

Université Saad Dahlab, Blida USDB.



**Faculté des sciences.
Département informatique.**

Mémoire présenté par :

Mr TOUMI Med Karim

Mr YOUNSI Oulhadj

En vue d'obtention du diplôme de MASTER

Filière informatique

Option ingénierie du logiciel

Sujet :

Evaluation expérimentale des Réseaux de Capteurs sans fil

Promoteur encadreur

Mr BENNOUAR D.

Promotion 2010

Au terme de ce travail, nous voudrions adresser nos sincères remerciements à Mr BENNOUAR D. pour son encadrement.

On tient, également, à remercier les membres du jury, qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail.

On souhaite aussi témoigner notre gratitude à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, nos parents, nos proches ainsi que tous nos amis pour leur aide et leurs encouragements tout au long de ce projet.

Résumé

A la fin du vingtième siècle, l'agriculture était à l'origine de 70% en moyenne de la consommation d'eau dans le monde, la gestion de la quantité d'eau utilisée en agriculture est donc de plus en plus nécessaire. L'étude présentée dans cet ouvrage rentre dans le cadre d'un projet au laboratoire LRDSI du département d'Informatique de l'université de Blida (U.S.D.B), ce travail aura pour objectif d'optimiser l'exploitation de l'eau dans les plantations agricoles denses composées de milliers d'arbres et ceci en utilisant l'un de ces systèmes les plus efficaces, soit un réseau de capteurs tensiométriques d'humidité qui a pour mission de contrôler l'alimentation en eau de la surface à irriguée. L'objectif principal dans ce contexte est d'évaluer ces réseaux, ceci consiste à proposer des architectures, déterminer les éléments des trois couches de bases de celles-ci (Physique, Liaison, Réseau) et trouver des réponses pour deux préoccupations majeures : La faisabilité et le coût global de la solution. Pour ce faire, ces architectures vont être soumises à une évaluation soigneusement élaborée, afin d'aboutir à des solutions optimales pour satisfaire nos besoins et nos attentes.

Mots clés

Réseaux de capteurs sans fil - Irrigation de précision - tensiométrie - capteur - sonde tensiométriques - réseau ad hoc - Standard IEEE 802.11 - Wi-Fi - CSMA/CA - couche MAC - collision - Drop - routage - protocole proactif - protocole réactif - flooding - DSDV- AODV.

Abstract

At the end of the twentieth century, agriculture was responsible for 70% of average water consumption in the world, managing water use in agriculture is increasingly necessary. The study presented in this work falls within the framework of a project LRDSI Laboratory Department of Computer Science, University of Blida (USDB), this work will aim to optimize the use of water in dense agricultural plantations composed of thousands of trees and this by using one of the most efficient system, a network of wireless sensors moisture tensiometer which aims to control the supply of water surface irrigation. The main goal in this context is to assess these networks, this consists in proposing architectures, determining elements of the three layers of these bases (physical, Data link, network) and find answers to two major concerns: The feasibility and overall cost of the solution. To do this, these architectures are going to be subjected to a carefully elaborated evaluation to lead to optimal solutions to end in optimal solutions to satisfy our needs and our expectations.

Keywords

Wireless sensors networks – Precision irrigation - tensiometry - sensor – Tensiometric probe - ad hoc network - IEEE 802.11 Standard - Wi-Fi - CSMA / CA - MAC - collision - Drop - routing - proactive protocol - reactiv protocol - flooding - DSDV-AODV

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'art et problématique	3
1. L'eau : une ressource précieuse	4
1.1. Pourquoi se consacrer aux problématiques de l'eau ?	4
1.2. Préserver l'eau	5
1.3. Des volumes d'eau disponibles en baisse, une consommation en hausse	5
1.4. Tension du sol	5
1.5. Rendre l'irrigation efficace	6
1.6. Un système de gestion de l'irrigation sans fil	6
2. L'étude de la problématique	6
2.1. Problématique	6
2.2. Mode d'approche	7
Chapitre II : Les réseaux de capteurs	10
1. Les capteurs	11
1.1. Généralité et composition	11
1.2. Les états d'un capteur	16
1.3. TinyOS...un vrai système d'exploitation libre	17
2. Les réseaux Ad Hoc	20
2.1. Aperçu	20
2.2. Réseaux Ad Hoc – caractéristiques	23
3. Les réseaux de capteurs sans fil	26
3.1. Aperçu	26
3.2. RCSF – caractéristiques	27
3.3. La couverture dans les RCSF	28
3.4. Pourquoi des capteurs sans-fil ?	29
3.5. Domaines d'application des RCSF	29
3.6. Les types d'applications dans les RCSF	30
4. RCSF vs Réseaux Ad Hoc.....	32

Chapitre III : Le domaine d'application	33
1. Notre domaine d'application	34
1.1. Généralités sur la conduite de l'irrigation	34
1.2. Principe du pilotage selon le mode d'irrigation	35
1.3. Pilotage de l'irrigation par bilan hydrique	37
1.4. Pilotage de l'irrigation par relevés tensiométriques	38
1.5. L'arrivée du sans fil	41
1.6. Des résultats garantis	41
Chapitre IV : Les architectures et leurs évaluations	43
1. Modèle en couches	44
1.1. Initiation	44
1.2. Les couches	45
1.3. Plans de gestion	46
2. Le routage dans les RCSF	46
2.1. Classification des protocoles de routage	46
2.2. Les protocoles utilisés	48
2.2.1. L'inondation « Flooding »	48
2.2.2. Le protocole « DSDV »	49
2.2.3. Le protocole « AODV »	51
2.3. Classification des réseaux de capteurs	53
3. Les standards de communication utilisés dans les RCSF	54
4. Le standard sans fil utilisé pendant l'étude	55
4.1. Couche physique	57
4.2. Couche liaison.....	57
5. La simulation.....	58
6. Utilisation des bases de données et DWH.....	58
7. Les architectures : étude et évaluation	63
7.1. Couche physique	63
7.2. Couche liaison	66
7.3. Couche réseau	73
7.3.1. Architecture à routage par « Flooding »	74
7.3.1.1. Topologie et simulation	74
7.3.1.2. L'évaluation	74
7.3.2. Architecture à routage par « DSDV »	98

7.3.2.1. Topologie et simulation	98
7.3.2.2. L'évaluation	98
7.3.3. Architecture à routage par « AODV »	104
7.3.3.1. Topologie et simulation	104
7.3.3.2. L'évaluation	104
8. Synthèse	109
9. Les actionneurs	112
Conclusion et perspectives.....	114
Références	116

Table des figures

<i>Figure 1.1 : L'élaboration d'une architecture réseau.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 2.1 : Exemples des capteurs.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 2.2 : Anatomie d'un capteur.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 2.3 : Les couches d'un nœud capteur.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 2.4 : Architecture d'un nœud capteur.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 2.5 : Les états d'un capteur.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 2.6 : Graphe modèle du réseau.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 2.7 : Nœuds cachés.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 2.8 : Nœuds exposés.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 2.9 : Schéma générale d'un RCSF.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 2.10 : Couverture.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 2.11 : Applications des RCSF.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 2.12: Application event-driven.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 2.13: Application request/reponse.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 2.14: Many-to-one / Many-to-many data flow.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 3.1 : champs d'oliviers.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 3.2 : Le principe de micro aspersion.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 3.3 : Le principe du goutte-à-goutte.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 3.4 : consommation en eau des oliviers.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 3.5 : Installation des sondes en goutte-à-goutte.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 4.1 : Modèle en couches.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure 4.2 : La propagation du paquet RREQ (Requête de route).....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 4.3 : Le chemin pris par le paquet RREP (Requête de réponse).....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 4.4 : Les normes des réseaux sans fil.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 4.5 : le label du WIFI.....</i>	<i>55</i>

<i>Figure 4.6 : Les entrées / sorties du simulateur NS</i>	59
<i>Figure 4.7 : exemple de fichier de trace</i>	61
<i>Figure 4.8 : topologie avec risque de collision</i>	68
<i>Figure 4.9 : Exemple de transmission DCF appliquant le Backoff</i>	71
<i>Figure 4.10 : Algorithme du DCF</i>	72
<i>Figure 4.11 : L'usage du RTS/CTS et du NAV</i>	73
<i>Figure 4.12 : Taux de perte des messages acheminés par inondation</i>	75
<i>Figure 4.13 : Taux des rejets des messages acheminés par inondation</i>	75
<i>Figure 4.14 : Taux de perte des messages acheminés par inondation avec intervalles entre les émissions</i>	77
<i>Figure 4.15 : Temps de transmission des messages par inondation</i>	78
<i>Figure 4.16 : Consommation d'énergie par chaque nœud durant l'acheminement de données d'un prélèvement</i>	89
<i>Figure 4.17 : distribution de la consommation par rapport au positionnement des nœuds</i>	80
<i>Figure 4.18 : Taux de messages redondants</i>	81
<i>Figure 4.19 : Taux de transmissions utiles à l'acheminement de données</i>	81
<i>Figure 4.20 : Taux de rejets de messages acheminés par inondation avec intervalles entre les émissions</i>	83
<i>Figure 4.21 : disposition des nœuds multisondes dans le champ</i>	85
<i>Figure 4.22 : Taux de rejets de messages acheminés par inondation avec des capteurs multisondes</i>	86
<i>Figure 4.23 : Taux de perte des messages acheminés par inondation avec des capteurs multisondes</i>	87
<i>Figure 4.24 : Figure 4.24 : graphe de temps de transmission de messages par inondation avec des capteurs multisondes</i>	88
<i>Figure 4.25 : Agrandissement des variations périodiques au temps de transmission</i>	90
<i>Figure 4.26 : Forme générale du graphe du temps de transmission</i>	91

<i>Figure 4.27 : Consommation d'énergie par chaque nœud durant l'acheminement de données d'un prélèvement</i>	91
<i>Figure 4.28 : Agrandissement des variations périodiques dans la consommation d'énergie</i> ..	92
<i>Figure 4.29 : Forme générale du graphe de consommation d'énergie</i>	92
<i>Figure 4.30 : Disposition de la consommation sur le champ</i>	93
<i>Figure 4.31 : Redondance des messages au niveau du nœud Sink</i>	94
<i>Figure 4.32 : Taux de perte des messages acheminés par le DSDV</i>	98
<i>Figure 4.33 : Nombre de sauts effectués par chaque message pour atteindre le sink</i>	99
<i>Figure 4.34 : Nombre de sauts par chaque message selon la position de sa source dans le champ</i>	100
<i>Figure 4. 35 : Temps de transmission des messages par DSDV</i>	100
<i>Figure 4.36 : consommation des nœuds en DSDV</i>	101
<i>Figure 4.37 : Taux de transmission de tables de routage et leurs mises à jour</i>	102
<i>Figure 4. 38 : Taux de perte des messages acheminés par l'AODV</i>	104
<i>Figure 4.39 : Temps de transmission de messages par AODV</i>	105
<i>Figure 4.40 : Temps de transmission de messages par AODV</i>	105
<i>Figure 4.41 : Consommation des nœuds en AODV</i>	106
<i>Figure 4.42 : Comparaison des taux de fiabilité</i>	109
<i>Figure 4.43 : Comparaison des temps de transmission</i>	110
<i>Figure 4.44 : Consommation journalière d'énergie par architecture</i>	111
<i>Figure 4.45 : Estimations du coût des deux topologies</i>	111
<i>Figure 4.46 : Une électrovanne prenant en charge un champ entier</i>	112
<i>Figure 4.47 : Une électrovanne par tuyau d'irrigation</i>	113

Tableaux

Tableau 2.1: comparaison RCSF Vs Ad Hoc 32

Tableau 4.1 : Portée des équipements 802.1163

Tableau 4.2 : le nombre des messages acheminés avec plusieurs sauts83

Tableau 4.3 : le nombre des messages acheminés avec plusieurs sauts86

Introduction

L'évolution qu'a connue le domaine de la technologie des systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS) et la communication sans fil, a rendu possible le développement de capteurs multifonctionnels pouvant être utilisés dans divers domaines avec des coûts réduits et une consommation optimale de l'énergie. Les systèmes informatiques qui constituent les réseaux de capteurs sans fil - RCSF - (Wireless Sensors Networks – WSN) sont fortement contraints. Les récentes avancées dans le monde de la (MEMS) et des technologies sans-fil ont permis de développer des capteurs de petite taille, dotés de capacités de traitement et de modes de communication sans fil par diffusion radio généralement à portée réduite. Ce concept de capteur miniature encourage l'idée des réseaux de capteurs basés sur un effort collaboratif d'un grand nombre de nœuds (allant jusqu'à des milliers), cette branche de réseau mobile offre des solutions économiquement intéressantes pour la surveillance à distance et le traitement des données dans des environnements complexes.

Les réseaux de capteurs représentent une grande avancée par rapport aux capteurs classiques et voient leur application dans des domaines aussi variés que : la santé, l'agriculture, la surveillance dans les milieux hostiles à la présence humaine comme les réacteurs nucléaires ou les raffineries, l'activité sismique, la détection de mouvements, notamment ceux des ennemis dans un champ de bataille, etc.

Toujours est-il, la Qualité de Service (robustesse, durée de vie et fiabilité) d'un RCSF est très fortement dépendante des ressources matérielles mises en jeu (densité des capteurs, consommation énergétique, mode de transmission et intelligence embarquée des capteurs). La conception d'un RCSF doit donc permettre d'optimiser les protocoles de communication ainsi que les ressources matérielles afin d'atteindre une qualité de service donnée. Le développement de ces réseaux de capteurs

constitue donc très certainement une prochaine étape dans l'évolution des technologies de l'information.

L'environnement mobile offre beaucoup d'avantages par rapport à l'environnement habituel. Cependant de nouveaux problèmes peuvent apparaître, ces derniers sont causés par les nouvelles caractéristiques du système. Les solutions conçues pour les systèmes avec uniquement des sites statiques, ne peuvent pas donc être utilisées directement dans un environnement mobile. Notre étude va porter sur l'élaboration de nouvelles solutions qui doivent être conçues pour s'adapter aux limitations qui existent, ainsi aux facteurs qui rentrent dans le jeu lors de la conception de ce système dynamique.

Chapitre I

Etat de l'art et problématique

Depuis quelques décennies, le besoin d'observer et de contrôler des phénomènes physiques tels que la température, la pression ou encore la luminosité ; est essentiel pour de nombreuses applications industrielles et scientifiques.

Dans le domaine de l'écologie, la surveillance des polluants de la couche d'Ozone, comme le NO₂ ou encore le CO₂, pourrait considérablement augmenter la qualité de vie dans les villes.

Aujourd'hui, grâce aux récents progrès des technologies sans fil, Les réseaux de capteurs sans fil (*Wi reless Sensor Networks*) sont employés pour récupérer ces données environnementales.

1. L'eau : une ressource précieuse

L'eau est un enjeu majeur au cœur des considérations environnementales. Sa consommation a été multipliée par six au cours du XX^e siècle. La rapidité de cette évolution n'est pas sans conséquence sur les modes de vie urbaine et rurale, ainsi que sur l'environnement en général.

1.2. Pourquoi se consacrer aux problématiques de l'eau ?

- Parce qu'il semble que nous soyons arrivés à une période charnière de la gestion des ressources en eau de notre planète.
- Parce que les inquiétudes montent sur la capacité de l'humanité à faire face aux pénuries d'eau qui s'annoncent.
- Parce que des solutions existent, qui passent le plus souvent par une coopération responsable entre les différents acteurs publics et privés. Et puis, et c'est la grande nouveauté de ce début de 21^e siècle, parce que chacun d'entre nous peut maintenant s'impliquer dans la préservation des ressources en eau.

1.3. Préserver l'eau

L'eau est l'une des plus grandes richesses de la planète mais aussi une des plus mal exploitées. Il s'agit de faire prendre conscience aux citoyens des pays développés qu'ils sont aussi concernés à moyen terme par la pénurie d'eau et la nécessité d'une gestion responsable de celle-ci. Le constat est souvent alarmant, mais pas désespéré. Quand des acteurs économiques, comme les agriculteurs ou les responsables d'espaces verts, doivent leur survie économique au maintien de la disponibilité de l'eau ou à son prix encore raisonnable, il leur est urgent de réagir pour que le rendement des terres soit amélioré tout en diminuant la consommation d'eau.

1.4. Des volumes d'eau disponibles en baisse, une consommation en hausse

La quantité d'eau douce disponible par personne décroît rapidement. En outre, en raison de nombreux autres facteurs, la consommation individuelle d'eau douce est en pleine expansion. La consommation mondiale double tous les vingt ans, soit deux fois plus vite que la population humaine. Chaque cabinet de toilettes utilise 18 litres d'eau à chaque utilisation. Et pourtant, en dépit de cette explosion à l'échelle individuelle, les ménages et les municipalités ne consomment que 10% de toute l'eau utilisée.

L'industrie puise une part considérable des réserves mondiales d'eau douce : sa consommation représente 20 à 25% de la consommation totale. De plus, ses exigences ne cessent de croître. Si la tendance persiste, il est prévu que, en 2025, les besoins en eau de l'industrie auront doublé ^[1].

Mais c'est à l'irrigation pour l'agriculture qu'est consacrée la plus grande partie de l'eau utilisée par les êtres humains, soit les 65 à 70% restants. 50% de cette irrigation sont consacrés au maïs. C'est pourquoi Ramel Ntondéle a décidé de s'attaquer à ce problème.

1.5. Tension du sol

Lorsque la tension du sol atteint un certain niveau, les plantes ne peuvent plus extraire d'eau, même s'il en reste dans le sol. Cela signifie que cette eau n'est pas disponible pour les plantes et la réaction est la suivante: leur croissance diminue ou s'arrête complètement. Il existe donc une zone de tension idéale afin d'obtenir une croissance et un rendement optimal. La mesure de la tension permet de prendre des décisions plus éclairées en ce qui concerne l'irrigation. Résultat: la fréquence et le volume de l'irrigation peuvent être facilement réglés pour maintenir la zone des racines dans des conditions idéales.

^[1] Statistiques UNESCO. <http://www.astrosurf.com>

1.6. Rendre l'irrigation efficace

L'irrigation efficace est, dans une moindre mesure, influencée par le type de technologie d'irrigation. Les changements de technologies visant à rendre plus efficace l'irrigation sont notamment le remplacement des canons mobiles par des bras mobiles. En outre, de nombreux nouveaux irrigateurs investissent dans l'irrigation goutte-à-goutte plutôt que dans des technologies par aspersion ou autre, ce qui les pousse petit à petit vers l'innovation technologique et l'irrigation de précision.

1.7. Un système de gestion de l'irrigation sans fil

Pourquoi se priver alors que maintenant la technologie sans fil est couramment et efficacement utilisée? Le système de gestion de l'irrigation sans fil comprend des appareils de mesure de la tension du sol sans fil, c'est les capteurs tensiométriques sans fil, les informations récoltées sont directement transférées du champ à votre ordinateur, un système qui permet un meilleur contrôle sur les ressources hydriques ainsi que la bonne gestion de l'irrigation.

2. L'étude de la problématique

2.1. Problématique

Comme il est mentionné au paravent, un système de gestion d'irrigation sans fil serait la solution idéale pour pouvoir bien gérer nos ressources en eau, mais avant d'en arriver là, on doit aboutir à une bonne évaluation de ce réseau de capteurs qui sera d'un certain niveau de complexité vu qu'il est composé d'un nombre très important de capteurs. L'objectif qui reste à atteindre à travers cette évaluation est l'optimisation de l'exploitation de l'eau dans les plantations agricoles utilisant les techniques d'irrigation de précision notamment la technique d'irrigation par goutte à goutte. Ce qui nous met face à plusieurs défis de taille vu tous les problèmes rencontrés pour la préservation de cette ressource si précieuse.

2.2. Mode d'approche

L'évaluation va se faire sur un ensemble d'architecture (Fig.1.1) et ceci en étudiant leur faisabilité ainsi que leur coût et ceci selon trois axes :

- ✓ **La fiabilité** : la fiabilité d'un réseau se mesure sur des propriétés telles que la sûreté de fonctionnement, la disponibilité, ou la sécurité. Donc après avoir mis en place une architecture réseau, on doit être sûr qu'une information envoyé du nœud A doit être remise au nœud B avec un taux d'assurance satisfaisant et ceci dans un délai qui repend bien entendu a nos attentes.
- ✓ **Le temps de transmission** : c'est le temps mis par un message pour arriver de sa source à sa destination finale ce qui est exprimé en informatique par la latence (latency), ca se mesure en « ms » ou en « μ s ».
- ✓ **Le coût de réalisation** : c'est le coût de revient de la mise en place des architectures proposées selon les équipements, leurs maintenance ainsi que leur déploiement.

Chaque architecture sera évaluée d'après ses équipements spécifiques au transport de l'information (le réseau de transport) et les éléments des 3 couches basses utilisés (physique, liaison et réseau). Au niveau 1, il s'agit de déterminer les supports de transmission utilisés. Aux niveaux 2 et 3 il s'agit de définir les protocoles et algorithmes à mettre en œuvre. Une fois l'architecture complètement définie, il faudrait l'évaluer en termes de performance. Les critères de performance doivent être déterminés en se basant d'une part et d'autre part sur le domaine d'application des réseaux intenses. Dans ce contexte et comme a été mentionné les critères sont la faisabilité et le cout. Notre domaine d'étude travail sur l'optimisation de l'eau pour des plantations d'arbres fruitiers (Les oliviers dans notre cas).

L'intérêt a travers ce projet est de contrôler l'exploitation de l'eau à travers un réseau de capteurs d'humidité et un réseau d'actionneurs qui contrôlerait l'alimentation en eau de la surface à irriguée. Un ou plusieurs capteurs et actionneurs seraient placé au niveau de chaque arbre fruitier. Un capteur pourrait ainsi capter le niveau d'eau et l'état du système d'irrigation.

L'évaluation de performance sera faite en utilisant le simulateur de réseau NS2 [2].

Dans le domaine de la recherche, les réseaux de capteurs posent un certain nombre de défis scientifiques. Les chercheurs électroniciens sont confrontés à de nombreux challenges, au niveau de la taille des capteurs (miniaturisation maximale), mais aussi au niveau des performances (l'émission de messages la plus performante possible opposé à la consommation la moins importante). En informatique, les enjeux se situent au niveau du routage (détermination du chemin optimal entre deux points du réseau), des protocoles de communication (comme les protocoles TCP et IP de l'Internet) et des architectures logicielles. Toutes ces recherches vont dans le même sens : optimiser au maximum les performances d'un réseau de capteurs. En revanche chaque tentative d'amélioration d'un critère pose des problèmes majeurs sur un autre point.

Dans notre étude plusieurs défis sont présents, et parmi lesquels on cite :

- **Déployer un réseau peu coûteux** : Il s'agit de minimiser le coût d'installation, d'infrastructures ou de câblage en étudiant les différentes architectures une étude bien approfondie qui puisse refléter une bonne évaluation de ces dernières.
- **Tolérance aux pannes** : Si un lien est rompu par le départ d'un nœud du réseau, les autres sont capables de rétablir des nouvelles routes pour réparer la rupture et ceci grâce aux algorithmes de routage adéquats.
- **Possibilité de réseau dynamique** : Un ensemble de capteurs avec possibilité de futurs déplacements peut créer un réseau local mobile. Ou par exemple on peut utiliser un réseau pour relier des capteurs autonomes mobile capables de se déplacer afin de satisfaire des besoins propre au réseau en question.
- **Une bande passante limitée** : Une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé (Les ondes radio). Ce partage fait que la bande passante réservée à un hôte est modeste.

[2] cet outil de simulation va être présenté en détail par la suite.

- **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.
- **Erreur de transmission :** Les erreurs de transmission radio sont plus fréquentes que dans les réseaux filaires cependant, reste à traiter tout les types d'erreurs plausibles.
- **Interférences :** Les liens radios ne sont pas isolés, deux transmissions simultanées sur une même fréquence ou, utilisant des fréquences proches peuvent interférer.
- **Routage dynamique :** Le routage dans les réseaux de capteurs demande d'énormes ressources pour véhiculer la signalisation indispensable aux réseaux fréquemment restructurés. Jusqu'à présent, la plupart des routages se sont montrés plutôt inaptes à faire face à un fort dynamisme.

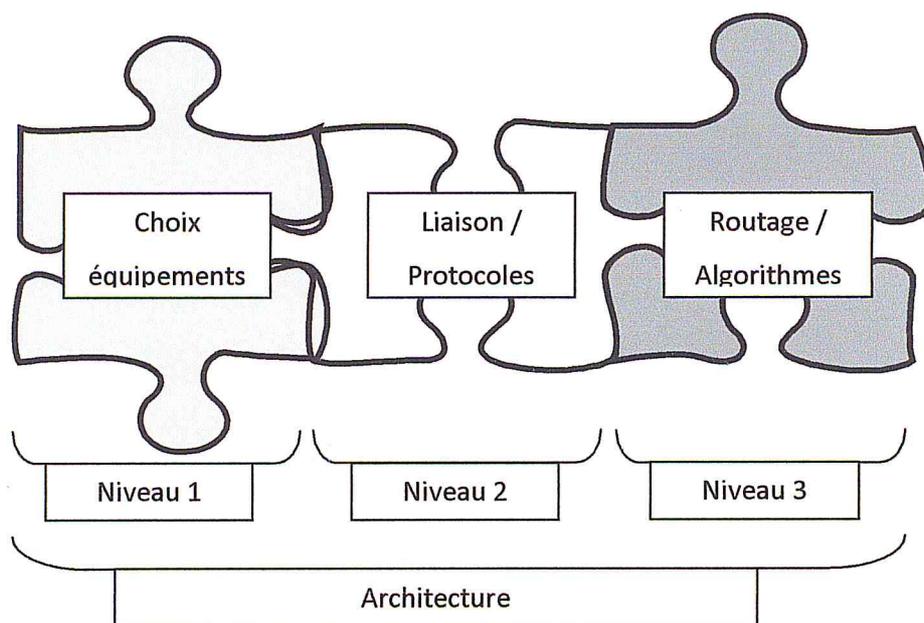


Figure 1.1 : L'élaboration d'une architecture réseau

Chapitre II

Les réseaux de capteurs

Les réseaux de capteurs sans fil - Wireless Sensor Networks (WSN) - sont considérés comme un type spécial de réseaux ad hoc. Les nœuds de ce type de réseaux consistent en un grand nombre de micro-capteurs capables de récolter et de transmettre des données comme celles environnementales d'une manière autonome. Dans ce chapitre on va s'intéresser à ces réseaux de capteurs intenses ainsi qu'à leur structure ce qui nous permettra d'approfondir notre étude.

1. Les capteurs...

1.1. Généralités et composition

Les acteurs industriels impliqués dans le domaine des réseaux de capteurs doivent être capables de développer rapidement des solutions fiables. Les entreprises qui conçoivent et déploient des réseaux de capteurs doivent le faire le plus rapidement possible pour faire face à la concurrence. L'enjeu économique lié à la conception des réseaux de capteurs est très important.

Cependant, concevoir un réseau de capteurs n'est pas une chose facile parce que ce sont des systèmes complexes qui combinent des caractéristiques propres aux systèmes distribués et aux systèmes embarqués.

En plus des contraintes accumulées par ces systèmes les applications auxquelles sont dédiés les réseaux de capteurs imposent des exigences supplémentaires de fiabilité et surtout d'économie d'énergie. A cause des difficultés d'accès aux nœuds, un problème matériel ou logiciel sera plus difficile à régler dans les réseaux de capteurs.

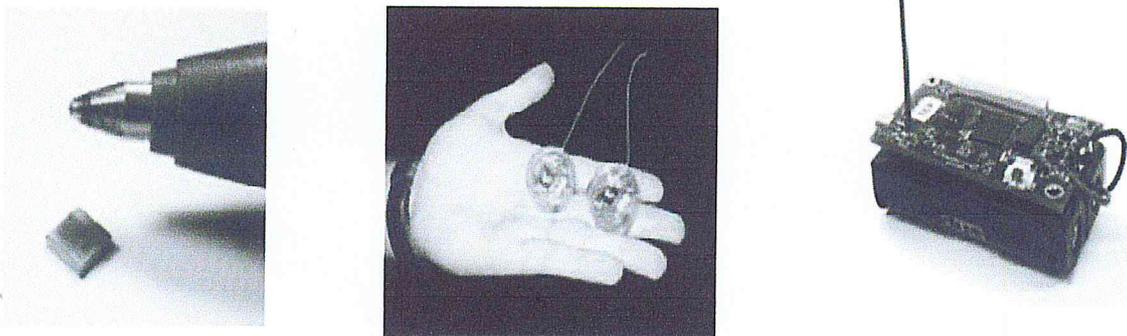


Figure 2.1 : Exemples des capteurs

Les récentes avancées dans les domaines des technologies sans-fil et électroniques ont permis le développement à faible coût de minuscules capteurs (Fig.2.1) consommant peu d'énergie (solution low-cost et low-power). Ces capteurs ont 3 fonctions :

- Capturer des données (de type son, vibration, lumière,...)
- Calculer des informations à l'aide de ces valeurs collectées
- Les communiquer à travers un réseau de capteurs

Un nœud capteur contient quatre unités de base ^[1] (Fig.2.2) : l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de transmission, et l'unité de contrôle d'énergie. Il peut contenir également, suivant son domaine d'application, des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation (GPS), ou bien un système générateur d'énergie (cellule solaire). On peut même trouver des micro-capteurs, un peu plus volumineux, dotés d'un système mobilisateur chargé de déplacer le micro-capteur en cas de nécessité.

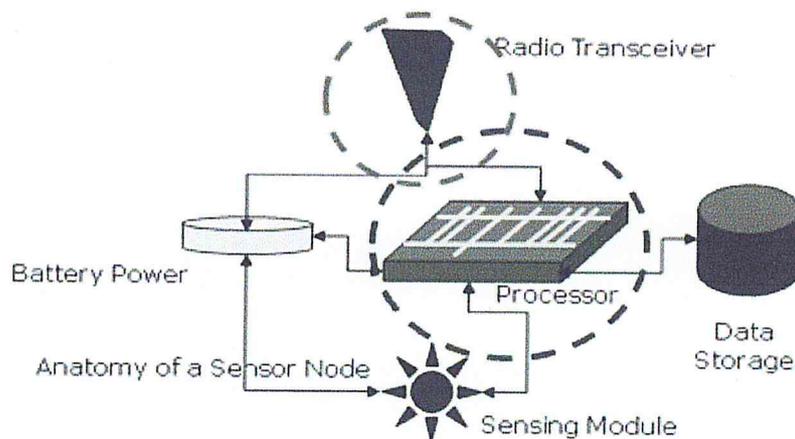


Figure 2.2 : Anatomie d'un capteur

L'unité de captage

L'unité de captage est généralement composée de deux sous-unités : le capteur lui-même et un convertisseur Analogique/Numérique. Le capteur est responsable de fournir des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.

^[1] Séverine Sentilles. *Architecture logicielle pour capteurs sans-fil en réseau*. 2006.

L'unité de traitement

L'unité de traitement comprend un processeur associé généralement à une petite unité de stockage et fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les micro-capteurs (TinyOS par exemple). Cette unité est chargée d'exécuter les protocoles de communications qui permettent de faire collaborer le nœud avec les autres nœuds du réseau. Elle peut aussi analyser les données captées pour alléger la tâche du nœud puits.

L'unité de transmission

Cette unité est responsable d'effectuer toutes les émissions et réceptions des données sur un medium sans fil. Elle peut être de type optique (comme dans les nœuds Smart Dust), ou de type radio-fréquence. Les communications de type optique sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes. Par conséquent, elles ne peuvent pas établir de liaisons à travers des obstacles. Les unités de transmission de type radio-fréquence comprennent des circuits de modulation, démodulation, filtrage et multiplexage ; ce qui implique une augmentation de la complexité et du coût de production du micro-capteur. Concevoir des unités de transmission de type radio-fréquence avec une faible consommation d'énergie est un véritable défi. En effet, pour qu'un nœud ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant. Cependant, l'énergie consommée serait importante. L'autre alternative serait d'utiliser de longues antennes, mais ceci n'est pas possible à cause de la taille réduite des micro-capteurs.

L'unité de contrôle d'énergie

Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique (généralement une batterie) pour alimenter tous ses composants. Cependant, en conséquence de sa taille réduite, la ressource énergétique dont il dispose est limitée et généralement irremplaçable. Dès lors, l'énergie est la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteurs, puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des micro-capteurs et du réseau en entier. L'unité de contrôle d'énergie constitue donc l'un des systèmes les plus importants. Elle est responsable de répartir l'énergie disponible aux autres modules et

de réduire les dépenses en mettant en veille les composants inactifs par exemple. Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé telles que les cellules solaires, afin d'étendre la durée de vie totale du réseau.

Il est important de noter que le nœud capteur peut contenir deux autres unités ^[2] qui sont :

L'unité de mobilité : dans les nœuds capteurs conçus pour être mobile sur le champ de captage

L'unité de localisation : si les nœuds sont faits pour être déployer aléatoirement.

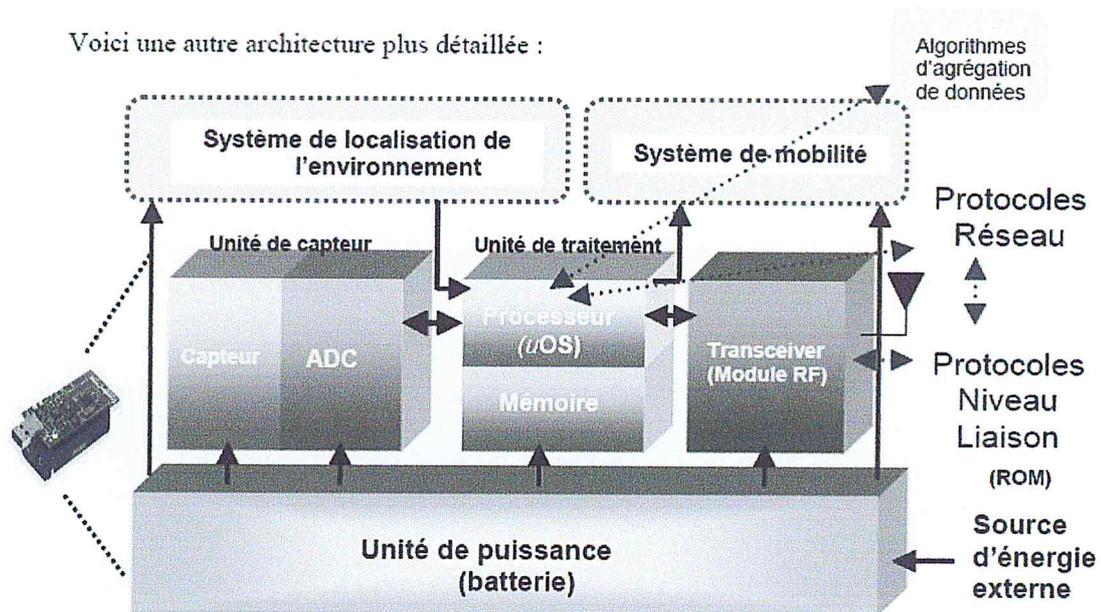


Figure 2.3 : Les couches d'un nœud capteur

Cette architecture en couche complète et détaillée d'un nœud capteur illustre les niveaux ROM et ceux programmables (Fig.2.3).

Les capteurs que l'on trouve actuellement sur le marché ont généralement la même architecture, ils sont composés de la façon suivante (Fig. 2.4) : un noyau

^[2] Ce modèle a été tiré du site <http://www.techno-science.net> et est utilisé ici pour illustrer ce qui est ROM et ce qui ne l'est pas.

central auquel viennent se greffer différents composants. Un capteur (Mote) est composé d'un processeur, une mémoire pour les données et une mémoire système (RAM et Flash), d'une radio dotée d'une antenne, d'une batterie et de détecteurs (capteur) dotés d'une diode électroluminescente (LED) et d'une interface ^[3].

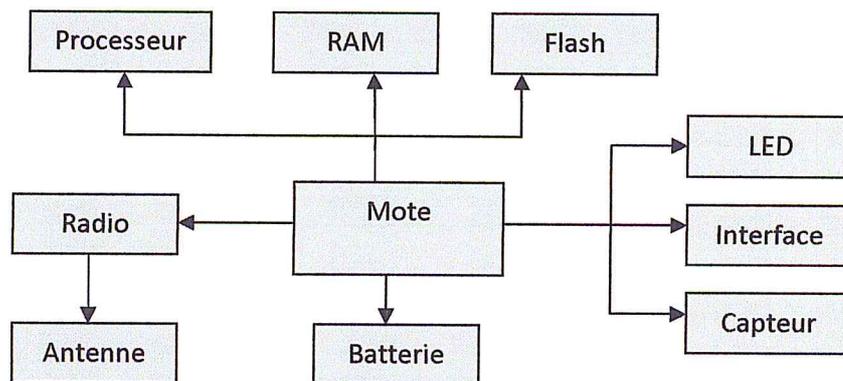


Figure 2.4 : Architecture d'un nœud capteur

Description :

- Mote (processeur, RAM et Flash) : On appelle généralement Mote la carte physique utilisant le système d'exploitation pour fonctionner. Celle-ci a pour cœur le bloc constitué du processeur et des mémoires RAM et Flash. Cet ensemble est à la base du calcul binaire et du stockage, temporaire pour les données et définitif pour le système d'exploitation.
- Radio et Antenne : Un capteur est conçu pour mettre en place des réseaux sans fil, les équipements étudiés sont donc généralement équipés d'une radio ainsi que d'une antenne afin de se connecter à la couche physique que constitue les émissions hertziennes.
- LED, Interface, capteur : Prévus pour mettre en place des réseaux de capteurs, on retrouve donc des équipements bardés de différents types de détecteurs et autres entrées.
- Batterie : Comme tout dispositif embarqué, ils disposent d'une alimentation

^[3] Yacine CHALAL. *Réseaux de capteurs sans fils*. 2008.

- autonome telle qu'une batterie, et parfois d'un panneau solaire pour permettre de recharger cette batterie, ce qui lui permet d'être disposé dans un endroit parfois inaccessible.

Bien sûr, des différences peuvent exister d'un capteur à un autre, et ceci selon le fabricant, on peut trouver ceux de mica, mica2 ou TelosBe de Crossbow

Le domaine des capteurs se dirige donc vers un grand essor et de très nombreux nouveaux produits risquent d'inonder le marché durant les prochaines années. D'autant plus que des technologies Open Source s'associent à ce succès avéré, comme par exemple TinyOS qui a été développé à l'Université de Berkeley.

1.2. Les états d'un capteur

Un capteur est initialisé avant toute utilisation, c'est l'état Initiale. Puis il fonctionne selon trois modes :

- le mode Actif où il exécute une fonction ou transmet un message.
- le mode écoute (Idle) où il est seulement à l'écoute d'éventuels messages à recevoir.
- le mode veille (Sleep) où il est en veille. Enfin il se met dans l'état Stop lorsque la batterie est vide ou qu'il est mis hors tension (bouton OFF).

Lorsqu'il est actif, le capteur peut envoyer et recevoir des messages (et seulement recevoir s'il est dans l'état (Idle). La transmission des messages connaît trois états. Avant toute transmission, le module de communication du capteur (la radio) doit être dans l'état Idle, c'est-à-dire qu'aucune transmission n'est en cours sur le réseau. Le réseau doit être vide de message. Après quoi le capteur peut soit envoyer soit recevoir un message (Fig.2.5).

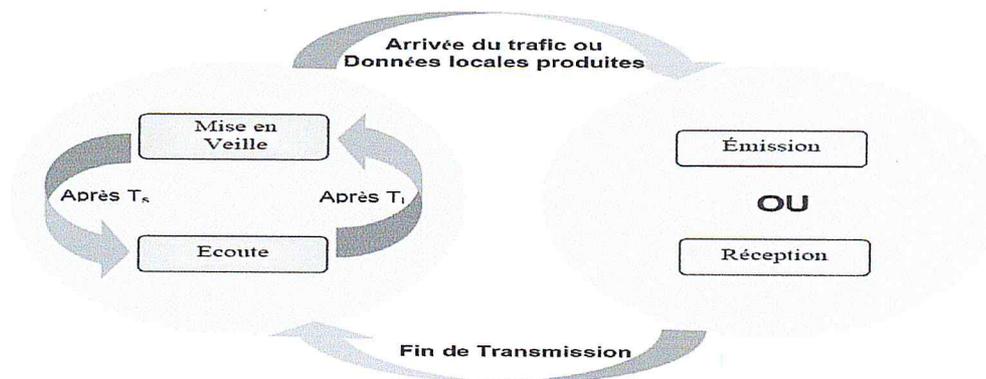


Figure 2.5 : Les états d'un capteur

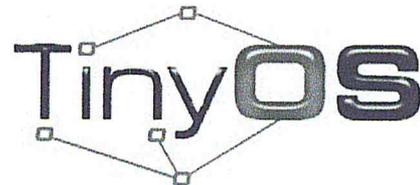


Un capteur ne peut pas envoyer et recevoir des messages simultanément. Il fonctionne en half duplex, c'est-à-dire qu'il ne fait qu'une transmission à la fois.

1.3. TinyOS...un vrai système d'exploitation libre

TinyOS est un système d'exploitation Open Source conçu pour les capteurs embarqués sans-fil. Il est actuellement utilisé par plus de 500 universités et centres de recherche dans le monde

[4]. La réalisation de programmes sur cette plate-forme s'effectue exclusivement en NesC (dialecte du C). La particularité principale de cet OS est sa taille extrêmement réduite en termes de mémoire (quelques kilo-octets).



Cette plate-forme logicielle ouverte et une série d'outils développés par l'Université de Berkeley est enrichie par une multitude d'utilisateurs. En effet, TinyOS est le plus répandu des OS pour les réseaux de capteurs sans-fil. Il est utilisé dans les plus grands projets de recherches sur le sujet (plus de 10.000 téléchargements de la nouvelle version). Un grand nombre de ces groupes de recherches ou entreprises participent activement au développement de cet OS en fournissant de nouveaux modules, de nouvelles applications,...

[4] Yacine CHALAL. Op. Cit.

Cet OS est capable d'intégrer très rapidement les innovations en relation avec l'avancement des applications et des réseaux eux même tout en minimisant la taille du code source en raison des problèmes inhérents de mémoire dans les réseaux de capteurs. La librairie TinyOS comprend les protocoles réseaux, les services de distribution, les drivers pour capteurs et les outils d'acquisition de données.

Rappelons que pour bien accomplir sa mission, un capteur aurait besoin d'un OS garantissant les points suivant :

- Image mémoire petite
- Efficacité en calcul et consommation d'énergie
- La communication est fondamentale
- Construction efficace d'applications

TinyOs est basé sur quatre grandes propriétés qui font que ce système d'exploitation s'adapte particulièrement bien aux systèmes à faible ressources :

- **Évènementiel** : Le fonctionnement d'un système basé sur TinyOS s'appuie sur la gestion des évènements se produisant. Ainsi, l'activation de tâches, leur interruption ou encore la mise en veille du capteur s'effectue à l'apparition d'évènements, ceux-ci ayant la plus forte priorité. Ce fonctionnement évènementiel (eventdriven) s'oppose au fonctionnement dit temporel (timeddriven) où les actions du système sont gérées par une horloge donnée.
- **Non préemptif** : Le caractère préemptif d'un système d'exploitation précise si celui ci permet l'interruption d'une tâche en cours. TinyOS ne gère pas ce mécanisme de préemption entre les tâches mais donne la priorité aux interruptions matérielles. Ainsi, les tâches entre elles ne s'interrompent pas mais une interruption peut stopper l'exécution d'une tâche.
- **Pas de temps réel** : Lorsqu'un système est dit « temps réel » celui-ci gère des niveaux de priorité dans ses tâches permettant de respecter des échéances données par son environnement. Dans le cas d'un système strict, aucune échéance ne tolère de dépassement contrairement à un système temps réel

ou. TinyOS se situe au-delà de ce second type car il n'est pas prévu pour avoir un fonctionnement temps réel.

- **Consommation** : TinyOS a été conçu pour réduire au maximum la consommation en énergie du capteur. Ainsi, lorsqu'aucune tâche n'est active, il se met automatiquement en veille.

2. Les réseaux Ad Hoc

2.1. Aperçu

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont avant tout des réseaux ad hoc même pour les topologies utilisant des techniques hiérarchiques. Le modèle ad-hoc sera utilisé par le niveau supérieur de l'hierarchie ; pour cela avant de parler des RCSF on commencera par définir les réseaux ad hoc afin de montrer les spécificités des RCSF par rapport à ces derniers.

Definition ^[5] Le terme « ad hoc » est une locution d'origine latine qui signifie « qui convient au sujet, à la situation. » On parle donc de réseaux auto -adaptatifs (capables de s'organiser par eux-mêmes). Une autre lecture de la définition peut signifier une propriété d'universalité de ce moyen de communication, comme si ce procédé pouvait satisfaire tous les besoins en termes de communication entre objets mobiles.

Les Réseaux mobiles ad hoc appartiennent à une catégorie de réseaux sans fil qui n'a pas besoin d'infrastructure, chaque nœud jouant le rôle de l'hôte et du routeur au même temps. Les équipements mobiles dans ces réseaux sont généralement de petites tailles (PC portable, PDA, ...) d'où les contraintes de ressources en terme de mémoire et de batteries.

Un réseau ad hoc, appelé généralement MANET (Mobile Ad hoc NETWORK), est un ensemble d'hôtes mobiles (appelés aussi nœuds). C'est un réseau peer-to-peer, *i.e.*, il permet à deux nœuds qui sont à portée radio l'un de l'autre (conditions appropriées de propagation radio) de rentrer directement en communication. Au sein de ces réseaux où chaque nœud est considéré comme machine et routeur en même temps, le chemin entre chaque paire de nœuds (source et destination) peut inclure plusieurs autres nœuds (sauts) d'où l'appellation de réseau multi-sauts. Dans un réseau ad hoc, les nœuds ne se connaissent pas, chaque nœud connaît uniquement son identifiant, il ne connaît pas les identifiants de ses voisins et ne peut pas deviner la taille du réseau en terme de nombre de nœuds.

^[5] Gérard Chalhoub. Réseaux de capteurs sans fil. 2009

A un instant t , un réseau ad hoc peut être modélisé par un graphe non orienté

$$G_t = (V_t, E_t).$$

où " V_t " représente l'ensemble des nœuds (les unités mobiles),

et " E_t " représente l'ensemble des liens existants entre ces nœuds

$$\text{Si } e = (u, v) \in E_t.$$

Cela veut dire que les nœuds u et v sont en mesure de se communiquer directement à l'instant t (Fig.2.6).

Ces réseaux sont caractérisés par la faible bande passante qui diminue encore en raison des interférences des signaux ainsi que la déplétion sur le canal (Channel Fading).

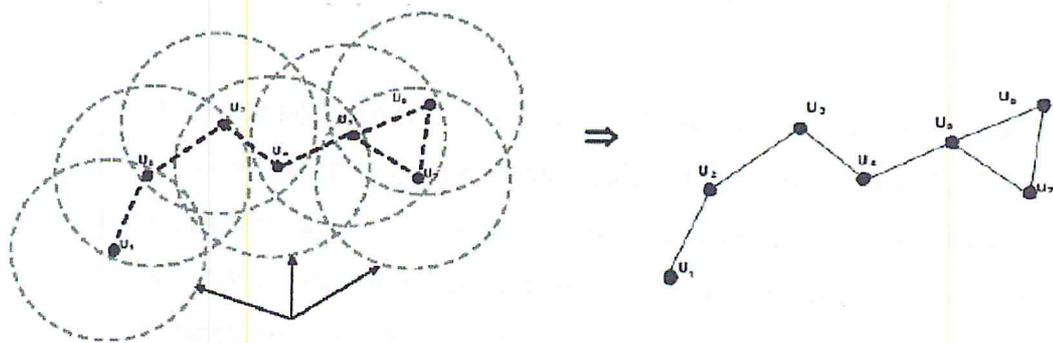


Figure 2.6 : Graphe modèle du réseau

Les militaires sont Les premiers à avoir effectué des travaux sur ce type de réseaux. (La capacité à se reconfigurer et à rester opérationnel en cas de perte de certains mobiles étant un avantage considérable), mais leur champ d'application est beaucoup plus vaste.

Par exemple, ils peuvent être utilisés dans des endroits ne possédant pas d'infrastructures ou dans lesquels les infrastructures sont trop chères ou difficiles à étendre ou parce que la durée d'installation du réseau ne justifie pas de câblage à demeure. De plus, avec l'apparition des technologies sans fil (Bluetooth, autre

La topologie des réseaux ad hoc étant volatile, variable et éphémère, chacun des membres peut quitter le groupe de communication sans avertissement. Ainsi, le fait qu'un nœud soit absent du réseau est un état normal, qui ne doit pas gêner les autres participants. Cette caractéristique doit être prise en compte à chaque couche du modèle réseau OSI ; le routage doit se faire dans la mesure du possible, de manière transparente, tout en s'adaptant aux déficiences d'une partie du réseau (en trouvant des chemins alternatifs par exemple).

Le choix du type de routage est nécessaire pour améliorer la fiabilité de transmission. Certains protocoles de routage doivent être adoptés en prenant en compte la mobilité des nœuds ainsi que le manque des ressources. Puisque plusieurs applications de ces réseaux nécessitent la collaboration et la communication parmi les groupes de nœuds, les protocoles de routage multicast jouent un rôle très important. Les communications multicast sont plus efficaces que les communications unicast dans un environnement radio car elles profitent de la propriété de diffusion dans le canal radio et donc économisent l'utilisation de la bande passante ainsi que la consommation d'énergie.

2.2. Réseaux Ad Hoc - caractéristiques

Les réseaux ad hoc sont considérés comme des systèmes autonomes sans l'utilisation d'une infrastructure fixe. Un groupe d'utilisateurs équipé de cartes d'interfaces pour réseaux sans fil suffit pour former un réseau ad hoc. Un utilisateur peut se connecter ou se déconnecter au réseau d'une manière complètement dynamique et transparente ^[6]

- **L'absence d'infrastructure** : Les réseaux ad hoc se distinguent des autres réseaux mobiles par la propriété d'absence d'infrastructures préexistantes et de tout genre d'administration centralisée. Les hôtes mobiles sont responsables de l'établissement et du maintien de la connectivité du réseau d'une manière continue.

^[6] Nadjib BADACHE. *Le routage dans les réseaux mobiles Ad-Hoc.*

- **Déployer un réseau ad hoc est peu coûteux** : Il n'y a aucun coût d'installation ou de câblage. La simple présence des hôtes possédants des interfaces de communication radio forme le réseau. On peut créer des réseaux provisoires, par exemple pour couvrir une manifestation.
- **Réseau tolérant aux pannes** : Si un lien est rompu par le départ d'un nœud du réseau, les autres sont capables de rétablir de nouvelles routes pour réparer la rupture.
- **Déployer un réseau ad hoc est rapide** : Il est possible d'utiliser un réseau ad hoc dans des situations d'urgences, par exemple organisation des secours lors d'une catastrophe naturelle.
- **Il est possible de créer un réseau itinérant** : Un ensemble de personnes se déplaçant peut créer un réseau local mobile. On peut, par exemple, utiliser un réseau ad hoc pour relier les camions d'un convoi routier au cours d'un trajet.
- **Une bande passante limitée** : Une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé (Les ondes radio). Ce partage fait que la bande passante réservée à un hôte est modeste.
- **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.
- **Erreur de transmission** : Les erreurs de transmission radio sont plus fréquentes que dans les réseaux filaires.
- **Interférences** : Les liens radios ne sont pas isolés, deux transmissions simultanées sur une même fréquence ou, utilisant des fréquences proches peuvent interférer.
- **Une sécurité physique limitée** : Les réseaux mobiles ad hoc sont plus touchés par le paramètre 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.

- **Routage dynamique :** Le routage dans les réseaux ad hoc demande d'énormes ressources pour véhiculer la signalisation indispensable aux mouvements des nœuds. Jusqu'à présent, la plupart des routages ad hoc se sont montrés plutôt inaptes à faire face à une forte mobilité. Cette problématique est au cœur des travaux de recherches.
- **Nœuds cachés :** Ce phénomène est très particulier à l'environnement sans fil (Fig.2.7). Les nœuds B et C ne s'entendent pas, à cause d'un obstacle qui empêche la propagation des ondes. Les mécanismes d'accès au canal vont permettre alors à ces nœuds de commencer leurs émissions simultanément. Ce qui provoque des collisions au niveau du nœud A.
- **Nœuds exposés :** le problème du nœud exposé (Fig.2.8) est l'opposé du problème précédent (Nœud caché). Ici, le nœud A transmet une trame à D. Pendant ce temps, B désire communiquer avec C et écoute le canal. Il entend A (car il est dans sa portée de communication) et ne transmet pas donc sa trame à C. Or, cette transmission ne brouillerait pas le mobile D car il n'est pas dans la portée de B. Le débit utile est donc diminué car B n'émet pas alors qu'il aurait pu le faire.

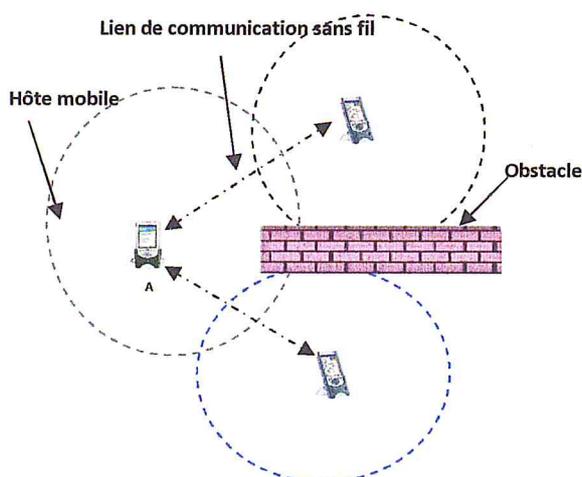


Figure 2.7 : Nœuds cachés

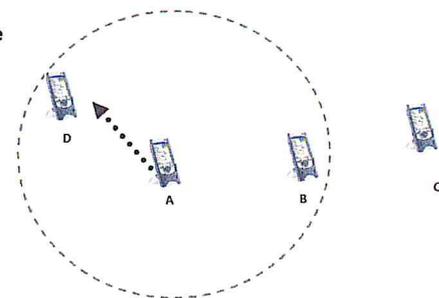


Figure 2.8 : Nœuds exposés

3. Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)

3.1. Aperçu

Definition Un réseau de capteurs (ou senseurs) est un système réparti qui se compose d'un grand nombre de minuscules senseurs nommés «nœuds de capteurs » avec des émetteurs-récepteurs de faible puissance avec unité centrale de traitement. Elle est un déploiement d'un grand nombre de petits équipements autonomes (appelés encore senseurs) dans lesquels, chaque senseur peut sentir, calculer, envoyer/recevoir des données pour rassembler des informations dans le but de satisfaire une tâche concrète. Ces derniers ne sont pas chers ^[7].

Dans un RCSF, la position des nœuds n'est pas forcément prédéterminée, ils peuvent être dispersés aléatoirement ou déployer d'une façon prédéterminée à travers une zone géographique, qui définit le terrain d'intérêt pour le phénomène capté. Les données captées sont acheminées grâce à un routage multi-saut à un nœud considéré comme un "point de collecte", appelé nœud puits ou (sink). Ce dernier peut être connecté à l'utilisateur du réseau via Internet ou un satellite. Ainsi, l'utilisateur peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau, précisant le type de données requises et récolter les données captées par le biais du nœud puits (Fig.2.9) ^[8].

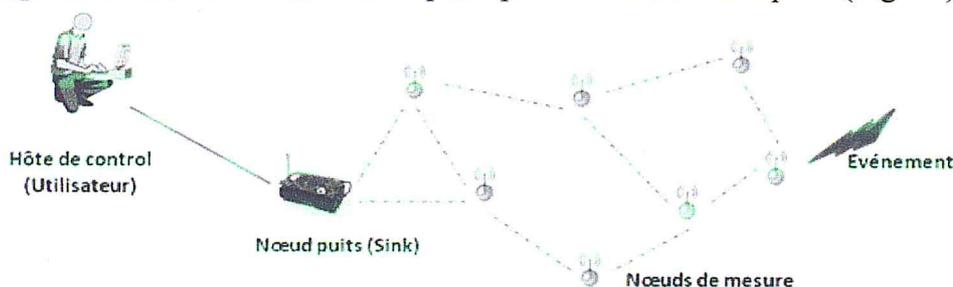


Figure 2.9 : Schéma générale d'un RCSF

Alors, si on s'intéresserait au composant d'un RCSF générique, on parlerait d'un grand nombre de nœuds capteurs dispersés dans le terrain d'intérêt appelé "champ de captage".

[7] Boubiche Djallel Eddine. *Protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans fil*.

[8] Dans cette figure l'hôte de control est facultative.

Les nœuds ont la possibilité de collecter les données sur le phénomène surveillé et envoyer les rapports de captage à un nœud spécial appelé *puits* (sink). Ce nœud est responsable, en plus de la collecte des rapports, de la diffusion des demandes sur les types de données requise aux capteurs via des messages de requêtes.

Un réseau de capteurs peut contenir plusieurs nœuds puits diffusant des intérêts différents. A titre d'exemple, un nœud puits peut demander à tous les capteurs se trouvant dans la région nord du champ de captage d'envoyer un rapport de température chaque minute, pendant qu'un autre peut être intéressé seulement par les hautes températures ($> 40^{\circ} \text{C}$) dans la région sud. Par conséquent, un capteur doit pouvoir stocker toutes les requêtes reçues, et les traiter séparément.

Les nœuds qui composent un RCSF sont soit posés à un endroit précis, soit dispersés aléatoirement (souvent déployés par voie aérienne à l'aide d'avions ou hélicoptères). Ce dispersement aléatoire des capteurs nécessite que le protocole utilisé pour les réseaux de capteurs possède des algorithmes d'auto organisation. 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).

3.2. RCSF – caractéristiques

Ces réseaux sont caractérisés par :

- ✓ Liaison sans fil : La nécessité de créer un réseau de communication hertzien ad-hoc dynamique entre les nœuds, tous les nœuds communiquent par ondes radio.
- ✓ La faible ou inexistance de Mobilité mais la topologie du réseau reste dynamique vu qu'elle peut changer rapidement, de façon aléatoire et non prédictive à cause des pannes ou d'arrêt de nœuds dont les batteries sont déchargées.
- ✓ Autonomie des nœuds : la consommation d'énergie constitue un problème majeur puisque ces derniers fonctionnent sur des batteries autonomes. Il est

important que les protocoles mis en place dans les réseaux ad hoc prennent en compte cette spécificité.

- ✓ Equivalence des nœuds du réseau : tous les nœuds sont équivalents, sans aucune centralisation.
- ✓ La densité des nœuds qui engendre des problèmes d'interférence
- ✓ déploiement peut être aléatoire : ce qui nécessite l'utilisation des techniques d'auto-organisation.

3.3. La couverture dan les RCSF

Definitions

Couverture : C'est la surface totale se trouvant en dessous de la marge de capture des données au moins d'un nœud (Fig.2.10).

Couverture d'un point : On dit qu'un capteur S_i couvre un point q si et seulement si la distance $d(q, s_i) \leq r_i$. La fonction de distance d peut être la fonction de distance euclidienne.

Couverture d'une région : On dit qu'un capteur couvre une région A si et seulement si pour chaque point q dans A , la distance $d(q, s_i) \leq r_i$.^[9]

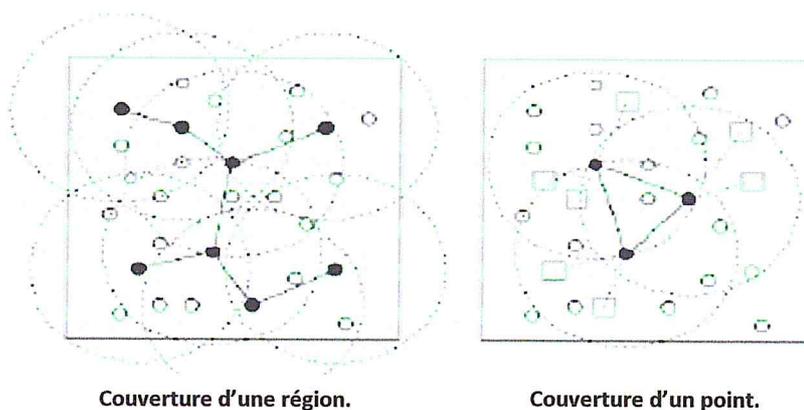


Figure 2.10 : Couverture.

^[9] Boubiche Djallel Eddine. *Op. Cit.*

3.4. Pourquoi des capteurs sans-fil ?

Dans un tel, l'utilisation du câble pour la communication des capteurs est souvent synonyme :

- de coûts élevés (coût du métal, temps d'installation, de démontage)
- de vulnérabilité (corrosion, étanchéité, usure, vandalisme.)
- de sensibilité à la foudre, à la CEM
- d'un nombre de capteurs limité et peu mobiles !

3.5. Domaines d'application des RCSF

Les nouvelles technologies permettent de réduire l'encombrement, le coût et la consommation d'énergie et d'augmenter la précision et les performances des capteurs, des processeurs et des circuits spécifiques. Un nombre très important de capteurs peut donc être envisagé, intégré et organisé en réseau selon le domaine d'application.

Ce qui fait que des nouveaux réseaux de capteurs viennent au secours de l'environnement (Fig.2.11) et de l'industrie grâce aux récents développements réalisés dans le domaine des techniques sans-fil (wireless).

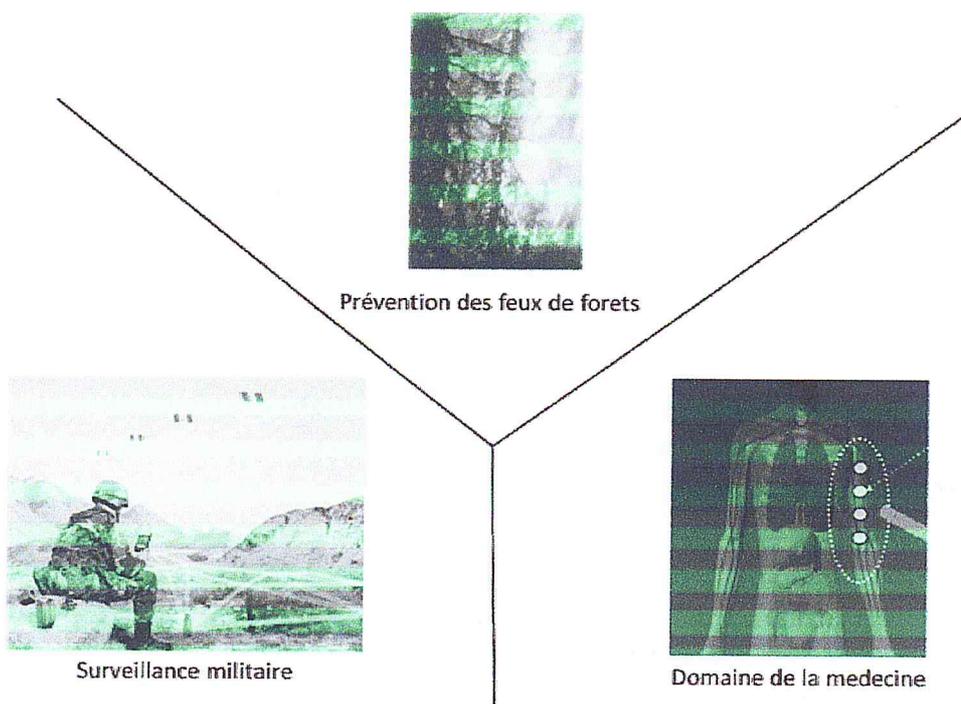


Figure 2.11 : Applications des RCSF

Parmi les nombreuses applications des RCSF on peut citer :

- Découvertes de catastrophes naturelles : On peut créer un réseau autonome en dispersant les nœuds dans la nature. Des capteurs peuvent ainsi signaler des événements tels que feux de forêts, tempêtes ou inondations. Ceci permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours.
- Détection d'intrusions : En plaçant, à différents points stratégiques, des capteurs, on peut ainsi prévenir des cambriolages ou des passages de gibier sur une voie de chemin de fer (par exemple) sans avoir à recourir à de coûteux dispositifs de surveillance vidéo.
- Applications métier : On pourrait imaginer devoir stocker des denrées nécessitant un certain taux d'humidité et une certaine température (min ou max). Dans ces applications, le réseau doit pouvoir collecter ces différentes informations et alerter en temps réel si les seuils critiques sont dépassés.
- Contrôle de la pollution : On pourrait disperser des capteurs au-dessus d'un emplacement industriel pour détecter et contrôler des fuites de gaz ou de produits chimiques. Ces applications permettraient de donner l'alerte en un temps record et de pouvoir suivre l'évolution de la catastrophe.
- Surveillance médicale : En implantant sous la peau de mini capteurs vidéo, on peut recevoir des images en temps réel d'une partie du corps sans aucune chirurgie pendant environ 24h. On peut ainsi surveiller la progression d'une maladie ou la reconstruction d'un muscle.
- Contrôle d'édifices : On peut inclure sur les parois des barrages des capteurs qui permettent de calculer en temps réel la pression exercée. Il est donc possible de réguler le niveau d'eau si les limites sont atteintes. On peut aussi imaginer inclure des capteurs entre les sacs de sables formant une digue de fortune. La détection rapide d'infiltration d'eau peut servir à renforcer le barrage en conséquence. Cette technique peut aussi être utilisée pour d'autres constructions tels que ponts, voies de chemins de fer, routes de montagnes, bâtiments et autres ouvrages d'art.

3.6. Les types d'applications dans les RCSF

La méthode de captage des données dans un RCSF dépend de l'application et de l'importance de la donnée. De ce fait, la RCSF peuvent être catégorisés comme time-driven, event-driven ou à la demande :

- ✓ **Application time-driven** ^[10]: un réseau time-driven est approprié pour des applications qui nécessitent un prélèvement périodique des données. Par exemple, cela est utile dans des applications de monitoring (feu, météo) afin d'établir des rapports périodiques.
- ✓ **Application event-driven** : dans des applications temps réel, les capteurs doivent réagir immédiatement à des changements soudains des valeurs captées. Un prélèvement périodique des données est inadapté pour ce type de scénarios. Pour cela, le protocole doit être réactif et doit donner des réponses rapides à l'occurrence d'un certains nombre d'évènements (Fig.2.12).

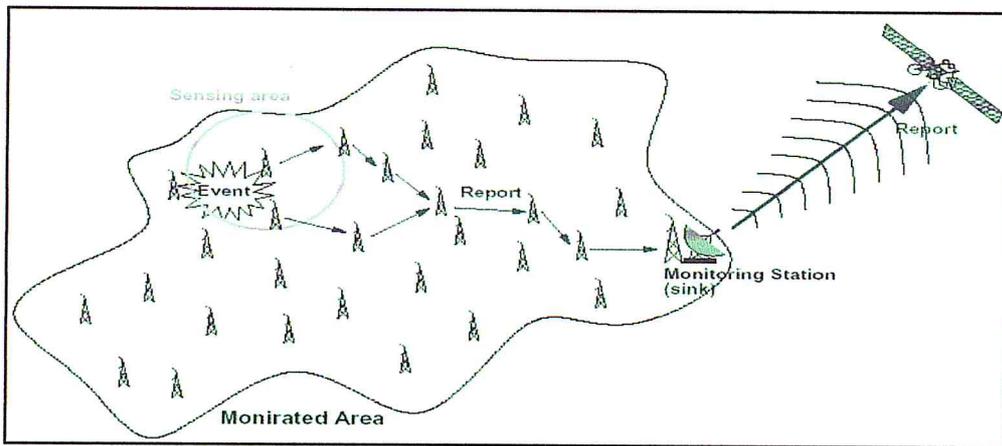


Figure 2.12: Application event-driven

- ✓ **Application orienté request/response** : C'est où les données d'un ensemble de nœuds ou de la totalité du champ de captage n'est transmises ou acquises qu'après la demande de la station terminale (Fig.2.13)

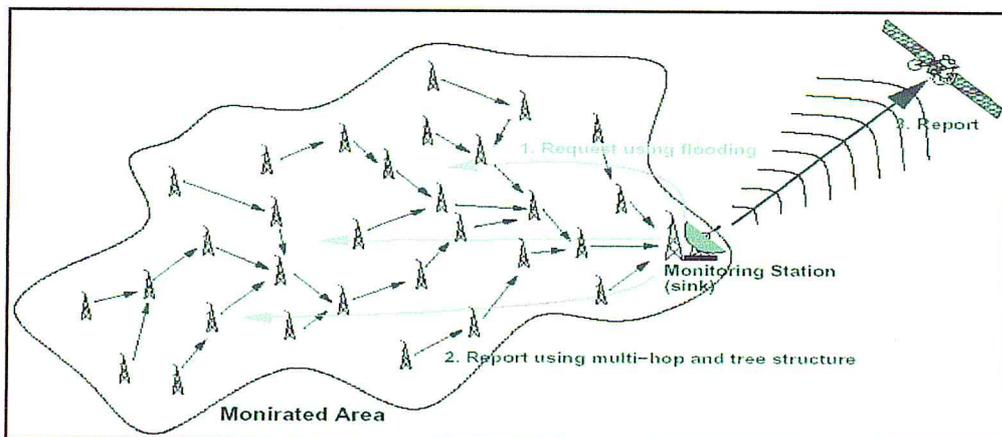


Figure 2.13: Application request/reponse

[10] c'est le type d'application au quel on va s'intéresser plus tard vu que c'est celui de notre application.

4. RCSF vs Réseaux Ad Hoc

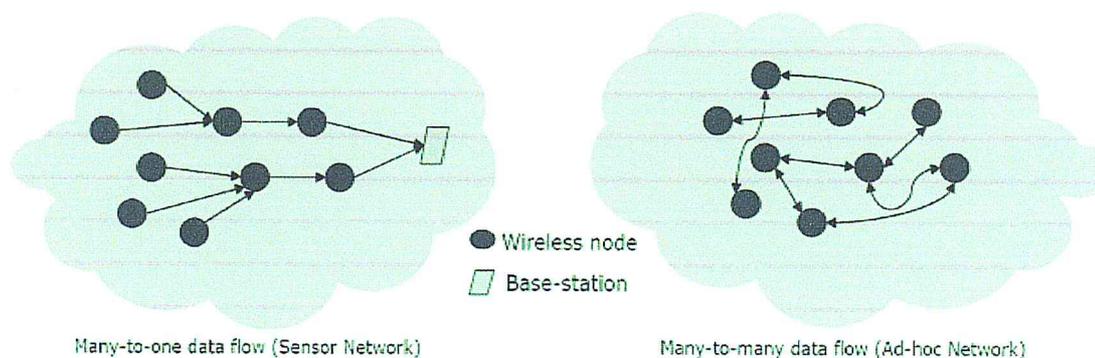


Figure 2.14: Many-to-one / Many-to-many data flow

Ce tableau présente une comparaison entre les réseaux de capteurs et les réseaux Ad Hoc :

<i>Réseaux de nœuds capteurs (RCSF)</i>	<i>Réseaux Ad hoc</i>
1. Objectif ciblé	1. Générique / communication
2. Les nœuds collaborent pour remplir un objectif	2. Chaque nœud a son propre objectif
3. Flot de données « Many-to-one »	3. Flot « Any-to-any »
4. Energie est un facteur déterminant	4. Débit est majeur
5. Utilisation du broadcast	5. Communication point à point

Tableau 2.1: comparaison RCSF Vs Ad Hoc

Chapitre III

Le domaine d'application

L'irrigation est une pratique ancestrale qui a permis le développement de l'agriculture jusque dans les régions les plus sèches. Que serait l'Égypte sans le Nil qui lui permet de nourrir son peuple ? Partout dans le monde où le climat la rend nécessaire, l'irrigation s'est développée.

En Europe par exemple, la question de l'irrigation est souvent traitée de façon polémique. Pourtant, l'eau n'y manque pas. Cependant cette eau est répartie inégalement dans le temps et sur le territoire et l'irrigation est une façon tout à fait pertinente d'utiliser cette eau. Encore faut-il pouvoir la distribuer au bon moment...

1. Notre domaine d'application

Notre domaine d'application est l'irrigation de précision (goutte à goutte) pour les arbres fruitiers, le pilotage de cette opération sera fait grâce à un réseau de capteurs de mesure de l'état hydrique du sol ; Un ou plusieurs capteurs et actionneurs ^[1] seraient placés au niveau de chaque arbre fruitier. Un capteur pourrait ainsi capter le niveau d'eau et l'état du système d'irrigation. Cette solution est très utile, surtout dans quelques circonstances, par exemple le Sud-ouest de l'Europe, bien que soumis au flux océanique, est très fortement concerné par le changement climatique qui accroît la variabilité des précipitations et augmente les besoins en eau lors des poussées chaudes de Sud de plus en plus fréquentes. On observe un décalage vers le Nord des contraintes hydriques qui amplifie le déficit moyen durant la période principale de culture d'avril à septembre, alors que la ressource en eau pluviale d'octobre à mars reste insuffisante sur tout sur le pourtour Méditerranéen, Si beaucoup d'irrigants connaissent des méthodes de pilotage de l'irrigation, peu les appliquent systématiquement, sauf lorsque leur ressource en eau est limitée, chère ou insuffisante. Pour certains c'est un guide, pour d'autres un moyen de se recalibrer ou décider le meilleur moment pour démarrer, arrêter et reprendre un tour d'eau, d'autres souhaitent une méthode simple pour passer de la mesure à une prise de décision optimisée. La grande majorité est consciente de la nécessité de mieux gérer une ressource limitée. Beaucoup attendent des pouvoirs publics des aides pour mettre en application des méthodes fiables et précises du pilotage de leur irrigation et peu se rendent compte qu'ils pourraient déjà commencer en finançant leur système sur les économies d'eau réalisées... Donc pour remédier à tous ces problèmes, on peut s'appuyer sur cette merveille technologique : les réseaux de capteurs.

1.1. Généralités sur la conduite de l'irrigation

Dose d'irrigation : La dose d'irrigation ^[2] correspond à la quantité d'eau nécessaire à la satisfaction des besoins en eau de l'arbre. Ces besoins sont variables en fonction du système d'irrigation en place

^[1] Les actionneurs seront traités plus tard dans ce qui suit.

^[2] AREFLH. *L'irrigation de précision pour une meilleure valorisation de la ressource en eau*. 2008.

$$\text{Equivalences : } 1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3/\text{ha} = 1 \text{ L/m}^2$$

Durée de l'irrigation : La durée de l'irrigation varie en fonction de la dose à appliquer et du débit d'eau par arbre.

$$\text{Durée (en heure)} = \text{Dose (en litres/arbre)} / \text{Débit par arbre (en litres/heure)}$$

Exemple >>>

Pour une dose de 0,8 mm à apporter à des oliviers espacés de 7 mètres sur le rang et 8 mètres sur l'entre-rang, chaque arbre étant équipé de 4 goutteurs de 4 litres/heure (Fig.3.1) : ^[3]

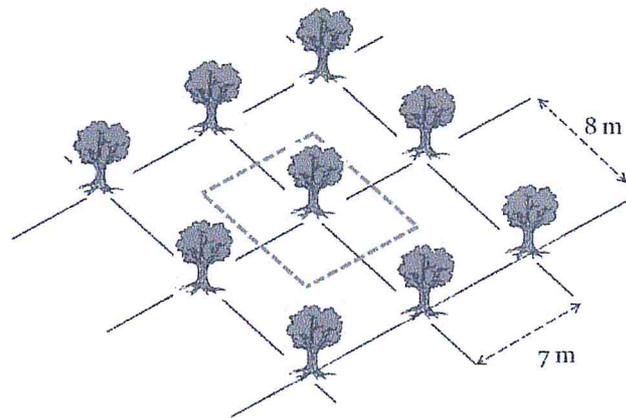


Figure 3.1 : champs d'oliviers

- Débit par arbre = 4 goutteurs x 4 L/h = 16 L/h
- Surface occupée par olivier = 7 mètres x 8 mètres = 56 m²
- Durée de l'irrigation = 0,8 mm x 56 m² / 16 L/h
= 2,8 heures = 2 heures et 48 minutes

Rmq : les oliviers sont séparés de 7 à 10 mètres.

1.2. Principe du pilotage selon le mode d'irrigation

Principe de l'irrigation en micro-aspersion

Le principe de la conduite de l'irrigation en micro-aspersion consiste à

^[3] Les distances de cet exemple seront retenues plus tard même lors de la simulation.

reconstituer le bulbe humide une fois que celui-ci est épuisé (Fig.3.2). La fréquence des arrosages varie entre une à deux fois par semaine selon la demande en eau, le sol rencontré et le type de micro-asperseur utilisé.

La micro-aspersion montre une efficacité de l'ordre de 85 %, voire 80 % en cas de vent : sur 100 litres d'eau apportés, 85 litres sont réellement profitables à l'olivier. Ainsi, pour déterminer les quantités d'eau à apporter par micro-aspersion à partir d'un bilan hydrique, les besoins en eau sont divisés par 0,85 ^[4].

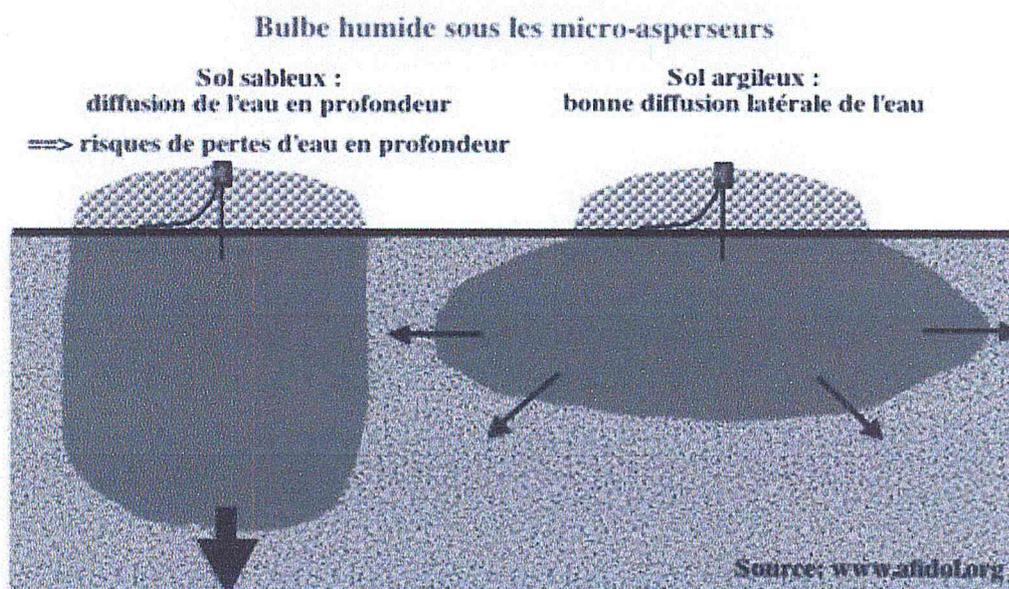


Figure 3.2 : Le principe de micro aspersion

Principe de l'irrigation en goutte-à-goutte

Le principe de la conduite de l'irrigation en goutte-à-goutte est de maintenir en permanence un bulbe humide sous les goutteurs durant la période d'arrosage (Fig.3.3). Pour cela, il est nécessaire d'irriguer tous les jours, voire deux fois par jour en sols sableux afin de limiter les pertes par percolation. Il est préférable que le bulbe ne s'assèche pas en raison des fortes quantités d'eau nécessaires à sa reconstitution.

En cas d'épisode pluvieux permettant de reconstituer plus de la moitié de la réserve facilement utile (RFU), l'irrigation peut être suspendue. Dans le cas contraire, les doses journalières sont réduites.

^[4] AFIDOL. *La conduite de l'irrigation*. <http://www.afidoltek.org>.

Le goutte-à-goutte présente une efficacité de l'ordre de 90 % : sur 100 litres d'eau apportés, 90 litres sont réellement profitables à l'olivier. Ainsi, pour déterminer les quantités d'eau à apporter par goutte-à-goutte à partir d'un bilan hydrique, il faut diviser les besoins en eau par 0,90.



Dans notre travail, on va se baser sur la technique du goutte-à-goutte afin d'apporter aux oliviers le meilleur apport hydrique.

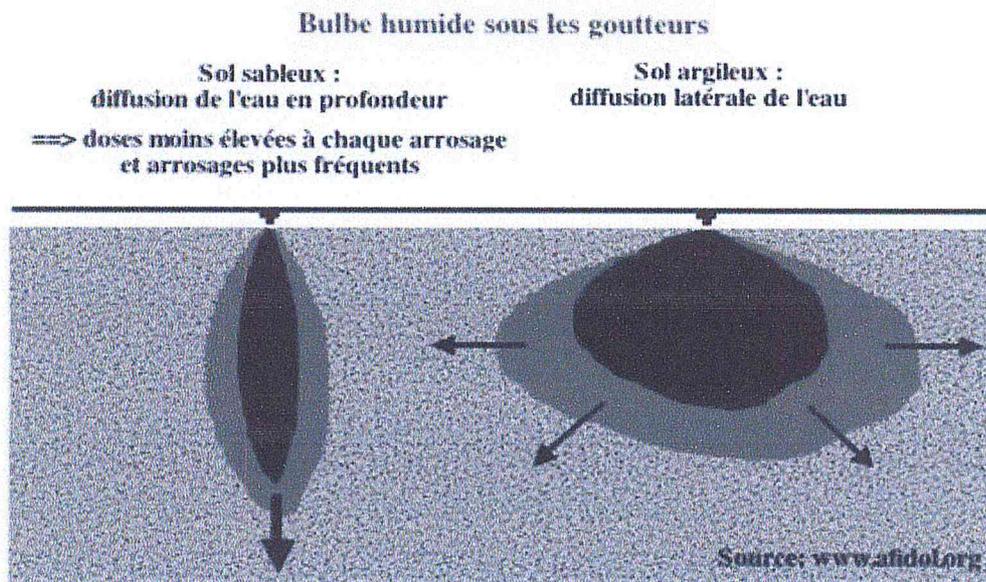


Figure 3.3 : Le principe du goutte-à-goutte

1.3. Pilotage de l'irrigation par bilan hydrique

Le bilan hydrique consiste à calculer la différence entre la consommation en eau de l'olivier et les disponibilités en eau sur une période établie afin d'évaluer les besoins en eau des oliviers :

$$\text{Besoins en eau} = \text{consommation en eau} - \text{disponibilités en eau}$$

Le bilan hydrique est une méthode intéressante dans les sens où il permet de prévoir l'évolution des besoins en eau des oliviers. Cependant, le pilotage de l'irrigation par bilan hydrique demeure délicat et limitée du fait de certaines imprécisions.

Exemple de détermination de la dose journalière en goutte-à-goutte >>>

Durant la seconde quinzaine de juin, quelle est la dose moyenne journalière à apporter aux oliviers si 10 mm de pluies ont été relevés dans le pluviomètre au 16 juin ^[5]:

- D'après le graphique ci-dessous, l'évapotranspiration réelle s'élève à 15 mm durant la seconde quinzaine de juin (Fig.3.4).

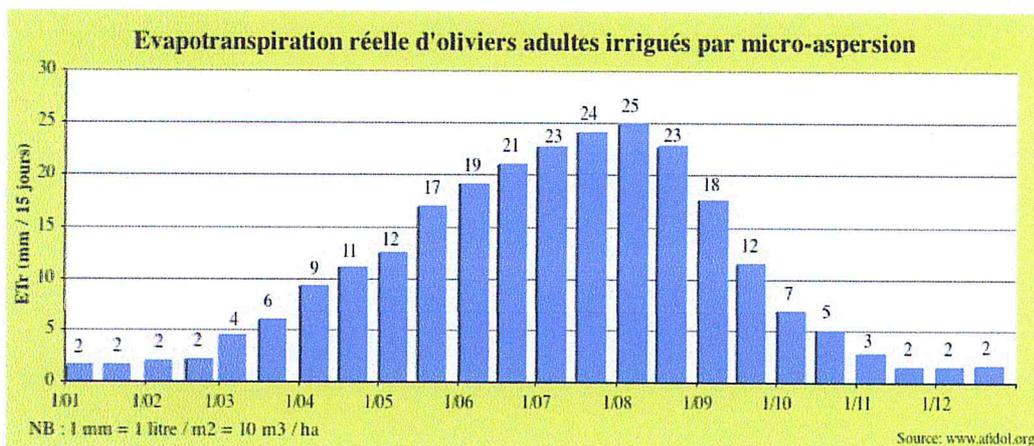


Figure 3.4 : consommation en eau des oliviers

- Si 10 mm d'eau ont été relevés dans le pluviomètre, les pluies réellement utiles sont de l'ordre de 6 mm (10 mm x 60 % = 6 mm).
- Les besoins prévisionnels en eau sont de l'ordre de 9 mm au cours de la seconde quinzaine de juin (15 mm - 6 mm = 9 mm), soit 90 m³ d'eau par hectare.
- Dose moyenne prévisionnelle quotidienne = 9 mm / (15 jours x 90 %) = 0,67 mm, soit 6,7 m³ / ha. Cette dose sera à corriger en fonction des relevés tensiométriques.

1.4. Pilotage de l'irrigation par relevés tensiométriques

Pour piloter au mieux l'irrigation, le bilan hydrique doit être associé à l'utilisation de tensiomètres ou de sondes tensio-électriques. L'association de ces deux méthodes demeure une technique efficace pour déterminer au plus juste les besoins en eau :

^[5] <http://www.afidoltek.org>. Article élaboré dans le cadre du programme Olea 2020.

- on estime dans un premier temps les volumes d'eau à apporter ou la fréquence des irrigations à partir du bilan hydrique,
- puis on corrige les doses d'irrigation ou la fréquence à l'aide des relevés tensiométriques.

La tensiométrie sans fil : la solution à un arrosage maîtrisé

Definition ^[6] La tensiométrie est une technique universelle de mesure de tension d'eau dans le sol. Chaque plante, ayant des besoins en eau, émet un stress mesurable. L'extension à des fins industrielles permet de piloter tout système d'irrigation, sur toute culture, tout sol, tout climat.

Cette technique permet aux agriculteurs et aux responsables d'espaces verts de maîtriser la décision d'arrosage en s'adaptant au contexte plante, sol, climat.

Fonctionnement de la tensiométrie

Simplicité de mise en œuvre... rapidité d'utilisation. Des dispositifs de sondes adaptés à chaque situation.

Des sondes sont placées en profondeur dans le sol pour recueillir et mesurer en temps réel, dans le sol, l'eau disponible pour les végétaux. Cela évite les risques d'assèchement ou d'excès d'eau. Le responsable de l'arrosage sait quand, combien et où arroser ?

La mesure de cette tension permet d'évaluer le développement des racines dans le sol pour assurer la vigueur et la pérennité des plantations. Vous disposez d'un suivi précis de l'enracinement grâce à des résultats explicites et facilement compréhensibles.

Principe : Les mesures tensiométriques permettent de contrôler la pression requise pour extraire l'eau du sol (exprimée en centibars). Le principe est basé sur la mesure des forces de rétention entre le sol et l'eau, appelées tensions. Plus le sol est sec, plus

[6] <http://www.afidoltek.org>. *Op.Cit.*

le niveau de succion est élevé. Ainsi, les tensions augmentent lorsque le sol se dessèche et elles diminuent lorsque le sol s'humecte.

Matériel de mesure tensiométrique : La sonde tensio-électrique apporte une réponse satisfaisante. Les capteurs de la tensio-électrique mesurent la résistance électrique entre deux électrodes, les tensions peuvent être mesurées jusqu'à 200 centibars.

Installation des sondes tensiométriques : Pour piloter l'irrigation par tensiométrie, les sondes doivent être installées en périphérie du bulbe humide. Il est conseillé de placer les sondes à 30 et 60 cm de profondeur. Une troisième sonde peut être positionnée à 90 cm pour définir la dose d'irrigation et pour contrôler les pertes en eau en profondeur en cas d'apport trop élevé.

En goutte-à-goutte, une certaine distance doit être respectée entre la sonde et le goutteur (Fig.3.5):

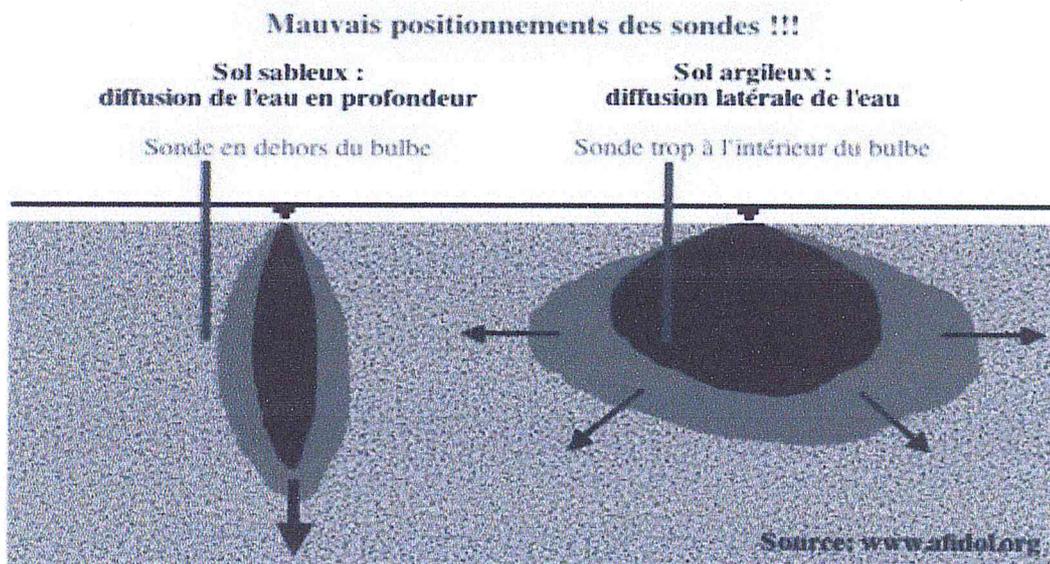


Figure 3.5 : Installation des sondes en goutte-à-goutte

- sonde à 30 cm de profondeur: à plus ou moins 30 cm du goutteur. Cette distance n'est qu'indicative. A chacun d'adapter la distance en fonction du type de sol rencontré. En terrain filtrant, l'eau diffuse peu latéralement; la distance entre le goutteur et la sonde sera alors inférieure à 30 cm. Par contre, en sol

argileux, l'eau diffuse très bien latéralement; la sonde est alors placée à plus de 30 cm du goutteur.

- sonde à 60 cm de profondeur: à mi-distance entre le goutteur et la sonde placée à 30 cm de profondeur.

- sonde à 90 cm de profondeur: à hauteur de la sonde à 60 cm.

1.5. L'arrivée du sans fil

ELEDNOT est la première société à mettre sur le marché un système sans fil permettant de recueillir sur un PC toutes les données relatives à une exploitation agricole ou à la gestion d'un parc d'espaces verts. La mesure de la tension (ou disponibilité de l'eau dans le sol), technique universelle, permet de piloter à distance tout système d'irrigation, sur tout sol, toute culture, tout climat.

La tensiométrie permet à l'irrigant de maîtriser lui-même parfaitement sa saison en 10 à 20 décisions, s'adaptant en permanence au contexte sol, plante, climat.

Plus de 1000 sondes peuvent ainsi en temps réel transmettre leurs données au serveur central. Ainsi l'exploitant agricole ou le responsable des espaces verts peut déclencher l'arrosage zone par zone selon les besoins du sol et des plantes.

1.6. Des résultats garantis

Economie d'eau grâce maîtrise de l'arrosage :

En arrosant au moment où la plante en a besoin, il n'y a aucun gaspillage d'eau et, ce qui est donné, est aussitôt consommé par la plante d'où une économie substantielle sur la facture d'eau

Maintien de la fertilité des sols grâce au contrôle agronomique :

Production et rendement accrus : en ne recherchant jamais l'eau dans le sol, la plante ne se stresse pas et donc se consacre pleinement à produire.

Les rendements des exploitations agricoles et maraichères sont grandement augmentés. De même, la qualité des produits est exceptionnelle. Fini les fruits fibreux ou secs.

Reprise racinaires assurée pour tous les arbres transplantés : La gestion d'eau permet en milieu urbain une reprise d'arbres transplantés et un pilotage d'arrosage urbain ultra précis

Cette solution permet de préserver la qualité des arbres et des végétaux et surtout permet à la plante un enracinement complet.

Chapitre IV

Les architectures et leurs évaluations

Dans ce chapitre, nous allons élaborer des architectures pour gérer nos réseaux de capteurs, et ceci en définissant les équipements adéquats au premier niveau, les protocoles et les algorithmes nécessaires pour faire marcher le réseau au second et troisième niveau, après avoir élaboré ces architectures, notre travail consistera à les évaluer en termes de coût et de performances et cela après les avoir simulés avec l'outil dédié.

1. Modèle en couches

1.1. Initiation

L'utilité de ce modèle se concrétise en la standardisation de la communication entre les composants du réseau afin que différents constructeurs puissent mettre au point des produits (logiciels ou matériels) compatibles et pouvant travailler en collaboration bien entendu. Ce modèle comprend 5 couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI ainsi que 3 couches pour la gestion de la puissance d'énergie, la gestion de la mobilité ainsi que la gestion des tâches (interrogation du réseau de capteurs). Le but d'un système en couches est de séparer le problème en différentes parties (les couches) selon leur niveau d'abstraction. Chaque couche du modèle communique avec une couche adjacente (celle du dessus ou celle du dessous). Chaque couche utilise ainsi les services des couches inférieures et en fournit à celle de niveau supérieur.

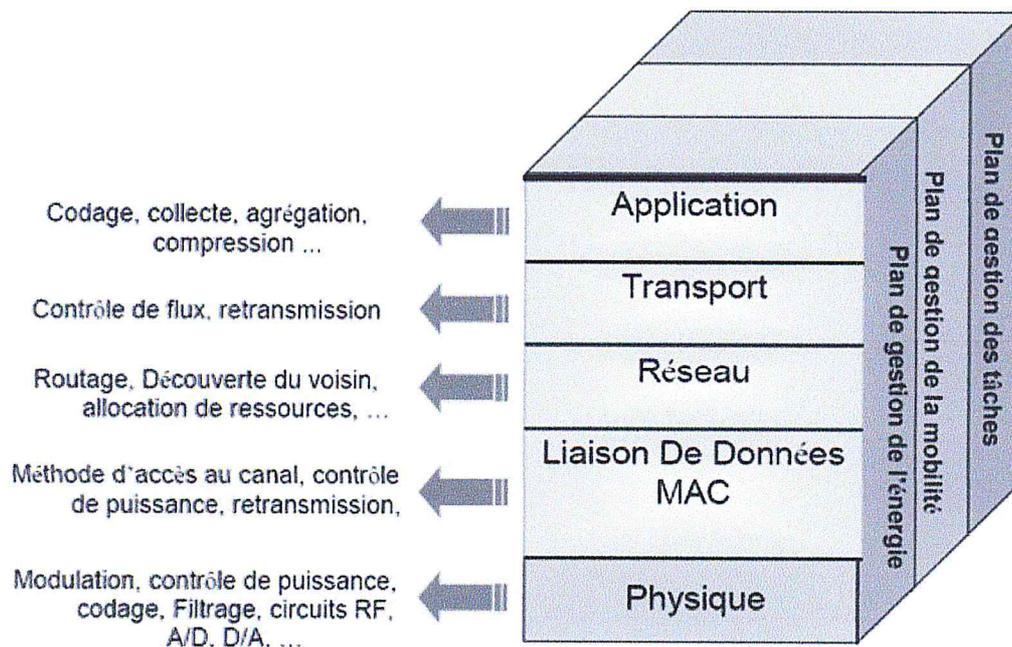


Figure 4.1 : Modèle en couches

1.2. Les couches

- **La couche physique** : Spécifications des caractéristiques matérielles comme dans notre cas le type, le modèle et les spécifications des capteurs adéquats ainsi que la structure de leur déploiement, la spécification des fréquences porteuses ... etc.
- **La couche liaison** : Spécifie comment les données sont expédiées entre deux nœuds/routeurs dans une distance d'un saut. Elle est responsable du multiplexage des données, du contrôle d'erreurs, de l'accès au media,... Elle assure la liaison point à point et multipoints dans un réseau de communication.
- **La couche réseau** : Dans la couche réseau le but principal est de trouver une route et une transmission fiable des données, captées, des nœuds capteurs vers le puits "sink" en optimisant l'utilisation de l'énergie des capteurs. Ce routage diffère de celui des réseaux de transmission ad hoc sans fil par les caractéristiques suivantes:

- il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global pour le grand nombre de nœuds.
- les applications des réseaux de capteurs exigent l'écoulement des données mesurées de sources multiples à un puits particulier.
- les multiples capteurs peuvent produire de mêmes données à proximité d'un phénomène (redondance).
- les nœuds capteur exigent ainsi une gestion soignée des ressources.

En raison de ces différences, plusieurs nouveaux algorithmes ont été proposés pour le problème de routage dans les réseaux de capteurs.

- **La couche transport** : Cette couche est chargée du transport des données, de leur découpage en paquets, du contrôle de flux, de la conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.
- **La couche application** : Cette couche assure l'interface avec les applications. Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par les logiciels.

1.3. 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.



Vu que dans notre cas le nœud capteur est immobile, en ayant sa position fixée par rapport à un arbre, on va devoir faire abstraction de la partie « gestion de mobilité », on aura à prendre en considération la gestion de l'énergie et celle des tâches.

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. Vu que les protocoles de routage implémentés sur nos capteurs jouent un grand rôle dans la gestion de l'énergie, en outre le capteur éteint son récepteur afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus.
- ❖ **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.

2. Le routage dans les RCSF

2.1. Classification des protocoles de routage

Les protocoles de routage spécifiques aux réseaux de capteurs doivent tenir compte du type de communications induit par l'application. Outre le fait que la quantité de données échangées est très faible par rapport aux applications de types réseaux ad hoc, notons que le trafic est particulièrement prévisible puisqu'il va des nœuds vers le puits ou du puits vers les nœuds.

Suivant la manière de création et de maintenance de routes lors de l'acheminement des données, les protocoles de routage peuvent être séparés en :

1- Les protocoles de routage 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 du réseau. Les routes sont sauvegardées mêmes si elles ne sont pas utilisées. La sauvegarde permanente des chemins de routage est assurée par un échange continu des messages de mise à jour des chemins, ce qui induit un contrôle excessif surtout dans le cas des réseaux de grande taille.

2- Les protocoles de routage réactifs (à la demande)

Les protocoles de routage réactifs (dits aussi : protocoles de routage à la demande), représentent les protocoles les plus récents proposés dans le but d'assurer le service du routage dans les réseaux sans fil.

La majorité des solutions proposées pour résoudre le problème de routage dans les réseaux ad hoc, et qui sont évaluées actuellement par le groupe de travail MANET (Mobile Ad Hoc Networking Working Groupe) de l'IETF (Internet Engineering Task Force), appartiennent à cette classe de protocoles de routage.

3- Les protocoles de routage hybrides

Les protocoles hybrides définissent deux zones où ils combinent le comportement proactif à l'intérieur d'une zone et le comportement réactif entre les zones. Par exemple DSR, qui est réactif à la base mais qui peut être optimisé s'il adopte un comportement proactif^[1].

[1] SADEDDINE Menad. Optimisation du protocole de routage DSR. UNIVERSIT'E CLAUDE BERNARD LYON I.

2.2. Les protocoles utilisés

2.2.1. L'inondation « Flooding »

(*flooding*), c'est une technique classique qui peut être utilisée pour le routage dans les réseaux de capteurs. Dans cette approche, chaque nœud recevant une donnée ou un paquet de contrôle le diffuse à tous les nœuds voisins jusqu'à ce que le nombre maximum de sauts pour ce paquet soit atteint ou le paquet arrive à sa destination. L'inondation est une technique réactive qui ne nécessite pas une maintenance coûteuse de la topologie du réseau, ni des algorithmes complexes pour la découverte des routes,

La technique d'acheminement par inondation (*Flooding*) est basée sur un principe simple consistant pour chaque nœud à retransmettre le paquet reçu sur tous les nœuds voisins.

On voit que la méthode par inondation assure l'arrivée d'au moins une copie du paquet au destinataire pourvu qu'il existe au moins un chemin entre celui-ci et la source du paquet. Cette garantie d'acheminement est assurée même si la topologie change, à la suite par exemple d'une défaillance de certains composants du réseau. La méthode de l'inondation permet donc une grande robustesse dans l'exploitation du réseau, ce qui explique que ces applications principales soient du domaine militaire. D'autre part, comme toutes les liaisons possibles entre le nœud d'origine et le nœud destinataire sont essayées de façon exhaustive, la méthode assure qu'au moins une des répliques du paquet atteindra le destinataire par le chemin le plus court, et donc avec un délai minimum si le réseau est peu chargé. La technique par inondation présente également l'avantage d'être très simple à implanter, puisque l'acheminement des messages ne nécessite ni tables de routage ni même de connaître la position géographique du destinataire dans le réseau. En effet pour que le paquet parvienne à son destinataire, il suffit simplement que celui-ci soit capable de reconnaître que le message lui est adressé. Le prix à payer pour ces qualités de simplicité, de robustesse, et de rapidité d'acheminement est évidemment une mauvaise utilisation des ressources du réseau et une tendance marquée à la congestion. En effet, puisque chaque nœud produit en général plusieurs répliques du même paquet, le nombre total des répliques en transit dans le réseau croît très rapidement en fonction du nombre de

nœuds traversés. Cela explique pourquoi, en dehors de quelque cas particuliers, cette technique est peu employée. Néanmoins, ce principe peut être utilisé de manière efficace pour la transmission de routage dans le cas de certaines techniques adaptatives.

2.2.2. Le protocole « DSDV »

Parmi les protocoles proactifs de routage, le DSDV (Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector), ce protocole est basé sur l'idée classique de l'algorithme distribué de Bellman-Ford en rajoutant quelques améliorations. Dans cette technique chaque station mobile maintient une table de routage qui contient :

- Toutes les destinations possibles.
- Le nombre de nœud (ou de sauts) nécessaire pour atteindre la destination.
- Le numéro de séquences (SN : sequence number) qui correspond à un nœud destination.

Le SN est utilisé pour faire la distinction entre les anciennes et les nouvelles routes, ce qui évite la formation des boucles de routage.

Afin de maintenir la consistance des tables de routage, chaque nœud du réseau transmet périodiquement sa table de routage à ses voisins directs. Le nœud peut aussi transmettre sa table de routage si le contenu de cette dernière subit des changements significatifs par rapport au dernier contenu envoyé. La mise à jour dépend donc de deux paramètres : Le temps, c'est à dire la période de transmission, et Les événements (ou les déclencheurs), exemple : apparition d'un nœud, détection d'un nouveau voisin... etc. La mise à jour doit permettre à une unité mobile de pouvoir localiser, dans la plupart des cas, une autre unité du réseau.

La mise à jour de la table de routage peut se faire de deux façons :

- Une mise à jour complète.
- Une mise à jour incrémentale.

Dans la mise à jour complète, la station transmet la totalité de la table de routage aux voisins ce qui nécessite l'envoi de plusieurs paquets de données ; alors que dans une mise à jour incrémentale, juste les entrées qui ont subi un changement par rapport à la dernière mise à jour, sont envoyées ce qui réduit le nombre de paquets transmis. La façon de faire la mise à jour des tables de routage est liée à la stabilité du réseau. Dans le cas où le réseau serait relativement stable, la mise à jour incrémentale est utilisée pour réduire le trafic de la communication, la mise à jour complète n'est pas fréquente dans ce genre de situation. Dans le cas opposé, où le réseau subit des changements rapides, le nombre de paquets incrémentaux envoyés augmente, ce qui fait que la mise à jour complète est fréquente.

Un paquet de mise à jour contient :

1- Le nouveau numéro de séquence incrémenté, du nœud émetteur.

Et pour chaque nouvelle route

2- L'adresse de la destination.

3- Le nombre de nœuds (ou de sauts) séparant le nœud de la destination.

4- Le numéro de séquence (des données reçues de la destination) tel qu'il a été estampillé par la destination.

Les données de routage reçues par une unité mobile, sont comparées avec les données déjà disponibles. La route étiquetée par la plus grande valeur du numéro de séquence (i.e. la route la plus récente), est la route utilisée. Si deux routes ont le même numéro de séquence, alors la route qui possède la meilleure métrique, est celle qui sera utilisée. La métrique utilisée dans le calcul des plus courts chemins est, tout simplement, le nombre de nœuds existant dans le chemin. Les valeurs des métriques des routes, choisies après réception des données de routage, sont incrémentées. Les modifications faites sur les données de routage locales, sont immédiatement diffusées à l'ensemble courant des voisins. Les routes reçues par une diffusion, seront aussi envoyées quand le récepteur procédera à l'envoi de ses paquets de routage. Le récepteur doit incrémenter les métriques des routes reçues avant l'envoi, car le récepteur représente un nœud en plus, qui participe dans l'acheminement des

messages vers la destination. Un lien rompu est matérialisé par une valeur infinie de sa métrique, i.e. une valeur plus grande que la valeur maximale permise par la métrique.

Le DSDV élimine les deux problèmes de boucle de routage "routing loop", et celui du "counting to infinity".

2.2.3. Le protocole « AODV »

Le protocole « Routage avec Vecteur de Distance à la Demande » (AODV : Ad hoc On-demand Distance Vector), est une technique de routage réactif représentant essentiellement une amélioration de l'algorithme proactif DSDV. Le protocole AODV, réduit le nombre de diffusions de messages, et cela en créant les routes lors du besoin, contrairement au DSDV, qui maintient la totalité des routes. L'AODV est basé sur l'utilisation des deux mécanismes « Découverte de route » et « Maintenance de route », en plus du routage nœud-par-nœud, le principe des numéros de séquence et l'échange périodique du DSDV.

L'AODV utilise les principes des numéros de séquence à fin de maintenir la consistance des informations de routage. A cause de la mobilité des nœuds dans les réseaux ad hoc, les routes changent fréquemment ce qui fait que les routes maintenues par certains nœuds, deviennent invalides. Les numéros de séquence permettent d'utiliser les routes les plus nouvelles ou autrement dit les plus fraîches (fresh routes).

L'AODV utilise une *requête de route* dans le but de créer un chemin vers une certaine destination.

Un nœud diffuse une requête de route (RREQ : Route REQuest), dans le cas où il aurait besoin de connaître une route vers une certaine destination et qu'une telle route n'est pas disponible (Fig.4.2). Cela peut arriver si la destination n'est pas connue au préalable, ou si le chemin existant vers la destination a expiré sa durée de vie ou il est devenu défaillant (i.e. la métrique qui lui est associée est infinie). Le champ numéro de séquence destination du paquet RREQ, contient la dernière valeur

connue du numéro de séquence, associé au nœud destination. Cette valeur est recopiée de la table de routage. Si le numéro de séquence n'est pas connu, la valeur nulle sera prise par défaut. Le numéro de séquence source du paquet RREQ contient la valeur du numéro de séquence du nœud source. Comme nous avons déjà dit, après la diffusion du RREQ, la source attend le paquet réponse de route (RREP : Route REPLY). Si ce dernier n'est pas reçu durant une certaine période (appelée RREP_WAIT_TIME), la source peut rediffuser une nouvelle requête RREQ.

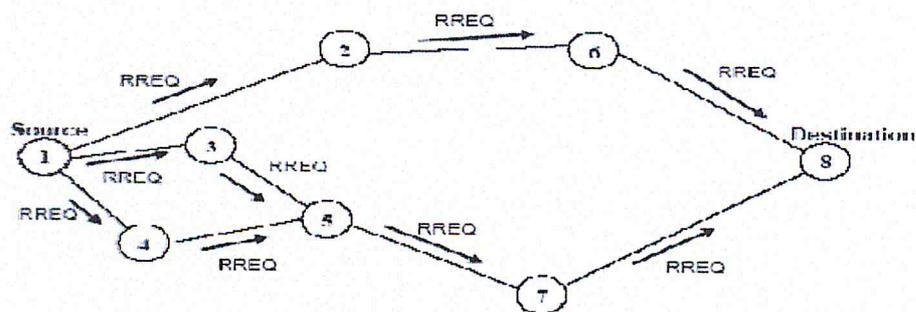


Figure 4.2 : La propagation du paquet RREQ (Requête de route)

Quand un nœud de transit (intermédiaire) envoie le paquet de la requête à un voisin, il sauvegarde aussi l'identificateur du nœud à partir duquel la première copie de la requête est reçue. Cette information est utilisée pour construire le chemin inverse (Fig.4.3), qui sera traversé par le paquet *réponse de route* de manière unicast (cela veut dire qu'AODV supporte seulement les liens symétriques). Puisque le paquet *réponse de route* va être envoyé à la source, les nœuds appartenant au chemin de retour vont modifier leurs tables de routage suivant le chemin contenu dans le paquet de réponse (temps d'expiration, numéro de séquence et prochain saut).

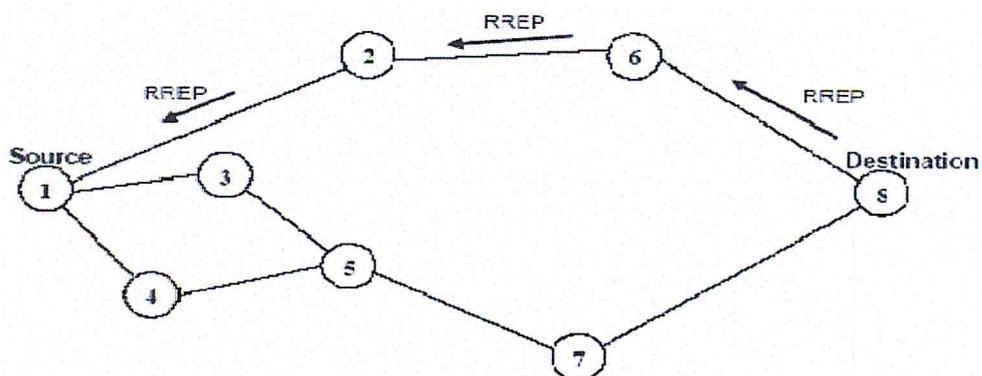


Figure 4.3 : Le chemin pris par le paquet RREP (Requête de réponse)

2.3. Classification des réseaux de capteurs

Les RCSF sont classifiés selon la technique d'acheminement en deux types :

RCSF plats :

Un réseau de capteurs sans fil plat est un réseau homogène, où tous les nœuds sont identiques en termes de batterie et de complexité du matériel, excepté le sink qui joue le rôle d'une passerelle et qui est responsable de la transmission de l'information collectée à l'utilisateur final. Selon le service et le type de capteurs, une densité de capteurs élevée (plusieurs nœuds capteurs/m²) ainsi qu'une communication multi-saut peut être nécessaire pour l'architecture plate. En présence d'un très grand nombre de nœuds capteurs, la scalabilité (rapport signal sur bruit) devient critique. Le routage et le contrôle d'accès au médium (MAC) doivent gérer et organiser les nœuds d'une manière très efficace en termes d'énergie.

RCSF hiérarchiques :

Les réseaux sans fil peuvent posséder une hiérarchie, celle-ci manifestée par la présence d'entités dédiées au bon fonctionnement du réseau : routeurs, antennes-relais, point d'accès... ces entités situées au cœur du réseau ont pour finalité de l'organiser. Les réseaux de capteurs eux, par leur nature homogène (tous les capteurs sont identiques physiquement) ne possèdent pas d'infrastructures préalables, cela dit dans les réseaux de capteurs, on doit faire recourt à d'autres mécanismes afin de pouvoir hiérarchiser leur architecture tout en prenant en considération les contraintes énoncées précédemment.

Le routage hiérarchique est considéré comme étant l'approche la plus favorable en termes d'efficacité énergétique. Il se base sur le concept (nœud standard – nœud maître) où les nœuds standard acheminent leurs messages à leur maître, lequel les achemine ensuite dans le réseau tout entier via d'autres nœuds maîtres jusqu'à la station de base (sink).



Dans notre étude le type de RCSF employé est celui plat, l'ensemble des nœuds utilisés sont homogènes de même type (nœuds capteurs tensiométriques)

3. Les standards de communication utilisés dans les RCSF

Les technologies sans fil ont fait des progrès significatifs ces dernières années, permettant de nombreuses applications, parmi ces technologies on retrouve :

Bluetooth :

Bluetooth est une technologie de réseau personnel sans fils (noté WPAN pour Wireless Personal Area Network), c'est-à-dire une technologie de réseaux sans fils d'une faible portée permettant de relier des appareils entre eux sans liaison filaire. Contrairement à la technologie IrDa (liaison infrarouge), les appareils Bluetooth ne nécessitent pas d'une ligne de vue directe pour communiquer, ce qui rend plus souple son utilisation et permet notamment une communication d'une pièce à une autre, sur de petits espaces.

Zig-bee :

Zigbee est une technologie sans fil radio, de basse puissance et de bas débits (en dessous de 150 kbps). Sa portée est variable. Elle oscille suivant l'environnement entre 10 et 50 mètres en intérieur. C'est une technologie ouverte. Le standard 802.15.4 a été ratifié par l'IEEE. Elle ne nécessite pas de licence spécifique. Zigbee fonctionne sur les bandes des 2,4 Ghz (bandes du Bluetooth et du Wifi), du 866 Mhz (bande libre en Europe) et du 916Mhz aux US.

Wi-Fi :

Wi-Fi est l'abréviation de Wireless Fidelity. Le Wi-Fi est le nom d'une norme donnée à un type de réseau sans fil développé pour les communications informatiques. Il permet de supprimer les câbles et de résoudre les problèmes de distances, d'obstacles... La liaison utilise des ondes radioélectriques. Pour communiquer en réseau sans fils, les ordinateurs, les modems et les périphériques doivent être équipés de récepteurs/émetteurs Wi-Fi.

Ils se présentent sous plusieurs formes : adaptateur USB Wi-Fi, carte PCI WiFi, ou PCMCIA WiFi pour les ordinateurs portables. Et autres qui ne suivent pas forcément un standard: sell phone, z-wave, wavenis.

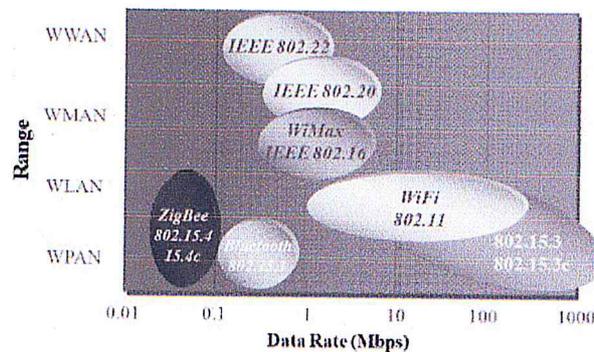


Figure 4.4 : Les normes des réseaux sans fil

4. Le standard sans fil utilisé pendant l'étude

IEEE 802.11 / Wi-Fi :

Définition La norme IEEE 802.11 (ISO/CEI 8802-11) est un standard international décrivant les caractéristiques d'un réseau local sans fil (WLAN). La marque déposée



Figure 4.5 : Le label WIFI

« Wi-Fi » correspond initialement au nom donné à la certification délivrée par la WECA (« Wireless Ethernet Compatibility Alliance »), organisme ayant pour mission de spécifier l'interopérabilité entre les matériels répondant à la norme 802.11 et de vendre le label « Wi-Fi » aux matériels répondant à leurs spécifications (Fig.4.5). Par abus de langage (et pour des raisons de marketing) le nom de la norme se confond aujourd'hui avec le nom de la certification (c'est du moins le cas en France, en Espagne, au Canada...). Ainsi, un réseau Wi-Fi est en réalité un réseau répondant à la norme 802.11. Dans d'autres pays (en Allemagne, aux États-Unis par exemple) de tels réseaux sont correctement nommés WLAN (Wireless LAN).

Le groupe **802.11** a été initié en 1990, et le standard **IEEE 802.11** définissant les réseaux locaux sans fil a vu le jour en 1997. Le standard d'origine a défini trois couches physiques pour une même couche MAC, correspondant à trois types de produits 802.11 :

- IEEE 802.11 FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), qui utilise la technique d'étalement de spectre basé sur le saut de fréquence.

- IEEE 802.11 DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), qui utilise aussi la technique d'étalement de spectre mais sur une séquence directe.
- IEEE 802.11 IR (InfraRed), de type infrarouge.

Les réseaux IEEE 802.11 FHSS et IEEE 802.11 DSSS sont des réseaux radio sans fil émettant dans la bande ISM. Etant donné leurs caractéristiques, ces trois types de produits ne sont pas directement compatibles entre eux. Même s'ils offrent une certaine opérabilité au niveau LLC, celle-ci ne se retrouve pas au ni niveau physique. Ainsi, une carte IEEE 802.11 FHSS ne peut pas dialoguer avec une carte IEEE 802.11 DSSS, et réciproquement. De même, IEEE 802.11 IR ne peut dialoguer avec un réseau IEEE 802.11 FHSS ni IEEE 802.11 DSSS. Pour obtenir cette opérabilité, il faudrait des produits multistandards, ce qui n'est pas le cas des produits existants.

Le standard IEEE 802.11 n'est pas resté figé, et de nombreuses améliorations ont été apportées au standard d'origine. Ces améliorations continuent actuellement. Trois nouvelles couches physiques ont été ajoutées avec les standards IEEE 802.11b, IEEE 802.11a et IEEE 802.11g :

- **IEEE 802.11b** ou **Wi-Fi** utilise la même bande ISM que IEEE 802.11 mais avec des débits pouvant atteindre 11 Mbit/s. IEEE 802.11b est en réalité une amélioration de IEEE 802.11 DSSS. Ainsi, une caractéristique de IEEE 802.11b est de rester compatible avec IEEE 802.11 DSSS.
- **IEEE 802.11a** ou **Wi-Fi 5**, utilise une nouvelle bande, appelée bande U-NII, située autour de 5 GHz. Le débit de IEEE 802.11a peut atteindre 54 Mbit/s, mais en perdant la compatibilité avec 802.11 DSSS et FHSS et 802.11b, du fait de l'utilisation d'une bande différente.
- **IEEE 802.11g** utilise la bande ISM mais avec un débit pouvant atteindre 20 Mbit/s. Ce standard utilise en fait la forme d'onde OFDM de 802.11a. Mais, contrairement à IEEE 802.11a, IEEE 802.11g est compatible avec 802.11 DSSS et IEEE 802.11b.
- **IEEE 802.11n**, est une évolution de 802.11g qui intègre la "dimension" MIMO.

4.1. Couche physique

On rappelle que la couche physique de la norme IEEE 802.11 est l'interface située entre la couche MAC et le support qui permet d'envoyer et de recevoir des trames.

Chaque couche physique 802.11/a/b/g est divisée en deux sous-couches :

- la sous-couche PMD (Physical Medium Dependent) qui gère l'encodage des données et effectue la modulation
- la sous-couche PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) qui s'occupe de l'écoute du support et fournit un CCA (Clear Channel Assessment) à la couche MAC pour lui signaler que le canal est libre.

4.2. Couche liaison

Les types de trames utilisés pour la norme 802.11

Il y a trois principaux types de trames :

- **Les trames de données**, utilisées pour la transmission des données
- **Les trames de contrôle**, utilisées pour contrôler l'accès au support (eg. RTS, CTS, ACK)
- **Les trames de gestion**, transmises de la même façon que les trames de données pour l'échange d'informations de gestion, mais qui ne sont pas transmises aux couches supérieures.

Chacun de ces trois types est subdivisé en différents sous-types, selon leurs fonctions spécifiques.

5. La simulation

Avant sa mise en place, le déploiement d'un réseau de capteurs nécessite une phase de simulation afin de s'assurer du bon fonctionnement de tous les dispositifs. En effet, pour de grands réseaux le nombre de capteurs peut atteindre plusieurs milliers et donc un coût financier relativement important. Il faut donc réduire au maximum les erreurs de conception possibles en procédant à une phase de validation.

Afin de simuler les architectures de réseaux de capteurs et les différentes stratégies de communication pour satisfaire les requêtes, on va s'appuyer sur un outil de simulation très puissant on cite le « NS 2 ».

Le simulateur NS2

NS est un outil logiciel de simulation de réseaux informatiques. Il a été conçu autour des idées de conception par objets, de réutilisabilité du code et de modularité. Il est devenu aujourd'hui un standard de référence en ce domaine. C'est un logiciel dans le domaine public disponible sur l'Internet. Son utilisation est gratuite. Le logiciel est exécutable tant sous Unix que sous Windows.

NS est bâti autour d'un langage de programmation appelé « Tcl » dont il est une extension. Du point de vue de l'utilisateur, la mise en œuvre de ce simulateur se fait via une étape de programmation qui décrit la topologie du réseau et le comportement de ses composants, puis vient l'étape de simulation proprement dite et enfin l'interprétation des résultats. Cette dernière étape peut être prise en charge par un outil annexe, appelé « nam » qui permet une visualisation et une analyse des éléments simulés. Au cours de ce TME, nous allons montrer comment utiliser le simulateur avec les composants disponibles dans la distribution.

NS est en réalité un programme relativement complexe écrit en C++ et interfacé via Tcl. Pour modifier le comportement d'objets existant. Il en résulte de la simulation un fichier de trace contenant les données résultantes et un fichier NAM

pour l'animation (Fig.4.6), nous aurons à programmer des simulations en scripts TCL et traiter le fichier de trace résultant avec des outils de manipulation de données afin de pouvoir bien analyser et illustrer en s'appuyant sur des graphes et des statistiques, les simulations sont très couteuses de temps et très gourmandes coté ressources, et dans notre cas celles-ci est effectuées avec un P.C conventionnel ^[2].

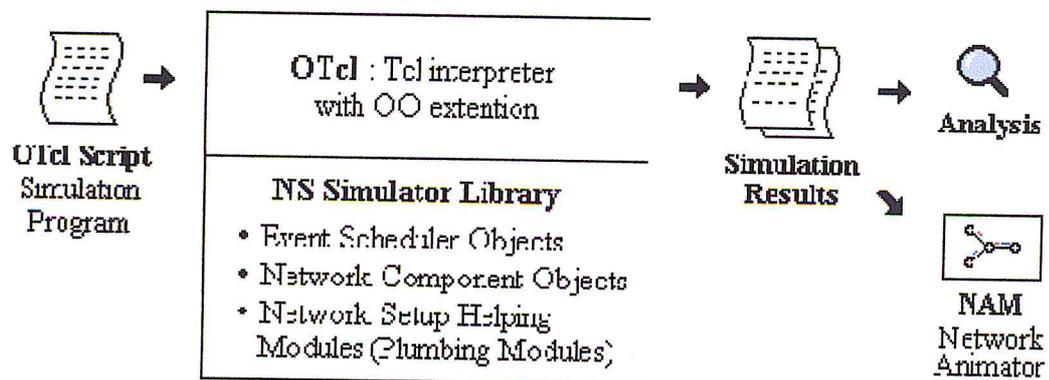


Figure 4.6 : Les entrées / sorties du simulateur NS

^[2] Un P.C conventionnel en 2010 comprend un processeur Intel Core Duo ou un processeur Intel Pentium 4 à la limite.

6. Utilisation des bases de données et DWH :

Dans notre étude la simulation est le premier pas à faire sur la quelle repose tout notre travail.

Le simulateur NS2 génère à la fin de la simulation un fichier de trace au format (.tr) qui enregistre tous les informations sur les transactions effectuées.

Quand on a commencé nos simulations, déjà au premier teste, avec un nombre réduit de nœud, le fichier de trace était de 900 Mo de taille ;

On simulant 300 nœuds de notre première architecture on s'est trouvé avec des traces (.tr) de plus de 5Go !!

Déjà à ce stade là un grand problème qui se pose : ..

Aucun tableur ni éditeur peut traiter un fichier de cette taille.

Et le deuxième problème était le nombre de transactions : une simulation de 10 nœuds donne un fichier de plus de 10 000 lignes,... contre 48 million pour la première architecture de 300 noeuds ?!

Comment peut-t-on extraire des informations de ce nombre immense de transactions pour élaborer les graphes d'évaluation de nos architectures étudiées ?!

Mais ce n'est pas tout, ce qui a aggravé la situation le plus est l'hétérogénéité des données des fichiers de trace ; citant par exemple :

- Le type du message
- Le type d'événement
- La couche étudiée
- La cause de rejet d'un message reçu

Sont des informations de type « chaine de caractères ».

- Le numéro du nœud
- L'identificateur ID de transaction

Sont des valeurs entières.

-Les adresses Ethernets est en hexadécimal.

-La position ; le timing sont des valeurs à virgule flottante.

-Le traçage IP ,transport est de type complexe qui comporte l'dresse IP et le port.

En plus de ça, le simulateur utilise des valeurs spéciales généralement négatives pour designer des événements spécifiques.

Cette hétérogénéité rend l'exploitation des informations avec un tableur impossible.

Alors deux solutions qui se pose :

Contourner le problème en minimisant le nombre de nœuds avec une réduction du temps de traçage à 2ou 3 minute dans le but d'avoir des fichiers de trace relativement petits ;

Mais cette solution va donner des résultats faussés, à cause du nombre de nœuds qui ne peut pas montrer les caractéristiques et le comportement d'un RCSF intense, en plus, diminuer le temps de traçage peut éliminer une grande partie de transactions engendrées par la transmission des prélèvements faits.

Alors la seule solution qui s'impose est l'utilisation des bases de données et les DWH, profitant de la puissance des SGBD pour gérer des nombres immenses d'enregistrements et leur capacité d'interrogation et d'extraction d'information même de nature hétérogène.

La démarche suivie :

Les étapes prises sont celles de construction d'un data warehouse :

- Extraction
- Transformation
- Chargement

Qui construisent ensemble l'ETL

Puis nous nous sommes intéressés aux requêtes et différentes mesures qu'il faut étudier selon divers axes d'analyse.

Le fichier de trace a un format spécifique à lui et ses lignes ne sont pas forcement de même formatage de colonnes comme c'est montrer ci-dessous :

```
v 0.16978848733463719 eval {set sim_annotation { s 0 -2 0 }}
s -t 0.170323487 -Hs 0 -Hd -2 -Ni 0 -Nx 0.00 -Ny 0.00 -Nz 0.00 -Ne 9000.000000 -Nl MAC -Nw --- -Ma 0 -Md ffffffff -Ms
0 -Mt 800 -Is 0.42 -Id -1.42 -It message -Il 62 -If 0 -Ii 0 -Iv 32
N -t 0.170324 -n 1 -e 8999.999950
r -t 0.170820147 -Hs 1 -Hd -2 -Ni 1 -Nx 185.00 -Ny 70.00 -Nz 0.00 -Ne 8999.999950 -Nl MAC -Nw --- -Ma 0 -Md ffffffff
-Ms 0 -Mt 800 -Is 0.42 -Id -1.42 -It message -Il 4 -If 0 -Ii 0 -Iv 32
v 0.17084514666931869 eval {set sim_annotation { r 0 1 0 }}
```

Figure 4.7 : exemple de fichier de trace

La phase d'extraction :

on a utilisé pour cela l'outil de transferts de donnée du SGBD , c'est le DTS de SQL server 2000.

La phase de transformation :

Bien que le DTS peut faire la transformation et le nettoyage lors de l'extraction mais l'hétérogénéité des données sur les mêmes colonnes sur le fichier de trace , nous a forcé de laisser tous les données comme des chaines de caractères lors de l'extraction.

Alors nous avons fait les transformations nécessaires après une phase de nettoyage en utilisant des requêtes pour supprimer les lignes superflues

Le chargement :

Après les deux phases précédentes nous avons construit les bases de données et DWH nécessaires :

Nous avons une bases de données générique qui reproduit la même logique que le fichier de trace qu'on a appeler « event » .

Et au cours de nos analyses nous avons eu besoin d'effectuer des recherches approfondies pour trouver des explications aux phénomènes rencontrés, à ce stade là, nous avons eu recourt à l'utilisation d'un DWH où des schémas en étoile avec une mesure et des dimensions illustrent milieu le besoin, et nous donnent des résultats trop rapide qu'une exécution de requêtes géantes sur un bases de données dont le nombre de enregistrements a attint dans des simulations faites les 217 million de lignes.

Utilisations :

On cite parmi les modèles utilisés :

- le nombre de sauts avec comme dimension l'ID du message et les nœuds utilisés.
- Les rejets par message et par nœud
- La consommation d'énergie par nœud et par région.

Et bien d'autres, qui nous ont aidés pour aboutir à des résultats pertinents et des optimisations trop avancées.

7. Les architectures : étude et évaluation

Les architectures qu'on va étudier sont des architectures élaborées avec du matériel conforme IEEE802.11.

7.1. Couche physique

La norme 802.11 permet d'obtenir un débit théorique jusqu'à 54 Mbps, pour une portée allant d'une dizaine à une centaine de mètres.

Débit théorique(en intérieur)	Portée
54 Mbits/s	10 m
48 Mbits/s	17 m
36 Mbits/s	25 m
24 Mbits/s	30 m
12 Mbits/s	50 m
6 Mbits/s	70 m

Tableau 4.1 : Portée des équipements 802.11

Matériel

Les capteurs Wi-Fi :

Les capteurs Wi-Fi adoptent le standard IEEE 802.11, de ce fait le principal avantage tient à l'existence d'énormément d'infrastructures adaptées à cette technologie. En effet, la plupart des organisations disposent déjà de points d'accès appropriés. De plus, les connaissances avancées sur cette technologie sont déjà métrisées par la plupart des professionnels. En contre partie, la consommation d'énergie était, jusqu'à récemment, relativement élevée. Ceci est principalement dû au fait que les contraintes énergétiques n'étaient pas une priorité lors de la conception, n'empêche que les capteurs d'aujourd'hui intègrent les dernières technologies à faible consommation en puissance.

Les capteurs Wi-Fi actuellement répondus sur le marché sont généralement livrés avec une ou plusieurs sondes de mesure, plusieurs firmes spécialisées dans les

systèmes de micro-électro-mécanique (MEMS) se sont lancées dans la fabrication de ces capteurs Wi-Fi, cette famille de capteurs comme le WaterMark par Davis instrument, Trime-PICO par SDEC France, AquaMon par Cermetek electronics, SM300 par Delta-T Devices Ltd, Lexington KY par Point Six Wireless ou encore le Sentinel Pro II SHT11 par Aginova, cette famille de capteurs présente globalement la même configuration matérielle :

- * compatible avec les normes 802.11b/ g/a
- * débit jusqu'à 2 Mbps
- * implémente les normes de sécurité Wi- Fi (WPA2)
- * capteurs de température, humidité et lumière
- * \approx trois ans de durée de vie avec batteries AA lithium 3,6 V
- * mémoire flash pouvant sauvegarder jusqu'à cinq jours de données

Dans la conception de réseaux de capteurs la consommation d'énergie est un facteur très pesant, mais il faut noter qu'une radio de faible puissance consomme à peu près autant en émission, en réception et en écoute passive, c'est-à-dire quand elle est allumée pour sonder le canal. Par contre elle ne consomme pas si elle est éteinte.

On peut dire que les principales causes de surconsommation sont :

- L'écoute libre ("idle listening"), lorsqu'un nœud a sa radio allumée parce qu'il attend un paquet ou pour voir s'il y a du trafic alors qu'il n'y a rien.
- Les collisions entre trames causent des consommations inutiles. Les récepteurs et les émetteurs ont dépensé de l'énergie pour rien. Parfois les collisions entraînent des retransmissions.
- Quand un nœud reçoit une trame qui ne lui est pas destinée, il dépense de l'énergie inutilement. Ce cas de figure est appelé sur-écoute ("overhearing").
- Le protocole MAC lui-même peut avoir besoin de messages de contrôle qui contribuent à des pertes d'énergie (ce point va être traité dans la couche liaison).

Les équipements choisis doivent l'être selon des critères comme la qualité, l'adéquation avec le terrain ou le coût, le calcul du coût de revient de nos architectures revient à calculer les prix des équipements nécessaires au déploiement de nos solutions ainsi que celui de sa maintenance.

Les prix sont classifiés en deux :

1. Prix du matériel nécessaire au déploiement :

C'est les prix des équipements fonctionnels

- Les capteurs Wi-Fi.
- Les sondes d'humidité du sol.

2. Prix de maintenance :

- Les batteries de rechange.

Les prix sont mentionnés dans ce qui suit :

Capteur Wi-Fi.....	10 \$/U
Sonde d'humidité du sol.....	15 \$/U
Batterie AA 3,6V / 2250mAh.....	0,53 \$/U
Batterie AA 3,6V / 2100mAh.....	0,40 \$/U

Le coût des capteurs Wi-Fi est relativement un peu plus élevé par rapport aux autres capteurs utilisant d'autre type de système de transmission, un nœud Wi-Fi revient à peu près à 10\$, On peut justifier cette hausse de prix par la technologie coûteuse dédiée à optimiser la consommation d'énergie qui est un point très important dans ces appareillages ^[5]. Toujours est-il, on verra par la suite que les capteurs utilisant le standard 802.11 possèdent beaucoup d'avantages et reflètent une bonne efficacité sur le terrain.

^[5] GITI. Les premiers capteurs sans fil.

7.2. Couche liaison

La couche *Liaison de données* de la norme 802.11 est composée de deux sous-couches :

La couche de *contrôle de la liaison logique* (*Logical Link Control*, notée **LLC**) et la couche de *contrôle d'accès au support* (*Media Access Control*, ou **MAC**).

Notre réseau repose sur le mode ad-hoc ce qui fait que cette couche *MAC* définit les méthodes d'accès. La méthode *CSMA/CA* utilisant la *Distributed Coordination Function* (*DCF*).

La sous couche MAC

Protocoles d'accès au medium :

Le rôle du protocole d'accès au medium (*MAC* pour "Medium Access Control", en anglais) est d'organiser l'accès au canal de communication. Pour les réseaux sans fil, cette tâche est difficile. Principalement deux raisons à cela : premièrement, le canal de communication est partagé entre les nœuds voisins ; et deuxièmement, le canal radio n'est pas fiable. En effet, un four à micro-ondes en marche ou un nouvel obstacle comme un camion peuvent changer complètement la topologie en créant des interférences ou en réduisant la portée des nœuds.

Comme il a été mentionné au paravent, le protocole *MAC* peut éprouver le besoin d'utiliser quelques messages de contrôles qui contribuent à la consommation rapide de l'énergie. Les acquittements (on verra ça par la suite), par exemple, sont des paquets envoyés par le récepteur pour confirmer qu'il a bien reçu les données. Envoyer et recevoir ce paquet a un coût. Pour réduire la consommation, le protocole *MAC* doit permettre de garder la radio éteinte le plus longtemps possible. Le cas parfait est de n'allumer la radio que pour recevoir et émettre le paquet de données utiles. Les nœuds ne communiquant que via leurs radios, c'est impossible en pratique.

Le protocole DCF :

Le protocole DCF (*Distributed Coordination Function*) est un protocole d'accès au médium qui se base sur la méthode CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*), le but de cette méthode étant de minimiser le nombre de collisions en les évitant au sein du réseau, et cela en ayant pour moyen différents type de messages courts (RTS, CTS) et des accusés de réception ACK (acknowledgment).

Propriétés du DCF :

- Peut-être utilisé par tous les nœuds en dépit du type de la topologie
- Accès équitable au canal radio (probabilité d'accès)
- Sans aucune centralisation (algorithme totalement distribué)
- Aussi bien en mode infrastructure qu'en mode ad hoc

La méthode CSMA/CA :

Rappel CSMA/CD :

En CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), avant toute tentative de transmission, une station s'assure que le canal n'est pas déjà utilisé (détection de porteuse), auquel cas la transmission est remise à un instant ultérieur. Quand le canal est détecté libre, après une durée aléatoire, si le canal est resté libre, la station envoie son paquet. Mais cette détection de porteuse ne suffit pas pour s'assurer que le paquet est reçu correctement. En effet, une ou plusieurs stations peuvent effectuer cette procédure et envoyer leurs messages simultanément et causent une collision, notamment quand le réseau est chargé.

CSMA dans les réseaux sans fil :

Si les mécanismes de détection de collisions s'avèrent adaptés pour un réseau local câblé, ils ne le sont pas, en général, pour les réseaux radio. Plusieurs raisons pour cela :

- Dans un environnement sans fil, on ne peut pas être sûr que toutes les stations s'entendent entre elles (ce qui est l'hypothèse de base du principe de

détection de collision), et le fait que la station voulant transmettre teste si le support est libre, ne veut pas forcément dire que le support est libre autour du récepteur.

- Le problème des stations cachées : Ce problème se produit quand deux stations ne peuvent pas s'entendre l'une et l'autre du fait que la distance qui les sépare est trop grande ou qu'un obstacle les empêchent de communiquer entre elles mais elles ont des zones de couverture qui se recoupent. Si les stations A et C ne font que la détection de porteuse en écoutant le canal, n'étant pas en mesure de s'entendre l'une l'autre, elles vont s'autoriser à émettre des paquets en même temps à une station B située dans l'intersection des zones de couverture, il va y avoir collision entre les paquets et donc B ne pourra recevoir aucune des communications. On dit que les stations A et C sont cachées l'une par rapport à l'autre.

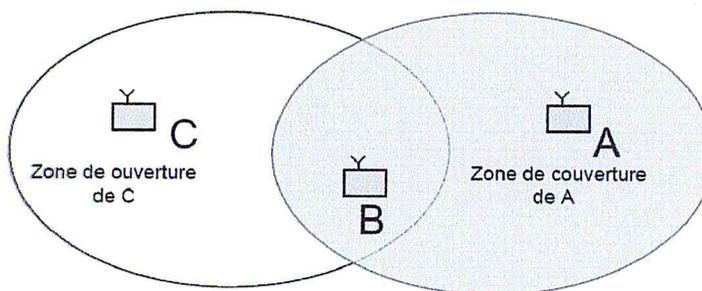


Figure 4.8 : topologie avec risque de collision

- Le problème des stations exposées : ce problème arrive dans le cas où une station B transmet des données à une station A. Si une station C écoute le canal radio, elle peut entendre une communication en cours. Elle conclut qu'elle ne peut pas transmettre des paquets à une station D, or si C transmettait, cela créerait des collisions seulement dans la région entre B et C et non dans les régions où D et A se situent.

Pour combler ces problèmes, 802.11 utilise le mécanisme d'**esquive de collision (Collision Avoidance) appelé CSMA/CA.**

Mécanisme du CSMA /CA

L'accusé de réception ACK :

Une station voulant transmettre écoute le support, et s'il est occupé, la transmission est différée. Si le support est libre pour un temps spécifique (appelé DIFS, Distributed Inter Frame Space, dans le standard), alors la station est autorisée à transmettre après une durée tirée aléatoirement en se basant sur l'algorithme de Backoff exponentiel (voir partie suivante). La station réceptrice va vérifier le CRC du paquet reçu et renvoie un accusé de réception (ACK). La réception de l'ACK indiquera à l'émetteur qu'aucune collision n'a eu lieu. Si l'émetteur ne reçoit pas l'accusé de réception, alors il retransmet le fragment jusqu'à ce qu'il l'obtienne ou abandonne au bout d'un certain nombre de retransmissions.



C'est la couche MAC qui est informée des collisions par l'attente d'un accusé de réception (ACK) pour chaque fragment transmis. Dans le cas de non réception d'un ACK, la couche MAC retransmet le paquet sans avoir à passer par les couches supérieures, ce qui engendrait des délais significatifs.

Afin de surveiller l'activité du réseau, la sous couche MAC travaille en collaboration avec la couche physique qui utilise l'algorithme CCA (Clear Channel Detection) pour évaluer la disponibilité du canal. Pour savoir si le canal est libre, la couche physique mesure la puissance reçue par l'antenne appelée RSSI (Received Signal Strength Indicator). La couche physique détermine donc si le canal est libre en comparant la valeur du RSSI à un certain seuil et transmet par la suite à la couche MAC un indicateur de canal libre. Dans le cas contraire, la transmission est différée.

Les temporisateurs :

Dans le CSMA/CA avec DCF on définit les espaces entre deux trames **IFS (Inter Frame Space)** suivants :

- SIFS (Short IFS) : le plus court de tous. Il est utilisé pour la transmission des trames ACK, CTS ... et des rafales de trames issues d'une même station.
- DIFS (DCF IFS) : Il est utilisé en mode DCF comme temps minimal d'attente avant transmission.

$$DIFS = SIFS + 2 * Slot\ Time$$

Où : *Slot Time* = durée minimale pour déterminer l'état du canal + temps aller-retour + temps de propagation.

- EIFS (Extended IFS) : utilisé lorsqu'il y a détection de collision. Ce temps relativement long par rapport aux autres IFS est utilisé comme inhibiteur pour éviter des collisions en série.

Ces IFS permettent de définir des degrés de priorité. Lorsque plusieurs stations souhaitent émettre simultanément, la station souhaitant émettre les trames les plus prioritaires comme les acquittements pourra les envoyer en premier. Puis seront transmises d'autres trames jugées prioritaires comme celles liées à l'administration réseau ou au trafic qui a des contraintes de délai. Enfin, les informations les moins importantes concernant le trafic asynchrone seront émises après un temps d'attente plus long.

Algorithme de backoff exponentiel BEB (Binary Exponentiel Backoff):

Le Backoff est une méthode bien connue pour résoudre les différends entre plusieurs stations voulant avoir accès au support. Cette méthode demande que chaque station choisisse un délai d'attente aléatoire compris entre 0 et la taille d'une fenêtre de contention de valeur CW qui est égale à un certain nombre de slots, et d'attendre ce nombre de slots avant de transmettre, toujours en vérifiant qu'une autre station n'a pas accédé au support avant elle (Fig.4.9).

La durée d'un slot (Slot Time) est définie de telle sorte que la station sera toujours capable de déterminer si une autre station a accédé au support au début du slot précédent. Cela divise la probabilité de collision par deux.

Le backoff exponentiel signifie qu'à chaque fois qu'une station choisit un slot et provoque une collision, la durée d'attente aléatoire est augmentée exponentiellement (doublée à la tentative de transmission suivante).

Le standard 802.11 définit l'algorithme de backoff exponentiel comme devant être exécuté dans les cas suivant :

- ✓ Quand la station écoute le support avant la première transmission d'un paquet et que le support est occupé.
- ✓ Après chaque retransmission.
- ✓ Après une transmission réussie.

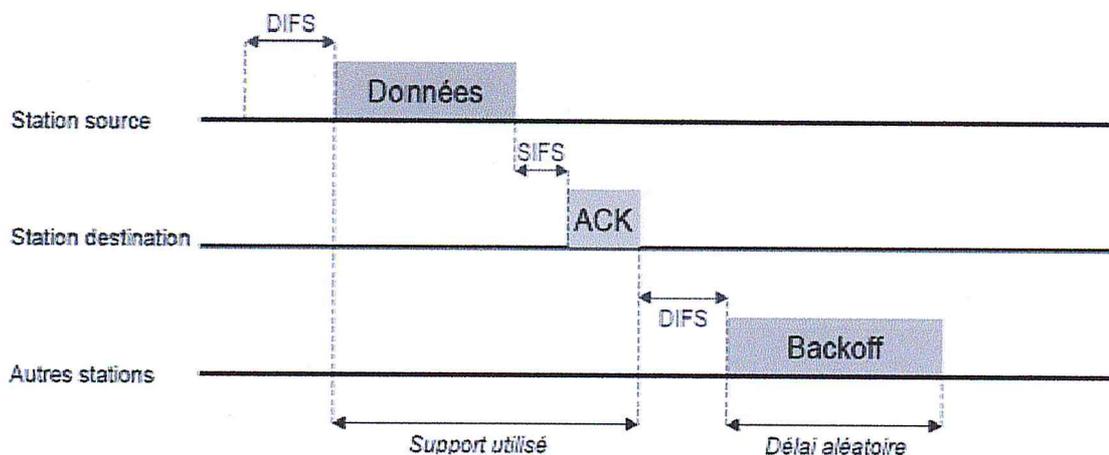


Figure 4.9 : Exemple de transmission DCF appliquant le Backoff

Le seul cas où ce mécanisme n'est pas utilisé est quand la station décide de transmettre un nouveau paquet et que le support a été libre pour un temps supérieur au DIFS (Fig.4.9).

La durée d'attente aléatoire (DAA) du backoff est calculée de la manière suivante :

$$DAA = CW * \text{random}(0, CW) * \text{SlotTime}$$

Random(0,CW) est une variable aléatoire uniforme comprise entre 0 et CW-1.

CW est la taille de la fenêtre de contention, $CW = [CW_{\min} \text{ } CW_{\max}]$.

Lors de la première tentative de transmission, $CW = CW_{\min}$; et à la fois suivante (en cas de collision) CW est doublée jusqu'à ce qu'elle atteigne CW_{\max} .

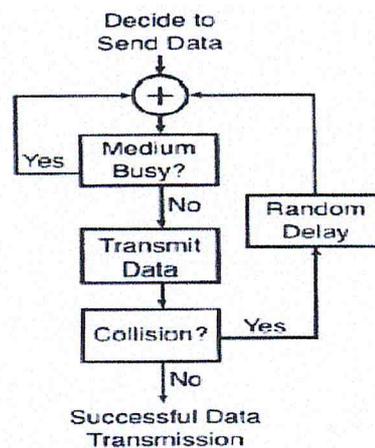


Figure 4.10 : Algorithme du DCF

Les messages courts RTS et CTS :

Il peut tout de même survenir des collisions malgré l'algorithme de reprise après collision BEB et l'acquittement des trames. Pour éviter surtout les problèmes des stations cachées et des trames longues (où les retransmissions coûtent du temps et la ressource spectrale), le standard définit un mécanisme **optionnel** qui permet de faire des réservations de canal. Ce mécanisme est appelé écoute virtuelle de porteuse.

Une station voulant émettre transmet d'abord un petit paquet de contrôle appelé RTS (Request To Send), qui comprend la source, la destination, et la durée de transmission (c'est à dire la durée totale de la transmission du paquet et de son accusé de réception) la station destination répond (si le canal est libre) avec un paquet de contrôle de réponse appelé CTS (Clear To Send) qui inclura les même informations sur la durée.

Toutes les stations écoutant soit la trame comprenant la demande de canal RTS, soit la trame de réponse de réservation CTS, déclencheront leur indicateur de l'écoute virtuelle (Virtual Carrier Sense) appelé NAV pour Network Allocation vector pour une certaine durée, et utiliseront cette information avec la procédure d'écoute de support.

Grâce à l'envoi de la trame RTS, toutes les stations situées dans la couverture radio de la source sont informées d'une transmission imminente et de sa durée éventuelle. Elles peuvent ainsi mettre à jour leur NAV et passer en mode économie

d'énergie pour la dite durée. Le CTS a le même rôle d'annonce mais cette fois autour du récepteur. Ces deux trames sont courtes (20 octets pour RTS et 14 octets pour CTS) et rencontrent donc une faible probabilité de collisions (Fig.4.11).

Ce mécanisme quoique efficace entraîne un surcoût important occasionné par la transmission sur la voie radio des trames de signalisation RTS/CTS. Ce surcoût correspond à autant de bande passante qui n'est pas utilisée pour transmettre des données. C'est pourquoi à ce mécanisme est associé un seuil de déclenchement qui en limite l'usage lorsque le surcoût devient trop important. Si la longueur des données à transmettre est inférieure à ce seuil, la transmission se fera sans utilisation des trames RTS/CTS. Si le seuil est dépassé alors le mécanisme est utilisé pour la transmission.

Ce mécanisme demeure inopérant pour la transmission de trames diffusées à tous les membres dites trames broadcast. En effet, le destinataire n'étant pas unique, on ne peut avoir de réponse en retour (CTS) et par conséquent des collisions sur les trames diffusées sont toujours possibles.

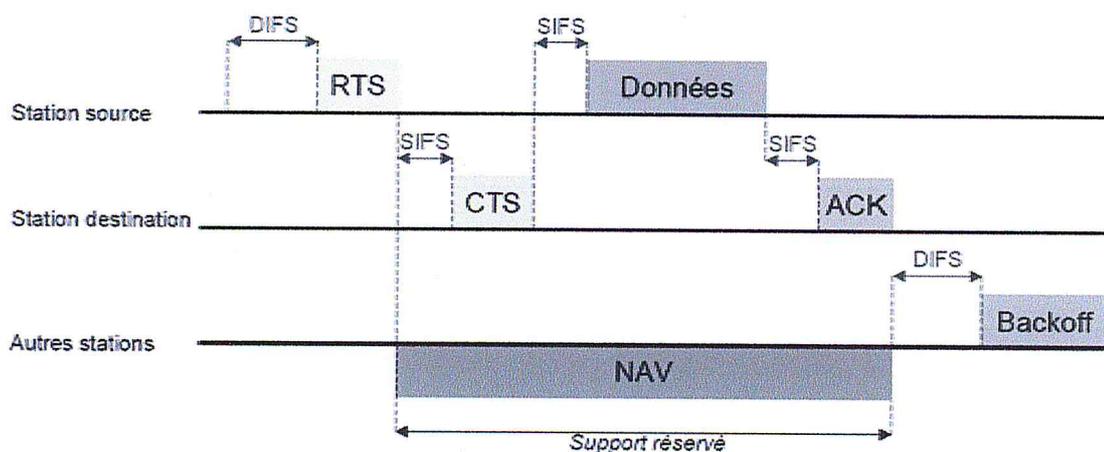


Figure 4.11 : L'usage du RTS/CTS et du NAV

7.3. Couche réseau



Dans ce qui suit, on va garder les mêmes paramètres d'architecture (plate) et ceci au niveau des deux couches : physique et liaison, vu que le matériel utilisé ainsi que les protocoles de la sous-couche MAC sont idem (on parle d'homogénéité), la variation va se faire au niveau de la troisième couche (au niveau de l'acheminement des données).

En restant sur la même architecture aux niveaux 1 et 2, on va procéder à la variation des protocoles de routages pour obtenir à la fin plusieurs architectures issues de cette dernière.

7.3.1. Architecture à routage par « Flooding »

La technique utilisée dans cette architecture est celle de l'inondation. Avec le standard IEEE 802.11 cette solution peut s'avérer très utiles mais alors elle peut aussi présenter quelques contraintes.

7.3.1.1. Topologie et simulation

La simulation va représenter un champ comptant 300 oliviers et un capteur pour un arbre (25x12) nœuds avec des distances conformes au type de plantation (7mx8m), le traçage est programmé pour être complet c'est-à-dire qu'il doit nous renseigner sur toutes les données de la couche mac ainsi que celle de transport...

Le flooding est une technique spécial de routage dont nous étions obligé de la programmer à zéro en TCL et cela et du au fait qu'il combine le travail des trois couche supérieure en une seule ce qu'il nous a privé d'utiliser les fonctionnalité existante sur le simulateur et de programmer des fonctions « send » et « receive » spécifique au flooding en intégrant sa logique d'inondation et de gestion de redondances.

Cette simulation a duré un peu plus de 30 minutes, son fichier de trace occupé près de 900Mo.

7.3.1.2. L'évaluation

Après simulation, intégration des résultats de trace dans le SGBD et leur injection dans un tableur grâce à plusieurs requêtes, nous avons pu arriver à l'évaluation ci présente.

Fiabilité :

Le graphe suivant montre la fiabilité de l'acheminement de données en utilisant la technique du Flooding dans notre réseau de capteurs :



Figure 4.12 : Taux de perte des messages acheminés par inondation

En observant le camembert (Fig.4.12) qui reflète le phénomène de perte de messages, on remarque que sur 300 messages envoyés, un très grand nombre voir presque la totalité (un taux de 97%) était perdu avant d'atteindre sa destination finale qui est le nœud puits (Sink), que 3% des messages envoyés ont été acquittés par le nœud puits soit 10 message sur 300. Ce qui fait que la solution adoptée dans ce cas est vouée à l'échec.

Cet échec ne peut être justifié que par deux causes plausibles à savoir la saturation des files d'attente des nœuds par rapport au grand flux de messages émis par diffusion (broadcaste), ou encore les collisions causées par le grand nombre de messages envoyés simultanément, les deux causes mentionnées vont se refléter par le rejet de messages (drop). Le graphe qui suit va montrer le grand taux de rejet de messages (drop) :

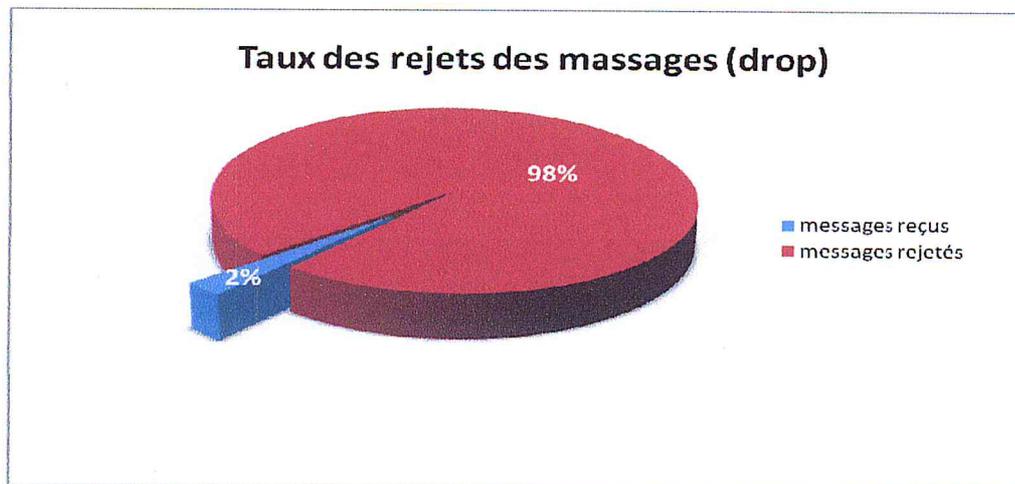


Figure 4.13 : Taux des rejets des messages acheminés par inondation.

Ces résultats sont interprétés par le fait que ce taux très haut de rejets de messages dû à la densité du trafic et à la fréquence des collisions, revient au mauvais timing de l'envoi de messages, c.à.d. dans le cas en question, dès qu'il y a un prélèvement tensionométrique des capteurs, tous ces derniers se mettent à émettre leurs informations en même temps ! Ce qui crée ce problème de collisions...

Pour pallier à ce problème une solution s'impose, il s'agit de changer les temps d'émission des informations de captage, donc au lieu d'envoyer toutes ces informations en mêmes temps on va séparer les temps d'activation des nœuds d'un intervalle de temps significatif, cela dit on va étaler les temps d'émission des messages sur une période P dans laquelle les émissions vont se succéder.

Topologie et simulation de la solution proposée

Pour pouvoir tester cette solution, on l'a implémenté sur notre simulateur mais cette fois ci avec 500 nœuds et chacun couvrant un arbre (20x25 en gardant les distances conventionnelles) et en étalant les émissions sur une période $P = 500s$. Ce qui fait que chaque émission va être séparé de sa précédente d'une seconde (1s.). Le traçage est complet : Niveau physique jusqu'au niveau transport.

La simulation a duré approximativement 6 heures 30 minutes et elle a finalement pris fin par une erreur (Error stack).

Par la suite, on a repris cette même simulation mais avec un nombre moins important de nœuds plus précisément 300 nœuds (12x25), la simulation a bien duré 4 heures 30 minutes mais le résultat était là, un fichier de trace de 5Go contenant un peu plus de 48 millions de ligne, et un autre fichier pour l'animation de 1.5Go.

Réévaluation

Après avoir suivi les mêmes étapes on est arrivé à ce qui suit :

Fiabilité :

Voici le graphe qui représente le taux de perte des messages et ceci après l'implémentation de la solution (Fig.4.14):

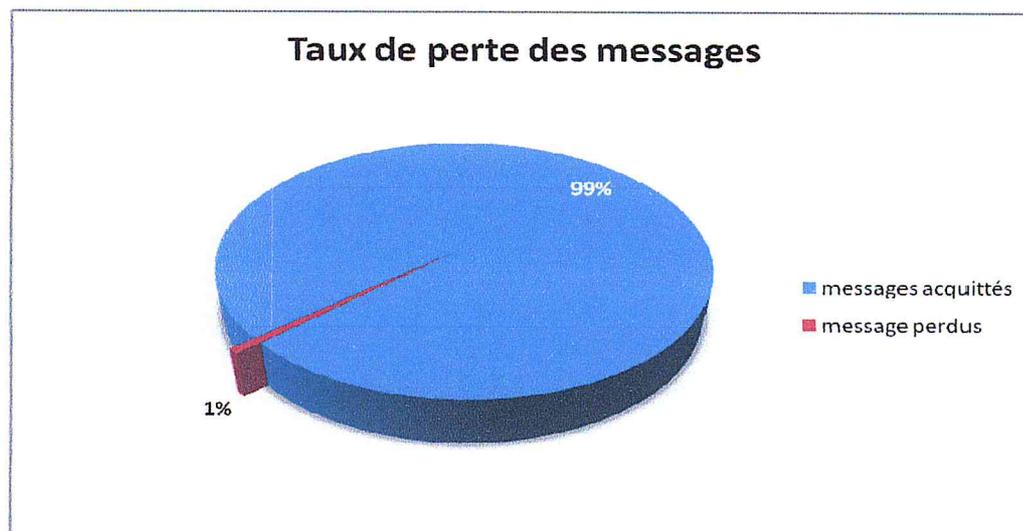


Figure 4.14 : Taux de perte des messages acheminés par inondation avec intervalles entre les émissions

Donc, après avoir implémenté la solution des intervalles entre les émissions, le taux de fiabilité a augmenté à 99% ! Ce qui rend notre architecture réseaux très fiable.



Le problème des collisions est indépendant de la couche réseaux mais il se pose au niveau des couches inférieures, Dans toute l'étude qui va suivre cette solution sera adoptée pendant tous les tests puisque elle permet d'assurer une bonne fiabilité.

Temps de transmission:

Précédemment, on a pu voir que la technique de l'inondation pouvait être fiable, dans ce qui suit on va étudier le temps de transmission de chaque message arrivé à destination, les résultats sont représentés dans le graphe qui suit :

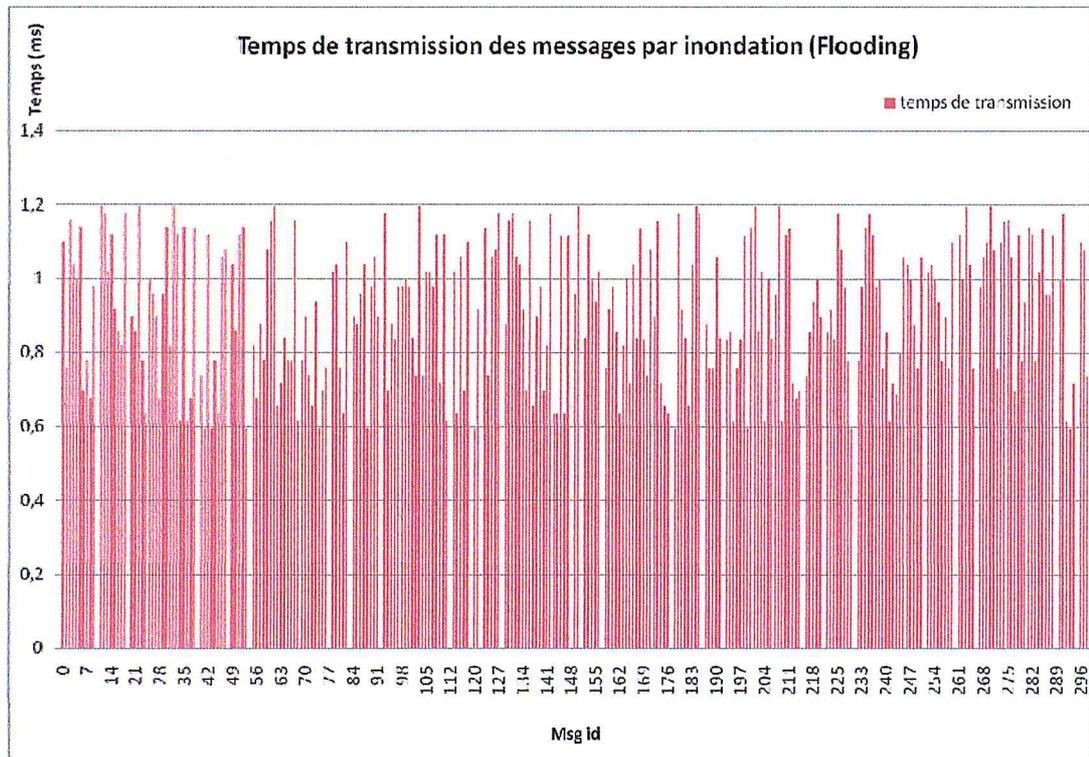


Figure 4.15 : Temps de transmission des messages par inondation

Ce qu'on peut constater à travers ce graphe, c'est que les temps de transmission varient entre 0.6 ms et 1.2 ms et ceci est un temps très acceptable vu qu'il faut 4,96s pour un message à fin de parcourir la distance entre le Sink et le nœud le plus éloigné du champ.

Cette variation de temps de transmission est directement liée au chemin emprunté par le message et le nombre de sauts effectué par celui-ci le long de ce chemin, pour bien comprendre le phénomène et l'étudier on s'est intéressé au nombre de sauts effectué par les messages transmis au Sink, mais la simulation a révélé que tous les messages arrivés a destination n'ont effectué qu'un seul saut ! C'est-à-dire que chaque message transmis au nœud puits lui a été envoyé directement par sont émetteur premier (source).

Donc une transmission directe entre chaque nœud du champ et le Sink est possible, ce phénomène est expliqué par le fait que la distance entre les nœuds et le sink est assez réduite pour permettre la communication entre tous les nœuds et le nœud puits.

La première cause de cela est la portée très élevée de la norme de transmission utilisée (Wi-Fi), ce qui rend chaque nœud capable de couvrir tout le champ inclus le Sink, cela revient à dire que malgré la fiabilité de cette architecture et son efficacité fonctionnelle, elle ne permet pas de bien refléter l'utilité du routage et techniques d'acheminement de données.

Consommation d'énergie :

On s'intéressera dans cette partie à l'énergie consommée par nos nœuds dans le cas échéant, l'énergie consommée par chaque nœud est représentée dans le graphe suivant :

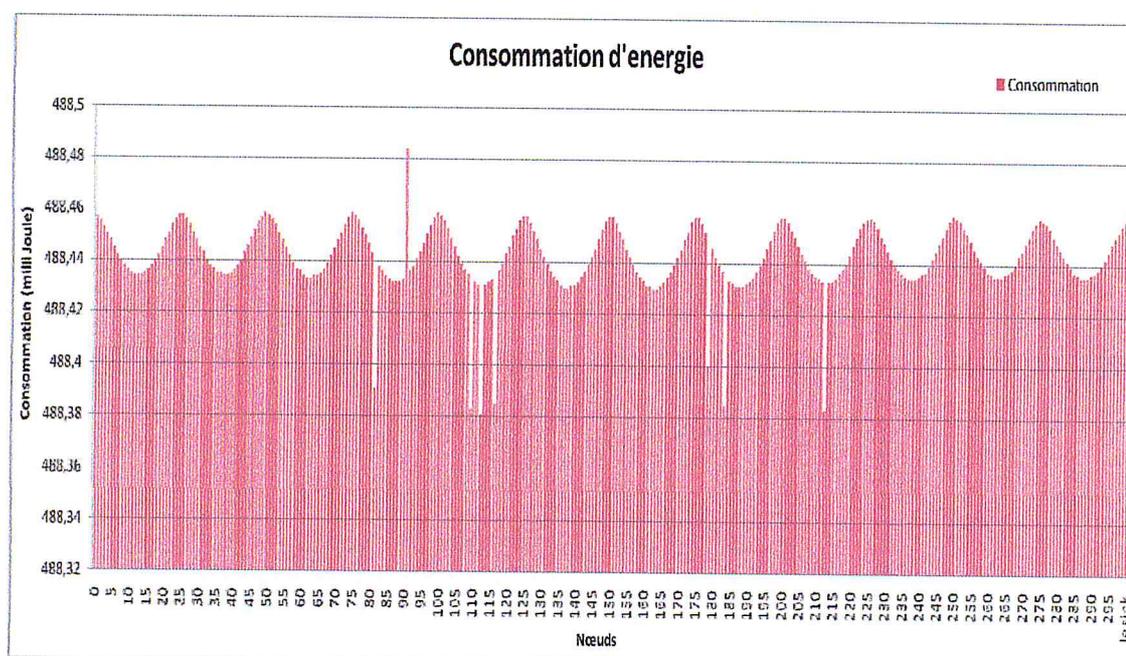


Figure 4.16 : Consommation d'énergie par chaque nœud durant l'acheminement de données d'un prélèvement

Les résultats présentés par ce graphe sont très intéressants ainsi que révélateurs, car on peut constater que l'énergie varie d'une façon régulière voir oscillatoire de 488,43 milli joule à 488,45 milli joule, cette consommation est très modérée par rapport aux batteries des capteurs ce qui permet aux capteurs de fonctionner longtemps sans pannes.



On peut rencontrer des exceptions dans la consommation vu qu'il existe des nœuds avec des consommations hors norme (ex: nœuds 90 / 488,84), ce sont des cas défavorisés ce qui fait le phénomène des nœuds épuisés.

On a cherché à comprendre la cause de cette variation régulière de l'énergie par rapport aux nœuds, et on a fini par arrivé a une explication rationnelle, ceci dit cette variation est en relation directe avec la position et la distance entre les nœuds capteur et le Sink : Notre champ est un rectangle de 12x25 nœuds, la consommation des nœuds est représentée dans la figure qui suit (Fig.4.17) :

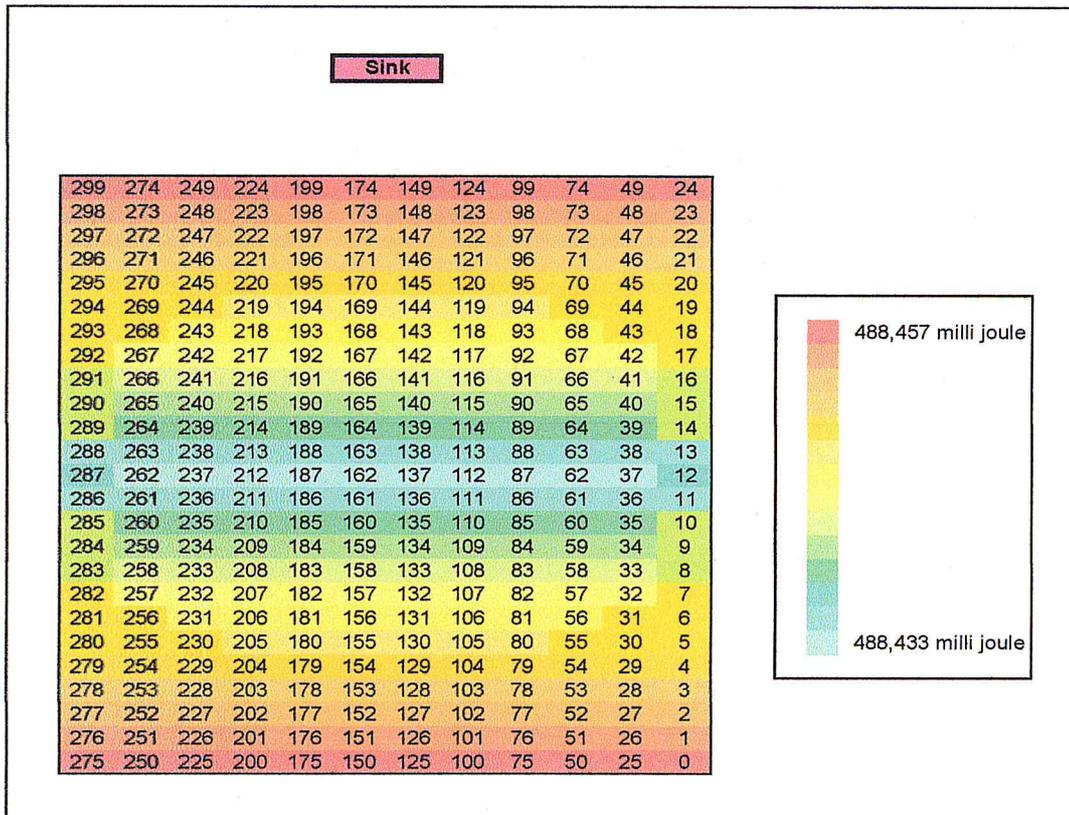


Figure 4.17 : distribution de la consommation par rapport au positionnement des nœuds

Donc, d'après ce qu'on peut constater à partir de cette figure, c'est que la consommation connaît une hausse aux extrémités du champ, l'origine de ce phénomène est expliquée par le rejet des messages, effectivement le taux de « Drop » est plus élevé au niveau des nœuds situés au centre du champ, ce qui fait qu'au lieu que ces nœuds se trouvant au milieu consomment de l'énergie en recevant les messages et en les retransmettant comme le reste des nœuds, eux ils les rejettent en économisant de l'énergie par rapport au autres et cela est du au grand flux de messages présent au centre du champ et provenant de tous les coins de celui-ci.

Parmi les autres causes de l'augmentation de consommation on trouve la redondance des messages envoyés, le taux de redondance est représenté dans le graphe ci-dessous (Fig.4.18) :

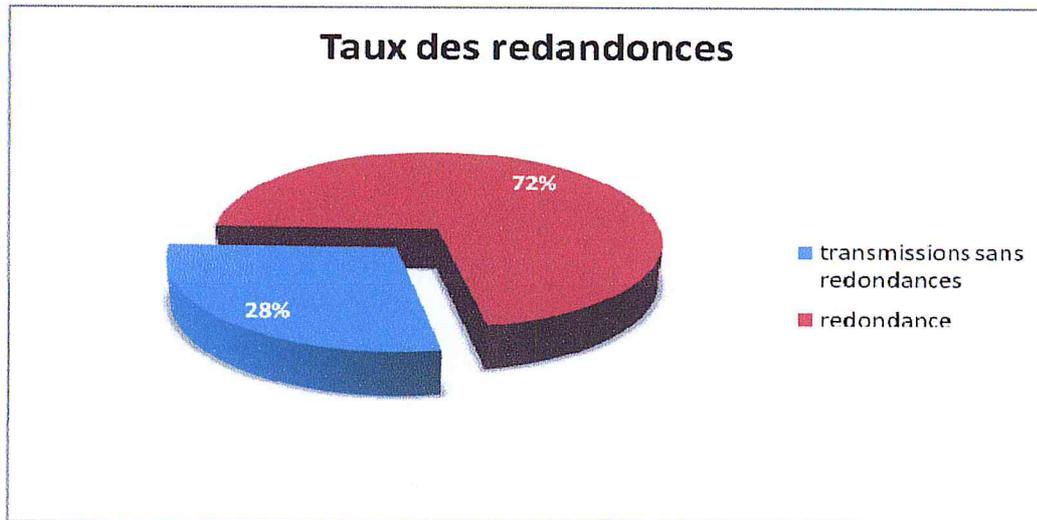


Figure 4.18 : Taux de messages redondants

A travers ces résultats on peut dire que le nombre de messages redondants par rapport à tous les messages envoyés est très élevé (72%), d'où la consommation inutile de l'énergie. Vu que les envois de messages utiles à l'acheminement de l'information sont minimes par rapport au nombre total d'envois comme le montre le camembert qui suit (Fig.4.19) :

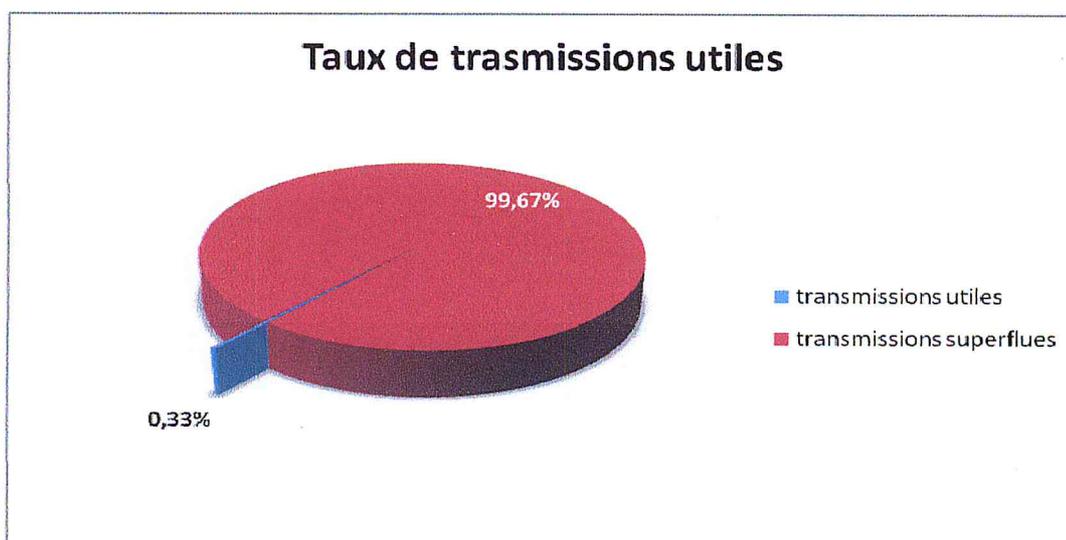


Figure 4.19 : Taux de transmissions utiles à l'acheminement de données

Effectivement le taux de message utiles est très bas par rapport au nombre total de message envoyés, notant que parmi les 28% des messages transmis c'est-à-dire non redondant, on compte que 0.33% de transmissions ayant contribué à faire parvenir les messages au Sink, ce qui nous ramène à dire qu'il y a eu que 0.09% d'énergie consommée pour transporter l'information et une perte de 99.01% ! Ce qui confirme notre théorie de gaspillage d'énergie.

D'après ces statistiques, on conclut que cette architecture qui se base sur la technique de l'inondation est fiable et rapide certes, mais cotés énergie, elle gaspille beaucoup ce qui nous pousse toujours à chercher le meilleur compromis surtout que cette technique d'acheminement présente plusieurs inconvénients, entre autres :

- L'implosion : cette situation parvient si des messages dupliqués sont envoyés au même nœud. Par exemple si un nœud capteur A à n nœuds capteurs voisins qui sont également voisin du nœud B, ce dernier recevra n copies du message envoyé par A.
- Le Chevauchement : si deux nœuds observant la même région sont stimulés en même temps, leurs nœuds voisins recevront des messages dupliqués.
- Ignorance de ressources : la technique d'inondation ne prend pas en compte les ressources d'énergie disponibles. Un protocole efficace en consommation d'énergie, cependant, doit prendre en compte à chaque instant la quantité d'énergie disponible.

Toutes fois, cette évaluation ne permet pas vraiment de montrer les vraies limites de cette architecture ! Effectivement, après avoir approfondis nos études, on a trouvé qu'une architecture fondée sur une telle norme ne conviendra pas trop à un champ agricole qui se réduit à un tels nombre d'arbres, parce que vu la portée du standard Wi-Fi, un autre problème s'impose... c'est le phénomène du sur-écoute « Overhearing », ce problème va se répercuter directement sur le rendement des nœuds capteur et ceci en influençant sur le taux des rejets de messages (Fig.4.13), et la limitation des transmissions utiles à un seul saut (Tab.4.2).

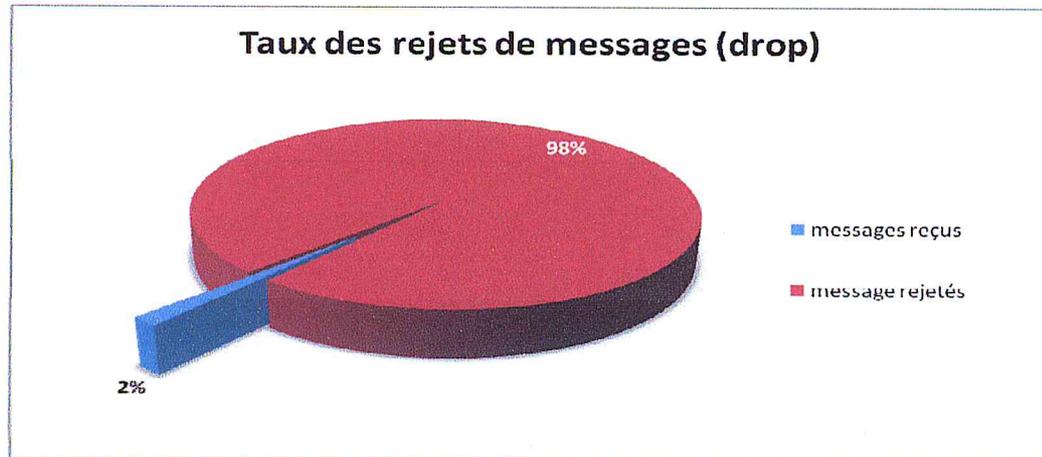


Figure 4.20 : Taux de rejets de messages acheminés par inondation avec intervalles entre les émissions.

Total messages émis	300
Messages transmis au sink avec succès	298
Messages transmis au sink en un seul saut	298
Message transmis au faisant plusieurs sauts	0

Tableau 4.2 : le nombre des messages acheminés avec plusieurs sauts

Comme on peut le constater le taux de rejets reste toujours trop élevés à 98%, et le nombre de sauts servant à transporter les message se limite à un seul saut, donc comme on a mentionné précédemment le standard Wi-Fi ne montre pas ses qualités dans un tel champ, alors on a procédé à soumettre cette architecture à de nouvelles tests avec des nouvelles conditions, l'étude qui vient va évaluer cette architecture dans un champ beaucoup plus vaste ainsi que dense, mais cette fois un nœud supportera 9 sondes d'une telle manière à couvrir un arbre avec les 8 autres arbres qui l'entourent. Un champ d'une telle ampleur permettra impérativement de bien montrer les vraies limites de cette architecture ainsi que sa vraie valeur fonctionnelle côté efficacité.

Estimation du coût :**Prix matériel nécessaire au déploiement :**

Notre champ dispose de N arbres et donc N capteurs et chacun prenant en charge une seule sonde, ce qui nous fait :

$$N \times (10\$ + 15\$) = N \times 25\$$$

Exemple >> avec un champ de N= 5400 arbres : $5400 \times 25 = 135\,000 \$$

Prix matériel de maintenance :

Il s'agit d'évaluer la consommation d'énergie et voir le coût de revient des batteries de rechange.

Vu que le nombre de capteur N est égale au nombre d'arbre on va utiliser des batteries de faible capacité, En utilisant des batteries AA 3,6V / 2100mAh, l'énergie délivrée est de 6 804 000 milli joule, la consommation maximum d'un nœud avec cette technique de routage et durant un seul prélèvement est de 488,58 milli joule, 3 prélèvements sont effectués par journée, le calcul donne :

$$488,58 \text{ milli joule} \times 3 = 1465,74 \text{ milli joule / jour}$$

Ce résultat représente la consommation journalière d'énergie par nœuds capteur, on calcule maintenant la durée de vie de notre batterie :

$$6\,804\,000 \text{ milli joule} / 1465,74 \text{ milli joule} \approx 4642 \text{ Jours}$$

Ce qui nous fait plus de 12ans mais on va se limité a 5ans car c'est la durée de vie max pour une batterie lithium dans un tel capteur ^[5]; malgré ca il ne faut pas se laisser faire trompé en pensant que cette solution doit être économique coté énergie vu la longue durée des batteries, car au bout de cette durée, il faudra changer N batteries ! Ce qui nous fera :

$$N \times 0,40\$ / 5 = N \times 0,08\$ / \text{ans}$$

Exemple >> avec un champ de N= 5400 arbres : $5400 \times 0,08 = 432 \$ / \text{ans}$.

^[5] Canton de Vaud. *Développement durable*.

Architecture à Capteur multisondes

Topologie et simulation de la solution proposée

Comme on l'a cité, au cours de cette simulation on va prendre en compte un champ de 600 nœuds (25x24) ayant chacun 9 sondes donc couvrant 9 arbres (Fig.4.21) ce qui nous fait un champ de 5400 oliviers.

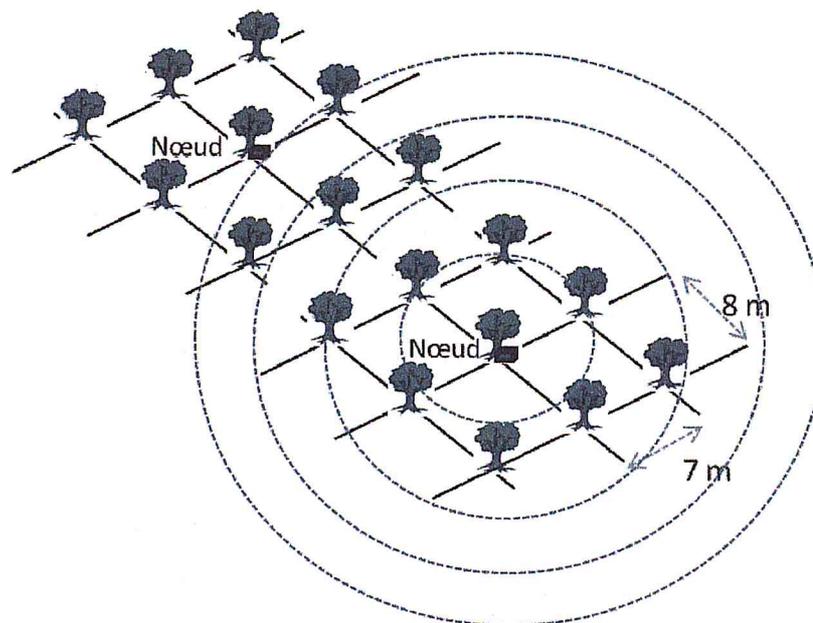


Figure 4.21 : disposition des nœuds multisondes dans le champ

La simulation est très couteuse en temps et très gourmande en ressources, donc il fallait trouver une solution pour contourner les problèmes des bugs, pour cela on a décortiqué la simulation en deux phases ou deux simulations, dans la première on a programmé un fichier de trace ne contenant que les informations concernant la sous couche MAC, la simulation en question a duré près de 13 heures et a donné comme résultat un fichier de trace d'une taille de 19Go et un fichier NAM de 4.6Go. La deuxième simulation elle, concerné les informations relatives a la couche transport et le suivi des messages par ID, cette simulation a duré environ 9 heures et a généré un fichier de trace de 7.75Go et un Fichier d'animation de 350Mo.

Réévaluation

Maintenant qu'on a effectué des changements dans notre architecture, on va la réévaluer en commençant par le taux de rejet de messages rejetés et le nombre de messages acheminés avec plus d'un seul saut, afin d'en juger de la valeur des améliorations apportées, le graphe suivant (Fig.4.22) montre le taux des rejets de messages :

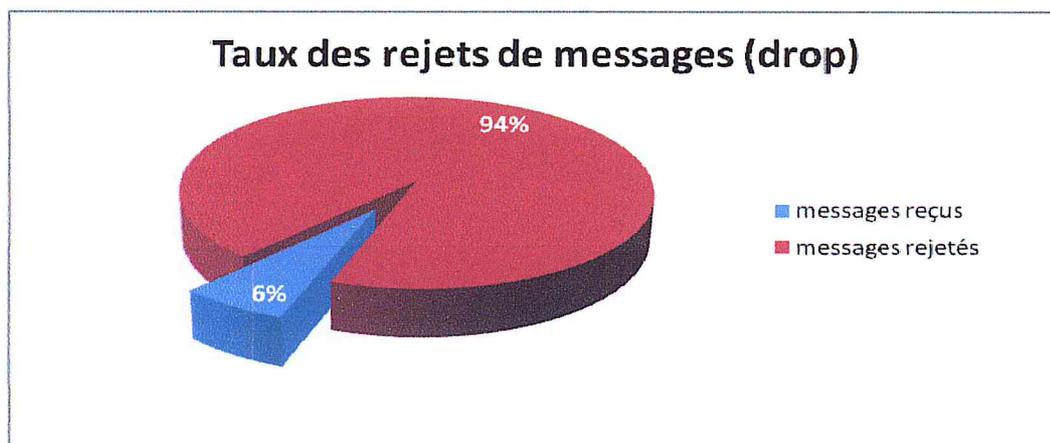


Figure 4.22 : Taux de rejets de messages acheminés par inondation avec des capteurs multisondes

L'amélioration apportée a finalement montré son utilité, vu que le nombre de rejets de messages a considérablement baissé, néanmoins ce taux de rejets reste toujours élevé et ceci dépend directement de la technique d'acheminement de données (flooding) qui ne peut être optimisé plus que cela dans le cas échéant, le tableau qui suit (Tab.4.3) montre le nombre de messages acheminés au sink en faisant plus d'un seul saut :

Total messages émis	600
Messages transmis au sink avec succès	597
Messages transmis au sink en un seul saut	156
Message transmis au faisant plusieurs sauts	441

Tableau 4.3 : le nombre des messages acheminés avec plusieurs sauts

Toujours est-il cette amélioration va apporter un plus à notre architecture et va permettre de montrer les vrais avantages de la norme sans fil utilisée et c'est ce qui va être démontré dans ce qui suit.

Fiabilité :

Le graphe qui représente la fiabilité de cette architecture est le suivant (Fig.4.23) :

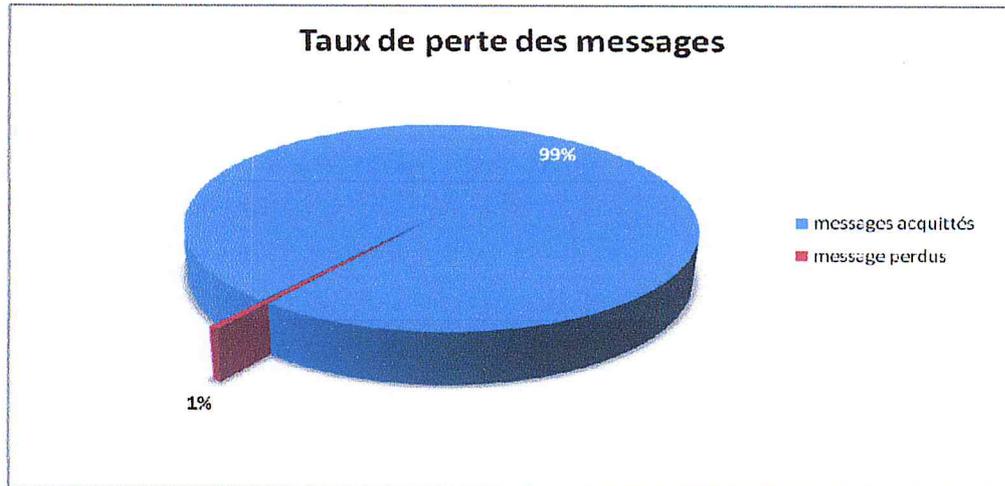


Figure 4.23 : Taux de perte des messages acheminés par inondation avec des capteurs multisondes

Comme on peut voir sur ce graphe, le moindre qu'on puisse dire sur cette architecture c'est qu'elle est très fiable avec un taux de fiabilité de 99%.

Temps de transmission:

Après avoir vu que notre architecture est très fiable, on va découvrir si ce bon taux de fiabilité ne va pas se répercuter sur les performances coté temps de transmission, et c'est ce que le graphe suivant va montrer (Fig.4.24) :

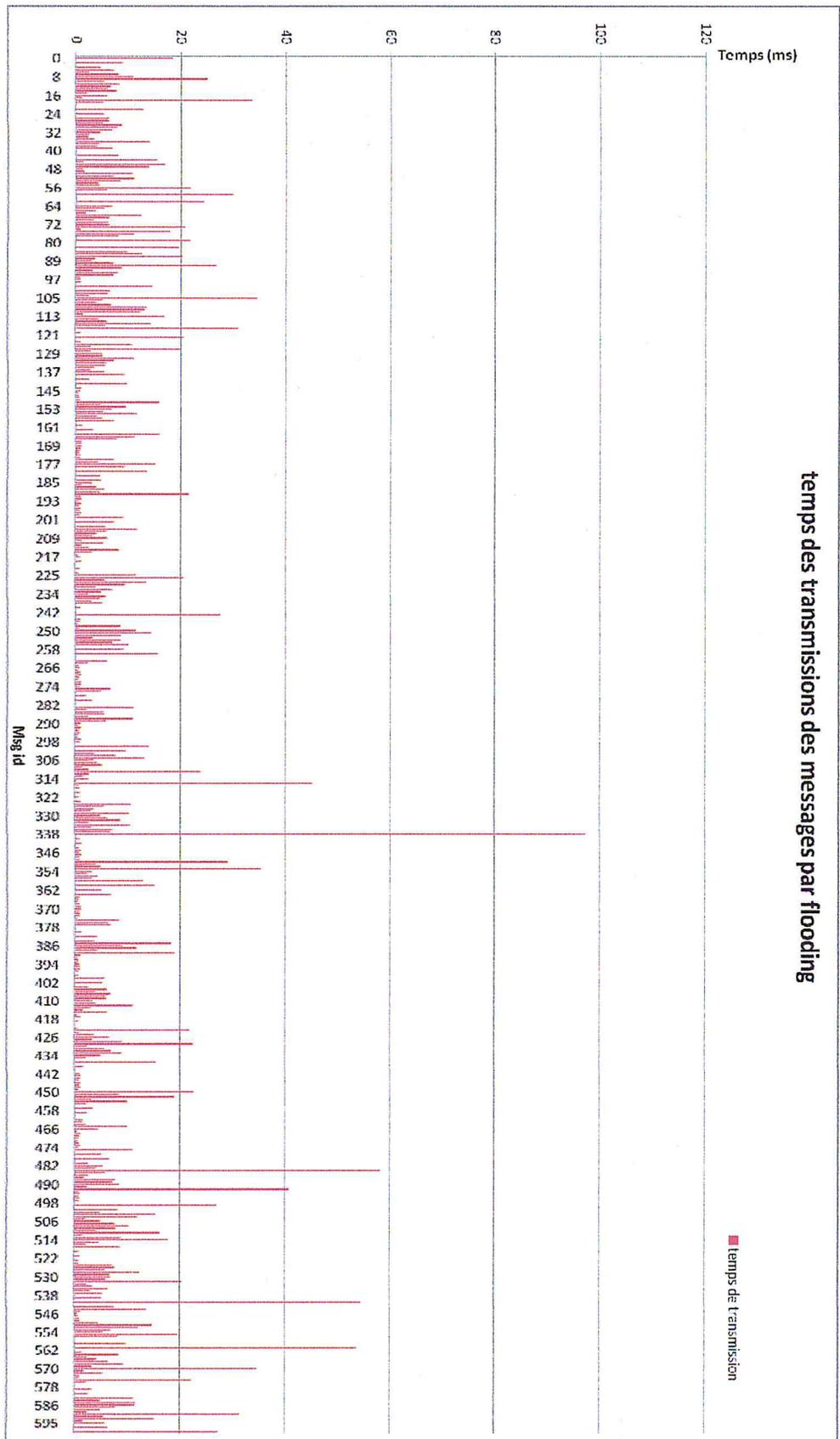


Figure 4.24 : Temps de transmission des messages par flooding

A travers ce graphe on peut constater que le temps de transmission varie entre 0.6 ms et 97 ms ce qui exprime un grand écart de latence, on remarque que la variation n'est pas vraiment aléatoire.

En se penchant bien sur le graphe, on a découvert qu'il y a un changement périodique qui revient, ce changement se fait voir sur des petites séries de valeurs à l'intérieur du graphe lui-même, plus précisément il prend sa forme avec des séries de 24 valeurs (Fig.4.24) par exemple entre les msg_id 175 et 199.

Aussi, à force d'observation on est arrivé à des remarques très pertinentes et qui nous ont conduites à leur tour à faire des études plus approfondies sur ce phénomène afin de résoudre l'origine de cette variation périodique et régulière, on a étudié sa forme, sa grandeur ainsi que le nombre de son apparition et ceci par rapport aux données initiales du cas d'étude et sa configuration matérielle et logicielle, et on est arrivé à faire une déduction aussi bien intéressante que bien argumentée.

Effectivement, observons bien le cours de ces variations, elles sont formées par des séries de 24 valeurs leur fréquence d'apparition dans le graphe est de 25 fois ! Ceci nous a ramené directement à faire la relation avec le déploiement de notre solution sur le terrain c'est-à-dire le nombre des capteurs par rang et par ligne (24x25).

En effet, la relation est cachée mais elle était là quand même, cette relation nous a poussé aussi à procéder à une autre initiative, c'est de chercher à positionner les optimums (les valeurs maximums et minimums) de ces variations sur notre champ, chaque temps de transmission est positionné dans les champs selon son nœud source, et la surprise était là, cette opération nous a permis de trouver une autre relation ! C'est que les temps de transmission des messages dépendaient directement de la position des nœuds sources et de la distance qui les sépare du sink, plus elle est réduite plus le temps de transmission est réduit.

Après être arrivé à cette conclusion, un autre phénomène a attiré notre attention, c'est que les messages émanant des nœuds les plus près du sink faisaient le temps le plus réduit pour parvenir à ce dernier (ex : les nœuds entre 191 et 199), l'explication qu'on a trouvée était très rationnelle, le nœud Sink rentre forcément

sous la couverture réseau des nœuds les plus près, ce qui fait que ces nœuds transmettaient leurs messages à destination sans répétitions.

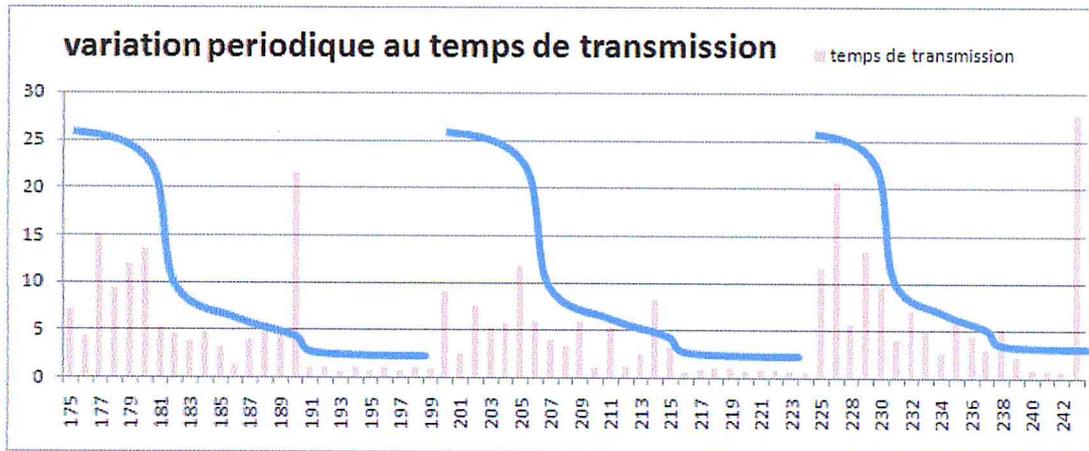


Figure 4.25 : Agrandissement des variations périodiques au temps de transmission

Une autre observation a attiré notre attention elle aussi, c'est qu'il y a une autre forme de variation qu'on a remarqué qu'après avoir vu le graphe à petite échelle, c'est-à-dire à regard éloigné... cette variation touche l'intégralité des valeurs du temps du premier message jusqu'au dernier, elle n'est pas vraiment claire mais elle y est, si on donnerait un effet de distorsion à cette variation ça donnerait le résultat représenté au graphe suivant (Fig.4.26) :

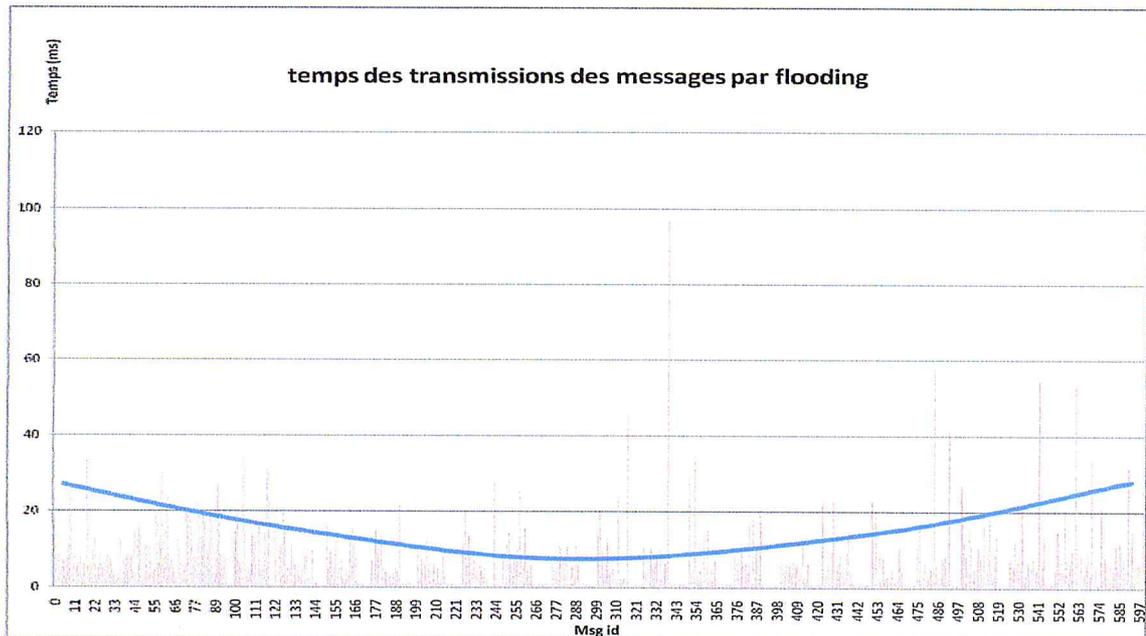


Figure 4.26 : Forme générale du graphe du temps de transmission

Après avoir procédé de la même façon qu’au premier cas, c’est-à-dire comparer cette variation des temps de transmission de chaque message par rapport à la position de son nœud source dans le champ, on a pu déduire que cette forme est dû à l’éloignement des nœuds émettant ces messages du sink, en effet les nœuds qui se rapprochent plus des coins du champ émettent des messages qui mettent plus de temps que les autre messages pour arriver au sink.

Consommation d’énergie

Dans le graphe suivant, on va s’intéresser a l’énergie consommée par chacun des nœuds et ceci durant un seul prélèvement, le résultat est représenté ci-dessous (Fig.4.27):

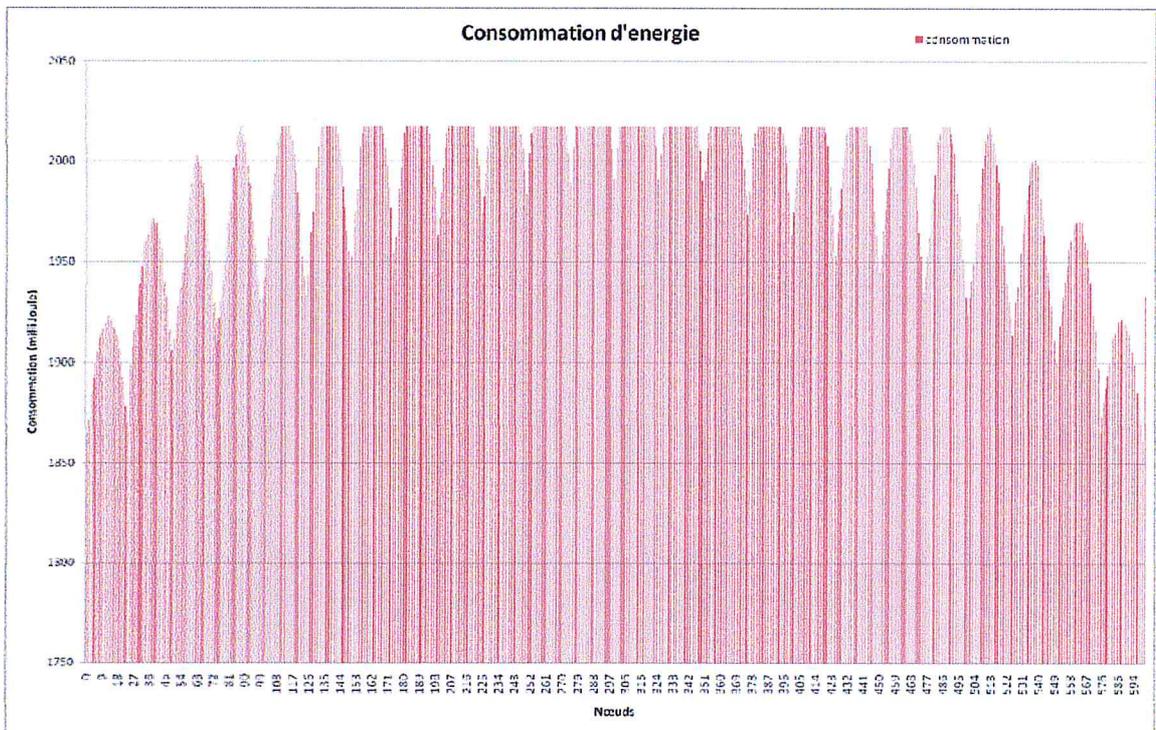


Figure 4.27 : Consommation d’énergie par chaque nœud durant l’acheminement de données d’un prélèvement

A travers ce résultat, on voit que l’énergie consommée par les nœuds pendant l’acheminement de données varie entre 1860 mJ et 2010 mJ, à noter une consommation importante dans ce cas, on retrouve presque le même phénomène que dans le graphe des temps de transmission, deux types de variation sont présentes, la première variation est celle qui est périodique et qui touche chaque série de 24

valeurs (Fig.4.28), la deuxième est celle qui se voit sur l'ensemble du graphe vu que le graphe est parfaitement symétrique (Fig.4.29).

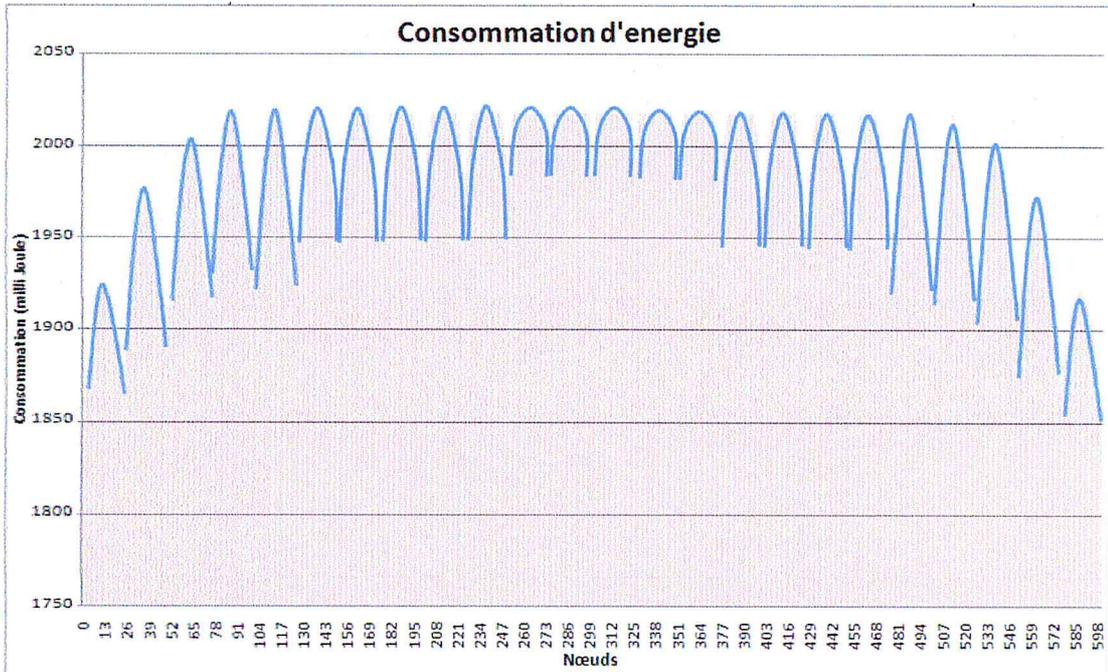


Figure 4.28 : Agrandissement des variations périodiques dans la consommation d'énergie

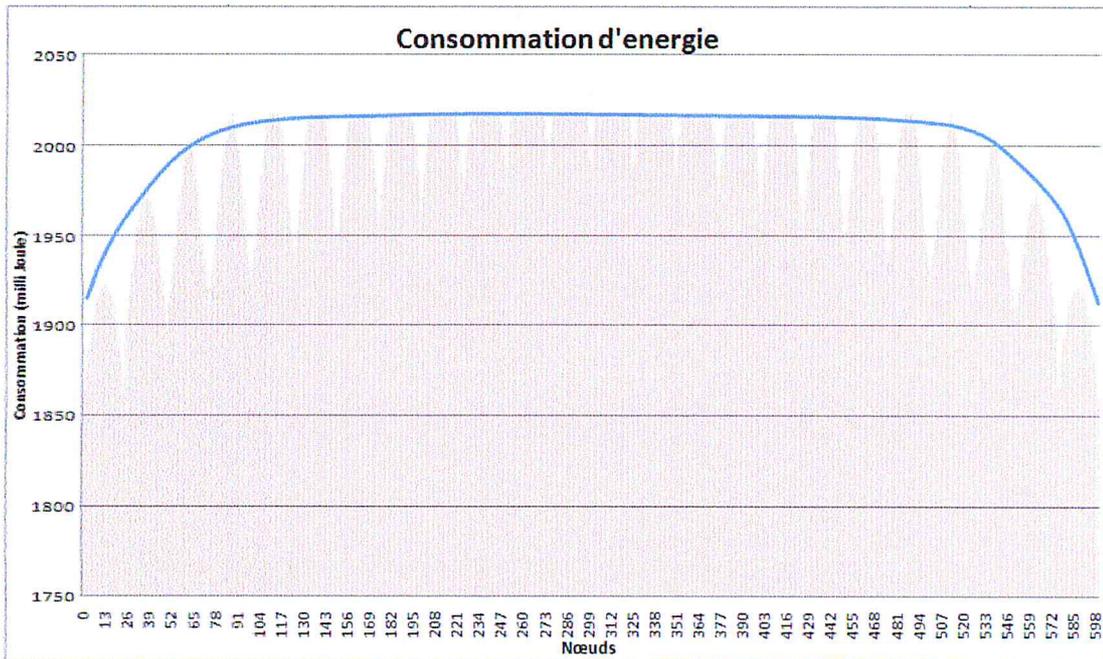


Figure 4.29 : Forme générale du graphe de consommation d'énergie

La première variation est bien comme le cas précédent (temps de transmission) dû à la position du nœud au champ par rapport au sink, les nœuds qui se trouvent au milieu du champ consomment plus d'énergie que ceux se trouvant aux extrémités du champ (Fig.4.30) (les premières rangées à partir du Sink et les dernières).

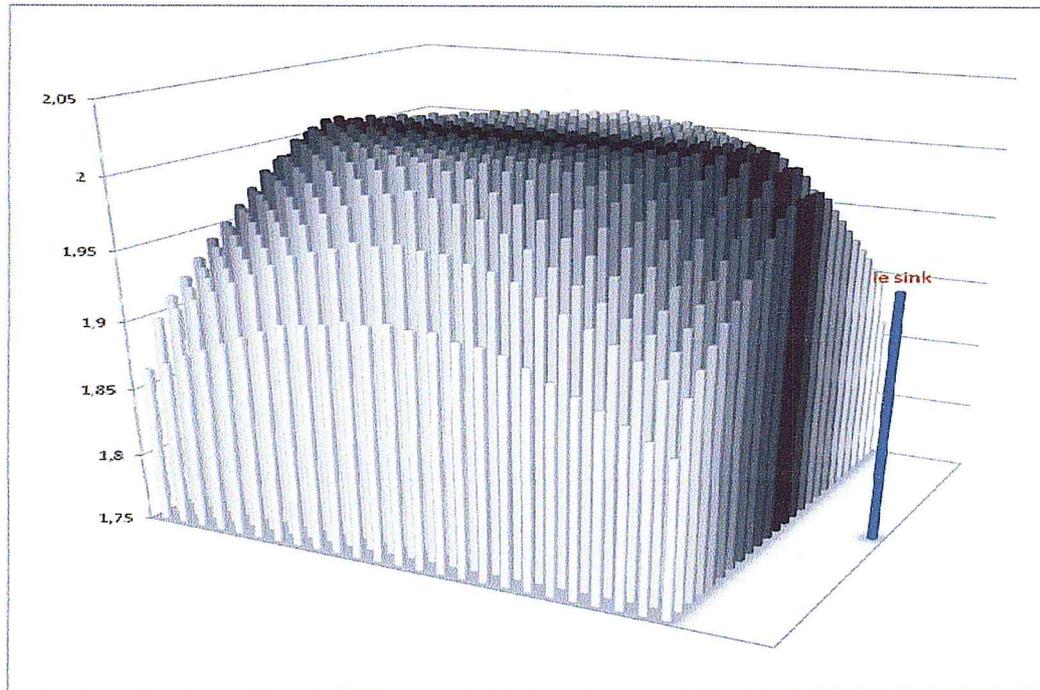


Figure 4.30 : Disposition de la consommation sur le champ

On a cherché à expliquer ce phénomène, et on est arrivé à une conclusion qui l'expliquerait très bien, ce surplus de consommation dans ces régions est principalement dû au fait que les nœuds se trouvant au centre du champ effectuent presque un double travail, effectivement ces nœuds étant soulagés par la grande distance qui a diminué les rejets de messages, sont contraints à diffuser tous les messages émanant de tous les côtés du champ vu qu'ils sont sous la couverture d'un grand nombre de nœuds, alors que ceux qui viennent aux extrémités ne sont pas à la portée de tous les nœuds, d'où leur basse consommation.

La deuxième variation est due à l'éloignement des nœuds par rapport au sink vers les coins, proportionnellement inversement, plus un nœud se rapproche du coin moins est sa consommation.

De la même sorte ces nœuds étant loin du sink, sont démunis de la mission de transmission des messages venant des autres nœuds, de plus la position des nœuds se trouvant a une extrémité leur permettent d'échapper à la couverture des nœuds se trouvant a l'autre extrémité.

Finalement, cette architecture est relativement gourmande en énergie, et ceci est justifié par la technique d'acheminement des données, quand on se rend a l'évidence, la diffusion (broadcaste) n'est pas la meilleure méthode de faire parvenir l'information bien qu'elle soit fiable, elle est en contre partie trop coûteuse cotés énergétique.

Cas de pannes :

D'après les graphes vu pendant l'étude de l'énergie, les pannes sont absente et leur possibilité est minime, vu que le phénomène des nœuds épuisé n'est pa répondu et tout le capteur ont fonctionné en bonne et dû forme.

Mais en cas de panne, la technique utilisé dans l'acheminement de données (Flooding) s'adapte facilement sans problèmes, vu que chaque message envoyé est arrivés plusieurs fois au sink, (minimum 3 fois) ceci est représenté dans le graphe suivant :

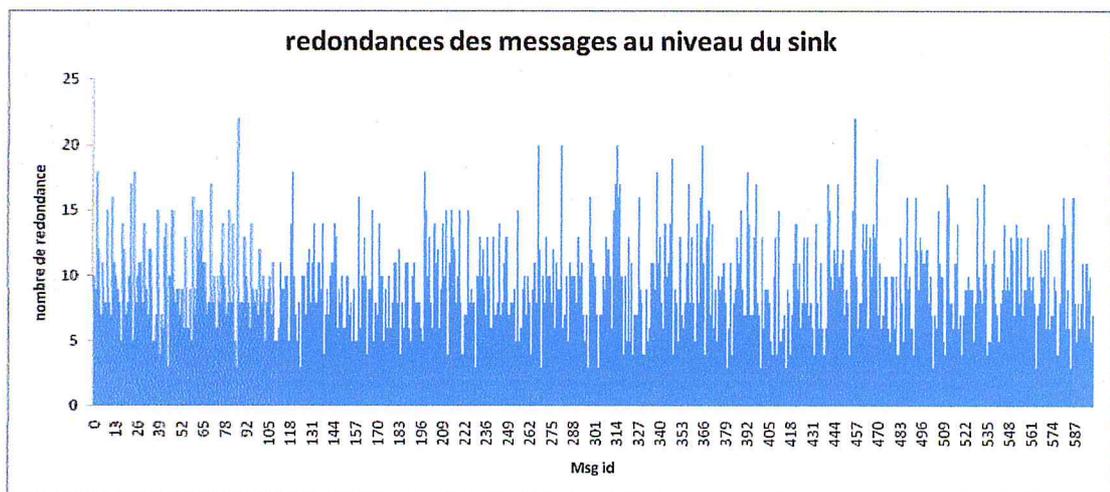


Figure 4.31 : Redondance des messages au niveau du nœud Sink

Estimation du coût :**Prix matériel nécessaire au déploiement :**

Notre champ dispose de N arbres et N/9 capteurs (chacun prenant en charge 9 sondes), ce qui nous fait :

$$N/9 \times 10\$ + N \times 15\$ = N \times 16,11\$$$

Exemple >> avec un champ de N= 5400 arbres : $5400 \times 16,11 = 86\,994 \$$

Prix matériel de maintenance :

L'évaluation de consommation d'énergie et voir le coût de revient des batteries de rechange :

On a N arbres, et le nombre de capteurs est de N/9, et d'après notre étude, le capteur aura plus de charge travail par rapport à l'architecture précédente, ce qui nous a poussé à choisir des batteries avec une capacité un peu plus importante, En utilisant des batteries AA 3,6V / 2250mAh, l'énergie délivrée est de 7 290 000 milli joule, la consommation maximum d'un nœud dans cette architecture et durant un seul prélèvement est de 2017,545 milli joule, 3 prélèvements sont effectués par journée, le calcul donne :

$$2017,545 \text{ milli joule} \times 3 = 6052,635 \text{ milli joule / jour}$$

Ce résultat représente la consommation journalière d'énergie par nœuds capteur, on calcule maintenant la durée de vie de notre batterie :

$$7\,290\,000 \text{ milli joule} / 6052,635 \text{ milli joule} \approx 1204 \text{ Jours}$$

Ce qui nous fait \approx 3 ans et 3 mois de durée de vie pour la batterie du nœud le plus défavorisé énergiquement dans le champ (les nœuds du centre du champ, donc le premier cas de panne à plus de chance d'arriver à ce niveau, mais ceci dit le changement de batterie de la totalité des capteurs du champs sera effectué en plusieurs fois ce qui devient coûteux, cela demande donc une étude, cette étude consistera à trouver le meilleur compromis de telle façon que toutes les batteries du champ

s'épuisent en même temps, c'est clair qu'une autre batterie moins importante coté capacité (AA 3,6V / 2100mAh) sera employée au niveau des nœuds de basse consommation.

On va commencer par trouver la consommation C nécessaire pour faire épuiser une batterie de 2000mAh qui délivre 6 804 000 milli Joule en 3 ans et 3 mois :

$$C = 6\,804\,000 \text{ mJ} / 1204 \text{ jours} = 5651,162 \text{ mJ} / \text{jours}$$

$$5651,162 / 3 \text{ prélèvements} = 1883,720 \text{ mJ} / \text{prélèvements}$$

Donc tous les nœuds ayant une consommation $\leq 1883,720$ mJ par prélèvements auront une batterie de 2100 mAh, ce qui représente 12 capteurs dans notre exemple, ce qui permettra de diminuer le coût.



On peut proposer plus de types de batteries à plus basse consommation et plus faible coût pour mieux contrôler la recharge de celles-ci et plus économiser l'énergie et l'argent.

Exemple >> avec un champ de $N= 5400$ arbres

Maintenant on va calculer le coût général de la maintenance en calculant celui des deux types de batteries :

On commence par le coût des batteries à plus grande capacité (2250mAh) :

On a 5400 / 9 capteurs donc 600 parmi lesquels 588 capteur utilise ce type de batteries :

$$588 \times 0,53\$ / 3,3 \text{ ans} = 94,27 \$ / \text{ans}$$

Calcule du coût des batteries à plus basse capacité (2100mAh) :

$$12 \times 0,40\$ / 3,3 \text{ ans} = 1,45 \$ / \text{ans}$$

Ce qui nous fait un coût de batterie totale de $94,27 + 1,45 = 95,92 \$ / \text{ans}$

Ce qui fait de cette architecture une alternative très économique par rapport à la précédente.

7.3.2. Routage par « DSDV »

Le protocole pro-actif DSDV sera utilisé dans ce cas pour acheminer les données.

7.3.2.1. Topologie et simulation

Dans ce qui suit, la simulation va concerner un champ de 300 nœuds distribués sur 2700 oliviers, ce qui fait un nœud pour neuf (9) arbres, les distances entre les arbres reste les mêmes c'est-à-dire 7m x 8m.

La simulation a duré plus de 3 heures, elle a généré un fichier de trace de presque 7Go.

7.3.2.2. L'évaluation

Après traitement des données extraites du fichier de trace on a pu élaborer l'étude présente.

Fiabilité :

La fiabilité de transport d'information via DSDV est représentée dans le graphe suivant :

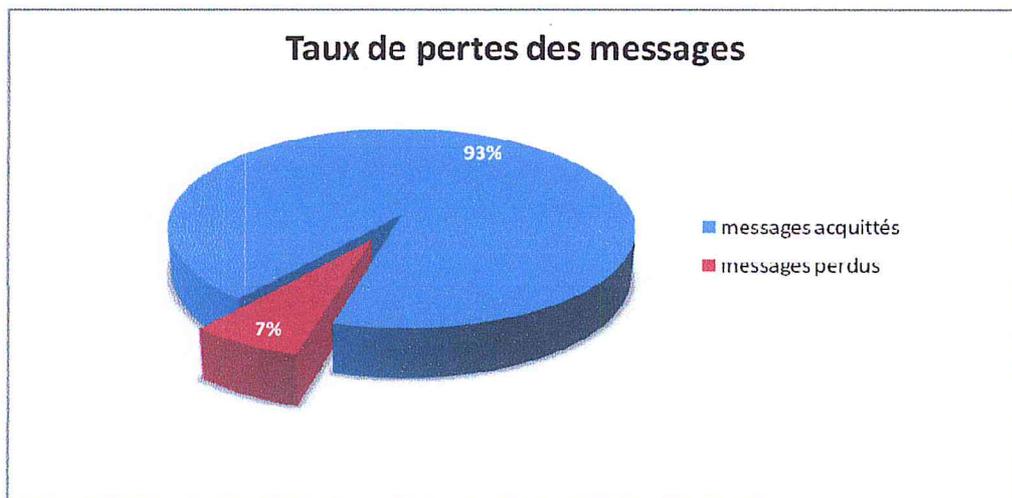


Figure 4.32 : Taux de perte des messages acheminés par le DSDV

Comme on le constate le taux de fiabilité de transport des informations avec le protocole DSDV est de 93% ceci dit, cette architecture est relativement fiable sachant que 7% des transmissions qui ne sont pas garanties représentent 20x9 sondes stériles ce qui nous fait 180 olivier négligés sur 5400 a chaque prélèvements.

Temps de transmission:

Dans ce qui suit, on va étudier le temps de transmission des messages acheminés par DSDV et ceci en focalisant notre étude sur le temps et le nombre de saut effectué.

Le graphe ci-dessous montre le nombre de saut par message :

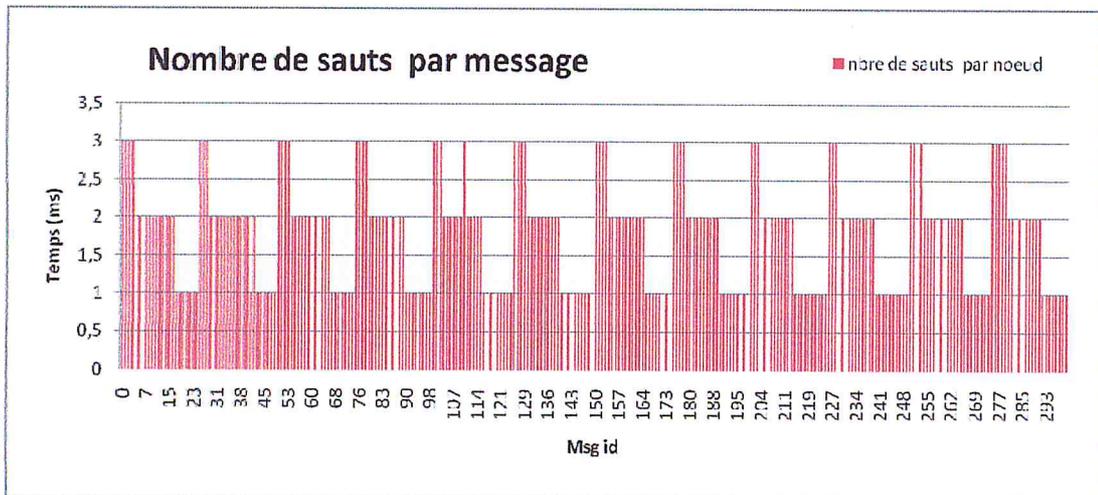


Figure 4.33 : Nombre de sauts effectués par chaque message pour atteindre le sink

D’après le graphe on remarque que le nombre de sauts varie entre un et trois sauts, cette variation se fait périodiquement chaque série de 25 nœuds, ce qui nous a poussé à tresser en 3 dimensions un graphe qui représente le nombre de sauts effectué par chaque message selon le positionnement de sa source dans le champ pour atteindre le sink (Fig.4.34)

Ce graphe montre que le temps de transmission d’un message varie selon la distance des nœuds sources de ces messages dans le champ.

Ce qui est tout a fait normal, les messages provenant des nœuds les plus loin du sink auront a faire plus de saut, et plus on se rapproche plus le nombre de saut

diminue, d'après nos théories le temps de transmission des messages les plus loin du sink est le plus élevé comme il diminue avec le nombre de sauts.

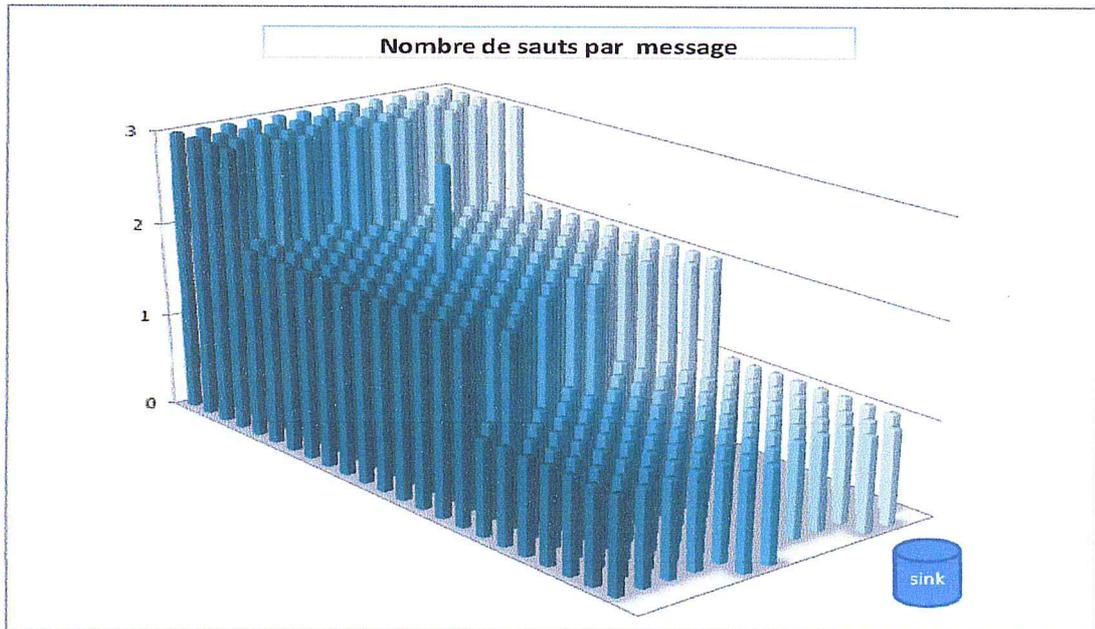


Figure 4.34 : Nombre de sauts par chaque message selon la position de sa source dans le champ

Pour montrer ce phénomène on a tracé le graphe de temps de transmission de chaque message (Fig.4.35) :

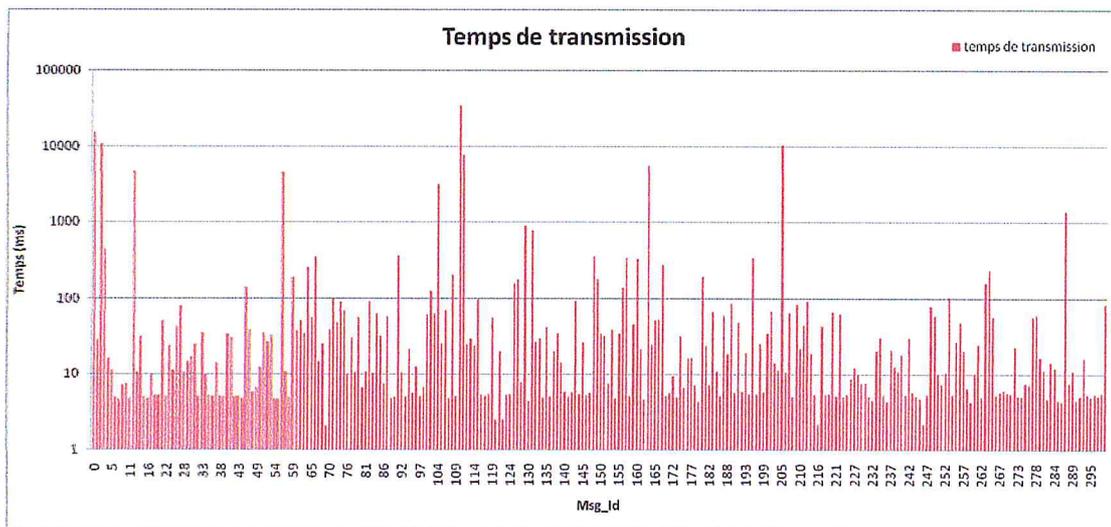


Figure 4.35 : Temps de transmission des messages par DSDV

Le graphe résultant montre que le temps de transmission varie entre 2 ms et 1400 ms ce qui est une très grande différence et ce qui nous a poussés à dessiner le graphe à l'échelle logarithmique.

Du graphe on peut dire que les temps varie d'une façon aléatoire, quand on cherche à expliquer ça, on sera ramené à dire que ce graphe ne montre pas vraiment le rapport entre la distance entre l'émetteur et le sink, ceci est du principalement au fait que parmi les messages qui circulent sur le réseau très peu nombreux sont qui représente l'information relative au captage, on trouve surtout les messages qui porte les table de routage et les mise à jour de ces tables ce qui crée un trafic assez important qui occupe le canal.

Consommation d'énergie :

Dans cette étape, on va évaluer la consommation d'énergie des nœuds avec cette architecture, la consommation est représentée dans le graphe suivant :

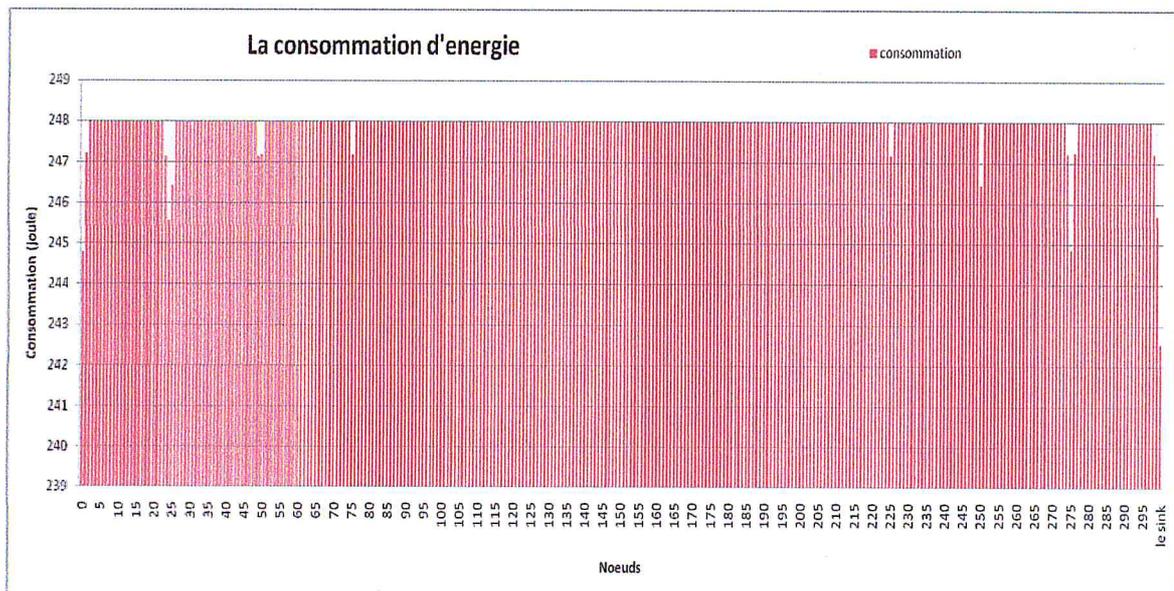


Figure 4.36 : consommation des nœuds en DSDV

Le graphe montre que la consommation d'énergie est très élevée, la majorité des nœuds ont stagné leur énergie à 249 Joule ! La consommation minimale est de 242 joules.

Cette consommation élevée est dû au grand nombre de transmissions périodique des tables de routage, ces transmissions sont trop nombreuses, ne font pas partie du chemin tracé et consomment de l'énergie tout le temps, vu que d'après notre simulation qui représente 3600 s (1 heure) dans la réalité pour donner le temps au trafic de s'arrêter complètement après un prélèvement et libérer le canal, le dernier nœud ayant envoyé un message a dû le faire au temps $T=300$ seconde, et le temps de transmission le plus élevé est de 34 s, donc le temps maximum nécessaire pour toute les transmission est de 334 s, or l'étude effectuée sur le fichier de trace de la simulation montre que les nœuds ont effectué chacun la dernière transmission à un temps $T= 3599,94$ s. Donc les nœuds n'ont pas arrêté de transmettre les messages de mise à jour jusqu'au dernier moment de la simulation ce qui est désavantageux pour notre application de ce fait on a prévu le nombre de prélèvements qu'à 3 par jour.

Le graphe suivant montre le taux de transmissions des tables de routage et mises à jour (Fig.4.37) :

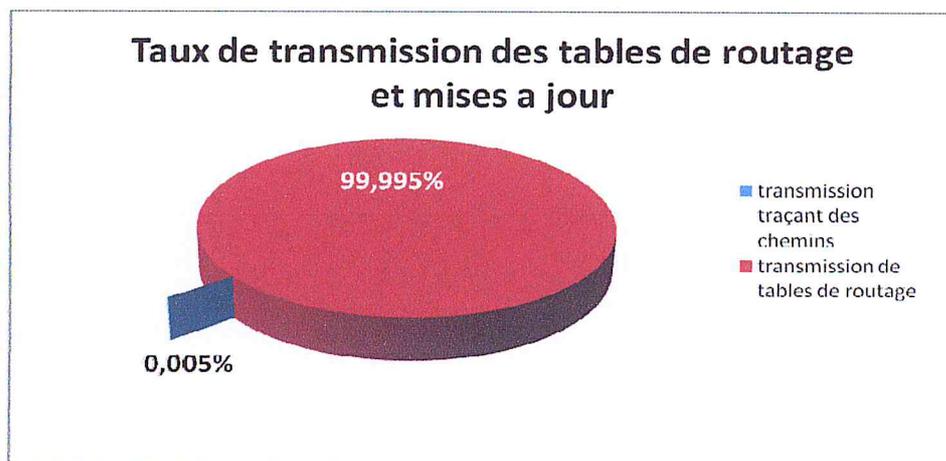


Figure 4.37 : Taux de transmission de tables de routage et leurs mises à jour

Dans ce protocole, une unité doit attendre jusqu'à ce qu'elle reçoive la prochaine mise à jour initiée par la destination, afin de mettre à jour l'entrée associée à cette destination, dans la table de distance. Ce qui fait que le DSDV est un protocole coûteux en termes d'énergie quand il s'agit de calculer le chemin à chaque fois, ce qui le rend un protocole utile pour les transmissions qui nécessitent une petite

latence et qui permettent de transmettre a haut débit quand il est question de ne pas changer les chemins a chaque fois.

Estimation du coût :

Prix matériel nécessaire au déploiement :

Notre champ dispose de N arbres et N/9 capteurs (chacun prenant en charge 9 sondes), ce qui nous fait :

$$N/9 \times 10\$ + N \times 15\$ = N \times 16,11\$$$

Exemple >> avec un champ de N= 2700 arbres : $2700 \times 16,11 = 43\,497 \$$

Prix matériel de maintenance :

L'évaluation de consommation d'énergie et estimation du coût de revient des batteries de rechange :

On a N arbres, et le nombre de capteurs est de N/9, et d'après l'étude, les capteurs consomment presque tous un taux très élevé d'énergie, ce qui nous a poussé a choisir des batteries avec une capacité assez importante, En utilisant des batteries AA 3,6V / 2250mAh, l'énergie délivrée est de 7 290 000 milli joule, la consommation maximum d'un nœud dans cette architecture et durant un seul prélèvement est de 247990 milli joule/prélèvement, 3 prélèvements sont effectués par journée, le calcul donne :

$$247990 \text{ milli joule} \times 3 = 743970 \text{ milli joule / jour}$$

Ce résultat représente la consommation journalière d'énergie par nœuds capteur, on calcule maintenant la durée de vie de notre batterie :

$$7\,290\,000 \text{ milli joule} / 743970 \text{ milli joule} \approx 9 \text{ Jours}$$

9 jours est une durée à négliger dans les réseaux de capteurs, ce qui fait que cette architecture n'est pas du tout rentable.

7.3.3. Architecture à routage par « AODV »

Dans cette architecture on va faire appel au protocole réactif « AODV ».

7.3.3.1. Topologie et simulation

Dans ce qui suit, la simulation va conserver la même topologie, 300 nœuds, 1 capteur pour 9 arbres, les distances entre les arbres reste les mêmes c'est-à-dire 7m x 8m.

Cette simulation a duré près de 4 heures et a généré un fichier de trace de presque 4Go !

7.3.3.2. L'évaluation

L'étude des résultats du fichier de trace ont donné ce qui suit :

Fiabilité :

Le graphe en dessous représente le taux de fiabilité dans notre architecture utilisant l'AODV comme protocole de routage (Fig.4.38):

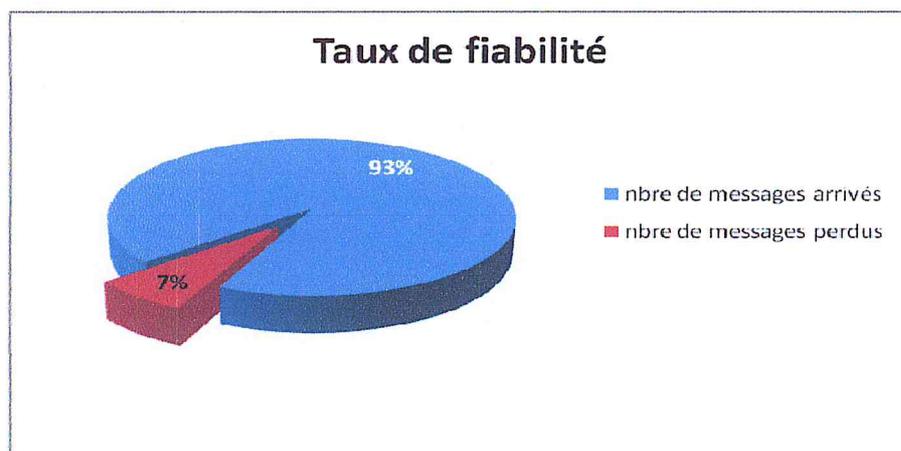


Figure 4.38 : Taux de perte des messages acheminés par l'AODV

Le taux de fiabilité de cette architecture utilisant le AODV comme protocole de routage est très acceptable, 93% des messages envoyés sont arrivés à leur destination contrairement à 7 nœuds, donc on peut dire que cette architecture est fiable.

Temps de transmission:

Maintenant on va étudier le temps de transmission des messages en calculant le temps et le nombre de sauts effectués par chaque message.

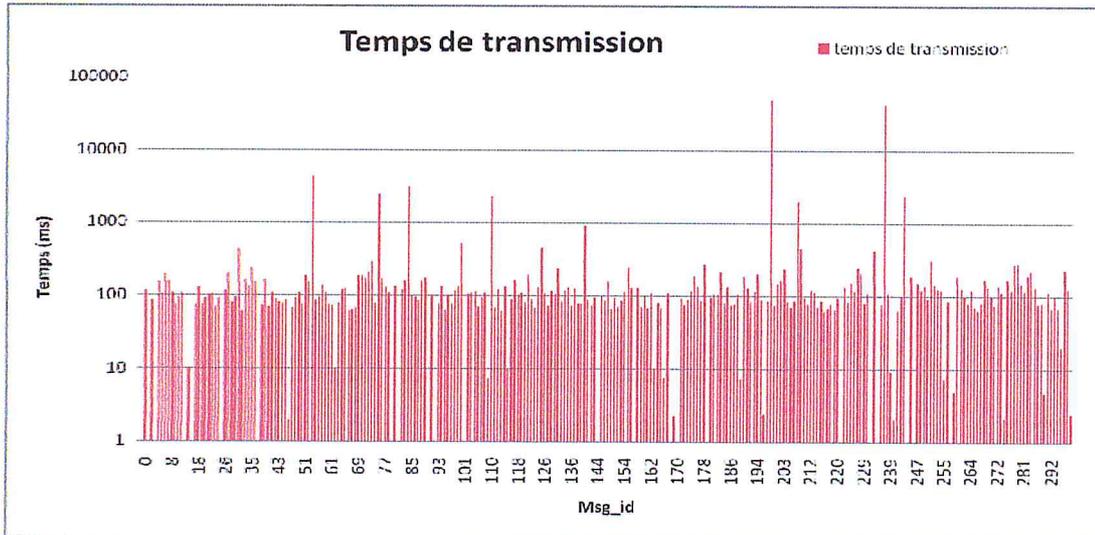


Figure 4.39 : Temps de transmission de messages par AODV

A travers ce graphe, on peut voir que le temps de transmission est en générale pas loin de 100 ms, avec des cas d’exceptions avec un temps beaucoup plus important jusqu’à près de 50 000 ms, ce qui rend ce graphe a l’échelle logarithmique.

Au faite, pour pouvoir expliquer ces temps de transmission nous nous somme reposé sur le nombre de sauts effectué par chaque message, ceci est représenté dans le graphe qui suit (Fig.4.40):

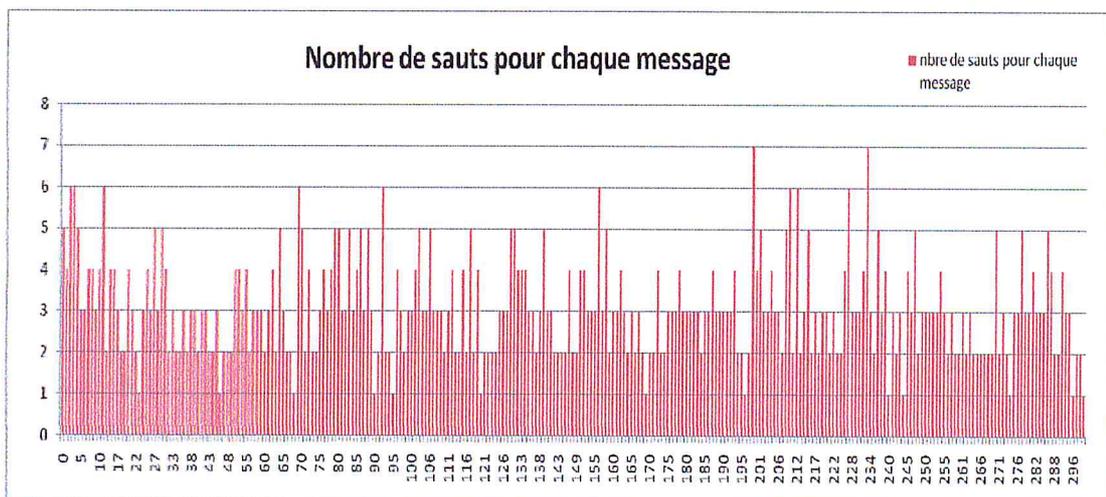


Figure 4.40 : Temps de transmission de messages par AODV

En analysant le graphe, on peut remarquer qu'au niveau de la même rangée les nœuds se trouvant le plus loin du Sink et qui représentent une minorité ont le plus grand nombre de sauts à savoir de 4 à 5 sauts, ensuite viennent les nœuds du milieu qui ont moins de saut effectués voir 3 saut minimum, et à la fin viennent les nœuds tout près du sink et qui représentent aussi une minorité, quant a eux ils n'ont eu à faire qu'un seul saut. Malgré ceci, l'influence des nombre de saut n'apparait pas sur le graphe de temps de transmission, et cela est dû à al nature du protocole de routage.

D'après ces résultats et les résultat obtenus de l'étude de l'architecture précédente on déduit que la proactivité du DSDV lui a permis de bien optimiser les route grâce à l'échange périodique des table de routage, par contre l'AODV qui lui est réactif, commence à calculer les routes juste avant la retransmission, ce qui explique le fait que ses routes ne sont pas aussi optimisée que celles du DSDV.

Consommation d'énergie :

Dans ce qui suit, la consommation d'énergie sera évaluée à travers le graphe de consommation de chaque nœud du champ, ce graphe est comme suite (Fig.4.41):

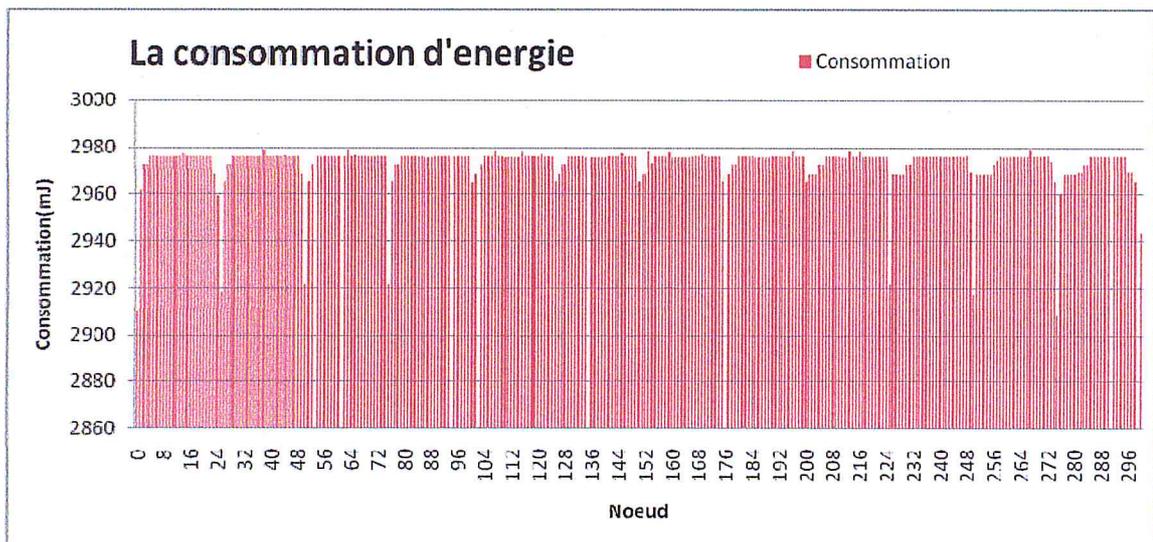


Figure 4.41 : Consommation des nœuds en AODV

On remarque dan le graphe une consommation très modérée de l'énergie ne dépassant pas 2980 mJ ce qui est très économique.

Les nœuds connaissent cette consommation pas trop élevées grâce à l'économie engendrée par la méthode de routage, l'AODV joint l'économie et l'efficacité.

Aussi on voit que les premiers nœuds se trouvant dans les deux extrémités de la dernière ligne (la plus éloignée du Sink) n'ont pas beaucoup consommé, après avoir bien étudié le cas on s'est rendu compte que cela est dû au fait que les nœuds se trouvant de cette position n'utilisent leurs batteries que pour envoyer leurs propres messages.

Cas de pannes :

L'AODV est un protocole réactif ce qui lui permet de tracer le chemin vers le sink à chaque fois qu'il a besoin d'envoyer des informations, ce qui le prive de perdre ses paquets transmis malgré qu'il est un protocole unicast (avec un seul chemin du nœud au sink) et cela est approuvé par le taux de perte (7%) qui reste acceptable sur un seul prélèvement.

Mais en observant bien la façon dont il acquiert le chemin on découvre une faille qui peut engendrer un accroissement rapide de pertes :

L'AODV diffuse une requête RREQUEST, puis le sink répond avec un message RREply sur le chemin choisi vers le nœud concerné à fin que ce dernier puisse acheminer ses paquets.

C'est ici que le problème se pose, effectivement le chemin désigné par le sink au début ne peut être forcément accessible lors de l'envoi d'informations et cela pour les raisons suivantes :

- Les nœuds du chemin sont de plus en plus sollicités pour router des paquets en étant près du sink, ce qui est bien montré par le graphe d'énergie, le fait qu'il soit au contraire de ceux des extrémités qui sont eux éloignées du sink, jouent le rôle de routeurs même si ils ne sont pas au milieu ; ce qui nous laisse dire que les premières pannes surviendront au niveau de ces nœuds là .

- Et pour le même rôle cité avant, les nœuds du chemin choisi peuvent être occupés par le routage de paquets des autres nœuds.

Alors, cette technique de routage qui a permis de garder une consommation assez faible en envoyant les informations d'une façon unicast peut être la source de défaillance.

Estimation du coût :

Prix matériel nécessaire au déploiement :

Si notre champ compte N arbres on a N/9 capteurs (chacun prenant en charge 9 sondes), ce qui nous fait :

$$N/9 \times 10\$ + N \times 15\$ = N \times 16,11\$$$

Exemple >> avec un champ de N= 2700 arbres : $2700 \times 16,11 = 43\,497 \$$

Prix matériel de maintenance :

L'estimation de revient des batteries de rechange en étudiant la consommation d'énergie :

Si on dispose de N arbres, on aura à déployer N/9 capteurs, les batteries utilisées disposeront de 2250 mAh. La consommation maximum présente dans le graphe est de 2979 mJ, notre batterie peut donner 7 290 000 mJ, sur une raison de 3 prélèvements par jours le calcul va donner :

$$2979 \times 3 = 8937 \text{ milli joule / jour}$$

Ceci est la consommation d'un seul jour, d'après cette consommation on va calculer la durée de vie de batteries :

$$7\,290\,000 \text{ milli joule} / 8937 \text{ milli joule} \approx 815 \text{ Jours}$$

Ce qui nous fait 2 ans et 2 mois, une durée de batterie très intéressante et qui rend cette architecture très faisable, le coût annuel des batteries est calculé dans ce qui suit :

$$N/9 \times 0,53\$ /2,23 = N \times 0,026\$ / \text{ans}$$

Exemple >> avec un champ de $N= 5400$ arbres : $5400 \times 0,026= 140 \$ / \text{ans}$.

On peut aussi envisager d'utiliser des batteries ayant moins de capacité (2100 mAh) pour les nœuds qui consomment très peu d'énergie (cités dans l'étude précédente) ce qui réduira ce coût d'une valeur presque insignifiante (un peu plus de 1\$).

8. Synthèse

Dans cette étape de travail on va procéder à établir une étude qui va combiner toutes les architectures proposées au paravent afin d'effectuer une comparaison qui servira à montrer les plus et les moins de chacune d'elles et cela en restant sur nos mêmes axes d'étude :

Fiabilité :

On va comparer la fiabilité des architectures étudiées avec le graphe qui va suivre (Fig.4.42):

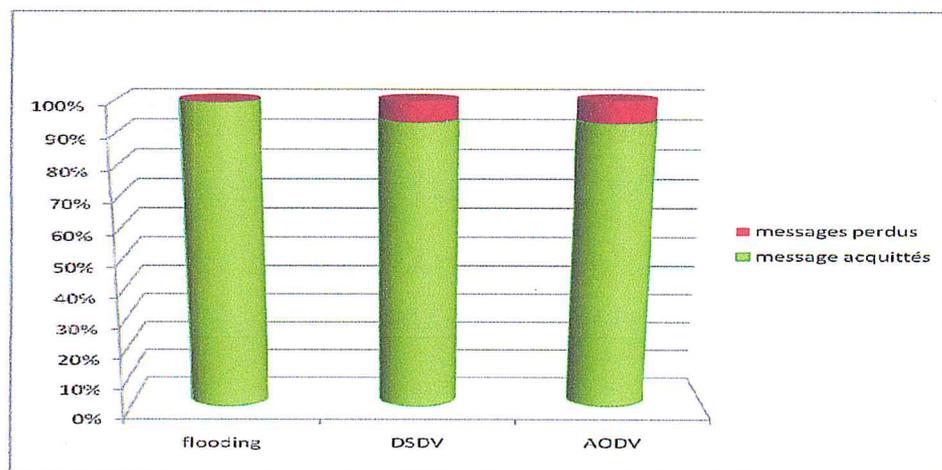


Figure 4.42 : Comparaison des taux de fiabilité

On remarque qu'en ce qui est question fiabilité, le flooding vient en tête avec un taux de 99% ensuite viennent le DSDV et l'AODV avec un taux de 93%.

Ce bon taux de fiabilité que possède l'architecture qui utilise le Flooding est expliqué par le fait que contrairement aux deux protocoles (AODV et DSDV) le flooding fait parvenir le message plus d'une fois au sink, donc il y a moins de chances qu'un message n'y arrive pas.

Temps de transmission :

Le temps de transmission de chaque architecture va figurer dans le graphe suivant (FIG.4.3) pour pouvoir comparer :

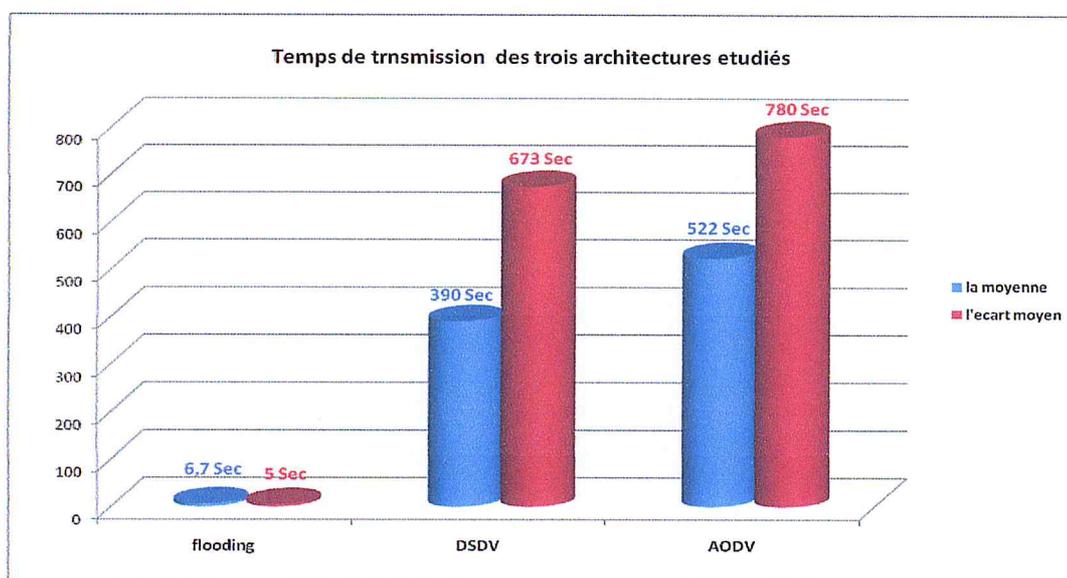


Figure 4.43 : Comparaison des temps de transmission

A travers ce graphe on peut constater que le temps de transmission en ce qui concerne l'architecture basée sur la technique flooding est vraiment négligeable par rapport aux deux autres temps de transmission, même l'écart moyen des temps le montre.

Le flooding est naturellement le plus rapide des trois et ceci revient à sa technique sachant qu'il ne cherche pas à optimiser le chemin ou le nombre de sauts mais il fait du mieux pour que le message parvienne au sink par tous les chemins possibles, mais le DSDV lui prend plus de temps que celui-ci mais moins que l'AODV qui lui trace ses chemins en temps réel.

Consommation d'énergie :

La consommation journalières des trois architectures sera étudiée a travers ce graphe (Fig.4.44) :

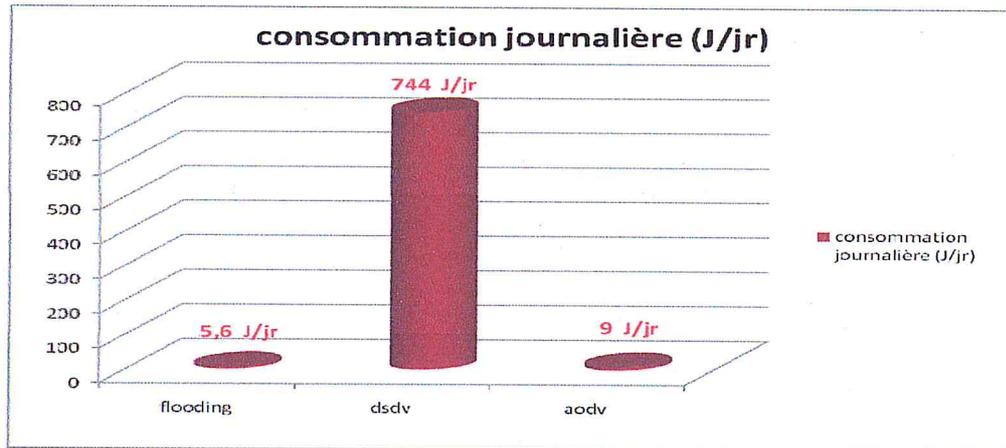


Figure 4.44 : Consommation journalière d'énergie par architecture

On remarque que l'architecture qui fonctionne avec la méthode méthode de routage (DSDV) est très couteuse coté énergie, ensuite vient l'AODV ensuite le flooding en étant le plus économique.

Avec ceci le flooding se met toujours a la tête du classement en étant le plus économiques.

Estimation du coût :

Dans l'estimation des coûts on va évaluer chaque topologie pour pouvoir bien la juger d'après son coût de revient :

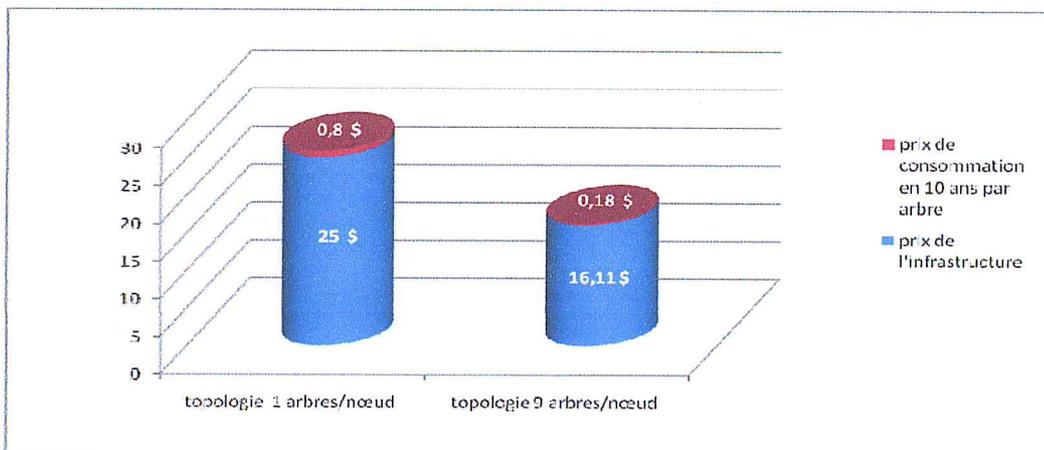


Figure 4.45 : Estimations du coût des deux topologies

D'après ce résultat, le coût de la topologie du nœud multisondes (1 nœud pour 9 arbres) est nettement moins élevé que l'autre d'un nœud par arbre.

Ce qui est tout à fait logique vu le nombre de nœuds à déployer aussi à maintenir en changeant leurs batteries périodiquement, donc afin d'investir mieux entreprendre la deuxième topologie.

Donc en générale, les deux architectures celle fondée sur le Flooding et celle sur AODV sont envisageables plus que celle qui est fondée sur le DSDV, vu son coût exagéré, mais celle du flooding est encore plus simple à entretenir vu sa consommation d'énergie, en ce qui concerne les topologies, celle du nœud multisonde est de loin la meilleure vu les performances qu'elle offre avec un prix si raisonnable.

9. Le réseau d'actionneurs

Les actionneurs sont des dispositifs électroniques qui contiennent des relais électriques, leur rôle est de commander les électrovannes quand ces dernières sont des vannes avec des petits moteurs électriques qui les entraînent.

Un réseau d'actionneurs est la disposition et le déploiement des actionneurs et les électrovannes dans un réseau d'irrigation.

Dans notre domaine d'application les actionneurs peuvent être repartis de deux façons :

- **Soit une électrovanne pour tout le champ d'irrigation (Fig.4.46):**

Dans ce cas notre réseau de capteurs va servir uniquement à la supervision ce qui va nous permettre de suivre la croissance de chaque arbre et l'état de ses goûteurs.

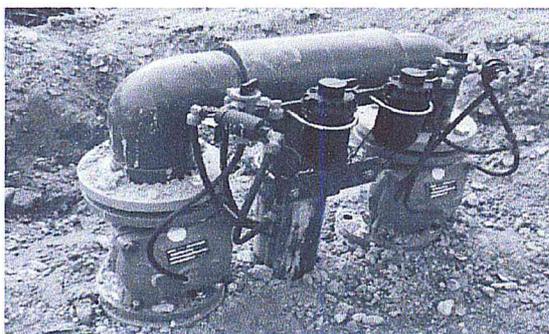


Figure 4.46 : Une électrovanne prenant en charge un champ entier

- **La deuxième stratégie de répartition consiste à placer une électrovanne sur chaque tuyau servant à un rangé (Fig.4.47):**

Cela va nous permettre d'utiliser notre réseau de capteurs non pas à la supervision seulement mais aussi on peut programmer nos irrigations de chaque rangé d'une façon indépendante selon l'état global indiqué par le RCSF.

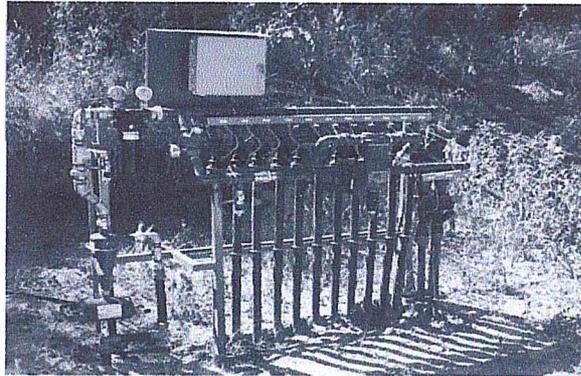


Figure 4.47 : Une électrovanne par tuyau d'irrigation

Conclusion et perspectives

Aujourd'hui, quel que soit le domaine d'étude considéré, jamais une avancée technologique ou scientifique ne s'est faite sans difficulté. Les réseaux de capteurs ne dérogent pas à cette règle et un certain nombre de problématiques doit être résolu avant de voir apparaître un monde futuriste "tout capteurs !".

Cet œuvre s'est attaché à apporter quelques contributions à ce vaste champ d'étude que nous ouvrent les réseaux de capteurs en se préoccupant de l'évaluation des performances pour optimiser nos réseaux d'une telle façon d'apporter au monde de l'agriculture les réponses nécessaires à ses besoins en gestion des ressources d'eau d'irrigation.

Après avoir procédé à l'évaluation et l'étude de plusieurs architectures proposées en variant la topologie et les protocoles de routage et ceci sur les trois axes fiabilité, temps de transmission ainsi que la consommation d'énergie, on a pu arriver à en juger de la faisabilité des celles-ci, chacune selon ses performances, son coût de revient aussi bien que son niveau de tolérance aux pannes, cela nous a permis d'apporter une grande contribution à l'évolution du domaine en apportant cette étude en guise de guide de choix aux consommateurs de cette technologie et une solution efficaces pour préserver les ressources hydriques à moyen et long terme.

D'autre part, d'après l'étude faite il reste toujours des possibilités pour d'avantage d'optimisation dans les architectures en prenant en compte les nouvelles perspectives qui s'offrent afin d'améliorer le rendement des solutions proposées et rendre cette technologie plus accessible à plus large public en travaillant sur la diminution de son coût et en la vulgarisant entre les professionnels du domaine.

Parmi ces perspectives qui s'ouvrent sur de nouveaux horizons très prometteurs, citant la tendance à intégrer le réseau de capteurs et le réseau d'actionneurs en un seul réseau de contrôle et d'irrigation en utilisant des nouveaux

nœuds appelés les nœuds capteur/actionneur où l'actionneur reçoit l'ordre d'irrigation directement de son nœud auquel il est attaché et cela va nous donner le niveau de control le plus précis qui puisse exister ! Une commande indépendante pour chaque nœud...

Mais cette technique demande une capacité de calcul et de mémoire plus élevé sur les nœuds par rapport a ce dont ils disposent actuellement, ce qui explique en ce moment le prix excessif de cette technologie.

Références

- ✚ LABORDE Cédric - DELGADO Frédéric. *Réseaux de capteurs sans fil Configuration et test de connectivité*. 2010.
- ✚ GITI. *Les premiers capteurs Wi- Fi*.2008.
- ✚ AREFLH. *L'irrigation de précision pour une meilleure valorisation de la ressource en eau*.2008.
- ✚ Nicolas Maréchal. *Consensus dans les réseaux de capteurs : application et optimisation*. INSA Lyon.
- ✚ Vivien Boistuaud, Julien Herr. *MODELISATION DE RESEAUX AVEC LE LOGICIEL NS2*.2008.
- ✚ BOUTOUMI Bachira. *Routage Multicast Avec Qualité De Service Dans Les Réseaux Ad Hoc*. 2009.
- ✚ P. Anelli & E. Horlait. *NS-2: Principes de conception et d'utilisation*.
- ✚ Thomas Watteyne. *Proposition et validation formelle d'un protocole MAC temps réel pour réseaux de capteurs linéaires sans fils*. Laboratoire CITI.
- ✚ Michel Terré. *WiFi Le Standard 802.11 Couche physique et couche MAC*.2007.
- ✚ Ali Movaghar, Mehdi EffatParvar. *Evaluating Effectiveness of DSDV Routing Protocol on IEEE 802.11n Wireless LANs*.
- ✚ Karel Heurtefeux. *Protocoles localizes pour réseaux de capteurs*. 2009.
- ✚ DHIB Eya. *Routage avec QoS temps réel dans les réseaux de capteurs*.Ecole supérieure de communication de Tunis. 2007.
- ✚ Abdelraouf Ouadjaout. *La Sécurité et la Fiabilité du Routage dans les Réseaux de Capteurs Sans Fils*. USTHB.
- ✚ KHALFAOUI Yasmina. *Routage dans les réseaux de capteur sans fils*. universitaire Mustapha Stambouli Mascara .
- ✚ Tayeb LEMLOUMA. *Le Routage dans les Réseaux Mobiles Ad Hoc*.
- ✚ ACMG, CEMAGREF, ANPN, HORTIS Aquitaine, CIREA. *L'irrigation de précision pour une meilleure valorisation de la ressource en eau*.www.precirieg.net
- ✚ Clément SAAD. *Quelques contributions dans les réseaux de capteurs sans fil : Localisation et Routage*. l'Université d'Avignon.

- ✚ Gérard Chalhoub. Réseaux de capteurs sans fil. 2009.
- ✚ Ludovic SAMPER. *Modélisations et Analyses de Réseaux de Capteurs*. 2008.
- ✚ Mathieu BADET. *Réseaux de capteurs : Mise en place d'une plateforme de test et d'expérimentation*. 2006.
- ✚ SADEDDINE Menad. *Optimisation du protocole de routage DSR*. UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON I.
- ✚ YACINE CHALLAL. *Réseaux de capteurs sans fils*. 2008.
- ✚ Nadjib BADACHE. *Le routage dans les réseaux mobiles Ad-Hoc*.
- ✚ E. Fleury. Réseaux de capteurs. INRIA. 2007.
- ✚ AFIDOL. *La conduite de l'irrigation*. <http://www.afidoltek.org>.
- ✚ <http://www.afidoltek.org>. Article élaboré dans le cadre du programme Olea 2020.
- ✚ <http://nsgam.isi.edu/nsgam/>. NS2.
- ✚ <http://www.precirieg.net>. Réseau d'actions concertées en horticulture pour une conduite de l'irrigation précise et économique en eau en SUDOE.
- ✚ <http://www.wavenis-osa.org/>. Aginova Wi-Fi sensor.
- ✚ <http://www.davis-meteo.com>. Capteurs sans fil.
- ✚ <http://www.fao.org>. Irrigation equipment supply.
- ✚ <http://www.tempsensornews.com/moisture>. Capteurs d'humidité.
- ✚ <http://www.afidoltek.org>.
- ✚ <http://www.vd.ch/>. Canton de vaud.

