS-2 (tout est préalablement compilé).

3. NS-3 plus performant que NS2 en termes de gestion de mémoire.

4. NS-3 dispose d'un mode d'émulation, qui permet l'intégration avec les réseaux réels

V.2.2. Présentation de simulateur NS-3

Le simulateur NS-3 vise à remplacer NS-2, écrit en C++, python et OTel (version orientée objet de Tel), pour tenter de remédier à ses limites (l'utilisation de multiples interfaces sur un nœud...). Il peut être utilisé sur les plateformes Linux/Unix, OS X (Mac) et Windows. Son développement a d'abord commencé en juillet 2006, et devait durer quatre ans, il est financé par les instituts comme l'université de Washington, Georgia Institue of Technologie et le Centre de l'ICSI pour la recherche sur Internet, la première version majeure publique et stable a été publié en juin 2008. Les développeurs de NS-3 ont décidé que l'architecture de simulation devait être remaniée complètement en partant du Zéro. Dans cette optique, l'expérience tirée de NS-2 doit être associé avec les progrès des langages de programmation et du génie logiciel. L'idée de la rétro compatibilité avec NS-2 a été abandonnée dès le départ. Cela libère NS-3 de contraintes héritées de NS-2 et permet la construction d'un simulateur qui est bien conçu depuis de début [95].

Règles de base

– Scripts en C++ ou Python (Plus de OTcl).

– Les nœuds représentent les entités (e.g. PC).

– L'application génère sa propre activité réseau (e.g. echo UDP).

– Le channel représente le canal (e.g. WIFI, PPP, Ethernet).

– Le Net Device représente la carte physique et son driver.

– Exemples disponible dans le dossier exemples.

V.2.3. Eclipse

Eclipse IDE est un environnement de développement intégré libre (le terme Eclipse désigne également le projet correspondant, lancé par IBM) extensible, universel et polyvalent, permettant potentiellement de créer des projets de développement mettant en œuvre n'importe quel langage de programmation [96]. Nous avons configuré l'environnement Eclipse avec le simulateur NS-3 sous le système lunix.

V.2.4. Présentation de l'animateur NetAnim

NetAnim est un animateur hors ligne basé sur Qt toolkit (API orientée objet développée en C++). Il anime actuellement la simulation à l'aide d'un fichier de trace XML recueillies lors de la simulation. Ce fichier de trace est généré par une interface d'animation inclus dans les versions actuelle de NS-3. La première version a été développée par George F Riley [97].

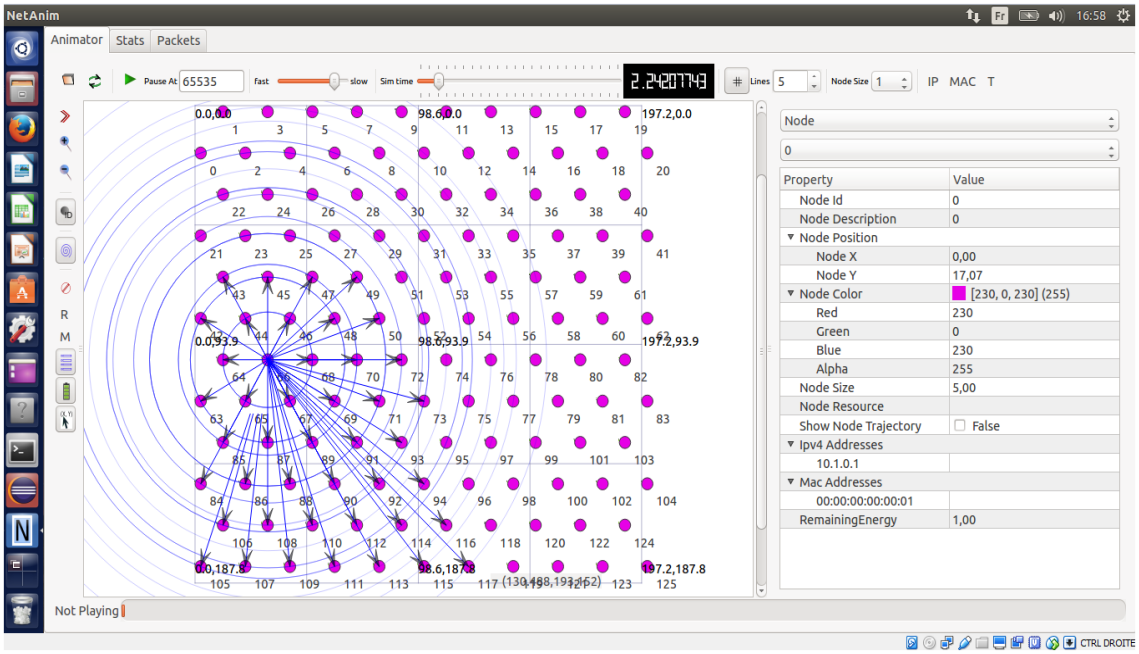


Figure V. 1. Interface de l'animateur NetAnim

V.3. Métriques d'évaluation

V.3.1. Puissance drainée à l'émetteur et le récepteur

La puissance P_{tx} drainée dans la transmission dépend du courant drainé I_{tx} pendant la transmission et le voltage V. Nous avons :

$$P_{tx} = I_{tx} \times V \qquad \textbf{(V.1)}$$

La puissance P_{rx} drainée dans la réception dépend du courant drainé I_{rx} pendant la réception et le voltage V. Nous avons :

$$P_{rx} = I_{rx} \times V \quad \textbf{(IV.2)}$$

V.3.2. Puissance globale drainée pour assurer une couverture complète de la zone

Nous utilisons Q pour désigner la puissance moyenne globale drainée pour assurer la couverture complète de la zone. La puissance Q est égale à la somme de Q_i la puissance moyenne drainée par chaque nœud :

$$Q = \sum_{i=1}^{N} Q_i \quad \textbf{(V.3)}$$

tel que N est le nombre des nœuds.

V.3.3. Puissance moyenne consommée en mode actif/veille

Le mode actif dépend du protocole MAC utilisé, par exemple si on choisit le protocole SMAC les nœuds se mettent périodiquement en mode sommeil et actif. où la durée du mode actif est environ 10 % de la durée du sommeil. L'idée de SMAC est de limiter au maximum l'état (Idle-listening) en entrainant les nœuds dans un état endormi périodique, chaque nœud doit synchroniser sa séquence d'états (listen/sleep) avec les nœuds qui lui sont proches. Donc la puissance moyenne consommée en SMAC égale à :

$$Q = \frac{Q_A \times t_A + Q_h \times t_h}{t_A + t_h} \quad \textbf{(V.4)}$$

– t_A(res. t_h) est le temps qui passer en mode actif (res. sommeil) en SMAC t_A= 10s et

t_h= 90s.

– Q_h est la puissance consommée en mode sommeil.

– Q_A est la puissance consommée en mode actif.

V.3.4. Puissance moyenne drainée par chaque nœuds utilisent Stop-Operate

La puissance consommée pour chaque nœuds dépend de l'état de module radio, Après appliqué l'algorithme de Stop-Operate on obtient une proportion des nœuds en mode actif (Active-Mode) et le reste en mode veille prolongée (Hibernate-Mode), un nœud en mode actif s'il déplace, donc la puissance consommée est la somme de trois puissance; la puissance moyenne consommé en mode actif Q_A, la puissance moyenne consommé en mode veille prolongée Q_h, et la puissance moyenne consommé en déplacement Q_m.

$$\boldsymbol{Q_{StopOperate} = Q_A + Q_m + Q_h} \qquad \textbf{(V.5)}$$

Puissance moyenne consommée en mode actif

Q_A est la puissance consommée en mode actif, cette puissance dépend de ce que le nœud fait; écoute, transmission, réception. Dans ce cas on calcule la moyenne en fonction de temps :

$$\boldsymbol{Q_A = \frac{P_{tx} \times t_1 + P_{rx} \times t_2 + P_{rx} \times t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} \qquad \textbf{(V.6)}$$

$\boldsymbol{P_{tx}}$ (res. $\boldsymbol{P_{rx}}$) c'est la puissance drainée en transmission (resp. réception), $\boldsymbol{t_1}$ (resp. $\boldsymbol{t_2}$) c'est le temps passe en transmission (resp. réception), calculé en fonction de paquet et la vitesse de transmission, et $\boldsymbol{t_3}$ le temps passe en mode écoute (idle), dépend de le protocole utilisé.

Puissance moyenne drainée en déplacement

Dans l'algorithme Stop-Operate la sélection des nœuds qui doivent être mis en mode veille prolongée faite par le déplacement des nœuds tel que les nœuds qui trouvent que ses nouvelles positions ne dépassent pas la zone de couverture se déplacent et continuent à fonctionner normalement, sinon ils doivent être mis en veille prolongée.

$$\boldsymbol{d^i_{t_1}} = \begin{cases} \left\| \overrightarrow{\boldsymbol{d^i_{t_0} d^i_{t_1}}} \right\| & \boldsymbol{if\ t_1\ in\ t_{Active}} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{elsewhere} \end{cases} \qquad \textbf{(V.7)}$$

Si on suppose que la puissance consommée en déplacement pour 1 mètre est Pm, alors pour un déplacement d_{t_i} la puissance drainée Q_m est comme suite :

$$Q_m^i = \sum_{j=0}^{23} d_{t_j}^i \times P_m \quad \textbf{(V.8)}$$

Puissance consommée en mode veille prolongée

Un nœud est en mode veille prolongée ou sommeil (Hibernate Mode) lorsque sa radio est éteinte et dans ce cas sa consommation est presque nulle $Q_h \ll 1$, mais $Q_h > 0$.

En Stop-Operate les nœuds peuvent être actif en temps t_{Active}et en mode veille prolongée en autre temps $t_{Hibernate}$, à cause de la variation de la température τ, un nœud actif s'il déplace, et pour ça on doit calculer le rapport d'où le nœud actif $Report_{Active}$ 24 heures.

$$Report_{Active}^i = \frac{\sum_{time=0}^{23} t_{Active}^i(time)}{\sum_{time=0}^{23} (t_{Active}^i(time) + t_{Hibernate}^i(timt))} \quad \textbf{(V.9)}$$

Par conséquence, la puissance moyenne consommée en mode active par chaque nœud utilise Stop-Operate $Q_{StopOperate}$est :

$$Q_{StopOperate}^i = (Q_A^i + Q_m^i)\, Report_{Active}^i + Q_h(1 - Report_{Active}^i) \quad \textbf{(V.10)}$$

En utilisant les équations (V.4) et (V.10) la puissance moyenne drainée par chaque nœud Q^i lorsqu'il utilise l'algorithme Stop-Operate dans le protocole SMAC est la suivante :

$$Q^i = Q_{StopOperate}^i \frac{10}{100} + Q_h \frac{90}{100} \quad \textbf{(IV.11)}$$

V.3.5. Puissance moyenne drainée par chaque nœuds utilisent Power-Control

La puissance moyenne drainée par chaque nœuds utilisent Power-Control équivalent à la puissance moyenne consommée en mode actif/veille Q, voir l'équation (V.4), avec utiliser le courant optimal I_{tx}^*en transmission.

Donc la puissance consommée en mode actif pour Power-Control est :

$$Q_{PowerControl} = \frac{I_{tx}^* \times V \times t_1 + P_{rx} \times t_2 + P_{rx} \times t_3}{t_1 + t_2 + t_3} \quad \textbf{(V.12)}$$

En utilisant les équations (V.4) et (V.12) la puissance moyenne drainée par chaque nœud Q^i lorsqu'il est utilisé l'algorithme Power-Control dans le protocole SMAC est la suite :

$$\boldsymbol{Q^i = Q^i_{PowerControl}\ \frac{10}{100} + Q_h \frac{90}{100}} \qquad \textbf{(V.13)}$$

V.3.6. Puissance moyenne drainée par chaque nœuds utilisent SOPC

Dans SOPC à chaque fois l'algorithme il doit choisir la technique qui est la meilleur en termes d'économie d'énergie Stop-Operate ou Power-Control. Donc la puissance moyenne drainée par chaque nœuds utilisent SOPC est comme suit :

$$\boldsymbol{Q_{SOPC} = \min\{Q_{StopOperate}\ ;\ Q_{PowerControl}\}} \qquad \textbf{(V.14)}$$

En utilisant les équations (V.4) et (V.14) la puissance moyenne drainée par chaque nœud Q^i lorsqu'il est utilisé l'algorithme SOPC dans le protocole SMAC est la suite :

$$\boldsymbol{Q^i = Q^i_{SOPC}\ \frac{10}{100} + Q_h \frac{90}{100}} \qquad \textbf{(V.15)}$$

En conséquence, en utilisant les équations (V.3), (V.11), (V.13), et (V.15), la puissance moyenne globale drainée Q pour assurer le bon fonctionnement du RCSF (connectivité et couverture) sous de variation de la température, après l'utilisation de l'un des algorithmes Stop-Operate, Power-Control, ou SOPC est la suite :

$$\boldsymbol{Q = \sum_{i=0}^{N} Q^i} \qquad \textbf{(IV.16)}$$

V.4. Expérimentation

On a étudié le déploiement aléatoire en fonction de la température en 24 heures, sur une zone de déploiement de 100m × 100m, cette zone déploie dans 50°C par 50 nœuds.

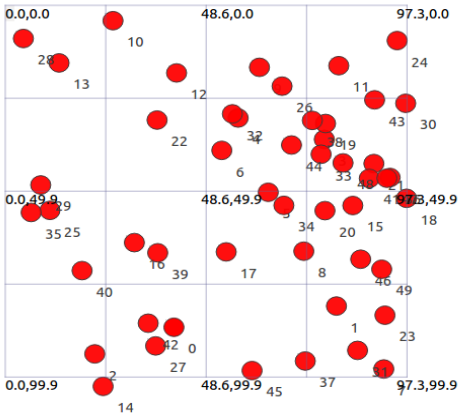


Figure V. 2.Dépoilement aléatoire

La figure V.2 représente le déploiement initial de RCFS (nœuds en mode actif)

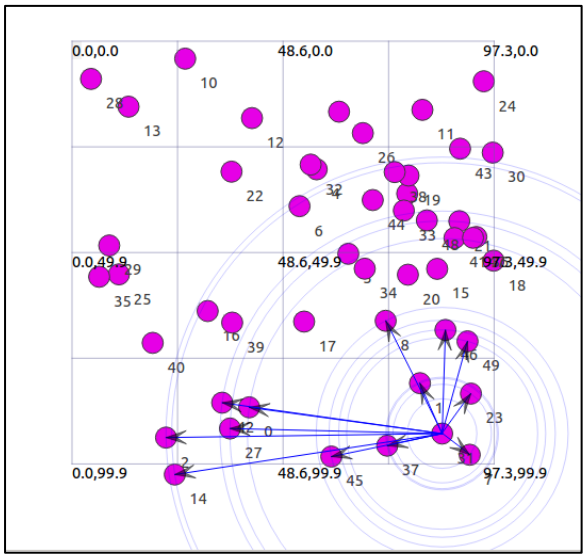


Figure V. 3.Déploiement hors de L'exécution de PC

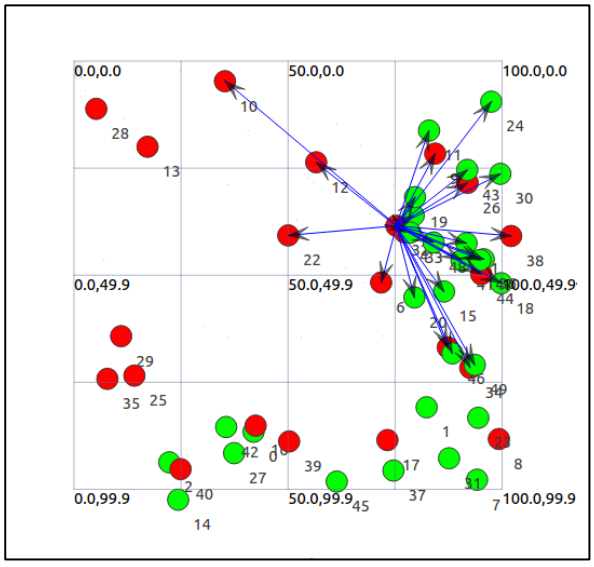


Figure V. 4.Déploiement hors de l'exécution de SO

Dans la figure V.3, Tous les nœuds utilisent la puissance de transmission la plus faible, ces nœuds colorés en violet. Et dans la figure V.4 on obtient une proportion des nœuds en mode actif colorés en rouge, et les reste des nœuds en mode veille prolongée colorés en vert.

La figure V.5 c'est la combinaison entre SO et PC.

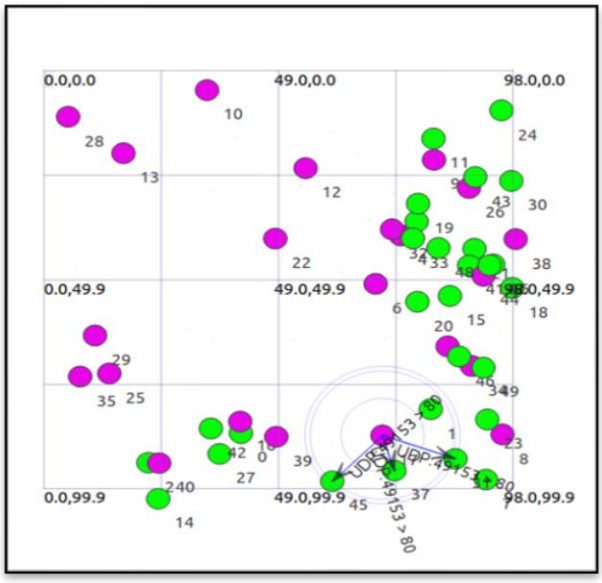


Figure V. 5.Déploiement lors de l'exécution de SOPC

V.4.1. Puissance moyenne globale drainée

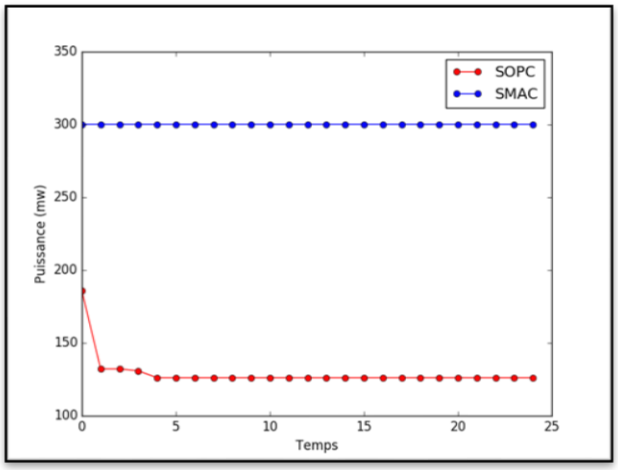


Figure V. 6. Puissance moyenne globale drainée en SOPC vs SMAC

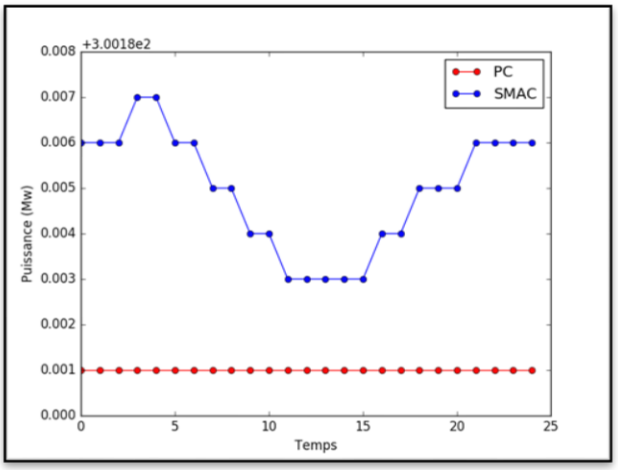


Figure V. 7. Puissance moyenne globale drainée en PC vs SMAC

– La puissance consommée par l'algorithme SOPC est la puissance minimale consommée par les deux algorithmes SO et PC (figure V.6), dans l'intervalle de temps [0-1] l'algorithme SOPC choisit la technique PC car dans cet intervalle l'algorithme PC consomme moins

d'énergie que l'algorithme SO, mais dans l'intervalle [1-4] l'algorithme choisit la technique SO, et dans l'intervalle [5-24] les nœuds continuent à utiliser la technique PC.

– Dans l'algorithme PC la puissance consommée dépend de la distance entre les nœuds. Si cette distance ne change pas la puissance consommée reste constante (voir Figure V.7)

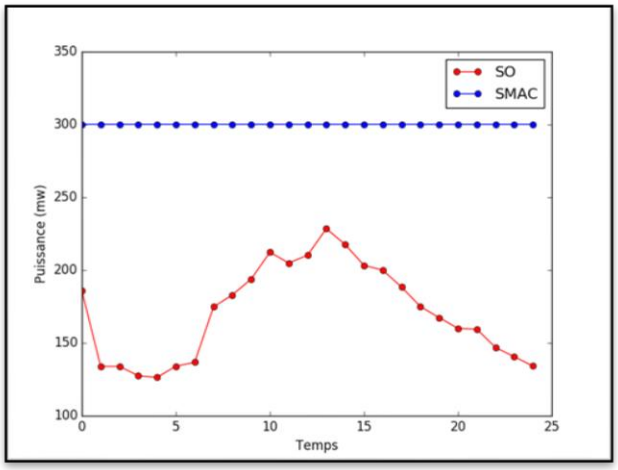


Figure V. 8. Puissance moyenne globale drainée en So vs SMAC

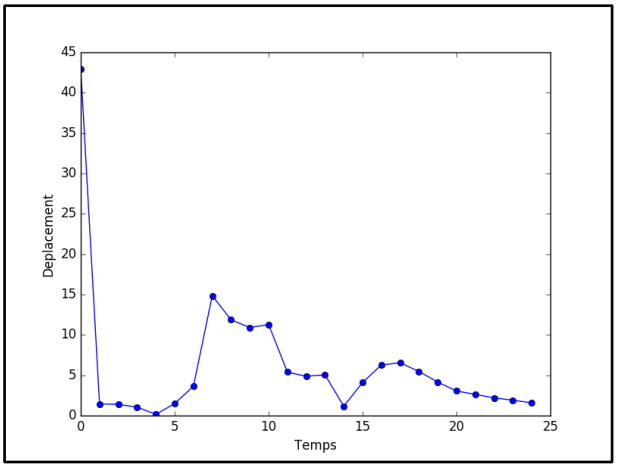


Figure V. 9. Puissance consommé en déplacement lors de l'utilisation de SO

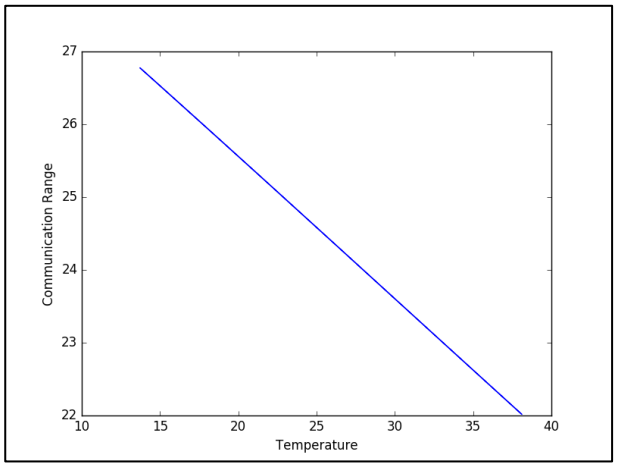


Figure V. 10. Variation de rayon de communication en fonction de température lors de l'utilisation de SO

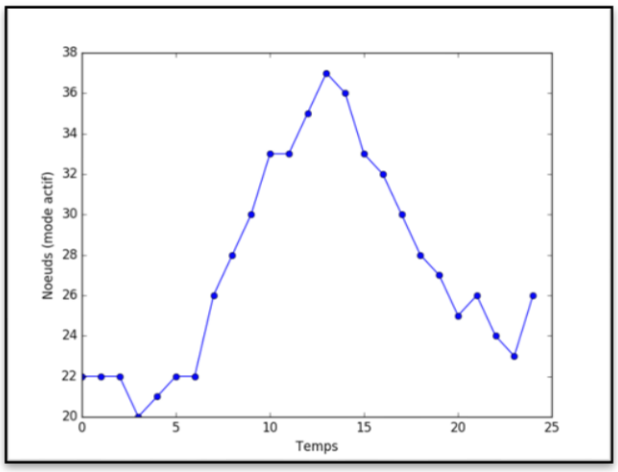


Figure V. 11. Le nombre de nœuds en mode actifs hors de l'utilisation de SO

Dans la figure V.8 la puissance consommée par l'algorithme SO augmente lorsque la puissance consommé par le déplacement (Figure V.9) et le nombre de nœuds actifs augmente (Figure V.11) donc cette dernière dépend de la puissance consommée en déplacement et le nombre des nœuds actifs en temps, la figure V.10 montre que le rayon de communication baisse quand la température augmente donc on besoin d'un déplacement. Par contre, lorsque la température diminue le déplacement des nœuds augmente à cause de l'augmentation du rayon de communication (voir Figure V.9). Et comme décrive Figure V.11, lorsque la température baisse (resp. augmente) le nombre des nœuds actifs diminue (resp. augmente).

– L'algorithme SOPC économise plus d'énergie en mettant plus de nœuds en mode veille prolongée et en utilisant le courant minimal en entrée. La puissance drainée en mode veille prolongée (hibernate mode) est très faible par rapport aux autres modes actifs. Dans ce cas la puissance consommée pour le partie SO (StopOperate) dépend de la puissance consommée en déplacement, plus le déplacement est élevé plus la puissance consommée est élevée, et aussi dans le cas où la température est élevée le nombre des nœuds qui sont en mode veille prolongée diminue à cause de la diminution du rayon de communication. Dans cette situation, la seule façon possible d'économiser l'énergie est d'utiliser la puissance d'émission la plus faible qui permet à maintenir la connectivité et la couverture avec moins de consommation d'énergie possible comme dans le partie PC (PowerControl).

Dans le cas où la puissance drainée en déplacement est petite, l'algorithme SO permet des économies plus d'énergie que l'algorithme PC.

V.4.2. Consommation d'énergie

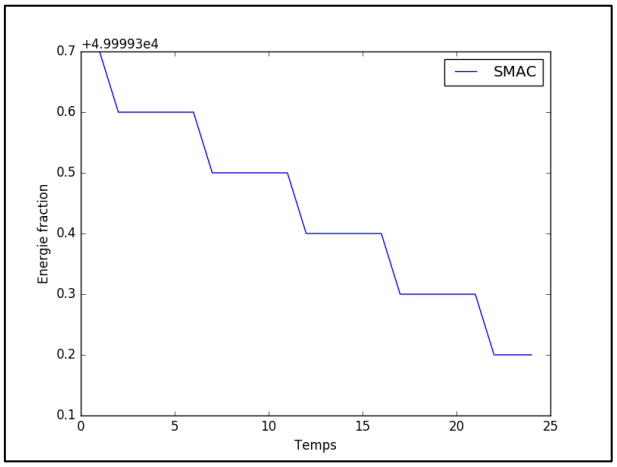


Figure V. 12. Consommation d'énergie hors de l'utilisation de SMAC

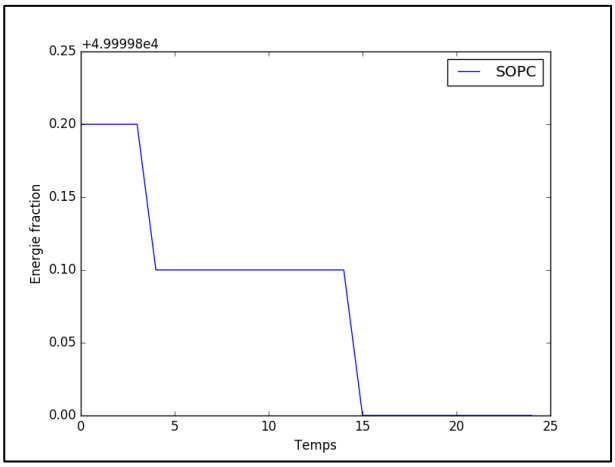


Figure V. 13. Consommation d'énergie hors de l'utilisation de SOPC

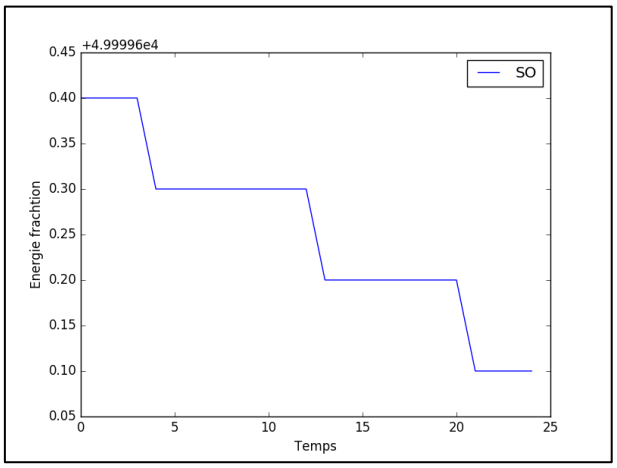


Figure V. 14. Consommation d'énergie hors de l'utilisation de SO

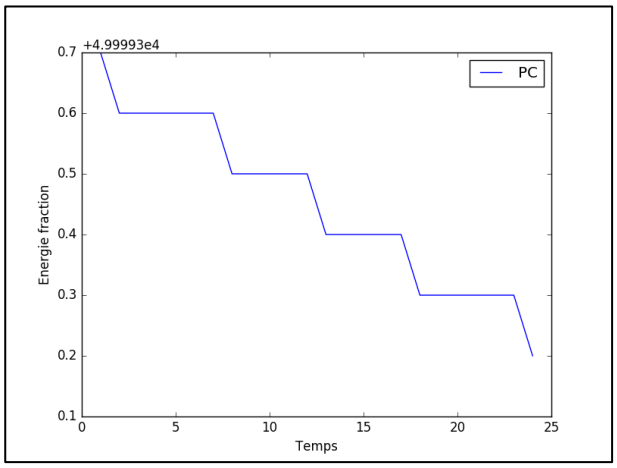


Figure V. 15. Consommation d'énergie hors de l'utilisation de PC

La consommation d'énergie pour les algorithmes SO et PC et SOPC est le rapport entre l'énergie initiale et l'énergie restante en fonction de temps (figures V.13, V.14, V.15)

V.4.3. Puissance consommée en transmission

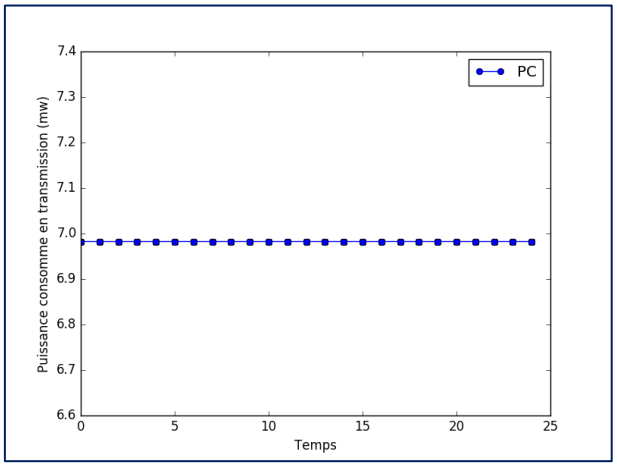


Figure V. 16. Puissance consommée en transmission après utilisation de PC

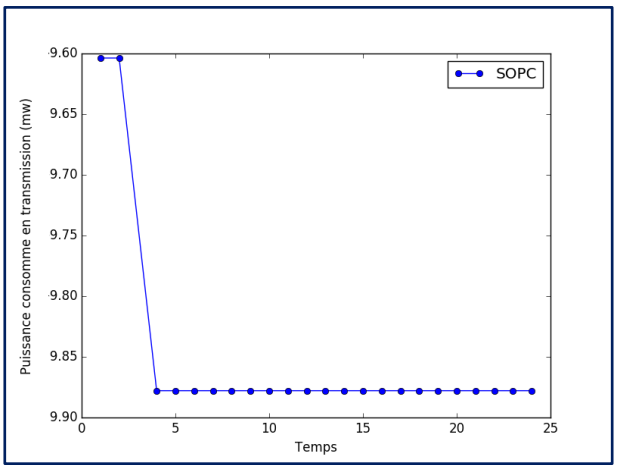


Figure V. 17.Puissance consommé en transmission après l'utilisation de SOPC

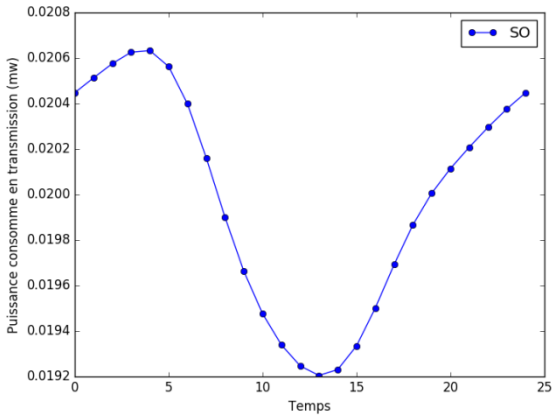


Figure V. 18.Puissance consommé en transmission après l'utilisation de SO

Dans les algorithmes SO et SOPC la puissance moyenne consommée en transmission diminue lorsque la température diminue, voir les figures V.17 et V.16. Dans le cas de l'algorithme SO la diminution de la puissance globale consommée est provoqué par la diminution de nombre des nœuds qui continuent à fonctionner normalement pour maintenir le bon fonctionnement du réseau. Dans le cas de l'algorithme PC la puissance moyenne consommée en transmission dépend de la distance entre les nœuds, tel que si cette distance est constante la puissance consommée est constante en temps, voir la figure V.16.

Après l'évaluation des résultats et la comparaison entre les résultats obtenus on a conclus que l'algorithme PC utilise la puissance de transmission la plus faible pour économie l'énergie mais cette dernière affecte sue la performance de RCSF cependant l'algorithme SO mets une portion de nœuds en mode vielle pour économiser l'énergie mais cet algorithme ne peut pas être utilisé dans toutes les situations car il affecte la connectivité et la couverture donc l'algorithme SOPC qui compare l'énergie consommé par les So et PC , la petite entre eux doit être utilisé pour une meilleur économie d'énergie.

V.5. Paramètres utilisés dans la simulation

Tableau V.1. Paramètres utilisés dans la simulation

Paramètre	valeur
Zone de déploiement	Areawidth×Arealenght = 100m×100m
Rayon de communication	$R = 10^{P_t - P_s - A_0/10\alpha}$
Température Max	Tmax = 50°C
Exposant l'atténuation	α=4
Fréquence	F=10^3 MHZ
Source d'énergie	E=150J
Courant de réception	$I_{rx} = 24mA$
Voltage	V =3v
Puissance consommée en veille prolongée	$P_h = 3\mu W$
Puissance consommée en déplacement	$P_m = 30mW$
Nombre des paquets	1 par senconde
Taille du paquet	1024 bits
Vitesse de transmission	DataRate = 1 Mbps
Hauteur de l'antenne de l'émetteur	$H_t = 1.5$
Hauteur de l'antenne du récepteur	$H_r = 1.5$
Gain de l'antenne de l'émetteur	$G_t = 1$
Gain de l'antenne du récepteur	$G_r = 1$
Radio	CC2400
Norme de radio	DLT_IEEE802_11_RADIO
Type de trafic	UDP
Modèle de mobilité	ns3 : :ConstantPositionMobilityModel
Modèle de Propagation	ns3: :TwoRayGroundPropagationLossModel

V.6 .Conclusion

Dans ce chapitre on a fait une petite présentation pour le simulateur et l'animateur choisis NS3 et NetAnim, et on a évalué les trois algorithmes proposés SO, PC et SOPC pour le protocole SMAC. Tous les algorithmes proposés ont le même objectif minimiser la consommation d'énergie, tout en conservant le bon fonctionnement du RCSF en assurant à la fois la connectivité et la couverture. Et on a discuté les résultats obtenus par rapport à l'algorithme par défaut de SMAC sous l'effet de la variation de la température.

Conclusion générale

Ce projet nous a permis d'acquérir des connaissances en programmation évènementielle. Il nous a aussi fait découvrir Python, C++ et NS3 comme environnement de travail.

Le travail consigné dans ce mémoire a été le fruit d'une étude menée dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil, ce qui nous a permis de découvrir les propriétés de ces derniers, de leurs contraintes et des domaines variés qui les utilisent. Nous nous sommes intéressées principalement l'effet de la température et à la préservation de l'énergie dans les réseaux de capteurs puisque le nombre de messages envoyés et reçus a un impact sur la consommation d'énergie.

Dans ce mémoire, nous avons vu que les variations de température affectent de manière significative la qualité des liaisons sans fil de façon déterministe. Lorsque les réseaux sont déployés (dans notre cas déploiement aléatoire), les algorithmes devraient être créés pour optimiser le fonctionnement du réseau lorsque les conditions s'améliorent.

Nous avons utilisé et évalué Les algorithmes SO, PC et SOPC qui opèrent sur les réseaux de capteurs. Toutes les cibles de ces algorithmes améliorant l'efficacité énergétique tout en conservant leur correct fonctionnement en assurant la connectivité et la couverture sont conservées. Les algorithmes ont été optimisés pour les environnements de radio stable où les variations de lien significatif sont régies par un modèle déterministe comme l'effet de la température sur la qualité du lien. Les résultats montrent que la méthode SO réalise une économie d'énergie mieux que celle de PC mais il ne peut pas être toujours utilisé a cause de problème de connectivité et la couverture , PC affecte aussi la performance de transmission cependant les résultat montre que la combinaison des algorithmes SO et PC réalise des économies d'énergie plus élevées que SO ou PC seul, comme proposé dans l'algorithme de SOPC.

Comme perspective, nous souhaitons dans l'avenir l'utilisation de la triangulation de Delaunay dans les études des réseaux de capteurs sans fil.

Bibliographie

[1] **Guy PUJOLLE** « Les réseaux » Edition 2014 8 e Edition Eyrolles.

[2] **Vernon S. Somerset**, « Intelligent and Biosensors », Edited by Vernon S. Somerset, Intech, January 2010.

[3] **Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci**. « A survey on sensor networks» Communications magazine, IEEE, 40(8) :102–114, 2002.

[4] **QinghuaWang et Ilangko Balasingham**,«Wireless Sensor Networks – An Introduction » Wireless Sensor Networks: Application-Centric Design, Geoff V Merrett and Yen Kheng Tan (Ed.), ISBN: 978-953-307-321-7, InTech, 2010

[5] **M.A. Matin, M .M,Islam** « overiew of wireless sensor network » Creative Commons Attribution License , 2012

[6] **A.Makhoul**.« Réseaux de capteur : Localisation, couverture, fusion de données » Thése de Doctorat. Université de Franche-Comté (LIFC) France Novembre 2008

[7] **Ben L. Titzer et J. Palsberg**, « Nonintrusive Precision Instrumentation of Microcontroller Software», acm, New york, ny, Etats-Unis, volume 40 issue 7 July 2005

[8] **H. Karl et A. Willig**, « Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks », John Wiley & Sons, 2005

[9] **Shio Kumar Singh** « Applications, Classifications, and Selections of Energy- Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks », international journal of advanced engineering sciences and technologies (ijaest), vol No.1, Issue No.2.

[10] **V. R. Syrotiuk, B. Li, and A. M. Mielke**, «Heterogeneous Wireless Sensor Networks» in Algorithms and Protocols for Wireless Ad hoc and Sensor Networks, A. Boukerche, ed., John Wiley & Sons, Inc., 2008, Chapter 2.

[11] **H.Saito ,S.Shimogawa, S.Tanaka, S.Shioda**. « Estimating Parameters of Multiple Heterogeneous Target Objects using Composite sensor Nodes». IEEE Trans Mob Comput 11(1): pp125-138.2012

[12] G.Simon et al « sensor Networs-Based Countersniper System». In:Proceeding of the 2nd international conference on embedded network systems. ACM NewYork ,pp 1-12.2004

[13] J.Huang,S. Amjad ,S. Mishra. CenWits: « A Sensor-Based Loosely Coupled Search and Rescue System using Witnesses ». In: Proceedings of the 3rd international conference on embedded networked sensor systems. ACM, New York, pp 191. 2005

[14] VigilNet. http://www.cs.virginia.edu/wsn/vigilnet/

[15] P.Zhang, C.Sadler, S.Lyon ,M.Martonosi. «Hardware Design Experiences in ZebraNet». In:Proceedings of the 2nd international conference on embedded networked sensor systems. ACM,New York, pp 227–238. 2004

[16] Harvard Sensor Networks Lab. «Volcano Monitoring ». Available online: http://fiji.eecs.harvard.edu/Volcano

[17] J.Burrell,T. Brooke,R. Beckwith. « Vineyard Computing: Sensor Networks inAgricultural Production ». IEEE Pervasive Comput 3(1):pp38–45. 2004

[18] K.Lorincz et al « Mercury: A Wearable Sensor Network Platform for HighFidelity Motion Analysis. In: Proceedings of the 7th ACM conference on embedded networked sensor systems. ACM, New York, pp 183–196. 2009

[19] V.Weber V. « Smart Sensor Networks: Technologies and Applications for Green Growth. The Organization for Economic Cooperation and Development »2009

[20] Y .Kim , T.Schmid, Z.M.Charbiwala,J. Friedman,M.B.Srivastava. « NAWMS: Nonintrusive Autonomous Water Monitoring System ». In: Proceedings of the 6th ACM conference on embedded network sensor systems. ACM, New York, pp 309– 322. 2008

[21] T.B. Gosnell, J.M. Hall, C.L. Ham, D.A. Knapp, Z.M. Koenig, S.J. Luke, B.A. Pohl,A. Schach von Wittenau, J.K. Wolford. « Gamma-Ray Identification of Nuclear Weapon Materials ». Technical Report DE97053424. Lawrence Livermore National Lab., Livermore, CA (USA). February 1997

[22] **R.Merzougui, M.Feham, H.Sedjelmaci**. «Design and Implementation of An Algorithm for Cardiac Pathologies Detection on Mobile Phone». International Journal of Wireless InformationNetworks, 18 (1):pp11-23, 2011.

[23] **K.Beydoun**« Conception d'un Protocole de Routage Hiérarchique pour les Réseaux de Capteurs». Thèse de Doctorat en informatique, Université de Franche-Comté, France, Décembre 2009

[24] **M. Fitzgerald.** «Technnology Review: Tracking a Shopper's Habits », August 2008. **http://www.technologyreview.com/computing/21161/**

[25] **G.Werner-Allen, K.Lorincz, M.Welsh et al** « Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano». IEEE Internet Computing, vol.10, no2,pp. 18–25. April 2006

[26] « http ://www.argo.ucsd.edu/ [accessed 17 06 2008] ».

[27] **K.Chintalapudi,T. Fu, J.Paek et al**. « Monitoring Civil Structures with a Wireless Sensor Network », IEEE Internet Computing, vol. 10, no2, pp. 26–34.2006

[28] **C.Herring, S.Kaplan.** «Component Based Software Systems for Smart Environments », IEEE Personal Communications, pp. 60–61. October 2000

[29] **N.Kouadria.** « Codage et Compression d'Images pour des Réseaux de Capteurs sans fil Multimédia et Communications » .Doctorat 3éme cycle 2013/2014

[30] **Z. Bidai.**«Routage Multi-Chemin avec Qualité de Service pour le Transport d'un Trafic Scalaire/Multimédia dans un Réseau de Capteurs sans Fil ».Thèse de Doctorat. Université d'Oran, juin 2013.

[31] **R.KACIMI.** « Techniques de Conservation d'Energie pour les Réseaux de Capteurs sans fil ». Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse Spécialité : Réseaux et Télécommunications, 28/09/2009.

[32] **Q.Lampin.**« Réseaux Urbains de Capteurs sans-fil : Applications, Caractérisation et Protocoles». Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Projet INRIA Urbanet, Laboratoire CITI, INSA de Lyon30 janvier 2014

[33] Texas Instruments. CC1011 chip specifications. [Online]. Available : http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc1101.html june, 2011.

[34] **J. Postel,** «Transmission Control Protocol (TCP) », RFC 6550, 1981

[35] **www.zigbee.org**

[36] **https://standards.ieee.org/about/get/802/802.15.html.**

[38] **M. Ilyas**, « The Handbook of Ad hoc Wireless Networks », CRC Press, ISBN: 0-8493-1332-5, 2003.

[39] **E.H.S. Mamour Diop** « Optimisation de la Transmission d'Images dans les Réseaux de Capteurs». Thèse en cotutelle de doctorat en science : Université de Pau, France et Université Gaston Berger de Saint-Louis, Sénégal. Juin 2014.

[40] **P.Rawat, K. Deep Singh, H.Chaouchi, J.M.Bonnin**. « Wireless Sensor Networks: A Survey on Recent Developments and Potential Synergies ».Revue: The Journal of super computing,Vol 68, No1, pp 1-48. Éditeur Springer US.2014

[41] **Kabou Salaheddine,Belgourari Abdessamed**, « Etat de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil »,2010

[42] **H. Namgoog, D. Lee,** and **D. Nam**. "Energy efficient topology for wireless microsensor networks". ACM, PE-WASUN, October 2005

[43] **S. Kumar, D. Shepherd,** and **F. Zhao**. "Collaborative signal and information processing in micro sensor networks". IEEE Signal Processing Magazine, March 2002.

[44] **S. Kumar, D. Shepherd,** and **F. Zhao**. "Collaborative signal and information processing in micro sensor networks".IEEE Signal Processing Magazine, March 2002.

[45] **S.Narayanaswamy, V. Kawadia, R.S. Sreenivas,** and **P.R. Kumar.** "Power control in ad-hoc networks : Theory, architecture, algorithm and implementation of the Compowprotocol", European Wireless Conference, 2006

[46] **Gerard Chalhoub**, « Une méthode d'accès déterministe et économe en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil »

[47] **Abdelmalik Bachir, Walid Bechkit, Yacine Challal, and Abdelmadjid Bouabdallah**« Temperature-Aware Density Optimization for Low Power Wireless Sensor Networks ».

[48] H.-W. Braun J. Otero, P. Yalamanchili. High performance wireless networking and weather. Technical report, Univ. California, San Diego, La Jolla, CA, USA, 2001.

[49] Z. He U. Roedig T. Voigt C. A. Boano, J. Brown. Lowpower radio communication in industrial outdoor deployments : The impact of weather conditions and atex-compliance. Springer Berlin Heidelberg, 2009.

[50] N. Tsiftes U. Roedig T. Voigt C. A. Boano, J. Brown. The impact of temperature on outdoor industrial wsn applications. IEEE Transactions on Industrial Informatics (TII), 2010.

[51] K. Chung J. Lee. An efficient transmission power control scheme for temperature variation in wireless sensor networks. Sensors (Basel), 2011.

[52] Z. Li W. Wang J. Zhang, G. Qiao. The impact of ambient temperature variations on signal intensity of outdoor wsn system. Springer Berlin Heidelberg, 2012.

[53] Sandeep K.S. Gupta K. Bannister, G. Giorgetti. Wireless sensor networking for “hot spplications : Effects of temperature on signal strength, data collection and localization. the 5th Workshop on Emb. Networked Sensors (HotEmNets), 2008.

[54] L. Tassiulas J-H. C Hang. Energy conserving routing in wireless adhoc networks. Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2000.

[55] P. R. K Umar A. Giridhar. Maximizing the functional lifetime of sensor networks. International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005.

[56] D. Estrin A. Cerpa. Ascent : Adaptive self-configuring sensor networks topologies. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014.

[57] **N. D. Georganas D. Tian**. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. ACM international workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, 2002.

[58] **J. V Itek O. Carbunar B. Carbunar, A. G Rama**. Redundancy and coverage detection in sensor networks. ACM Transactions on Sensor Networks, 2006.

[59] **Z. WANG W. MO, D. Q IAO**. Mostly-sleeping wireless sensor networks : Connectivity, k-coverage, and alpha-lifetime. Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Monticello, IL, USA, 2005.

[60] **Y. L I M. Cardei**, M Y T. Thai and W. WU. Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks. Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2005.

[61] **A. CHandrakasan M. Bhardwaj**. Upper bounds on the lifetime of wireless sensor networks. IEEE International Conference on Communications, 2001.

[62] **F. L I Y. XIAO K. WU, Y. G AO**. Lightweight deployment-aware scheduling for wireless sensor networks. mobile networks and applications. 2005.

[63] **J. C. H OU H. Zhang**. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. ad hoc and sensor wireless networks. 2005.

[64] **J. W U M. Cardei**. Coverage in wireless sensor networks. Editors, Handbook of Sensor Networks, 2004

[65] **M ANI B. Srivastava G. J. Pottie A. Kansal, A. R Amamoorthy**. On sensor network lifetime and data distortion. IEEE International Symposium on Information Theory, 2005.

[66] **V. Mharte and C. Rosenberg, D. Kofman. R. Mazudar**. and **N. Shroof**. «Design of surveillance Sensors grids wilh a lifetime constraint ». In European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN). Berlin. Germny.January 2004.

[67] M. Bhardwaj and A. Chandrakosan. Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assigement .In INFOCOM 2004. Hong kong. China March 2004. IEEE.

[68] I. Dietrich, F. Dressler, "On the lifetime of wireless sensor networks", ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), Vol. 5 , No. 1 , Article No.: 5, February 2009

[69] Antoine Gallais, Jean Carle et David Simplot-Ryl. La k-couverture de surface dans les réseaux de capteurs. IRCICA/LIFL, Université. Lille 1, INRIA Futurs, 2007

[70] Michaël Hauspie « Contribution à l'etudes des gestionnaire des services distribute dans les reseaux Ad Hoc» thése de doctorat , Université des Sciences et Technologies de Lille , 2005

[71] B.N Clark , C.J Colbourn AND D.S Jonhson .Unit disk graphs Discrete Mathematics 86:165.177,1990

[72] Rabah Meraihi, «Gestion de la qualité de service et contrôle de topologie dans le réseaux ad hoc», Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des télécommunications, TELECOM Paris. 2003.

[73] BENAHMED Khélifa « Approche Théorie des Graphe pour la Surveillance d'un Réseau de Capteurs sans fil » theme magister en informatique. Université D'Oran Es-senia , février 2007

[74] Alexandre Delye de Mazieux, Vincent Gauthier, Michel Marot, Monique Becker, « Etat de l'art sur les réseaux de capteurs », Rapport de Recherche INT N°05001RST, Institut National des Télécommunications, Evry, France, Avril 2005.

[75] L. Kleinrock and J. Silvester. Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number. In National Telecommunications Conference, Birmingham, Alabama, pages 4.3.2-4.3.5, December 1978.

[76] T. Clouqueur, V. Phipatanasuphorn, P. Ramanathan and K. K. Saluja. Sensor deployment strategy for detection of targets traversing a region. Mobile Networks and Applications, 8(4): 453-461, 2003

[77] K. Kar and S. Banerjee. Node Placement for Connected Coverage in Sensor Networks. Proc. of WiOpt 2003: Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, 2003.

[78] G Sanjiv Rao and V Vallikumari «A BENEFICIAL ANALYSIS OF NODE DEPLOYMENT SCHEMES FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS», International Journal of Advanced Smart Sensor Network Systems (IJASSN), Vol 2, No.2, April 2012.

[79] Lambrou, T.P. Panayiotou, C.G, «A Survey on Routing Techniques Supporting Mobility in Sensor Networks», 5th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN), pp. 78 - 85, 2009.

[80] Samayveer Singh and Ajay K Sharma «Distributed Algorithms for Maximizing Lifetime of WSNs with Heterogeneity and Adjustable Sensing Range for Different Deployment Strategies », I.J. Information Technology and Computer Science, 2013, 08, 101-108.

[81] M Amac Guvensan and A Gokhan Yavuz. On coverage issues in directional sensor networks : A survey. Ad Hoc Networks, 9(7) :1238–1255, 2011.

[82] Mohamed Younis and Kemal Akkaya. Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks : A survey. Ad Hoc Networks, 6(4) :621–655, 2008.

[83] Chuan Zhu, Chunlin Zheng, Lei Shu, and Guangjie Han. A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks. Journal of Network and Computer Applications, 35(2) :619 – 632, 2012.

[84] Mihaela Cardei, My T Thai, Yingshu Li, and Weili Wu. Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks. In INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE, volume 3, pages 1976–1984. IEEE, 2005.

[85] Xiaorui Wang, Guoliang Xing, Yuanfang Zhang, Chenyang Lu, Robert Pless, and Christopher Gill. Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks. In Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems, pages 28–39. ACM, 2003.

[86] Jorge Urrutia et al. Art gallery and illumination problems. Handbook of computational geometry, pages 973–1027, 2000.

[87] Chunseok Lee, Donghoon Shin, Sang Won Bae, and Sunghee Choi. Best and worst-case coverage problems for arbitrary paths in wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, 11(6) :1699 – 1714, 2013.

[88] Y. Challal A. Bouabdallah A. Bachir, W. Bechkit. Joint connectivity-coverage temperature-aware algorithms for wireless sensor networks. IEEE TRANSACTIONS ON PARALLEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS, 2015.

[89] C. Corporation. Cc2400 2.4 ghz low-power rf transceiver, data sheet [online]. http://www.ti.com/lit/gpn/cc2400, 2008.

[90] T. Instruments. Cc2530 a true system-on-chip solution for 2.4-ghz ieee 802.15.4 and zigbee applications, data sheet[online]. http ://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2530.pdf, 2009.

[91] D. G. Erbs. Models and applications for weather statistics related to building heating and cooling loads. PhD thesis, Dep. Mechanical Engineering, Univ. Wisconsin Madison, 1984.

[92] A. H. D. Miguel J. Bilbao and H. D. Kambezidis. Air temperature model evaluation in the north mediterranean belt area. 1. of applied meteorology, 2002.

[93] Kandpal et al., International Journal of Emerging Research in Management &Technology ISSN: 2278-9359 (Volume-4, Issue-9)

[94] Savita Hooda, Kirti Bhati , Rohini Sharma Nodes Deployment Strategies for Sensor Networks: An Investigation International Research Journal of Engineering and Technology Volume: 03 Issue: 04 April-2016

[95] **B. Wissem C. Mounira B. Dalila, B.F. Célia**. Les simulateurs : Ns2 et ns3. Technical report, univ. Sience et la Technologie Houari Boumediene, Fac. Electronique et Informatique, 2014.

[96] **E.H. Imane. Svr** avec boosting pour la prévision à long terme. Master's thesis, école polytechnique de l'université de tours, France, 2012.

[97] Netanim 3.105. https://www.nsnam.org/wiki/NetAnim. Consulté le : 2016-05-13.

[98] **MOAD.S** Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil Université : IFSIC-Rennes 1 Laboratoire de recherche : DYONISOS-IRISA Année universitaire : 2007/2008

[99] **Bounegta N**adia **, Aici N**acira Approche Décentraliséee pour la sécurité d'un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) Juin 2010