

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Mathématiques et Informatique**

Filière : **Informatique**

Spécialité : **Réseaux, Mobilités, et Systèmes Embarqués**

Présenté par :

Mlle LOUNIS Kahina

Thème

Déploiement d'un réseau de capteurs sans fils pour une installation pétrolière

Mémoire soutenu publiquement le 11/09/2019 devant le jury composé de :

Président : Mr FILALI Idir

Examineur : Mr RAJA Hakim

Encadré par : Mr. RAMDANI Mohamed

Remerciements

Si ce document a pu voir le jour, c'est grâce aux actions conjuguées de plusieurs personnes à qui je dis sincèrement merci pour leur soutien, leur présence, leurs conseils et leur disponibilité

Je tiens à exprimer ma grande gratitude à mon promoteur Monsieur RAMDANI Mohamed pour avoir accepté de m'encadrer tout au long de ce travail, pour sa disponibilité, son amabilité, ses conseils et suggestions.

Mes remerciements s'adressent à Mr FILALI Idir par l'honneur qui m'a fait de présider ce jury de soutenance, je lui exprime ma gratitude profonde.

Je tiens également à remercier Mr RAJA Hakim qui a aimablement accepté d'examiner et de juger ce travail et pour l'intérêt qu'il y porte.

J'exprime toute ma reconnaissance et gratitude à la direction régionale In Amenas pour leur accueil et prise en charge durant la période de mon stage. Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à monsieur TALEB Mohammed chef cellule IT et mon encadreur,

Un grand merci pour ma famille et mes amis, pour leurs soutiens permanents, leurs présences et leurs encouragements.

Je remercie sincèrement tous les gens honnêtes et justes dont j'ai eu l'honneur de connaître dans ma vie.

Dédicaces

A mes parents

A mes sœurs et mon frère

A tous ceux qui m'aiment et me soutiennent

Merci.

SOMMAIRE

Chapitre1	Généralités sur les RCSF	8
1.1	Introduction	8
1.2	Définition d'un capteur	8
1.3	Les différents types de nœuds	10
1.4	Les réseaux de capteurs sans fils	11
1.4.1	Domaines d'application des réseaux de capteurs	11
1.4.2	Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fils	12
1.4.3	Contraintes influençant les réseaux de capteurs	13
1.5	Le Routage dans les RCSF	14
1.5.1	Architecture de communication en couche	14
1.5.2	Classification des protocoles de routage pour les RCSF	15
1.5.3	Protocoles de routage dans RCSF	19
1.6	Exigences de sécurité	20
1.7	Conclusion	22
Chapitre2	Déploiement d'un réseau de capteurs sans fil	23
2.1	Introduction	23
2.2	Environnements de déploiement	23
2.2.1	RCSF terrestre	23
2.2.2	RCSF souterrain	24
2.2.3	RCSF mobile	25
2.2.4	RCSF aquatique	25
2.2.5	RCSF multimedia	26
2.3	Les techniques de déploiement	27
2.3.1	Les différentes phases de déploiement	27
2.3.2	Types de déploiement	27
2.4	Indicateurs majeurs de performance d'un bon déploiement	30
2.4.1	La couverture	30
2.4.2	Connectivité	33
2.4.3	Consommation d'énergie	33
2.5	Déploiement dans un environnement hétérogène	34
2.5.1	Types d'hétérogénéité	34
2.5.2	Types de nœuds dans un environnement hétérogène	34

2.5.3	Caractéristique d'un RCSF hétérogène.....	36
2.6	Comparaison entre RCSFs et d'autres réseaux sans fils	37
2.6.1	WSN Vs AD-HOC (MANET)	37
2.6.2	IoT vs WSN.....	38
2.6.3	RCSF vs GSM.....	39
2.7	Conclusion.....	41
Chapitre3	Mise en pratique	42
3.1	Introduction.....	42
3.2	Présentation du matériels	42
3.2.1	La carte Arduino Uno.....	42
3.2.2	Modules XBee.....	45
3.2.3	DHT11.....	48
3.2.4	Capteur UltraSons	50
3.3	Software	52
3.4	Les types de capteurs utilisés dans une installation pétrolière	53
3.5	Description du projet.....	53
3.6	Expérimentations et résultats	58
3.6.1	Expérimentations :.....	58
3.6.2	Résultats	62
3.7	Conclusion.....	66
	Conclusion générale.....	67
	Bibliographies	68

Table des figures

Figure 1.1: Exemple de nœud capteur.....	9
Figure 1.2: Anatomie d'un capteur	10
Figure 1.3: Réseau de capteurs sans fils.....	11
Figure 2.1: RCSF terrestre	24
Figure 2.2: RCSF souterrain.....	25
Figure 2.3: RCSF mobile	25
Figure 2.4: RCSF aquatique	26
Figure 2.5: RCSF multimédia	27
Figure 2.6: Le déploiement aléatoire.....	28
Figure 2.7: Déploiement déterministe.....	29
Figure 2.8: Illustration du modèle de couverture binaire	31
Figure 2.9: Exemple d'illustration de la couverture simple.....	31
Figure 2.10: Exemple d'illustration du mécanisme de couverture multiple (k-couverture).....	31
Figure 2.11: Couverture de zone par ordonnancement des états des capteurs	32
Figure 2.12: Réseau ad hoc	38
Figure 2.13: Modèle d'architecture de l'internet des objets.....	39
Figure 2.14: Réseau cellulaire.....	39
Figure 2.15: Architecture du réseau GSM.....	40
Figure 3.1: La carte arduino UNO	43
Figure 3.2 : Module Xbee	46
Figure 3.3: Adaptateur USB xbee	46
Figure 3.4: Les topologies zigbee possible	48
Figure 3.5: Capteur DHT11	49
Figure 3.6: Branchement de capteur dht11 à la carte arduino.....	49
Figure 3.7: Schéma de branchement dht11-Arduino-Xbee.....	49
Figure 3.8: Capteur ultrasons SR04	50
Figure 3.9: Fonctionnement d'un capteur ultrason.....	51
Figure 3.10: Branchement d'un capteur ultrasons-Arduino-Xbee	51
Figure 3.11: Schéma proposé pour une installation pétrolière.....	54
Figure 3.12: Schéma proposé pour la zone puits.....	55

Figure 3.13: Pipelines pétroliers.....	56
Figure 3.14: Schéma proposé pour la zone pipelines	56
Figure 3.15: Schéma proposé pour la zone stockage	57
Figure 3.16: BAC de stockage (réservoirs).....	57
Figure 3.17: Shéma proposé pour R.....	57
Figure 3.18 : application 1.....	59
Figure 3.19: interface XCTU (le coordinateur).....	60
Figure 3.20: Application2	60
Figure 3.21: Application3	61
Figure 3.22: La perte de paquets en fonction de la distance	63
Figure 3.23: Comparaison entres les trois type de nœud	63
Figure 3.24: Energie en fonction de la distance (cas ultrasons).....	64
Figure 3.25: Durée de vie de chacun des trois types de noeud.....	65

Liste des tableaux

Tableau 1: Différence entre les trois types de module xbee.....	47
Tableau 2: stations de base	58
Tableau 3: Configuration collecteur-coordonateur	59
Tableau 4: configuration collecteur-routeur-coordonateur	61
Tableau 5: Résultats des expérimentations zone puits.....	62
Tableau 6: Résultat des expérimentations zone stockage.....	64

Liste des abréviations

ADC : Analog Digital Converter

CH: Cluster head

ID: identifiant d'un nœud

IOT: internet of things

GPS: Global Positioning System

GSM: Global System for Mobile Communications

LEACH: Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

RCSF : Réseau de Capteur Sans Fils

SB: Station de Base

WSN: Wireless Sensor Network

WMSN: Wireless Multimedia sensor Networks

MAC: Message Authentication Code

Résumé

Un réseau de capteurs sans fil est un ensemble de nœuds, capables de recueillir et de transmettre des données d'une manière autonome, utilisés pour surveiller les conditions physiques ou environnementales telles que le son, la pression, la température... ces capteurs ont des caractéristiques particulières et des ressources limitées en termes d'énergie, capacité de calcul et mémoire de stockage.

Ils peuvent être implémentés dans différents domaines comme la domotique, les champs de bataille, le domaine de la santé, l'industrie, la surveillance de l'environnement, etc.

La qualité de service fourni par un RCsF dépend des positions des capteurs dans le champ de surveillance. Les nœuds doivent être placés proches les uns des autres afin de garantir une communication sans fil fiable, tout en assurant une couverture maximale du champ de surveillance. En conséquence, les performances d'un RCsF dépendent en grande partie de son déploiement.

Dans l'installation pétrolière on parle d'un déploiement déterministe (de nœuds terrestres et ou souterrains le cas en Algérie) pour surveiller les différents processus de l'exploitation du pétrole qui se subdivise schématiquement en deux étapes l'amont et l'aval. En amont : l'exploration pétrolière et la production, en aval le raffinage et la distribution. La mesure et la surveillance efficaces de certains paramètres (température, pression, débit, etc.) sont essentielles pour la sécurité et l'optimisation de ces processus.

Mots clés : capteur, rcsf, énergie, déploiement...

Abstract

A wireless sensor network is a set of nodes, capable of collecting and transmitting data in an autonomous manner, used to monitor physical or environmental conditions such as sound, pressure, temperature ... these sensors have special features and limited resources in terms of energy, computing capacity and storage memory.

They can be implemented in different fields such as home automation, battlefields, the field of health, industries, environmental monitoring, etc.

The quality of service provided by a WSN depends on the positions of the sensors in the monitoring field. Nodes must be placed close to one another to ensure reliable wireless communication, while ensuring maximum coverage of the surveillance. as a result, the performance of an RCsF depends largely on its deployment.

In the oil installation we use a deterministic deployment (terrestrial and/or underground nodes, the case in Algeria) to monitor the different processes of oil exploitation, which is schematically divided into two stages upstream and downstream. Upstream: oil exploration and production, downstream refining and distribution. The effective measurement and monitoring of certain parameters (temperature, pressure, flow, etc.) is essential for the safety and optimization of these processes.

Introduction générale

Les progrès récents dans les domaines de micro-électronique et des communications sans fil ont abouti au développement des dispositifs embarqués qui sont de très petits capteurs. Leur remarquable succès est dû à leur taille de plus en plus réduite, leurs faibles coûts ainsi que leur support de communication sans fils attrayant peu encombrant mais également peu de ressources. Les nœuds capteurs apparaissent comme des systèmes autonomes miniaturisés, munis d'une unité de traitement et de stockage de données, d'une unité de transmission sans fils et d'une batterie.

Ces capteurs peuvent être déployés n'importe où pour assurer des fonctions de surveillance ou autres. Le réseau ainsi établi est appelé Réseau de Capteurs Sans Fils (ou Wireless Sensor Network) est composé d'un ensemble de nœud intégrant les fonctionnalités d'acquisition et de traitement et de communication. Une fois déployée, les nœuds coopèrent entre eux d'une manière autonome afin de collecter et de transmettre des données vers une station de base dans le but de surveiller et/ou de contrôler un phénomène donné.

De nos jours, l'utilisation des RCSF connaît un très grand essor dans des domaines aussi variés que le secteur militaire, la médecine, l'environnement, etc. Un des domaines d'application prometteurs des RCSF est l'industrie pétrolière où la technologie des RCSF offre un support important qui permettra la gestion précise des ressources, la détection des fuites de gaz et d'autres problèmes connexes, entretenir et sécuriser les processus et les actifs industriels de manière efficace et rapide et de résoudre les problèmes critiques liés à l'état des pipelines.

Contributions :

Dans ce travail, une topologie de réseau de capteur sans fils est proposée pour une installation pétrolière tenant compte ses différentes zones (zone puits, pipelines, stockage).

Nous proposons d'utiliser trois types de nœud : nœud collecteur , nœud collecteur + relayeur et nœud relayeur selon les caractéristiques de chaque zone et une distance d'environ 50 m entre chaque noeud.

En effet nous présentons des résultats de testes sous forme de tableaux et graphes qui seront probablement utilisés dans la réalisation de ce projet par une société pétrolière tel que SONATRACH et nous nous sommes basés sur la notion d'énergie qui est un point très essentiel pour le fonctionnement d'un RCSF.

Organisation du mémoire :

Ce mémoire est constitué de trois chapitres organisés comme suit :

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux de capteurs sans fils : Pour mieux cerner les enjeux de notre étude, nous présentons dans le premier chapitre les concepts généraux des réseaux de capteurs sans fils, les domaines d'applications, les contraintes et caractéristiques des RCSFs. Nous présentons également les différents types de protocoles de routage et les exigences de sécurité.

Chapitre 2 : Déploiement d'un réseau de capteur sans fils : Le second chapitre, concerne le déploiement des réseaux de capteurs sans fil. Nous détaillons les techniques et type de déploiement et on termine par une comparaison entre les RCSF et autres réseaux sans fils.

Chapitre 3 : Mise en pratique : Le dernier chapitre est réservé aux résultats de différents tests réalisés avec les trois types de capteurs (collecteur, relayeur, collecteur-relayeur) utilisant des microcontrôleurs Atmega328P (intégrés sur les cartes ARDUINO UNO) et modules radio xbee s2c et s1.

Enfin, notre mémoire s'achève par une conclusion générale qui résume les grands points qui ont été abordés, ainsi nos perspectives pour les travaux futurs dans le domaine des RCSFs.

Chapitre 1

Généralités sur les RCSF

1.1 Introduction

Depuis leur création, les réseaux de communication sans fil ont connu un succès croissant au sein des communautés scientifiques et industrielles. Grâce à ses divers avantages, cette technologie a pu s'instaurer comme acteur incontournable dans les architectures réseaux actuelles. Le média hertzien offre en effet des propriétés uniques, qui peuvent être résumées en trois points : la facilité de déploiement, l'ubiquité de l'information et le coût réduit d'installation. Au cours de son évolution, le paradigme sans fil a vu naître diverses architectures dérivées, telles que : les réseaux cellulaires, les réseaux locaux sans fils et autres. Durant cette dernière décennie, une architecture nouvelle a vu le jour : les réseaux de capteurs sans fil.

Dans ce chapitre nous allons présenter brièvement la notion de capteurs, leur anatomie et leurs différents types. Nous allons présenter également les réseaux de capteurs, leurs caractéristiques et contraintes ainsi que le routage au sein des RCSF et enfin la notion de sécurité.

1.2 Définition d'un capteur

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, humidité, vibration, ..., etc.), et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base (puits, sink).

Chaque capteur assure les fonctions suivantes :

- Acquisition des données
- Calcul des informations à l'aide des valeurs collectées
- Communiquer ces données à travers le réseau



Figure 1.1: Exemple de nœud capteur

Anatomie d'un capteur :

Un capteur est composé de deux parties :

- **Partie hardware**
- **Partie software**

Le hardware :

Un nœud senseur est composé de quatre (04) unités de base :

- **Une unité de détection (d'acquisition) :** composées de deux (02) sous unités : Une sous unité de détection (capteur) qui permet de prendre des mesures physiques (pression, température, pollution, son, radiation...) et Une sous unité ADC (Analog Digital Converter) qui est un convertisseur analogique-numérique qui transforme le signal analogique en données numériques et les transmet à l'unité de traitement.
- **Une unité de traitement :** Composée d'un Processeur embarqué, son rôle est d'ordonnancer les taches, traiter les données et contrôler les autres composants du senseur et l'unité de stockage qui inclut la mémoire de travail et la mémoire réservée aux données.
- **Une unité de transmission/réception (communication):** Connecte le nœud au réseau (échange de donnée entres nouds).
- **Une unité d'énergie (batterie) :** Permet d'alimenter le reste des composants. Elle est souvent interchangeable.
- On peut également avoir d'autres unités suivant l'application. Parmi ces unités : Une unité de localisation, un générateur d'énergie et une unité assurant la mobilité.

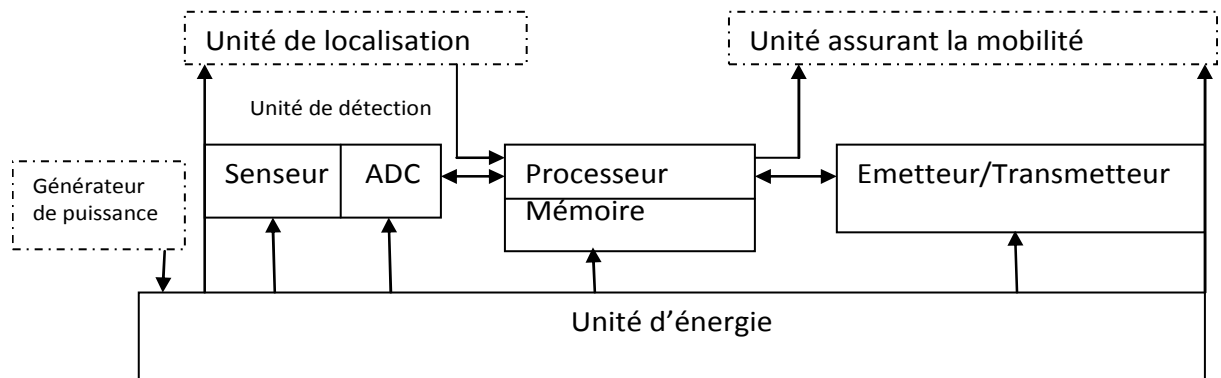


Figure 1.2: Anatomie d'un capteur

Software :

- Constitue le système d'exploitation et les applications embarquées sur le capteur. Le SE le plus utilisée est TinyOs sa conception est faite en NesC.

1.3 Les différents types de nœuds

Les nœuds sont la notion de base dans un réseau de capteurs sans fil, selon l'application et la structure choisie, un RCSF (Réseau de Capteurs Sans Fil), peut contenir différents types de nœuds :

- **Nœud régulier** est un nœud doté d'une unité de transmission et d'une unité de traitement de données.
- **Nœud capteur** ou **nœud source** qui est un nœud régulier équipé d'une unité d'acquisition ou de détection. L'unité d'acquisition est généralement dotée d'un capteur ou plusieurs capteurs qui obtiennent des mesures et d'un convertisseur Analogique/Numérique qui convertit l'information relevée en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.
- **Nœud actionneur** ou *robot* est un nœud régulier doté d'une unité lui permettant d'exécuter certaines tâches spécifiques comme des tâches mécaniques (se déplacer, combattre un incendie, piloter un automate, etc.)
- **Nœud puits** est un nœud régulier doté d'un convertisseur série connecté à une seconde unité de communication (GPRS, Wi-Fi, WiMax, etc.). La seconde unité de communication fournit une retransmission transparente des données provenant de nœuds capteurs à un utilisateur final ou d'autres réseaux comme internet.

- **Nœud passerelle** (ou gateway) est un nœud régulier permettant de relayer le trafic dans le réseau sur le même canal de communication. [6]

1.4 Les réseaux de capteurs sans fils

Un Réseau de Capteurs Sans Fil est un système distribué de grande échelle mettant en communication, des nœuds capteurs, à faible coût variant de quelques centaines d'éléments voir des milliers, répartis sur une grande surface. Les nœuds sont censés fonctionner de manière non supervisée même si de nouveaux nœuds sont ajoutés, ou de vieux nœuds disparaissaient.

Pour le magazine Technology Review du MIT¹, les réseaux de capteurs sans fil sont l'une des dix nouvelles technologies qui bouleverseront le monde et notre manière de vivre et de travailler.

Selon Wikipédia :

Un réseau de capteurs sans fil est un réseau ad hoc d'un grand nombre de nœuds, qui sont des micro-capteurs capables de recueillir et de transmettre des données d'une manière autonome. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils peuvent être aléatoirement répartis dans une zone géographique, intitulée « champ de captage » correspondant au terrain concerné pour le phénomène capté.

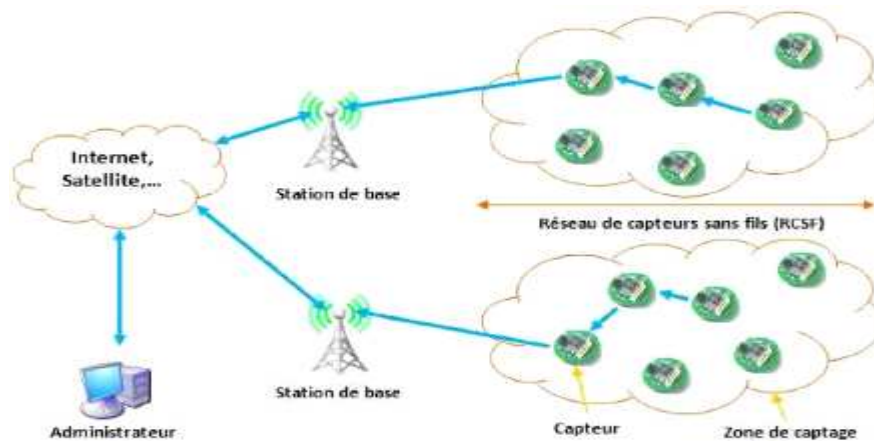


Figure 1.3: Réseau de capteurs sans fils

1.4.1 Domaines d'application des réseaux de capteurs

L'utilisation des capteurs est depuis longtemps une réalité au sein de multiples domaines tel que l'industrie automobile ou aéronautique, mais l'affranchissement de la connexion filaire

de part les progrès dans les technologies du sans fil permet d'étendre leur utilisation à une multitude d'autres applications, on en cite quelques unes :

- Ils peuvent détecter les fissures et les altérations dans les structures de ponts par exemple à la suite d'un séisme ou au vieillissement de la structure.
- Ils sont aussi utilisés dans les applications environnementales (détection d'incendies, détecter la pollution, analyser la qualité de l'air, empêcher que d'éventuels tsunamis, inondations, volcan ne se produisent).
- Utilisés dans les applications commerciales, ils servent pour améliorer les processus de stockage, de livraison, pour connaître la position, l'état et la direction d'une marchandise.
- Ils peuvent être utilisés pour la détection de feux dans des grandes zones forestières, l'observation d'environnements naturels (pollution, inondation, etc.), suivi d'écosystèmes comme la surveillance d'oiseaux, croissance des plantes, etc
- Les RCSFs permettent la détection des mouvements ennemis sur un champ de bataille ou bien de tracer leurs mouvements. De façon analogue, ils peuvent permettre la détection d'intrusion ou de cambriolage dans le domaine de la sécurité civile.
- Permettent la surveillance de l'état de santé des patients qu'ils soient au sein de l'établissement ou même ailleurs, et ce en permanence.
- Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole.

1.4.2 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fils

Les principales caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil sont:

- Un grand nombre de nœuds : un réseau de capteurs peut contenir des milliers de nœuds.
- Communication sans fils.
- Interférences : les liens radio ne sont pas isolés, deux transmissions simultanées sur une même fréquence, ou utilisant des fréquences proches, peuvent interférer.
- Absence d'infrastructure : les réseaux de capteurs se distinguent des autres réseaux par la propriété d'absence d'infrastructure préexistante et de tout genre d'administration centralisée au fait les RCSFs sont des réseaux ad hoc.

- Topologie dynamique : La topologie d'un RCSFs peut être dynamique, ceci est due à la mobilité des nœuds qui peuvent s'attacher à des unités mobiles (GPS par exemple), ou due à l'ajout ou la suppression d'un ou plusieurs nœuds après le déploiement pour élargir le réseau ou pour supprimer les nœuds défaillants.
- Bande passante assez faible : une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé. Ce partage fait que la bande passante réservée à un nœud est limitée. [3]

1.4.3 Contraintes influençant les réseaux de capteurs

Les réseaux de capteurs ne sont pas constitués de la même manière que les autres réseaux (les réseaux classiques), cette différence a causé des contraintes particulières à ce type de réseau. Parmi ces contraintes, on distingue :

Les ressources limitées : Un réseau de capteurs sans fils est constitué d'un grand nombre de nœuds capteurs, ces derniers sont limités en termes d'énergie, de puissance de calcul et de capacité de communication.

- **Limitation de mémoire et capacité de calcul** : Un capteur est un composant électronique simple avec une petite quantité de mémoire et de puissance de calcul, prenant par exemple le capteur le plus couramment utilisé : MicaZ, ne dispose que de 4KO de RAM, 128 KO de ROM et 512 KO de mémoire Flash, avec un microcontrôleur de 8MHz-Atmel 128Mega.

- **Limitation en énergie** : Un nœud capteur est muni d'une source d'énergie limitée (batterie souvent non rechargeable).

- **La limitation en puissance de transmission** : la communication dans les RCSFs est une communication sans fil, dépend souvent de la coopération locale des nœuds en se basant sur l'acheminement de données par un routage multi-sauts.

Une communication non fiable :

La communication dans un réseau de capteurs est une communication sans fils. De ce fait, chaque nœud capteur se trouvant dans une zone de captage peut écouter tous les messages transmis sur le canal de transmission, et donc l'application d'un bruit (le brouillage) sur ce canal rend le capteur incapable de transmettre ces messages car le canal peut apparaître occupé en permanence.

Des risques inattendus : Les capteurs sont déployés dans des zones géographiques distantes, ouvertes aux ennemis et sans aucune surveillance.

Et donc les nœuds capteurs sont exposés aux attaques physiques, ce qui peut provoquer la destruction ou la capture du nœud, ou bien sa compromission par des entités malicieuses.

L'environnement hostile : les nœuds capteurs sont déployés souvent dans des environnements hostiles, ces capteurs sont exposés à la destruction ou la capture par des intrus. Ce type de déploiement facilite pour les attaquants l'accès physique aux capteurs qui sont déployés aléatoirement dans la nature. L'attaquant peut capturer le nœud, extraire des données légitimes (des clés cryptographiques par exemple) ou le détruire entièrement.

De ce fait, les environnements hostiles sont un véritable challenge pour les chercheurs de sécurité.

La topologie de réseau : le déploiement d'un grand nombre de nœuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phases : déploiement, post-déploiement (les capteurs peuvent bouger, ne plus fonctionner, ...) et redéploiement de nœuds additionnels.

1.5 Le Routage dans les RCSF

1.5.1 Architecture de communication en couche

Comme tout les types de réseaux, les RCSF utilisent une architecture de communication en couches, ce sont les cinq premières couches du modèle OSI ; la couche physique, la couche liaison de données, la couche réseau, la couche transport et la couche application. Chaque couche a son propre rôle et ses propres protocoles pour atteindre son objectif. Mais le fait que l'objectif d'un RCSF n'est pas la communication elle même, qu'il est soumis à de fortes contraintes énergétiques, par voie de conséquence, d'autres unités doivent lui être ajouté afin de gérer la consommation d'énergie, la mobilité des nœuds et l'ordonnancement des tâches.

- **La couche physique** : Spécifications des caractéristiques matérielles, 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.

- **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.
- **Gestion d'énergie :** La couche de gestion d'énergie contrôle la manière d'utiliser l'énergie par le nœud capteur, et gère la consommation d'énergie selon le mode de fonctionnement employé (capture, calcul, et communication par radio). Par exemple pour éviter de recevoir des messages redondants, le nœud capteur change son mode en « Off » après une réception d'un message d'un de ses voisins. En outre un nœud capteur annonce à ses voisins qu'il a atteint un bas niveau d'énergie, par conséquent il ne va pas participer au routage des données, et l'énergie restante va être utilisée pour capter et détecter des tâches.
- **Gestion de mobilité :** La couche de gestion de mobilité détecte et enregistre-le mouvement/mobilité des nœuds capteurs. En utilisant ces positions, les nœuds capteurs peuvent connaître qui sont leurs voisins. Parfois une auto-organisation des nœuds est nécessaire à cause de la destruction de quelques nœuds. Dans ce cas, la couche de gestion de mobilité doit être capable de faire changer la position des nœuds.
- **Plan de gestion de tâche :** balance et ordonnance les différentes tâches de captage de données dans une région spécifique. Il n'est pas nécessaire que tous les nœuds de cette région effectuent la tâche de captage au même temps ; certains nœuds exécutent cette tâche plus que d'autres selon leur niveau de batterie.[3]

1.5.2 Classification des protocoles de routage pour les RCSF

Récemment, les protocoles de routage pour les RCSFs ont été largement étudiés. Les protocoles proposés présentent les points communs et donc peuvent être classifiés suivant un certain nombre de critères

Selon la topologie du réseau : La topologie détermine l'organisation des capteurs dans le réseau. Globalement, il existe deux topologies dans les RCSF : la topologie plate et la topologie hiérarchique.

a) Topologie plate: Dans une topologie plate, tous les nœuds capteurs ont le même rôle et collaborent entre eux pour accomplir la tâche de routage. Les réseaux plats sont caractérisés par : la simplicité des protocoles de routage, une grande tolérance aux pannes ainsi qu'une habilité à construire de nouveaux chemins suite aux changements de topologie. Cependant, Les nœuds proches de la station de base participent plus que les autres dans le processus de routage. De plus, les performances de ces réseaux se dégradent quand le nombre de nœuds augmente.

b) Topologie hiérarchique: Dans une topologie hiérarchique, les nœuds ont des rôles différents. En effet, certains nœuds sont sélectionnés pour exécuter des fonctions particulières telles que l'agrégation de données et l'acheminement des données. Une des méthodes les plus utilisées dans cette topologie est le clustering. Il consiste en un partitionnement du réseau en clusters. Un cluster est constitué d'un clusterhead et de ses membres. Selon l'architecture adoptée, les membres peuvent être des voisins directs du clusterhead ou pas. Cette topologie présente beaucoup d'avantages tels que l'agrégation des données collectées réalisée par les clusterheads ainsi qu'une grande scalabilité. Son inconvénient majeur est la surcharge des clusterheads qui induit un déséquilibre de la consommation d'énergie dans le réseau. Pour remédier à ce problème, les clusterheads peuvent être sélectionnés en fonction de leurs capacités énergétiques et leur élection devrait se faire périodiquement.

Selon le paradigme de communication : Le paradigme de communication détermine la manière dont les nœuds sont interrogés. Dans les RCSFs, il existe trois paradigmes de communication : centré-nœuds, centré-données et basé sur la localisation.

a) Centré-nœuds (Node-centric): Ce paradigme est celui employé dans les réseaux conventionnels, où il est nécessaire de connaître et d'identifier les nœuds communicants comme l'adresse IP dans l'environnement de Contiki et l'identifiant affecté par l'utilisateur comme dans TinyOs. Par ailleurs, dans les réseaux de capteurs, un routage basé sur une identification individuelle des nœuds ne reflète pas l'usage réel du réseau puisque les nœuds sont déployés en grand nombre et d'une manière aléatoire. D'où un autre paradigme a été introduit: data-centric. Néanmoins, le paradigme nodecentric reste toujours performant dans le cas des réseaux de petite taille et nécessitent une interrogation individuelle des capteurs.

b) Centré-données (Data-centric): Ce paradigme suppose qu'il est difficile d'avoir des identifiants comme les adresses MAC ou IP pour pouvoir communiquer entre les nœuds capteurs. Ainsi, le routage ne se fait pas en fonction d'une adresse de destination, mais suivant

les données disponibles au niveau des capteurs. Ces données seront propagées de proche en proche pour y arriver à la station de base.

c) Basé-localisation (location-based): Dans cette technique, les décisions de routage sont établies selon la position des nœuds. La distance entre les nœuds voisins peut être estimée sur la base de la puissance du signal arrivé (RSSI2). Un tel type de routage nécessite que les nœuds aient connaissance de leurs positions géographiques. Par conséquent, ce type de mécanismes nécessite un déploiement d'une solution de positionnement, dont le degré de précision requis dépend de l'application ciblée. L'utilisation du GPS reste trop coûteuse pour un RCSF puisque ce dernier consomme plus d'énergie. Néanmoins, d'autres méthodes de localisation et de positionnement des capteurs ont été développées comme par exemple la triangulation.

Selon le mode de fonctionnement : Le mode de fonctionnement définit la manière avec laquelle les données sont propagées dans le réseau. Selon ce critère, les protocoles de routage peuvent être classifiés en quatre catégories : routage basé sur la qualité de service "QoS 3 ", routage basé sur les requêtes (querybased routing), routage multi-chemins (Multi-path routing), et routage basé sur la négociation (Negociation based routing).

a) Routage basé sur les multi-chemins: Dans cette catégorie, les protocoles de routage utilisent des chemins multiples plutôt qu'un chemin simple afin d'augmenter la performance du réseau. La fiabilité d'un protocole peut être mesurée par sa capacité à trouver des chemins alternatifs entre la source et la destination en cas de défaillance du chemin primaire, le chemin alternatif sera emprunté. Pour cette raison, certains protocoles construisent plusieurs chemins indépendants, c-à-d ils ne partagent qu'un nombre réduit de nœuds. Malgré leur grande tolérance aux pannes, ces protocoles requièrent plus de ressources énergétiques et plus de messages de contrôle.

b) Routage basé sur les requêtes: Dans ce type de routage, la station de base génère des requêtes afin d'interroger les capteurs. Ces requêtes sont exprimées soit par un schéma valeur-attribut ou bien en utilisant un langage spécifique tel que SQL4 . Les nœuds qui détiennent les données requises doivent les envoyer au nœud demandeur à travers le chemin inverse de la requête. Les requêtes émises par la station de base peuvent aussi être ciblées sur des régions spécifiques du réseau.

c) Routage basé sur la négociation: En détectant le même phénomène, les nœuds capteurs inondent le réseau par les mêmes paquets de données. Ce problème de redondance peut être

résolu en employant des protocoles de routage basés sur la négociation. En effet, avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient entre eux leurs données en échangeant des paquets de signalisation appelés "métadonnées". Ces paquets permettent de vérifier si les nœuds voisins disposent déjà de la donnée à transmettre. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises et élimine la redondance des données. Ceci permet de minimiser la consommation d'énergie dans le RCSF.

d) Routage basé sur la qualité de service: Dans les protocoles de routage basés sur QoS, le réseau doit équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité de données. En particulier, le réseau doit satisfaire certaines métriques de QoS, par exemple, la latence, la consommation de l'énergie, largeur de bande passante, etc. Les protocoles de cette approche sont très recommandés pour les applications orientées surveillance.

Selon le mode d'établissement des chemins: Suivant la manière de création et de maintien des chemins pendant le routage, nous distinguons trois catégories de protocoles de routage : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs et les protocoles hybrides.

a) Les protocoles proactifs: Ces protocoles utilisent l'échange régulier de messages de contrôle pour maintenir au niveau de chaque nœud des tables de routage vers toute destination atteignable depuis celui-ci. Ces tables sont maintenues mêmes quand les routes ne sont pas utilisées. Cette approche permet de disposer d'une route vers chaque destination immédiatement au moment où un paquet doit être envoyé. Les protocoles proactifs sont adaptés aux applications qui nécessitent un prélèvement périodique des données. Par conséquent, les capteurs peuvent se mettre en veille pendant les périodes d'inactivité, et n'enclencher leur dispositif de capture qu'aux instants lorsqu'ils basculent en mode actif.

b) Les protocoles réactifs: Ces protocoles créent les routes à la demande. Lorsqu'un nœud a besoin d'une route, une procédure de découverte globale est déclenchée. Cette procédure s'achève par la découverte de la route ou lorsque toutes les permutations de routes possibles ont été examinées. La route trouvée est maintenue par une procédure de maintenance de routes jusqu'à ce que la destination soit inaccessible à partir du nœud source ou que le nœud source n'aura plus besoin de cette route.

c) Protocoles hybrides: Ces protocoles combinent les deux idées des protocoles proactifs et réactifs. Ils utilisent un protocole proactif pour apprendre le proche voisinage (par exemple le voisinage à deux ou à trois sauts), ainsi, ils disposent de routes immédiatement dans le

voisinage. Au-delà de la zone du voisinage, le protocole hybride fait appel à un protocole réactif pour chercher des routes.[4]

1.5.3 Protocoles de routage dans RCSF

Les différents protocoles de routage :

L'inondation (flooding) : L'émetteur envoie le message à tous ses voisins. Chaque voisin envoie à son tour le message à tous ses voisins et ainsi de suite. Les nœuds vont donc recevoir le même message plusieurs fois de différents voisins. Pour éviter que le message ne se multiplie dans le réseau, chaque nœud ne le renvoie qu'une seule fois. Pour ce faire, chaque message envoyé en inondation a un identifiant unique. Les nœuds qui réémettent le message notent l'identifiant. S'ils reçoivent à nouveau un message avec cet identifiant, ils ne le renvoient pas.

Gossiping : Dans cette technique, dérivée de la technique d'inondation, le nœud ne diffuse pas les messages reçus à tous ses voisins, mais il les transmet à un seul, sélectionné aléatoirement. En effet, chaque nœud capteur dans le réseau sélectionne aléatoirement un nœud parmi ses voisins pour lui transmettre les données reçues, une fois le nœud voisin reçoit ces données, il choisit un autre nœud d'une façon aléatoire pour lui transmettre ces données à son tour. Malgré que cette approche évite le problème d'implosion en ayant une seule copie du message au niveau de chaque nœud, elle prend beaucoup plus de temps pour propager les messages dans tout le réseau.

SPIN : L'idée derrière le SPIN est de nommer les données en utilisant des descripteurs de haut niveau ou des méta-données. Avant la transmission, les méta-données sont échangées entre les capteurs par un mécanisme de publicité de données. Chaque nœud recevant de nouvelles données, l'annonce à ses voisins et ceux intéressés récupèrent les données en envoyant une requête.

Diffusion dirigée : Ce protocole utilise lui aussi un schéma de nommage sous forme de pair « Attribue, Valeur » pour les requêtes et les données. Chaque nœud qui recense un événement crée et diffuse un gradient au voisinage direct. La station de base, de son côté, diffuse ses requêtes sous forme d'intérêt au voisinage direct ; et chaque nœud recevant l'intérêt crée un gradient vers le nœud source de cet intérêt. De cette manière, plusieurs routes reliant la station de base à la source de données sont réalisées ; puis la meilleure route sera renforcée pour éviter la redondance.

GAF (Geographic Adaptive Fidelity) : Ce protocole découpe le réseau en plusieurs zones virtuelles ; chaque nœud est affecté à une zone donnée selon ses coordonnées géographiques (en utilisant le GPS). Les nœuds appartenant à la même zone sont considérés comme équivalents en coût de routage ; ainsi, on choisit seulement un nœud de chaque zone pour router les données et les autres sont mis en mode sommeil pour conserver de l'énergie. De cette façon, la durée de vie du réseau est augmentée en fonction du nombre total des nœuds inactifs.

- Dans GAF le nœud peut se retrouver dans l'un des trois cas possibles :
- Mode découvert : pour déterminer ses voisins de zone;
- Mode Actif : s'il participe dans le routage de données et
- Mode Endormi : s'il ne participe pas au routage.

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) : Le protocole LEACH est le plus populaire de protocoles de routage hiérarchique. Son principal avantage est de minimiser la consommation énergétique des éléments du réseau. Dans ce protocole le réseau est divisé en clusters et chaque cluster possède un nœud maître appelé cluster-head. Ce dernier prend en charge la gestion de son cluster. Il est élu périodiquement parmi les nœuds formant le cluster, en fonction de l'état de sa batterie.

PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems):

Il est considéré comme une optimisation de LEACH, proposé en 2002 ; PEGASIS regroupe les nœuds du réseau sous forme d'une longue chaîne en se basant sur le principe qui stipule qu'un nœud ne peut communiquer qu'avec le nœud le plus proche de lui. Ainsi, il ajuste sa radio pour une communication très courte pour conserver son énergie. Pour communiquer avec le puits, le processus est organisé en rounds ; au cours de chaque round un seul nœud est autorisé à communiquer avec le puits directement (leader). Ce privilège est accordé à l'ensemble des nœuds du réseau à tour de rôle. Une meilleure conservation d'énergie est obtenue, également, en agrégeant les données sur chaque nœud du réseau.

1.6 Exigences de sécurité

Les solutions de sécurité proposées pour les réseaux de capteurs doivent satisfaire les exigences suivantes :

La sûreté : toute technique de sécurité doit assurer au moins l'un des services :

- **La confidentialité** : Seules les entités autorisées peuvent accéder les données échangées entre les entités communicantes. Les données doivent donc être chiffrées à l'aide des algorithmes de cryptage suffisamment robustes. D'autre part, la confidentialité des programmes des nœuds capteurs doit être garantie ; le nœud capteur ne doit en aucun cas se permettre la lecture de son contenu par des parties non autorisées. Donc, mêmes les données propriétaires au capteur, comme les clés cryptographiques, le programme du capteur et son identificateur, doivent être protégées.
- **L'intégrité** : Le mécanisme de sécurité doit garantir que les données ne seront pas altérées le long de leur passage vers la station de base. Les deux entités doivent implémenter des techniques de détection de toute modification de données.
- **L'authentification** : Il arrive qu'un attaquant ne cause pas que la modification des paquets qu'il intercepte mais aussi, il peut forger et injecter des paquets falsifiés dans le réseau. Dans tel cas, le nœud capteur doit pouvoir vérifier la validité des identificateurs des nœuds sources de données qui lui parviennent.
- **La fraîcheur de données** : Dans la majorité des applications des réseaux de capteurs, la récence de données est vivement suggérée. Un attaquant peut violer cette propriété, en rejouant plusieurs fois des anciens messages. De ce fait, et les nœuds capteurs et la station de base doivent mettre en place des mécanismes appropriés pour s'assurer de la fraîcheur des données communiquées.
- **La disponibilité** : Les RCSFs sont des réseaux orientés-services, ce qui veut dire que le réseau est spécialement mis en place pour rendre un service bien déterminé et souvent assez critique. Donc, même dans le cas où le réseau de capteurs est ciblé par des attaques, il doit résister tant que possible et préserver la disponibilité de ses ressources et services.
- **La sécurité de la localisation** : Le réseau de capteurs a souvent besoin des informations précises de localisation concernant des objets contrôlés par les capteurs et/ou les capteurs eux-mêmes. Telles informations doivent nécessairement être protégées contre toute interception illégale ou manipulation mal intentionnée.

La gestion soigneuse des ressources : L'utilisation raisonnable des ressources, en particulier l'énergie, est primordiale dans tout mécanisme sécuritaire destiné aux RCSFs.

La résistance : La technique de sécurité définie doit résister tant que possible aux attaques (plus la résistance est bonne, plus la solution est bonne).

La flexibilité : La souplesse de configuration et de réalisation de la solution sont vivement recommandées.

Le support pour l'évolutivité du réseau : Même avec l'ajout des nouveaux nœuds capteurs, la solution doit maintenir ses performances et son bon fonctionnement.[5]

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué les concepts généraux sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Cela nous a permis de découvrir les multiples domaines d'utilisation de ces derniers vu leur facilité de déploiement et de leurs faibles coûts des capteurs sans fil sans pour autant oublier les contraintes. Nous avons vu que les RCSF utilisent une architecture de communication en couches, qui sont les cinq premières couches du modèle OSI en plus d'autres unités afin de gérer la consommation d'énergie, la mobilité des nœuds et l'ordonnancement des tâches, nous avons défini les critères de classification des protocoles de routage en citant quelques-uns. Enfin nous avons abordé la notion de sécurité qui représente un grand challenge dans un domaine assez sensible que les RCSF.

Dans le chapitre suivant, nous allons aborder la notion de déploiement d'un réseau de capteurs sans fils,

Chapitre 2

Déploiement d'un réseau de capteurs sans fil

2.1 Introduction

La performance d'un réseau de capteur sans fil est considérablement influencée par le processus de déploiement des nœuds capteurs. En effet, le nombre et les positions des nœuds capteurs déployés dans une zone d'intérêt est une stratégie qui sert à définir la topologie du réseau. La qualité de la surveillance, la connectivité, et la consommation d'énergie sont aussi directement affectées par la topologie de réseau. D'autre part, le problème de placement optimal des nœuds est un problème qui a été prouvé NP-difficile pour la plupart des formulations de déploiement des nœuds. Les nœuds doivent être bien placés les uns des autres afin de garantir une communication sans fil fiable tout en assurant une couverture maximale du champ de surveillance.

Dans ce chapitre nous allons définir les environnements de déploiement, les types et techniques utilisées, les RCSF hétérogènes, les notions qui définissent la performance d'un RCSF donné et enfin nous allons comparer entre RCSF et quelques réseaux sans fils.

2.2 Environnements de déploiement

Actuellement, plusieurs RCSF sont déployés sur terrain, sous terre et sous l'eau. Ils font face à différents challenges et contraintes dépendant de leur environnement. Nous distinguons les cinq types de RCSF suivants :

2.2.1 RCSF terrestre

Un RCSF terrestre consiste en un grand nombre (centaines à milliers) de nœuds à faible cout qui sont déployés sur terrain dans une zone donnée, de manière ad hoc(déployé à partir d'un hélicoptère par exemple). Dans les RCSF terrestre, les nœuds capteurs doivent être capables de transmettre des données à une SB dans un environnement dense. Puisque l'énergie de la batterie est limitée et la plupart du temps inaccessible, les nœuds capteurs

terrestres peuvent être équipés d'une source secondaire telle que les cellules solaires. Les applications communes des RCSF terrestre sont la capture et le monitoring environnemental, le monitoring industriel et les explorations de surfaces .



Figure 2.1: RCSF terrestre

2.2.2 RCSF souterrain

Un RCSF souterrain comporte un ensemble de noeuds capteurs qui sont déployés sous terre, dans des caves ou des mines pour contrôler les conditions souterraines, afin de transmettre des données à partir des noeuds capteurs souterrains jusqu'à la SB, des noeuds sinks additionnels seront situés à la surface. Ces noeuds capteurs coutent plus chers que les capteurs terrestres car ils nécessitent des équipements appropriés pour assurer une communication fiable à travers la terre, les roches et l'eau, La communication sans fil est un challenge dans de tel environnement à cause de la forte atténuation et perte du signal. De plus, il est difficile de recharger ou de remplacer les batteries des capteurs sous terre, ce qui nécessite l'utilisation de protocoles de communication économie d'énergie pour prolonger la durée de vie du réseau. Les capteurs souterrains sont utilisés dans plusieurs applications telles que le monitoring agricole, le monitoring souterrain du sol et de l'eau et la surveillance des frontières militaires .

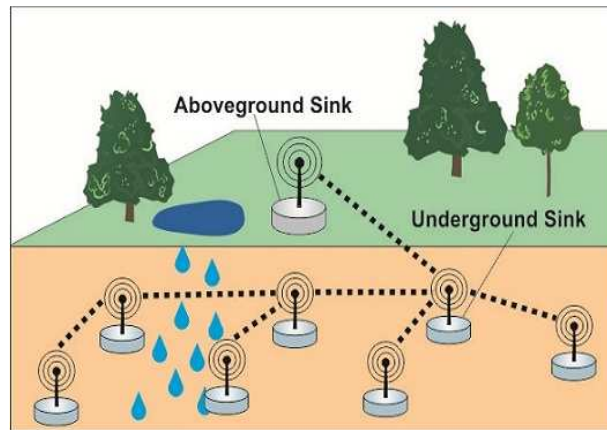


Figure 2.2: RCSF souterrain

2.2.3 RCSF mobile

Un RCSF mobile se compose de nœuds capteurs mobiles, qui peuvent se déplacer et interagir avec un environnement physique. Les nœuds mobiles peuvent se repositionner et s'auto-organiser dans le réseau de plus de leur capacité de capturer, traiter et de communiquer. Un algorithme de routage dynamique doit être au lieu du routage fixe approprié aux RCSF statiques. Les RCSF mobiles doivent faire face à plusieurs challenges tels que le déploiement, la gestion de la mobilité, la localisation avec mobilité, le contrôle et la navigation des nœuds mobiles, le maintien de la couverture et de la connectivité et la minimisation de la consommation d'énergie dans la locomotion. Les applications des RCSF mobiles concernent le monitoring environnemental, la surveillance militaire, le suivi de cibles et l'assistance aux opérations de secours. Un plus grand degré de couverture et de connectivité peut être assuré avec les nœuds capteurs mobiles comparé aux nœuds statiques.

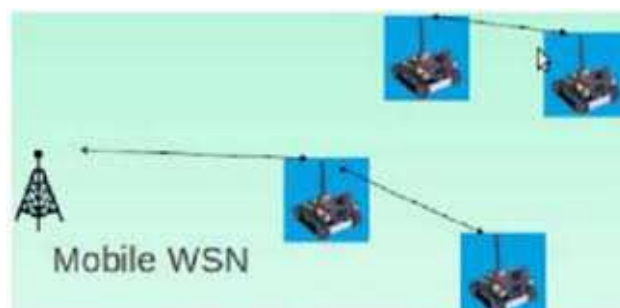


Figure 2.3: RCSF mobile

2.2.4 RCSF aquatique

Un RCSF aquatique se compose de capteurs déployé sous l'eau, par exemple, dans un environnement océanique. Comme ces noeuds coutent très cher, donc très peu de nœuds

capteurs seront déployés et des véhicules aquatiques autonomes seront utilisés pour explorer ou récupérer les données capteurées. Les communications sans fil aquatique utilisent des ondes acoustiques, qui présentent différentes contraintes telles qu'une bande passante limitée, un délai de propagation plus long, une haute latence et des problèmes d'affaiblissement du signal, Ces nœuds doivent être capables de s'auto-configurer et de s'adapter aux conditions extrêmes de l'environnement océanique, les applications des RCSF aquatiques incluent le contrôle de la pollution, la surveillance et l'exploitation sous-marine, la prévention et le monitoring de désastres que les séismes .

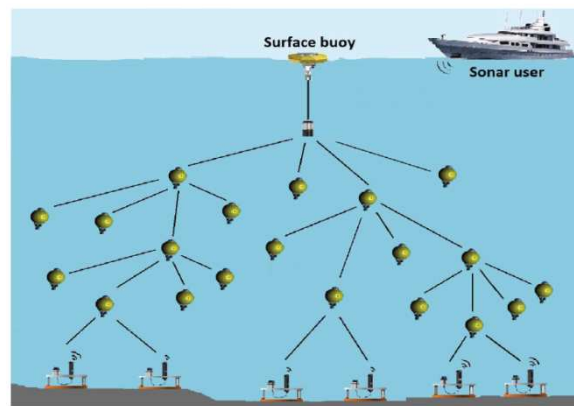


Figure 2.4: RCSF aquatique

2.2.5 RCSF multimedia

Certaines applications des réseaux de capteurs, exigent que les données à capter soient du type multimédia (son, image ou vidéo). Néanmoins, les données multimédias sont reconnues pour être volumineuses et occupent donc, un espace mémoire important. Ainsi, des techniques de représentation différentes que celles des données ordinaires sont nécessaires pour les données multimédias. Les réseaux de capteurs multimédias (ou Wireless Multimedia sensor Networks: WMSN) requièrent des protocoles performants ainsi que des considérations particulières pour répondre à leurs défis en matière de qualité de service et de capacités de traitement exigées. Les WMSN revendiquent suffisamment de bande passante ainsi qu'une faible latence pour qu'ils soient opérationnels, ce qui n'est pas le cas dans les réseaux de capteurs standard où la qualité de service est relâchée pour un besoin en un moindre coût et une faible dissipation des ressources. Puisque la qualité de service et les traitements intensifs sont pratiquement gourmands en énergie, les mécanismes de gestion de la consommation énergétique dans les réseaux de capteurs multimédias doivent être très efficaces. À cet effet, on note que dans ce cas, le remplacement des batteries des nœuds capteurs est souvent

possible (tout dépend de la nature du champ de captage). Les capteurs multimédias sont utilisés dans les applications médicales et les applications militaires.

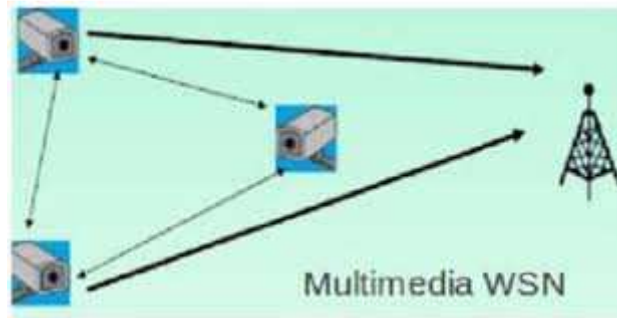


Figure 2.5: RCSF multimédia

2.3 Les techniques de déploiement

2.3.1 Les différentes phases de déploiement

- **Phase de pré-déploiement :** Une phase de pré-déploiement et de déploiement concerne le placement manuel des nœuds par un humain ou un robot, ou le lancement des nœuds à partir d'un hélicoptère par exemple
- **Post-déploiement :** Une phase de post-déploiement est nécessaire si la topologie du réseau a évolué, suite par exemple à un déplacement de nœuds, ou un changement des conditions de propagation radio.
- **Redéploiement :** La troisième phase considère le redéploiement qui consiste à ajouter de nouveaux nœuds au réseau pour remplacer certains nœuds défectueux ou en panne. Le système peut itérer sur les phases 2 et 3.

2.3.2 Types de déploiement

2.3.2.1 Déploiement statique

Les méthodes de placement des nœuds dépendent généralement du type d'application et du type d'environnement où ils sont déployés. Il existe deux méthodes de placement des nœuds qui sont le placement aléatoire et le placement déterministe.

2.3.2.1.1 Déploiement aléatoire :

La méthode de placement aléatoire est généralement utilisée pour le déploiement de nœuds capteurs dans des zones inconnues, difficiles d'accès ou inaccessibles (zone de bataille, montagne, atmosphère, etc.). Dans ce cas, les nœuds peuvent être déployés à l'aide de divers moyens, par exemple via des avions, des bateaux, lance-grenades, drone, des bombes en grappes etc. Cependant, ces méthodes de placement aléatoires nécessitent généralement des

techniques fréquentes de contrôle de la topologie et de reconfiguration des nœuds dans le but de garantir la stabilité du réseau et d'assurer une transmission efficace des données.[18]

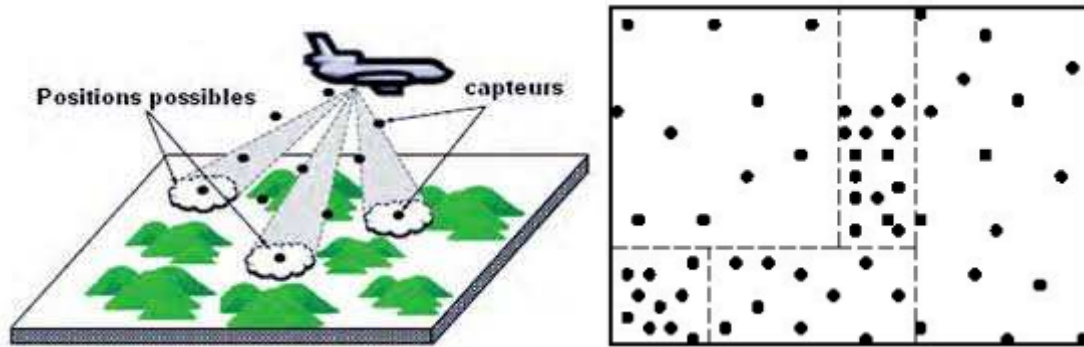


Figure 2.6: Le déploiement aléatoire

Dans certaines applications, le nombre de capteurs est très grand, des milliers voire des millions de capteurs sont utilisés. Déployer un nombre aussi important dans une grande zone de façon déterministe s'avère peu pratique, difficile voire impossible. En effet, la difficulté d'un déploiement déterministe survient dans deux situations : lorsque le nombre de capteurs est très grand, et/ou lorsque l'environnement de déploiement n'est pas complètement accessible. [21]

Souvent, le déploiement aléatoire est la seule option possible. Par exemple, dans les missions de reconnaissance et de surveillance des champs de bataille, de reprise après sinistre et de détection d'incendie dans les forêts, un déploiement déterministe des nœuds est très risqué et/ou irréalisable carrément.

Contraintes d'un déploiement aléatoire :

Le déploiement aléatoire ne permet pas une distribution uniforme des capteurs dans la zone à surveiller. Dans ce cas, le réseau doit faire face à des problèmes de connectivité d'un certain nombre de nœuds qui se retrouvent en dehors de la zone de couverture des autres nœuds, soit parce qu'ils sont trop éloignés, soit parce qu'ils sont tombés dans des lieux qui entravent la propagation des ondes radio ou tout simplement parce qu'ils ont été détruits.[21]

2.3.2.1.2 Déploiement déterministe

Dans le déploiement déterministe, les capteurs sont placés un par un, soit par un humain ou un robot dans des endroits déterminés préalablement, de façon à assurer certaines performances. Ce type de déploiement est utilisé lorsque le coût des capteurs est très élevé ou lorsque leur fonctionnement est très affecté par leur position tel qu'un réseau de vidéosurveillance et le plus souvent dans le cas des applications indoor. Nombreux sont les

exemples de ce genre d'applications : la surveillance des zones sismiques (les capteurs ont un coût très élevé), l'intégration des capteurs sur les machines dans l'industrie, etc. Dans ce type de déploiement, la couverture du champ de capture peut être assurée par une planification rigoureuse de la densité des nœuds ; donc la topologie du réseau peut être établie au moment de l'installation du RCsF.

Les stratégies du déploiement déterministe devraient tenir compte de l'optimisation d'un ou de plusieurs objectifs concernant les besoins applicatifs sous une ou plusieurs contraintes tel que la couverture et la connectivité tout en minimisant l'utilisation des capteurs (coût de déploiement). [18]

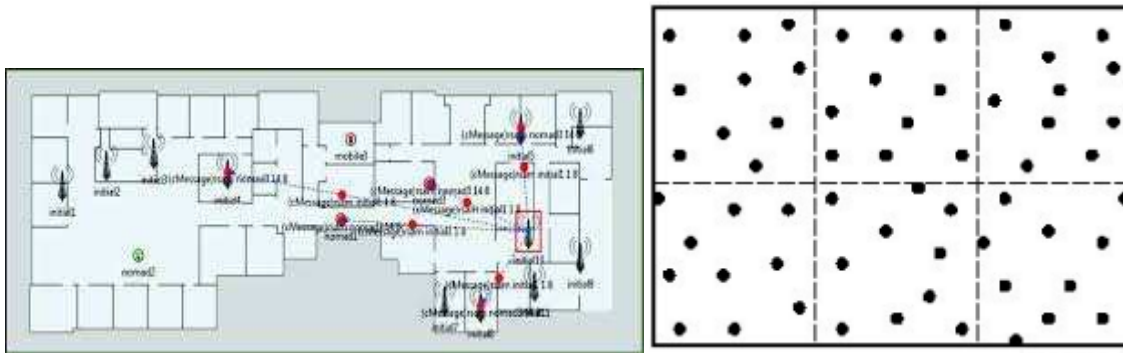


Figure 2.7: Déploiement déterministe

2.3.2.2 Déploiement dynamique

Dans une stratégie de déploiement statique, la décision sur les emplacements des capteurs s'est faite au moment de la configuration du réseau et ne tient pas compte des changements dynamiques dans sa phase d'exploitation. En effet, plusieurs situations peuvent se produire : les routes du trafic peuvent changer par cause de la disparition d'un ou de plusieurs capteurs ; la charge peut ne pas être répartie équitablement entre tous les capteurs, provoquant ainsi des goulots d'étranglement. L'usage d'une application peut varier dans le temps et les ressources réseau disponibles peuvent changer à mesure que de nouveaux capteurs rejoignent le réseau. Ces situations montrent que le déploiement statique ne répond pas à une bonne partie des applications des RCsF. Par conséquent, le repositionnement dynamiquement des capteurs dans un environnement opérationnel est nécessaire afin d'améliorer les performances du réseau. Par exemple, lorsque de nombreux capteurs, dans le voisinage de la station de base fonctionnelle, tombent en panne à cause de l'épuisement de leurs batteries, des capteurs redondants dans d'autres parties de la région surveillée peuvent être identifiés et redéployés

pour remplacer les capteurs éteints, ceci afin d'améliorer la durée de vie du réseau et assurer ainsi la continuité du service.

Un déploiement dynamique peut également être très bénéfique dans un objectif de suivi où la cible est mobile et des capteurs peuvent être rapprochés de l'objectif afin d'accroître l'acuité des données transmises par les capteurs. Aussi, dans certaines applications la station de base doit être maintenue à une distance de sécurité des objectifs nuisibles en la déplaçant par exemple vers des zones plus sûres afin d'assurer son bon fonctionnement.

Le mouvement des capteurs pendant le fonctionnement régulier du réseau impose l'existence de règles réactives. Contrairement au placement initial, la relocalisation est exercée en réponse à un stimulus du réseau ou de l'environnement de surveillance. Ceci requiert une surveillance continue de l'état du réseau et de ses performances, ainsi que l'analyse des événements qui se déroulent à proximité du capteur pendant son déplacement. En outre, le processus de relocalisation doit se manipuler avec précaution, cela peut en effet potentiellement causer des perturbations dans le routage des données ou dans la détection de nouveaux événements ayant lieu lors du redéploiement. [18]

2.4 Indicateurs majeurs de performance d'un bon déploiement

Les points clés de la recherche sur les algorithmes de déploiement des nœuds sont l'augmentation de la zone de couverture, d'améliorer connectivité réseau, prolonger la durée de vie du réseau, l'équilibre de la charge, améliorer la précision des données transmises et renforcer la tolérance des nœuds.

En général, l'optimisation du déploiement des nœuds capteurs principalement inclut les indices de performance suivants [19] :

2.4.1 La couverture

La couverture dans les RCSF est souvent considérée comme étant une mesure de performance très importante dans WSN et est liée aux économies d'énergie, à la connectivité et à la configuration du réseau. Il résout principalement comment déployer les nœuds capteur pour obtenir une couverture efficace de la zone afin que chaque point soit surveillé au moins par un nœud de capteur. Une bonne couverture est indispensable pour l'efficacité des réseaux de capteurs sans fil.[19]

Généralement, une zone de couverture du capteur peut être formulé sous la forme d'une fonction des distances euclidiennes (et des angles) entre un point de l'espace et les capteurs.

La majorité des travaux sur le déploiement assument un modèle de couverture binaire, où un capteur a un rayon de détection R_{set} . Une cible est dite détectée si elle se trouve à une distance inférieure à R_s . Sur la *Figure 2.8*, la cible représentée par une croix jaune est considérée comme étant détectée alors que la cible représentée par la croix rouge est considérée comme étant non détectée. [18]

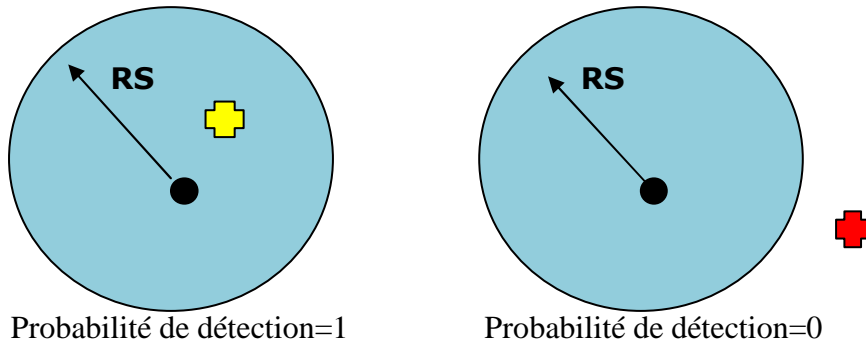


Figure 2.8: Illustration du modèle de couverture binaire

Types de couvertures dans les RCSF :

Il existe deux types de couverture dans les RCSF : une couverture simple et k-couverture définie comme étant une multitude de couvertures simples. [21]

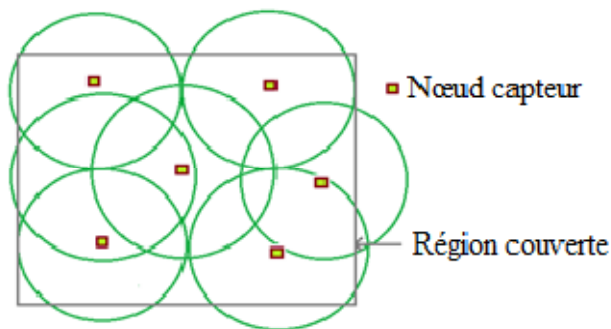


Figure 2.9: Exemple d'illustration de la couverture simple

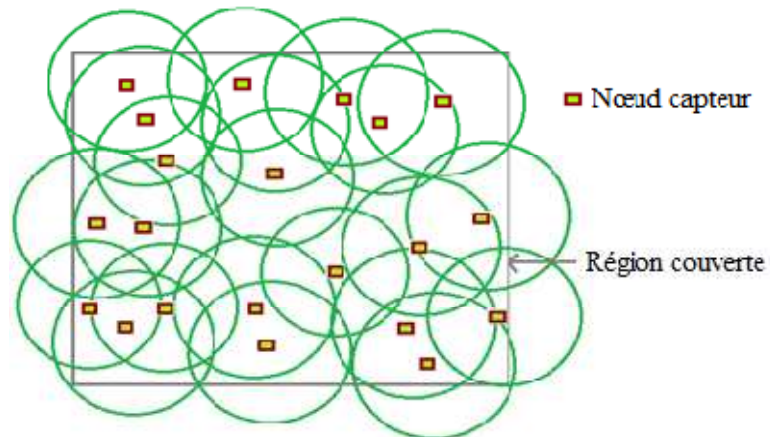
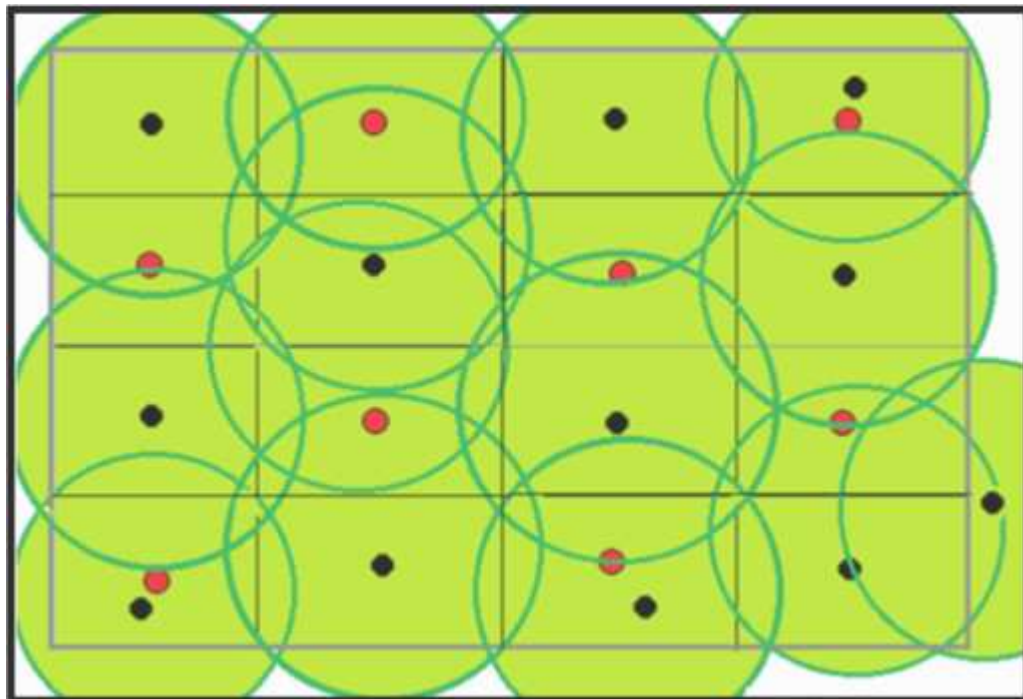


Figure 2.10: Exemple d'illustration du mécanisme de couverture multiple (k-couverture)

La couverture de zone consiste également à appliquer des stratégies d'ordonnement sur les états d'activités des nœuds capteurs (actif ou sleep) afin de décider du nombre et du choix des capteurs qui doivent être planifiés dans les modes actifs ou sleep, tout en maintenant une couverture complète ou acceptable de la zone de surveillance selon le type d'application. Pour certaines applications, un degré de couverture simple (1-couvert) ne suffit pas pour mettre en place de telles stratégies d'ordonnements. Ainsi, il est nécessaire de garantir une couverture multiple (k-couvert) lors du placement des nœuds. Dans ce cas, il peut y avoir des redondances de couvertures dans la zone d'intérêt, c'est-à-dire, plusieurs capteurs donnés peuvent couvrir en même temps les mêmes surfaces d'une zone donnée. Par conséquent, un même événement peut être détecté et envoyé à la BS par plusieurs capteurs à la fois. Ceux qui détectent et envoient des mesures redondantes vont ainsi consommer inutilement de l'énergie dans le traitement, la transmission et la réception de ces données. Afin de réduire la consommation énergétique dans l'ensemble du réseau, il est donc nécessaire d'appliquer des stratégies d'ordonnement efficaces sur les états d'activités des capteurs. La *figure 2.11* illustre un exemple d'un mécanisme d'ordonnement des états d'activités des capteurs qui permet d'optimiser la consommation énergétique dans un RCSF donné, tout en assurant la couverture complète de la zone de surveillance et une connectivité du réseau.



- Capteur actif assurant la couverture totale de la zone de surveillance
- Capteur en mode sleep
- Région totalement couverte par les capteurs actifs

Figure 2.11: Couverture de zone par ordonnancement des états des capteurs

2.4.2 Connectivité

On dit que deux nœuds d'un RCSF sont connectés si et seulement si ils peuvent communiquer directement (connectivité à un saut) ou indirectement (connectivité multi-saut). Le RCSF est connecté s'il existe au moins une route entre chaque nœud du réseau et la station de base. Par conséquent, d'après ces deux définitions, nous pouvons dire que la connectivité dépend donc essentiellement de l'existence de routes. Elle est ainsi affectée par les changements de topologie dus généralement aux pannes de nœuds, à la mobilité, etc. Ces changements de topologies ont pour conséquences la perte des liens de communication, l'isolement des nœuds, le partitionnement du réseau, etc.

Types de connectivité dans les RCSF

Il existe deux types de connectivité dans les RCSF qui sont la connectivité complète et la connectivité intermittente. Une connectivité complète peut être soit simple (1-connectivité), soit multiple (k-connectivité). Une connectivité complète d'un RCSF est dite simple s'il existe un seul chemin entre chaque nœud source et la station de base et elle est dite multiple s'il existe plusieurs chemins distincts entre chaque nœud source et la station de base. Selon les stratégies de placement des nœuds dans la zone de surveillance et selon les caractéristiques de l'application, une connectivité simple (ou multiple) peut être assurée lors de la phase de placement des nœuds ou bien être obtenue lors d'une phase de redéploiement ou d'auto-configuration des nœuds. Dans le cas de certaines applications des RCSF, il n'est pas nécessaire d'assurer et de maintenir en continu une connectivité complète du réseau. En effet, pour de telles applications, il est suffisant de garantir une connectivité intermittente en utilisant par exemple un (ou plusieurs) station de base mobile se déplaçant afin de recueillir les mesures collectées par les nœuds capteurs déconnectés.

2.4.3 Consommation d'énergie

L'une des exigences les plus importantes de WSN est de : réduire la consommation d'énergie. Par conséquent, il est nécessaire d'économiser l'énergie de la communication et les techniques de routage cela augmentera la durée de vie du réseau. La principale cause de gaspillage d'énergie est la redondance. Quand un nœud reçoit plus d'un paquet à la fois, même quand ils ne coïncident que partiellement. Tous les paquets qui causent la collision doivent être jetés et des retransmissions de ces paquets sont nécessaires, ce qui augmente la consommation d'énergie. La deuxième raison du gaspillage d'énergie est « overheard », ce

qui signifie qu'un nœud reçoit des paquets destinés à d'autres nœuds. Le troisième gaspillage d'énergie résulte de la surcharge du paquet de contrôle.

2.5 Déploiement dans un environnement hétérogène

Dans les réseaux de capteurs sans fil on distingue deux types de réseaux : les réseaux homogènes des hétérogènes. Dans un réseau de capteurs homogène, tous les nœuds du réseau (nœuds capteurs, le(s) stations de base et les passerelles) ont les mêmes capacités du point de vue énergie, calcul et stockage. Alors que, dans un réseau de capteurs hétérogène il y a quelques nœuds particuliers qui ont plus de capacité de traitement et de communication que les nœuds normaux. Cela améliore l'efficacité énergétique et prolonge la vie du réseau. L'avantage d'un tel réseau est que ces nœuds particuliers peuvent être utilisés pour exécuter les tâches plus complexes comme coordinateurs, points de collecte locale, nœud assurant la structuration et la configuration des nœuds voisins, chefs du cluster (clusterhead)...etc.

Son inconvénient est qu'il est difficile de mettre en place un tel réseau du fait qu'au moins chaque type de nœuds du réseau sera programmé différemment. Cette opération supplémentaire pourrait augmenter le coût de développement.

2.5.1 Types d'hétérogénéité

- L'hétérogénéité au niveau des capacités de calcul et de mémoire où certains nœuds ont des puissances de calcul et de mémoire supérieures à celles des nœuds classiques déployés dans le réseau.
- L'hétérogénéité au niveau des liens où certains liens sont des liens asymétriques et/ou sont des liens à longues distances.
- L'hétérogénéité au niveau de l'énergie où certains nœuds ont des ressources énergétiques illimitées.

2.5.2 Types de nœuds dans un environnement hétérogène

Un RCSF hétérogène peut contenir différents types de nœuds :

- **Un nœud régulier**

Est un nœud doté d'une unité de transmission et d'une unité de traitement de données. L'unité de transmission de données est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication sans fil pouvant être de type optique ou de type radiofréquence. L'unité de traitement de données est composée d'une mémoire, d'un microcontrôleur et d'un système d'exploitation spécifique comme TinyOS, alimentées par une

batterie embarquée. Selon le domaine d'application, un nœud peut être équipé d'unités supplémentaires ou optionnelles comme un système de localisation (Global Positioning System ou GPS, etc.) pour déterminer sa position, ou bien un système générateur d'énergie (cellule photovoltaïque, etc.), ou encore un système mobile pour lui permettre de changer sa position ou sa configuration en cas de nécessité.

- **Un nœud capteur ou nœud source**

Est un nœud régulier équipé d'une unité d'acquisition ou de détection. L'unité d'acquisition est généralement dotée d'un capteur ou plusieurs capteurs qui obtiennent des mesures analogiques (physiques et physiologiques) et d'un convertisseur Analogique/Numérique qui convertit l'information relevée en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.

- **Un nœud actionneur ou robot**

Est un nœud régulier doté d'une unité lui permettant d'exécuter certaines tâches spécifiques comme des tâches mécaniques (se déplacer, combattre un incendie, piloter un automate, etc.)

- **Un nœud puits**

Est un nœud régulier doté d'un convertisseur série connecté à une seconde unité de communication (GPRS, Wifi, Wi Max, etc.). La seconde unité de communication fournit une retransmission transparente des données provenant de nœuds capteurs à un utilisateur final ou d'autres réseaux comme internet.

- **Un nœud passerelle**

Est un nœud régulier permettant de relayer le trafic dans le réseau sur le même canal de communication. Pour optimiser certains paramètres comme la durée de vie du réseau ou le délai de livraison des données, certains travaux se sont focalisés sur l'architecture (plat, hiérarchique, multi niveaux) des RCSF. Ces architectures définissent le plus souvent les rôles joués par les nœuds dans un RCSF.

- **Nœud Relais (NR)**

Ils ont pour rôle d'agréger et de retransmettre les mesures provenant des NS afin que celles-ci parviennent à un utilisateur final. Dans une architecture à plat, quelques travaux considèrent généralement un NS comme un NR. Dans une architecture à 2 niveaux, un nœud passerelle joue le rôle de NR pour un ou plusieurs nœuds sources. Dans une telle

configuration réseau, la capacité de transmission du NR est supposée généralement plus grande que celle du NS.

- **Nœud Collecteur (NC) de données**

Ils ont pour rôle de collecter les mesures provenant des nœuds sources et éventuellement de les agréger. Généralement, un " Cluster-Head " ou chef de cluster est utilisé comme NC dans une architecture hiérarchique où les NS sont partitionnés en plusieurs groupes.

2.5.3 Caractéristique d'un RCSF hétérogène

Dans les RCSF hétérogènes les capteurs ont des rôles différents.

L'utilisation de stations plus puissantes (jouant le rôle de puits) au sein d'un grand RCSF a été perçue comme une voie possible pour faciliter la gestion et le passage à l'échelle du réseau, pour améliorer la connectivité, raccourcir le délai de transmission, et par conséquent prolonger sa durée de vie.

Une étude faite a montré qu'un réseau hétérogène proprement déployé peut tripler le taux moyen de livraison et peut prolonger jusqu'à cinq fois plus la durée de vie du réseau.

- L'utilisation de super-nœuds dans les grands RCSF est donc perçue comme une voie possible pour faciliter la gestion et le passage à l'échelle du réseau, pour raccourcir les délais de transmission, mais aussi pour améliorer la connectivité et la durée de vie du réseau.
- Sécurité : il faut s'appuyer sur les nœuds riches en ressource dans les réseaux de capteurs et actionneurs pour servir comme point d'exécution d'algorithme de sécurité complexe. Ces nœuds riches en ressources peuvent jouer le rôle de distributeur de clé de sécurité et peuvent aussi appliquer des algorithmes de cryptographie asymétrique.
- Routage : Dans un réseau hétérogène, l'utilisation des tables de routage est envisageable au niveau des nœuds riches en ressources. En effet, il y a besoin d'une table de routage qui doit être construite au niveau chaque nœud et un mécanisme pour remplir ces routes afin d'assurer le trafic P2P. Ceci peut être accompli par les nœuds riches en ressource déployé dans le réseau. Ces nœuds peuvent jouer le rôle de serveur DHCP local (*Dynamic Host Configuration Protocol*). Ils peuvent affecter des adresses aux nœuds capteurs dans leur voisinage et en plus ils peuvent sauvegarder les routes menant vers ces nœuds. Pour assurer l'acheminement des données vers ces capteurs, les nœuds riches en ressource jouent aussi le rôle d'un serveur NAT local (*Network Address Translation*). Ainsi quand un nœud veut communiquer avec un autre nœud du

réseau, il envoie une requête vers le nœud riche en ressource auquel il est attaché. Ce dernier, cherche le chemin à partir de sa table de routage locale vers la destination finale.

On peut exploiter l'hétérogénéité des nœuds du réseau pour améliorer les performances réseaux en termes de délai, de pertes de paquets, de passage à l'échelle, et d'économies d'énergie. Dans le but de réduire les interférences radios et l'occupation de la bande passante, la structure de clusters est inspirée du réseau cellulaire en utilisant plusieurs canaux de fréquences.

2.6 Comparaison entre RCSFs et d'autres réseaux sans fils

2.6.1 WSN Vs AD-HOC (MANET)

Un réseau mobile Ad Hoc appelé généralement MANET, consiste en une grande population relativement dense d'unités mobiles qui se déplacent dans un territoire quelconque. Le seul moyen de communication est l'utilisation des « ondes radio » qui se propagent entre les différents nœuds mobiles sans l'aide d'une infrastructure préexistante ou administration centralisée. Dans un réseau Ad Hoc, un nœud peut communiquer directement (mode point-à-point) avec n'importe quel nœud s'il est situé dans sa zone de transmission, tandis que la communication avec un nœud situé en dehors de sa zone de transmission s'effectue via plusieurs nœuds intermédiaires (mode multi-sauts).

- Le déploiement dans les MANET est plus facile est plus économique.
- Les nœuds senseurs c'est des petits nœuds plus susceptibles aux pannes, avec moins de capacité de traitement et de stockage que les nœuds dans les réseaux MANET .
- MANET: À partir de l'émetteur, La donnée peut traverser de nombreuses machines pour rejoindre le destinataire.
- Le nombre de nœuds de senseurs dans un réseau de senseurs est beaucoup plus grand que le nombre de nœuds dans un réseau ad hoc.
- Les nœuds de senseurs sont déployés de manière dense et intensive.
- Les nœuds senseurs sont enclins aux défaillances.
- La topologie d'un réseau senseur change très fréquemment.
- Les nœuds senseurs sont principalement utilisés en mode de communication "broadcast" (à la volée), par contre les réseaux ad hoc se basent sur les communications point-à-point.
- Les nœuds senseurs sont limités en énergie, en capacité de calcul et en taille mémoire.

- Les nœuds senseurs n'ont pas un identificateur global (ID) à cause du temps de servitude (très grand) et du très grand nombre de senseurs.
- Nœuds senseurs collaborent pour remplir un objectif Commun par contre dans les MANET Chaque nœud à son propre objectif

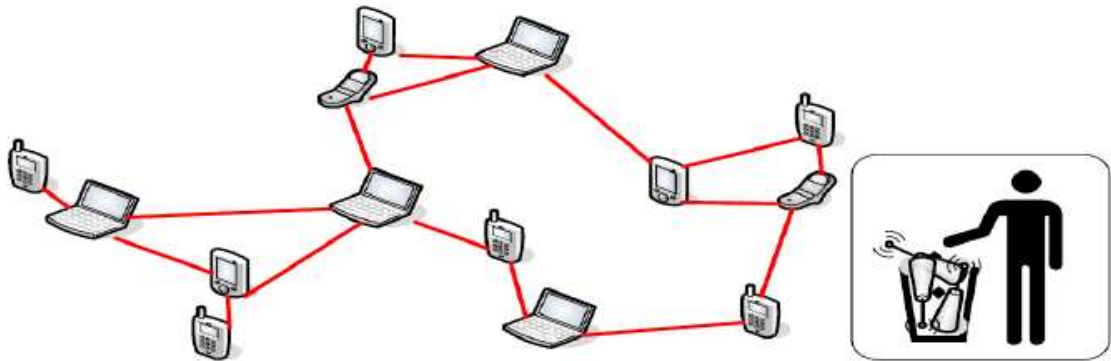


Figure 2.12: Réseau ad hoc

2.6.2 IoT vs WSN

Une approche réaliste définit l'IdO comme l'utilisation d'appareils connectés au réseau et intégrés à l'environnement physique pour améliorer un processus existant ou permettre un nouveau scénario impossible à mettre en place auparavant.

Ces appareils, ou objets, se connectent au réseau pour diffuser les informations qu'ils recueillent sur l'environnement via des capteurs, ou pour permettre à d'autres systèmes de communiquer et d'agir sur le monde physique par le biais d'actionneurs. Il peut s'agir de versions connectées d'objets courants que nous connaissons peut-être déjà ou de nouveaux appareils spécialement conçus pour des fonctions qui ne sont pas encore disponibles. Il peut s'agir d'appareils que nous possédons personnellement et que nous emportons avec nous ou gardons à la maison, ou qui sont intégrés à des équipements en usine ou à une partie du réseau de la ville où nous vivons. Chacun d'eux est capable de convertir des informations précieuses du monde réel en données numériques fournissant une visibilité accrue sur les interactions des utilisateurs avec nos produits, services ou applications.

- Dans l'IdO, le routage n'est pas implémenté. Les capteurs envoient leurs données directement à Internet car ils disposent d'une connexion Internet.
- Dans WSN les données acheminent le trafic pour atteindre le nœud collecteur. Ce nœud est proche des nœuds et nous pouvons y accéder pour lire les données collectées.
- Dans l'Internet des objets, l'objet peut être constitué de capteurs, d'appareils photo, animaux, de PC et de téléphones... ces appareils peuvent (charger) uploader leurs

données (de tout type) sur Internet afin que d'autres utilisateurs puissent les utiliser dans leurs applications.

- WSN est un exemple de réseau ad hoc. ils ont les caractéristiques des réseaux ad hoc. Cependant, dans l'IoT, les données sont envoyées à l'Internet en un seul saut.
- Dans l'IoT, chaque noeud doit avoir une adresse IP afin que l'utilisateur Internet puisse interagir directement avec le capteur de n'importe où dans le monde.

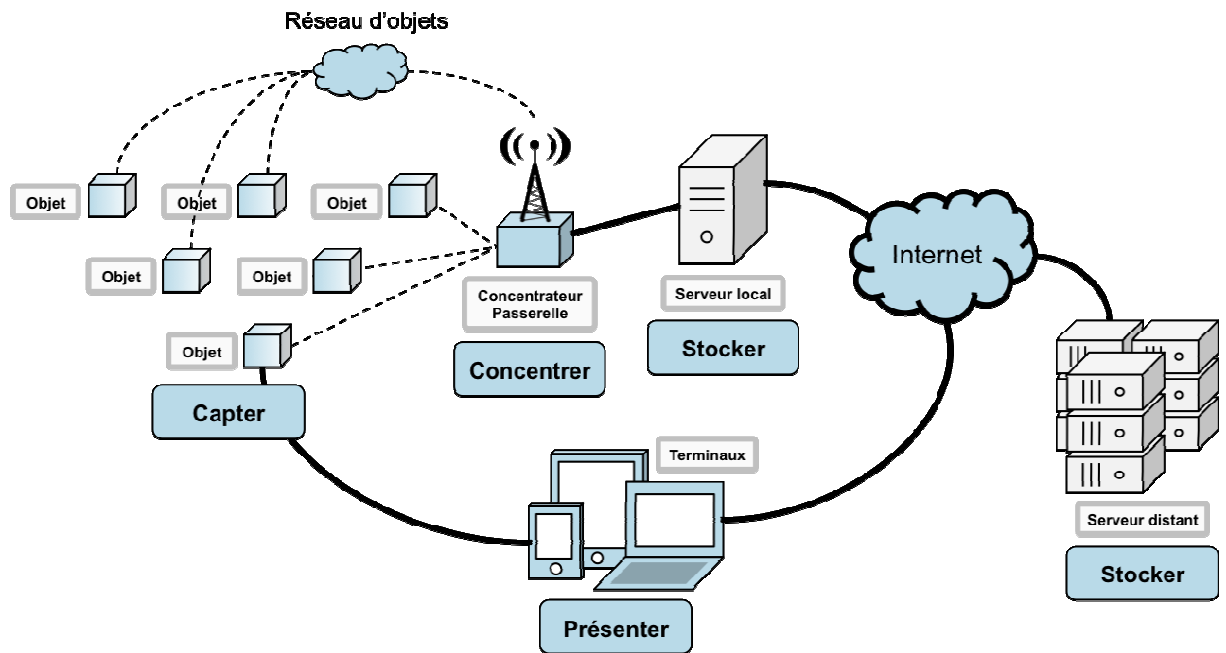


Figure 2.13: Modèle d'architecture de l'internet des objets

2.6.3 RCSF vs GSM

Global System for Mobile Communication ou en français Groupe Spécial Mobile. Les réseaux de téléphonie mobile sont basés sur la notion de cellules, c'est-à-dire des zones circulaires se chevauchant afin de couvrir une zone géographique.

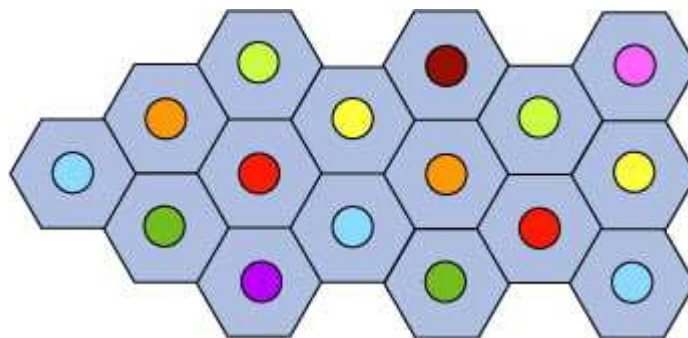


Figure 2.14: Réseau cellulaire

- les RCSFs et les GSM sont tous les deux reliés à une station de base, dans les réseaux cellulaires (GSM) c'est un émetteur-récepteur central au niveau de chaque cellule.
- Dans un réseau GSM, le terminal de l'utilisateur est appelé station mobile. Une station mobile est composée d'une carte SIM (Subscriber Identity Module), permettant d'identifier l'utilisateur de façon unique et d'un terminal mobile, c'est-à-dire l'appareil de l'utilisateur (la plupart du temps un téléphone portable), dans les RCSFs c'est des nœuds (des capteurs).
- Les SB dans les GSM sont fixe alors dans les RCSF peuvent être mobiles.
- La portée de la communication radio est plus grande dans les GSM
- La communication entre une station mobile et la station de base dans les GSM se fait par l'intermédiaire d'un lien radio, généralement appelé interface air (ou plus rarement interface Um).
- L'ensemble des stations de base d'un réseau cellulaire est relié à un contrôleur de stations (en anglais Base Station Controller, noté **BSC**), chargé de gérer la répartition des ressources.

L'ensemble constitué par le contrôleur de station et les stations de base connectées constituent le sous-système radio (en anglais BSS pour Base Station Subsystem). [9]

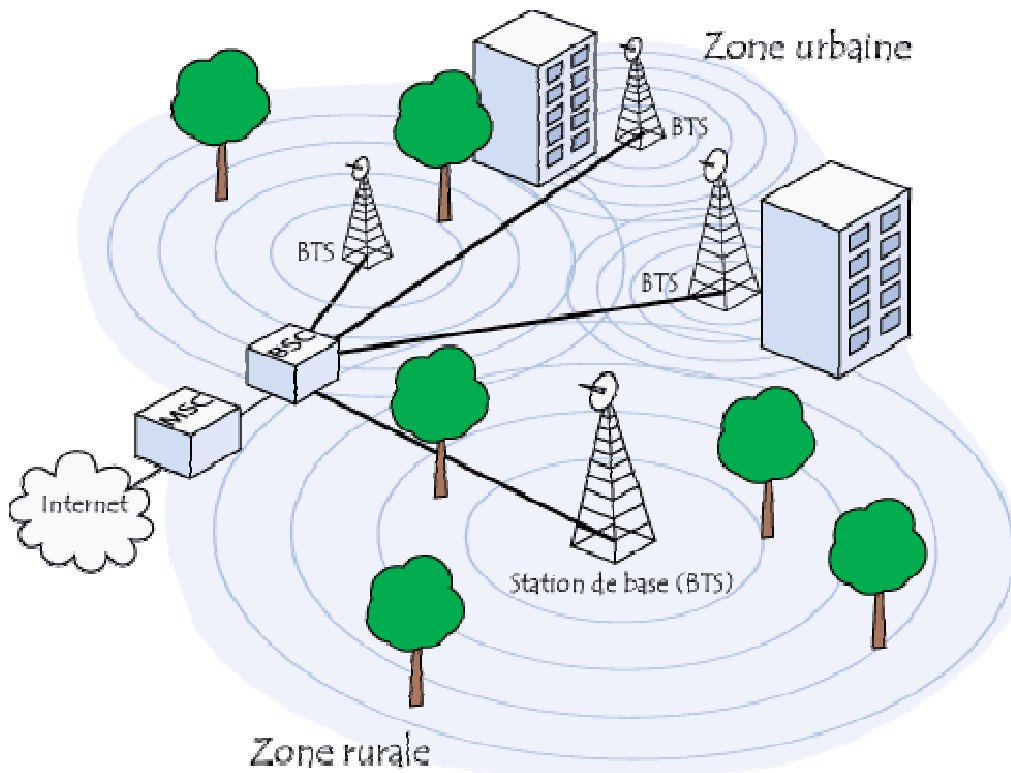


Figure 2.15: Architecture du réseau GSM

2.7 Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons exposé les différents environnements de déploiement, les phases de déploiement qui sont: pré-déploiement, post-déploiement et redéploiement, nous avons vu qu'il y a deux techniques de déploiement: déterministe et aléatoire, ce dernier est utilisé lorsque le nombre de capteurs est très grand, et lorsque l'environnement de déploiement n'est pas complètement accessible.

Nous avons vu aussi les caractéristiques d'un RCSF hétérogène et que ce dernier peut contenir différents types de nœud. Enfin on a comparé les RCSFs avec les autres réseaux sans fils tel que les AD HOC, IOT et GSM.

Dans le chapitre suivant nous allons mettre en place un réseau de capteurs et réaliser des expérimentations afin d'analyser les résultats obtenus.

Chapitre 3

Mise en pratique

3.1 Introduction

Le monde industriel du pétrole et du gaz implique des processus et des machines critiques pour l'exploration, l'extraction, le raffinage, le transport et la commercialisation des produits pétroliers. Les sociétés pétrolières et gazières doivent contrôler, surveiller, entretenir et sécuriser les processus et les actifs industriels de manière efficace. Pour résoudre les problèmes critiques liés à l'état des pipelines, à la surveillance de la corrosion et de l'intégrité, à la détection des fuites de gaz et à d'autres problèmes connexes, les réseaux de capteurs sans fil (WSN) offrent des solutions prometteuses.

Dans ce chapitre nous allons présenter en premier lieu le matériel et les outils software utilisés ainsi que les différentes topologies proposées pour notre RCSF et enfin nous allons exposer et analyser les résultats des expériences que nous avons menées utilisant les différents types de nœud.

3.2 Présentation du matériels

3.2.1 La carte Arduino Uno

La carte Arduino UNO est un microcontrôleur ATmega328 programmable permettant de faire fonctionner des composants (moteur, LED...). Elle possède des «ports» permettant par exemple de se connecter à un ordinateur ou de s'alimenter.

Elle est dotée de :

- 14 entrées/sorties (Dont 6 fournissent la sortie PWM)
- 6 entrées analogiques
- vitesse d'horloge 16 MHz
- une connexion USB
- une prise jack d'alimentation
- un en-tête ICSP
- une fonction reset.



Figure 3.1: La carte arduino UNO

La carte Arduino Uno peut être alimentée via la connexion USB ou avec une alimentation externe. La source d'alimentation est automatiquement sélectionnée.

Une alimentation externe peut provenir soit d'un adaptateur AC-DC ou d'une batterie. L'adaptateur peut être connecté en branchant une prise 2.1mm dans la prise d'alimentation de la carte ou à partir d'une batterie connectée dans le pin (ou broche) GND et V-in (alimentation externe).

Le processeur peut fonctionner sur une alimentation externe de 6 à 20 volts. Cependant, si la tension est inférieure à 7V, le pin 5V peut fournir moins de cinq volts et le processeur peut devenir instable. Si la tension est supérieure à 12V, le régulateur de tension peut surchauffer et endommager la carte. La plage recommandée est de 7 à 12 volts.

Les pins (ou broches) d'alimentation sont les suivantes:

- V-in. Tension d'entrée à la carte Arduino à l'aide d'une source d'alimentation externe (par opposition à 5 volts de la connexion USB ou une autre source d'alimentation régulée). Si l'alimentation en tension est faite par l'intermédiaire de la prise d'alimentation, on pourra y accéder via ce pin.
- 5V. Cette pin délivre un 5V régulé par la carte. Le processeur peut être alimenté soit à partir de la prise d'alimentation DC (7-12V), le connecteur USB (5V), ou le pin V-in de la carte (7-12). La fourniture d'une tension via les 5V ou 3,3V contourne le régulateur, et peut endommager votre processeur. A déconseiller !
- 3V 3. Une alimentation de 3,3 volts générée par le régulateur. La consommation de courant maximale est de 50 mA.

- GND. masse
- IOREF. Ce pin sur la carte Arduino fournit la référence de tension avec laquelle le microcontrôleur fonctionne.

Mémoire

L'ATmega328 a 32 Ko (avec 0,5 KB occupées par le bootloader**). Il a également 2 Ko de SRAM et 1 Ko de mémoire EEPROM*** (qui peut être lu et écrit avec la bibliothèque de l'EEPROM).

Entrées et sorties

Chacune des 14 broches numériques sur la carte Uno peut être utilisée comme une entrée ou une sortie, en utilisant les fonctions `pinMode ()`, `digitalWrite ()`, et `digitalRead ()`. Ils fonctionnent à 5 volts. Chaque broche peut fournir ou recevoir 20 mA en état de fonctionnement recommandée et a une résistance de pull-up interne (déconnecté par défaut) de 20-50k ohm. Un maximum de 40mA est la valeur qui ne doit pas être dépassée sur toutes les broches d'Entrée/Sorties pour éviter des dommages permanents au microcontrôleur.

Certaines broches ont des fonctions spécialisées:

- Série: 0 (RX) et 1 (TX). Permet de recevoir (RX) et transmettre (TX) TTL données série. Ces pins sont connectés aux pins correspondants de l'USB-TTL puce Serial ATmega8U2.
- LED: 13. Il est équipé d'un conduit par la broche numérique 13. LED Lorsque la broche est à la valeur HIGH, la LED est allumée, lorsque la broche est faible, il est hors tension.

La carte Uno dispose de 6 entrées analogiques, A0 à A5, dont chacune fournit 10 bits de résolution (ou 1024 valeurs différentes). Par défaut, la tension est de 5 volts. Il est cependant possible de changer la limite supérieure de la gamme en utilisant la broche AREF et la fonction `analogReference ()`.

Autres broches de la carte:

- AREF. Tension de référence pour les entrées analogiques. Pin utilisé avec `analogReference ()`.
- Réinitialiser.

Communication

Arduino a un certain nombre de moyens pour communiquer avec un ordinateur, une autre carte Arduino, ou autres microcontrôleurs. L'ATmega328 fournit UART TTL (5V) en communication série, disponible sur les broches numériques 0 (RX) et 1 (TX).

* PWM

En numérique, les signaux ont toujours une valeur LOW ou HIGH (0 ou 1). Le principe est de construire un signal alternativement LOW ou HIGH et de répéter cette alternance. La LED est donc alternativement allumée et éteinte mais le cycle est tellement rapide que la persistance rétinienne nous donne l'illusion d'une LED allumée en permanence.

** Bootloader : il s'agit de la racine du système, à la manière du bios sous Windows, où l'on peut installer un recovery alternatif, un kernel, une image d'Android, parmi d'autres choses...après l'avoir ouvert.

*** EEPROM : mémoire dont les valeurs sont conservées lorsque la carte est éteinte (comme un petit disque dur).

3.2.2 Modules XBee

Les produits XBee sont des modules de communication sans fil certifiés par la communauté industrielle ZigBee Alliance. La certification Zigbee se base sur le standard IEEE 802.15.4 qui définit les fonctionnalités et spécifications des réseaux sans fil à dimension personnelle (Wireless Personal Area Networks : WPANs).

Les principales caractéristiques du XBee :

- fréquence porteuse : 2.4Ghz
- portées variées : assez faible pour les XBee 1 et 2 (10 - 100m), grande pour le XBee Pro (1000m)
- faible débit : 250kbps
- faible consommation : 3.3V @ 50mA (inférieure à 10 μ A en mode "sleep").
- entrées/sorties : 6 10-bit ADC input pins, 8 digital IO pins
- sécurité : communication fiable avec une clé de chiffrement de 128-bits
- simplicité d'utilisation : communication via le port série
- ensemble de commandes AT et API.
- flexibilité du réseau : sa capacité à faire face à un nœud hors service ou à intégrer de nouveaux nœuds rapidement
- grand nombre de nœuds dans le réseau : 65000

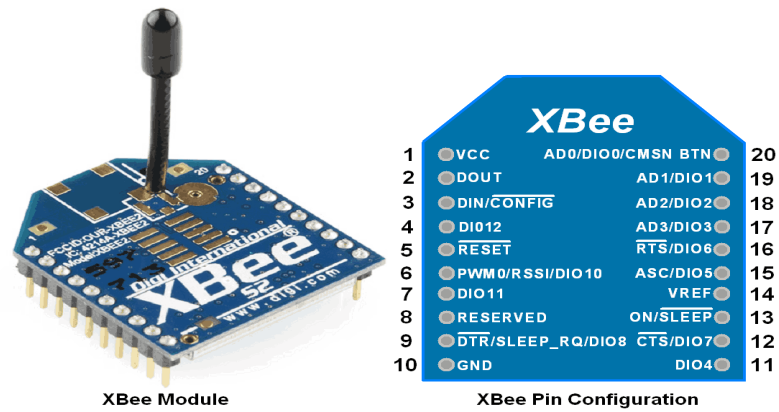


Figure 3.2 : Module Xbee



Figure 3.3: Adaptateur USB xbee

3.2.2.1 La différence entre Xbee S1 et S2

Il y a deux catégories de XBee : la série 1 et la série 2. Les modules de la série 1 ont souvent un "802.15.4" qui s'ajoutent à leurs noms. Les modules de la série 2 sont disponibles en plusieurs versions : XBee ZNet 2.5 (obsolète), le ZB ,2C, (l'actuel) et le 2B (le plus récent). Des XBee Pro font la même chose, mais avec de plus grandes capacités, notamment la portée qui peut aller jusqu'à 1000.

- les modules des séries 1 et 2 ne sont pas compatibles entre eux ;
- la portée et la consommation sont sensiblement les mêmes ;
- le nombre d'entrées et sorties est différent et surtout la série 2 ne possède pas de sorties analogiques PWM ;
- les topologies de réseaux possibles ne sont pas les mêmes. Avec la série 1, l'architecture est simple : point à point (pair) ou multipoint (star). La série 2 permet en plus de créer des réseaux plus complexes : mailles (mesh) ou en "arbre" (cluster tree). Ce tableau résume la différence entre les types de modules xbee :

	XBee 802.15.4 (s1)	XBee ZB S2	XBee ZB S2C
Indoor/Urban range	up to 100 ft. (30m)	up to 133 ft. (40m)	up to 200 ft (60 m)
Outdoor RF line-of-sight range	up to 300 ft. (100m)	up to 400 ft. (120m)	up to 4000 ft (1200m)
Transmit Power Output	1 mW (0dbm)	2 mW (+3dbm)	6.3mW (+8dBm) Boost mode 3.1mW (+5dBm) Normal mode
RF Data Rate	250 Kbps	250 Kbps	250 Kbps
Receiver Sensitivity	-92dBm (1% PER)	-98dBm (1% PER)	-102dBm (1% PER) Boost mode -100dBm (1% PER) Normal Mode
Supply Voltage	2.8 - 3.4 V	2.8 - 3.6 V	2.1 - 3.6V
Transmit Current (typical)	45 mA (@ 3.3 V)	40 mA (@ 3.3 V)	45 mA (+8dBm) Boost Mode 33 mA (+5dBm) Normal Mode
Idle/Receive Current (typical)	50 mA (@ 3.3 V)	40 mA (@ 3.3 V)	31 mA (+8dBm) Boost Mode 28 mA (+5dBm) Normal Mode
Power-down Current	10 uA	1 uA	<1uA
Frequency	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Operating Temperature	-40 to 85 C	-40 to 85 C	-40 to 85 C
Network Topologies	Point to point, Star, Mesh (with DigiMesh firmware)	Point to point, Star, Mesh	Point to point, Star, Mesh
Number of Channels	16 Direct Sequence Channels	16 Direct Sequence Channels	16 Direct Sequence Channels
Filtration Options	PAN ID, Channel & Source/Destination	PAN ID, Channel & Source/Destination	PAN ID, Channel & Source/Destination

Tableau 1: Différence entre les trois types de module xbee

3.2.2.2 Réseaux Zigbee

Un réseau Zigbee est composé de trois types de nœuds :

- **Nœud de type end-device** : (équipement RFD : Reduced Function Device). Il s'agit de nœuds simples réalisant une seule fonction : collecter une donnée.
- **Nœud de type routeur** : (équipement FFD : Full Function Device). Ces nœuds permettent la transmission de messages. Ils sont indispensables pour étendre le réseau par acheminements des trames d'un nœud à un autre. Ils permettent aussi aux autres modules de s'enregistrer sur le même réseau, et non exclusivement chez le coordinateur.
- **Nœud de type coordinateur**. Ce type nœud unique dans un réseau assure les fonctions telles que l'authentification, l'initiation de la communication, la sécurité et l'ajout des nœuds au réseau ... Il doit être actif en permanence pour répondre à tout moment aux requêtes des autres éléments du réseau. Il est donc alimenté à plein temps.

Les réseaux Zigbee peuvent présenter plusieurs types de topologie :

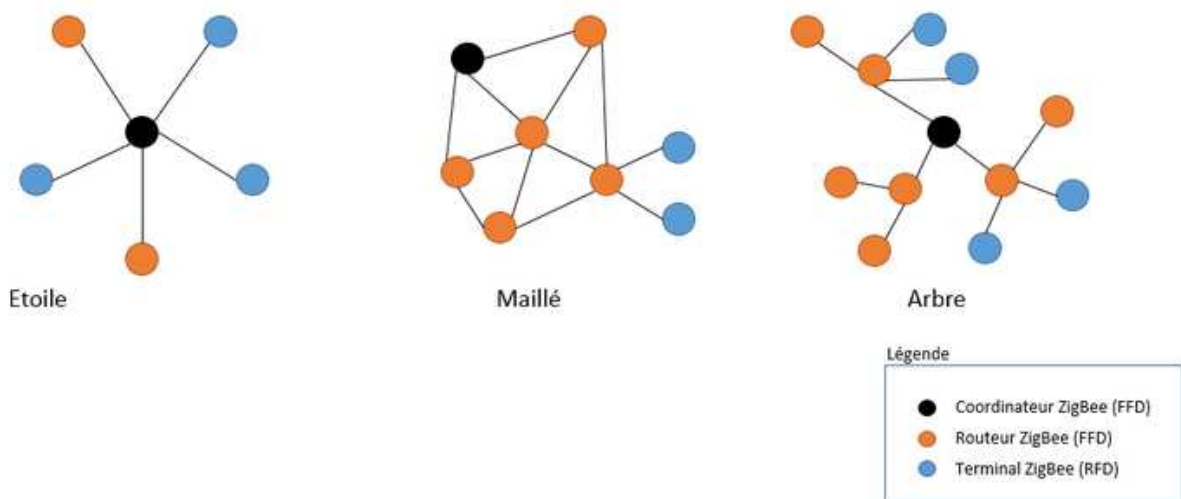


Figure 3.4: Les topologies zigbee possible

3.2.3 DHT11

Le capteur DHT11 est capable de mesurer des températures de 0 à +50°C avec une précision de +/- 2°C et des taux d'humidité relative de 20 à 80% avec une précision de +/- 5%. Une mesure peut être réalisée toutes les secondes.

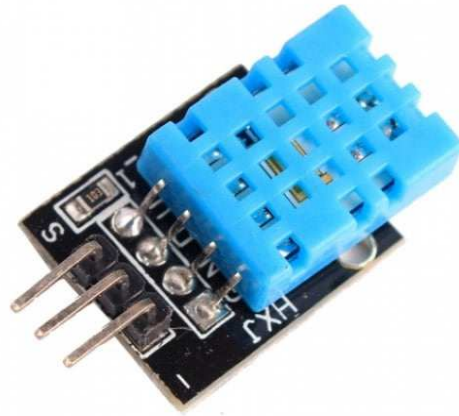


Figure 3.5: Capteur DHT11

Branchement:

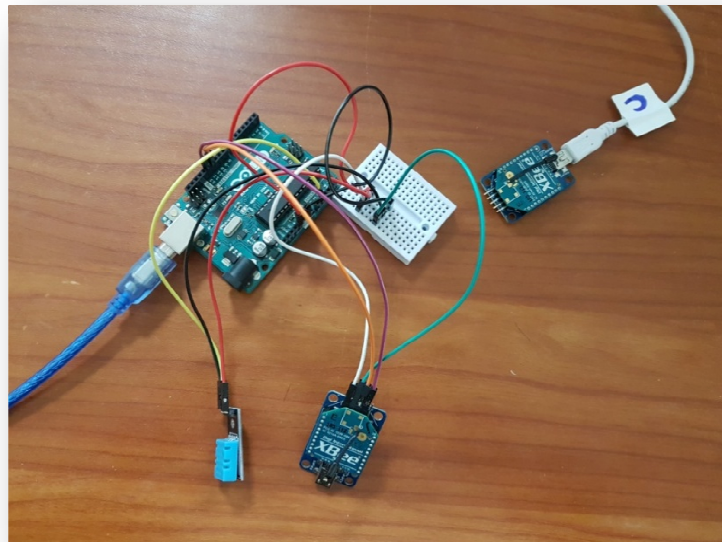


Figure 3.6: Branchement de capteur dht11 à la carte arduino

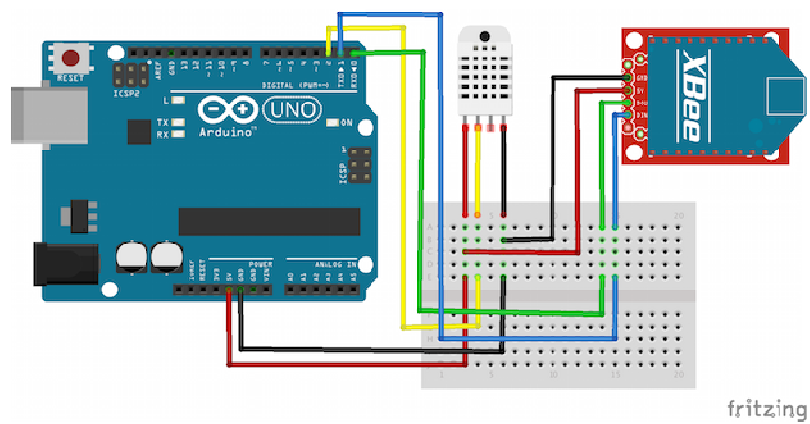


Figure 3.7: Schéma de branchement dht11-Arduino-Xbee

3.2.4 Capteur UltraSons



Figure 3.8: Capteur ultrasons SR04

Un Capteur a ultrasons : est un dispositif électronique capable d'émettre et de recevoir des ondes a Ultrason, fréquemment utilisé pour déterminer la distance d'un objet B a partir d'un point A.

Ci-après une liste de certaines caractéristiques et spécifications du capteur à ultrasons HC-SR04:

- Alimentation: + 5V DC
- Courant de repos: <2mA
- Courant de travail: 15mA
- Angle effectif: <15 °
- Plage de distance: 2cm - 400 cm / 1 " - 13ft
- Résolution: 0.3 cm
- Angle de mesure: 30 degrés
- Largeur d'impulsion d'entrée de déclenchement: 10uS
- Dimension: 45mm x 20mm x 15mm

Le capteur à Ultrason émet des ondes dit ultrason qui est une onde mécanique et élastique, qui se propage au travers de supports fluides, solides, gazeux ou liquides. La gamme de fréquences des ultrasons se situe entre 16 000 et 10 000 000 HERTZ, trop élevées pour être perçues par l'oreille humaine.

Comment mesure t-on la distance?

On a :

$$t = \frac{2*d}{V} \quad \dots (1)$$

t : temps entre émission et réception.

d : distance entre la source et l'obstacle.

V : vitesse de déplacement de l'ultrason dans l'air.

En se basant sur la formule 1 cette formule montre comment on calcul le temps (t) entre l'émission et la réception de l'onde ultrason on peut tirer la relation de la distance (d).

Voici ce que nous obtenons pour la distance

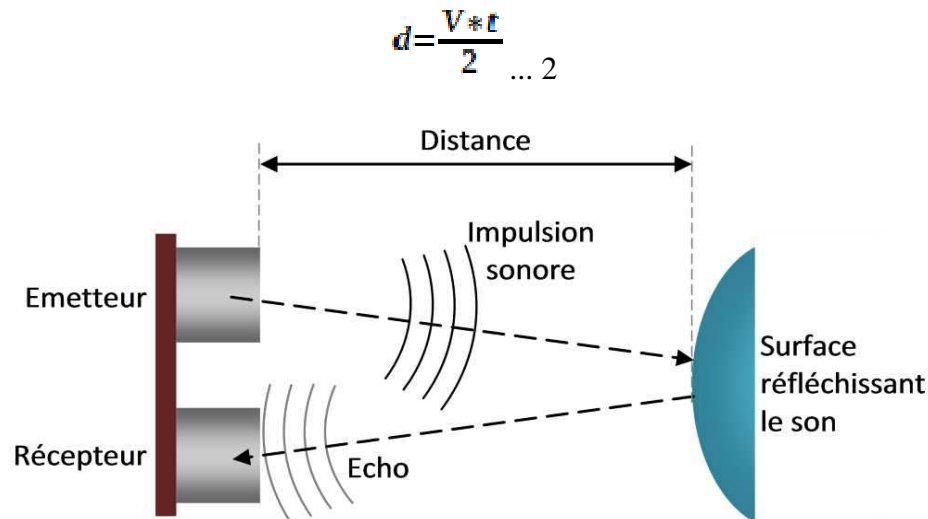


Figure 3.9: Fonctionnement d'un capteur ultrason

Le capteur HC-SR04 utilise les ultrasons pour déterminer la distance d'un objet. Il offre une excellente plage de détection sans contact, avec des mesures de haute précision et stables. Son fonctionnement n'est pas influencé par la lumière du soleil ou des matériaux sombres, bien que des matériaux comme les vêtements puissent être difficiles à détecter.

Donc ce capteur peut être utilisé pour beaucoup de projets Robot mobile, ouverture automatique lors de la détection, dans notre cas, mesure du niveau du pétrole dans les bacs de stockage...

Branchement:

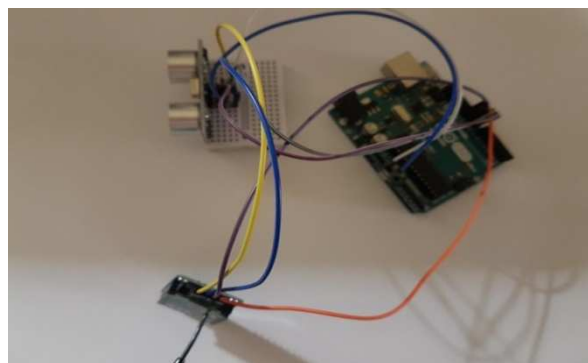


Figure 3.10: Branchement d'un capteur ultrasons-Arduino--Xbee

3.3 Software

Arduino ide

L'IDE (Integrated Development Environment ou en français, environnement de développement intégré). L'IDE Arduino est une interface graphique simple d'utilisation qui regroupe tous les outils qui permettent de programmer pour l'Arduino. Les langages de programmation pour l'Arduino sont le C et le C++.

Xctu :

XCTU est une application multiplate-forme gratuite qui permet aux développeurs de gérer les modules Digi radiofréquence (RF) via une interface graphique simple à utiliser. L'application comprend des outils intégrés qui facilitent la configuration, l'installation et le test des modules Digi RF.

Utilisez XCTU pour:

- Déploiement sur plusieurs plates-formes: XCTU est compatible avec les systèmes d'exploitation les plus utilisés, notamment Microsoft Windows, Linux et Mac OS.
- Découvrez vos modules: Découvrez automatiquement les modules radio locaux et distants connectés à votre PC, quels que soient leurs connexions de port ou leurs paramètres configurés.
- Configurez n'importe quel module: gérez et configurez plusieurs périphériques RF, y compris des périphériques distants communiquant avec XCTU par liaison radio.
- Communiquez avec vos modules: Utilisez les consoles de commande API et AT pour communiquer avec vos modules radio. Enregistrez vos sessions de console et chargez-les à tout moment.
- Explorez votre réseau: visualisez la topologie de vos réseaux RF en affichant tous les nœuds et toutes les connexions du réseau sous forme graphique ou sous forme de tableau.
- Accédez à une gamme d'outils: Utilisez des outils intégrés pour effectuer des opérations, de la récupération de modules à la réalisation de tests de portée.
- Obtenir des mises à jour automatiques: mettez à jour automatiquement l'application elle-même, ainsi que la bibliothèque de micrologiciels de radio, sans télécharger de fichiers supplémentaires.
- Quelle que soit la taille de votre réseau de périphériques, de quelques nœuds à plusieurs, XCTU peut simplifier les tâches de gestion de vos périphériques.

3.4 Les types de capteurs utilisés dans une installation pétrolière

L'industrie pétrolière et gazière est fortement tributaire du fonctionnement cohérent et efficace de ses équipements et de ses pipelines. Les variations de pression et de vibrations non surveillées endommagent les pipelines, les puits et les machines alternatives, entraînant des temps d'arrêt imprévus et des pertes catastrophiques, pour surveiller ces différents facteurs on utilise différents capteurs parmi : capteurs de distance pour surveiller le niveau du liquide dans les bacs de stockage pour éviter son inondation, du gaz pour détecter des fuites, détecteurs de flamme et de vibration, capteurs de température et l'humidité, capteurs de pression (surveiller la pression tubing, pression casing...) tout au long du processus, les capteurs ON/OFF pour le contrôle de puits à distance, ouvrir/fermer la vanne ...etc

Pour la réalisation des tests on va utiliser deux capteurs : DHT11 et l'ultrason HC-SR04 .

3.5 Description du projet

Description du schéma

La figure 3.11 présente un schéma d'un RCSF proposé pour une installation pétrolière, afin de surveiller chaque étape d'exploration du pétrole.

Le processus d'exploration commence par la production (l'amont): l'extraction, raffinage...etc dans une zone que nous avons nommée " zone puits " et où le nombre de nœuds est N1.

Les zones de production sont le plus souvent éloignées des zones de stockage (les BACs) donc pour transporter le brut d'une zone à l'autre, la méthode de l'oléoduc (ou pipeline) est utilisée. Nous avons nommé la zone où se trouvent les réservoirs (BACs) "zone de stockage" et où le nombre de nœuds est N3 et le moyen de transport du brut "Zone pipeline " où le nombre de nœuds est N2.

Tout au long de ce processus, plusieurs paramètres sont à surveiller tel que la pression, la température, les vibrations, le débit, gaz...etc., et cela grâce aux différents capteurs qui sont déployés au niveau de ces trois zones.

Toutes les données captées par les nœuds qui se trouvent dans la zone puits sont transférées vers une station de base qui est placée sur la même zone.

Ensuite ces données seront acheminées tout au long des pipelines qui sont surveillées aussi par des nœuds de type collecteur-relayeur (surveillent le processus de transportation du brut et acheminent les données reçues).

Ces données seront ensuite reçues par une station de base (SB) qui se trouve au niveau de la zone de stockage ou envoyées directement à la station de base principale. La SB de la zone stockage collecte aussi les données reçues par les nœuds déployés pour la surveillance des BACs. Les nœuds utilisés dans la zone puits est de type collecteur et collecteur-relayeur, dans la zone stockage sont plutôt de type collecteur et dans la zone pipelines, ils sont de type collecteur relayeur.

Enfin les données seront transférées à la salle de contrôle qui se trouve généralement sur le champ d'exploitation, grâce aux nœuds relayeurs.

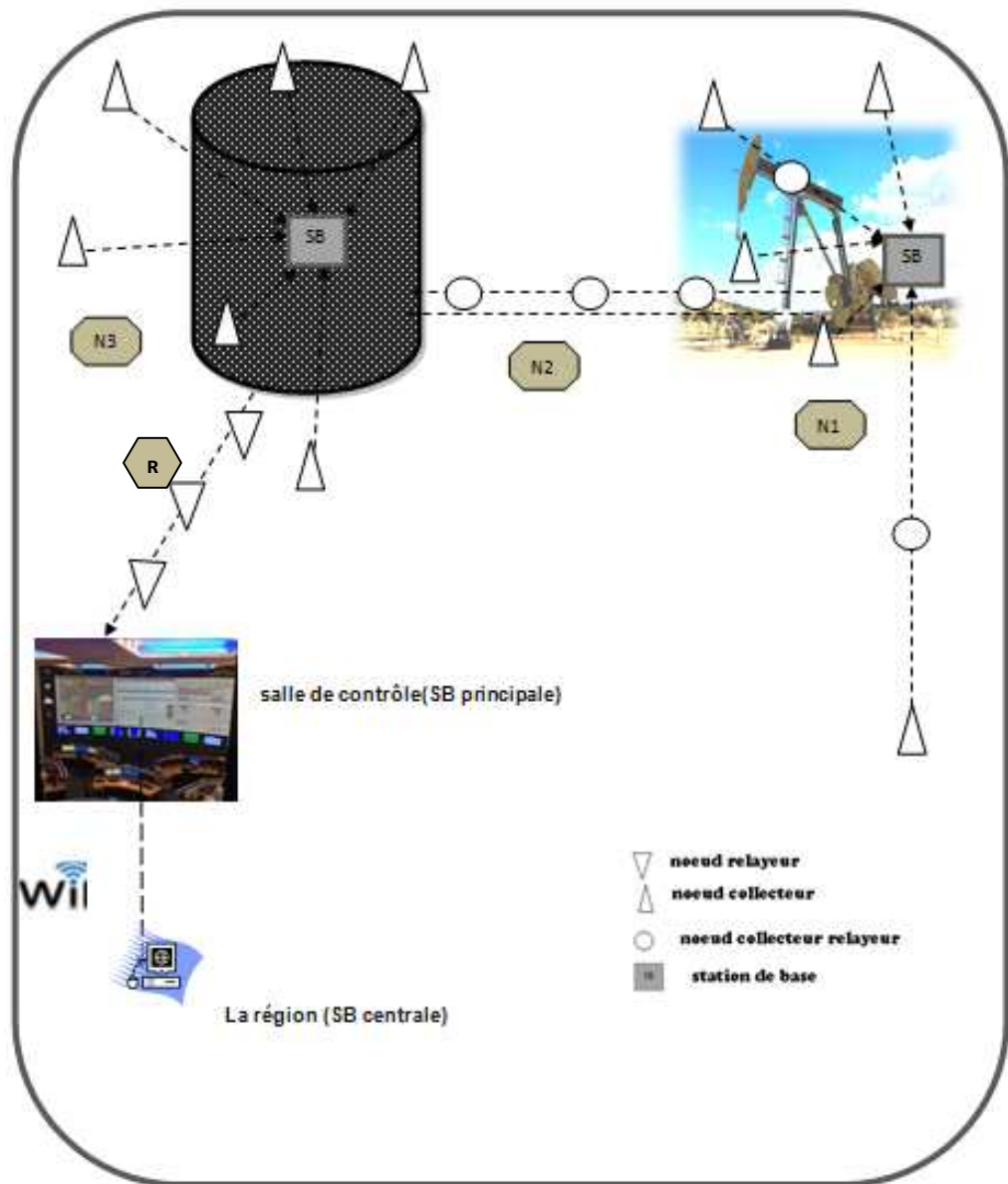


Figure 3.11: Schéma proposé pour une installation pétrolière

Légende :

- **le nœud collecteur :** c'est le nœud qui collecte la valeur à surveiller (end_device).

- **le nœud relayeur (relais) :** le nœud qui transfère les paquets reçus vers un autre nœud.
- **le nœud collecteur-relayeur:** effectue la capture et transfère les paquets vers un autre nœud.
- **N1:** le nombre de nœuds dans la zone puits.
- **N2:** le nombre de nœuds dans la zone pipelines.
- **N3:** le nombre de nœud dans la zone stockage.
- **R :** Acheminement des données vers la station de base.

Une installation pétrolière est constituée principalement de trois 03 zones :

La zone puits

Elle est constituée de puits lui-même qui est un équipement chargé d'extraire le pétrole brut du sous-sol, comprenant un puits d'exploitation et du matériel de pompage ainsi que des systèmes de contrôle et/ou sécurité ainsi qu'un séparateur et un MFD dans la même zone.

Pour cette zone nous proposons le schéma suivant : déploiement des nœuds capteurs pour surveillance de points proche inférieur à 50 km de la SB et pour des points qui ont largement dépasser les 50 km on déploie des intermédiaires soit des nœuds relayeurs ou des nœuds relayeurs-collecteurs.

Zone puits :

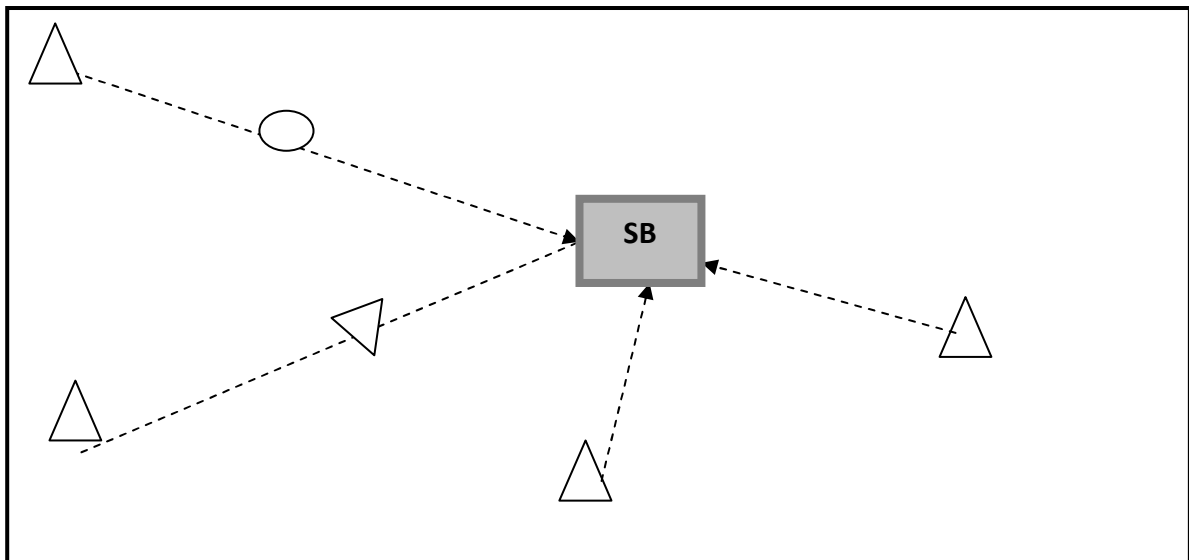


Figure 3.12: Schéma proposé pour la zone puits

Zone pipelines

Le pipeline est un mode de transport, sur de grandes distances de matières fluides, réalisé au moyen de tubes et accessoires sous pression, constituant un système souvent en réseau. Les produits visés par ce terme sont généralement : le pétrole et autres hydrocarbures liquides, le gaz naturel et autres gaz combustibles

Nous proposons de mettre à chaque 50 m un nœud capteur-relais parce qu'on surveille le processus de la canalisation tout au long des pipelines, au même temps ces capteurs transfèrent les données envoyées par un autre nœud.



Figure 3.13: Pipelines pétroliers

Type de données : température + pression

Type de nœud utilisé: collecteur + relayeur

Distance: 50 m

Taille du paquet = taille de la collecte + taille des données routé

Énergie = Energie (collet) + E(Rx) +E(Tx)

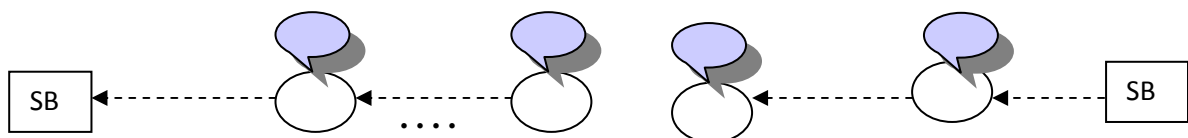


Figure 3.14: Schéma proposé pour la zone pipelines

Zone réservoirs :

L'industrie pétrolière a pour principale caractéristique la mise en œuvre de tonnage important d'hydrocarbure. Sous forme liquide ou gazeuse, elle se trouve dans l'obligation de prévoir d'énormes capacités de stockage, on utilise des réservoirs de stockage de 30000 à 50000m³ (10 m de longueur).

Pour la zone de stockage nous proposons des nœuds capteurs liés directement à la SB de distance inférieure ou égale à 50 m.

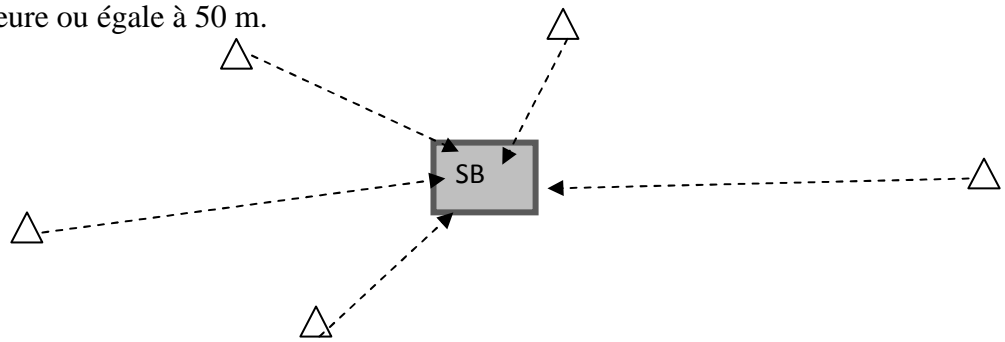


Figure 3.15: Schéma proposé pour la zone stockage

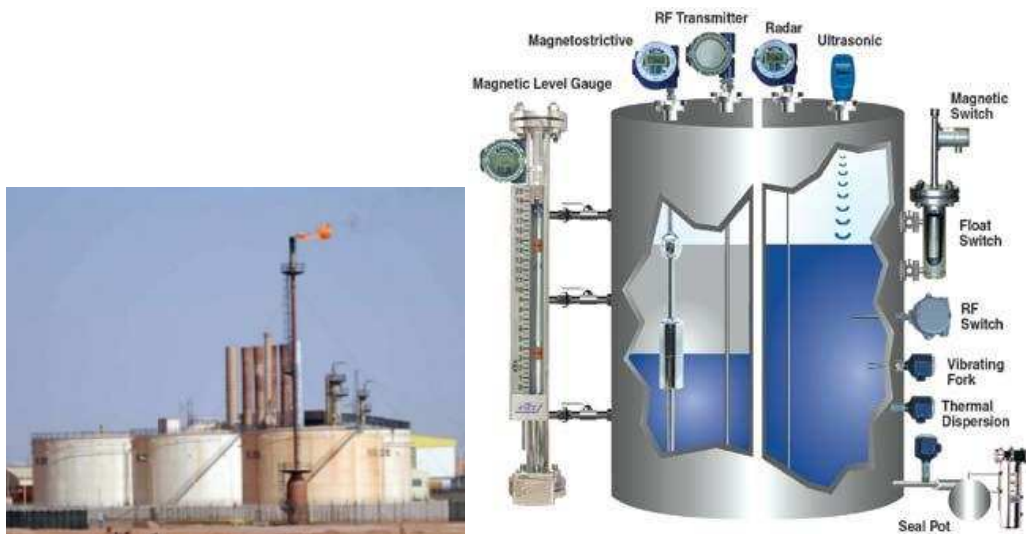


Figure 3.16: BAC de stockage (réservoirs)

Configuration 3(RCSF):

SB → relayeur → ... → centrale

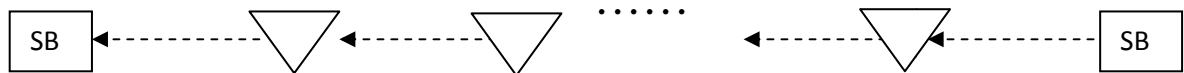


Figure 3.17: Schéma proposé pour R

Type de données : tous types

Taches : Relais

Distance entre chaque nœud : 50 m

Energie Globale = E(Rx) +E(Tx)

Les stations de base

Le tableau 2 présente les résultats concernant les stations de base de chaque zone (zone puits, zone stockage, zone pipelines) tel que le nombre de paquets (taille de la donnée) reçus et envoyés par ces SB ainsi qu'une estimation de l'énergie consommée en fonction de (N1,N2,N3).

Type	Nombre de paquets reçus	Nombre paquets envoyés	E_Rx (micro joule)	E_Tx (micro joule)	E_globale (micro joule)	taille de la donnée
Zone puits	N1	1	$2,304 * \text{taille_paquet}(\text{byte}) * N1$	$2,88 * \text{taille_paquet}$	$N1 (E_Rx + E_Tx)$	500 bytes
Zone stockage	$N3 + 1$	1	$2,304 * N3 * \text{taille_paquet} + 1$	$2,88 * \text{taille_paquet}$	$N2 (E_Rx + E_Tx)$	300 bytes
Principale	$N2 + N3$	1	$2,304 * \text{taille_paquet} (N1 + N2)$	$2,88 * \text{taille_paquet}$	$(N1 + N2) (E_Rx + E_Tx)$	550 bytes
Centrale	1	1	$2,304 * \text{taille_paquet}$	$2,88 * \text{taille_paquet}$	$E_Rx + E_Tx$	750 bytes

Tableau 2: stations de base

— N1=100 nœuds

Environ 100 nœuds au niveau de la zone puits (en Algérie, longueur d'un puits en profondeur est de 500 à 4000m).

— N2=40 nœuds

Environ 40 nœuds au niveau de la zone pipelines (cas un pipeline de 2 km).

En générale la longueur d'un pipeline varie de 2 à 7 km

— N3=60 nœuds

Environ de 60 nœuds au niveau de la zone stockage (hauteur d'un BAC de stockage 10m).

3.6 Expérimentations et résultats

3.6.1 Expérimentations :

Configurations xctu :

1/ collecteurs-coordonateur

Le tableau 3 présente les configurations réalisées sur les trois modules xbee (deux capteurs et un coordonateur) utilisant xctu pour réaliser une topologie en étoile où le coordonateur reçoit

les valeurs captées par les deux capteurs (End device1 et End Device2).

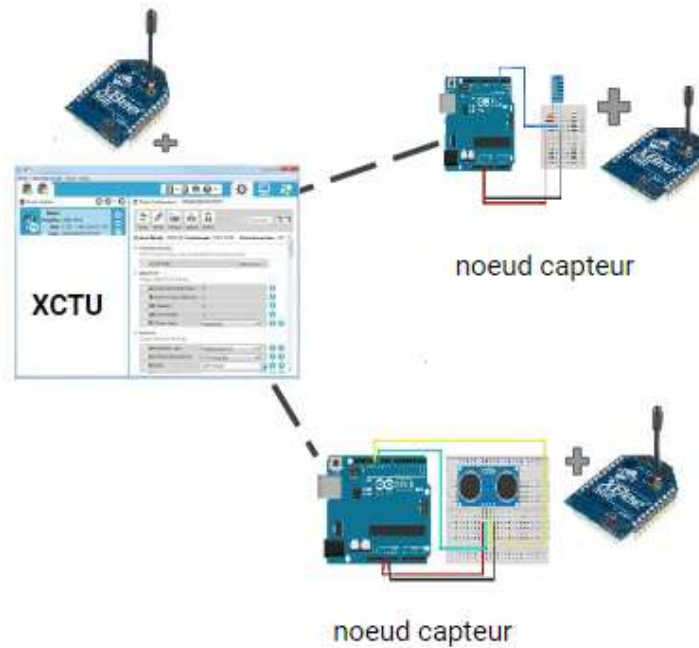


Figure 3.18 : application 1

	End Device 1	Coordinateur	End Device 2
PAN ID	1001	1001	1001
SH	0013A200 408C437C	0013A200 4106ff82	0013A200 40818634
DL	4106ff82	FFFF	4106ff82
NI	E1	coordonateur	E2
CO	disable[0]	enable[1]	disable[0]

Tableau 3: Configuration collecteur-coordonateur

PAN ID: identifiant réseau personnel DL : adresse destination

SH: adresse source NI: identifiant de noeud

CO: activer le mode coordonateur

- Pour connecter les 03 trois noeuds au même réseau, nous leurs avons attribués le même PAN id.

- Pour le end-device1 et end-device2, nous avons mis adresse destination = adresse MAC de coordonateur (les valeurs captées par ces deux capteurs seront directement transmises au coordonateur).

- Adresse destination de coordonateur = adresse diffusion.
- Afin qu'un end-device se comporte en tant que coordonateur on change enable [0] à enable [1].

La figure 3.19 représente l'interface XCTU où les données récupérées à partir des deux nœuds (device1 et device2) sont affichées.

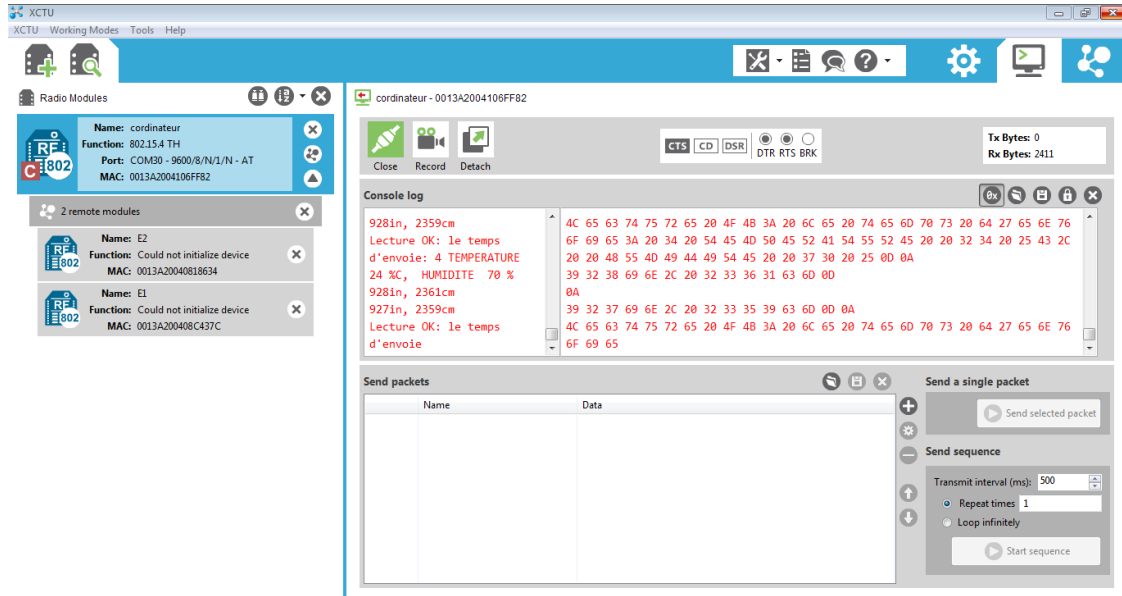


Figure 3.19: interface XCTU (le coordonateur)

2/ end-device -> routeur -> coordonateur

Configurations

Le tableau 4 présente les configurations réalisées sur les trois modules xbee (nœud capteur, routeur, coordonateur) utilisant xctu pour réaliser une connexion en mesh où dans un 1 er cas :

Nœud capteur (collecteur) envoie la valeur captée au routeur (nœud relayeur) qui la transmet à son tour au coordonateur.

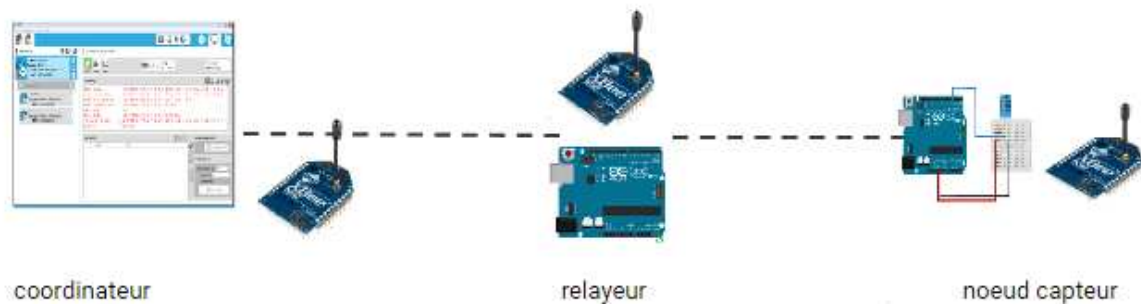


Figure 3.20: Application2

2eme cas : nœud capteur (collecteur) envoie la valeur captée au nœud collecteur-relayeur qui à son tour, la transmet au coordinateur et effectue une capture.

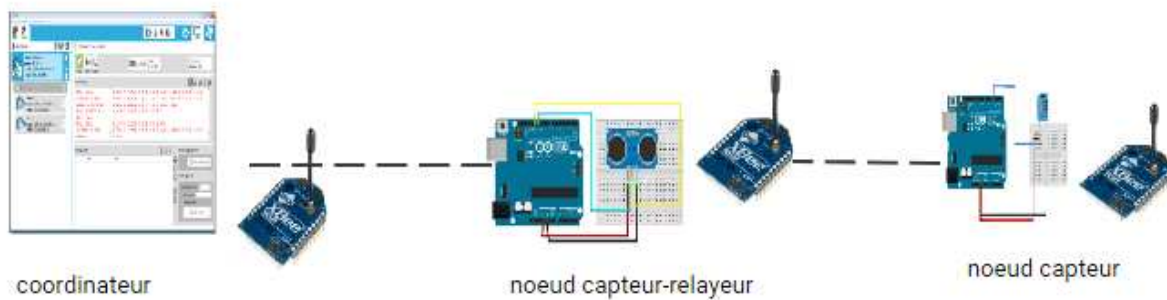


Figure 3.21: Application3

	End device 1	Coordinateur	Routeur
PAN ID	1001	1001	1001
SH	0013A200	0013A200	0013A200
SL	408C437C	4106ff82	40818634
DL	40818634	FFFF	4106ff82
NI	E1	coordonateur	Routeur
CO	disable[0]	enable[1]	disable[0]
SM	---	---	0
JV	----	---	enabled[1]
NJ	---	---	0

Tableau 4: configuration collecteur-routeur-coordonateur

JV: channel verification (Vérifie si le coordinateur existe sur le meme canal pour le joindre au réseau ou le supprimer s'il ne le trouve pas).

NJ: node join time si = 0 le nœud va toujours permettre de le joindre.

Nous avons attribué comme adresse de destination pour le end-device celle de router et pour ce dernier une adresse de destination =adresse coordinateur, afin de réaliser la liaison (end device -> routeur -> coordinateur).

Pour qu'un nœud se comporte en tant qu'un routeur on attribue au paramètre SM la valeur 0 : no sleep (router) [0].

3.6.2 Résultats

Résultats des expérimentations zone puits

Le tableau 5 représente les résultats des expérimentations réalisées avec trois 03 types de nœuds: collecteur, collecteur-relayeur, relayeur et selon différentes distances : 20m à 50 m de nœud coordinateur.

Distance(m)	Types	Nombre de paquets envoyés	Nombre de paquets reçus	Taille de paquet	Energie perdue	Energie de capture	Energie globale
20	Collecteur	100	98	5byte	28,8	18,2μJoule	1458,2
50	Collecteur	100	68	5byte	737,28	18,2μJoule	1458,2
20	Collecteur-relayeur	100	reçu 98 envoyé 198	5byte	30,06	18,2μJoule	4220,76
50	Collecteur-relayeur	100	reçu 68 envoyé 168	5byte	739,1	18,2μJoule	3202,56
20	Relayeur	100	reçu 98 envoyé 98	5byte	29,88	0	2365,92
50	Relayeur	100	reçu 68 envoyé 68	5byte	740,22	0	1566,32

Tableau 5: Résultats des expérimentations zone puits

- L'énergie consommée par un nœud est celle de communication, capture et du traitement dans notre cas nous supposons que l'énergie du traitement est négligeable.
- L'énergie de transmission=énergie nécessaire pour transmettre un byte* la taille de paquet
- Energie d'envoi > énergie de réception.

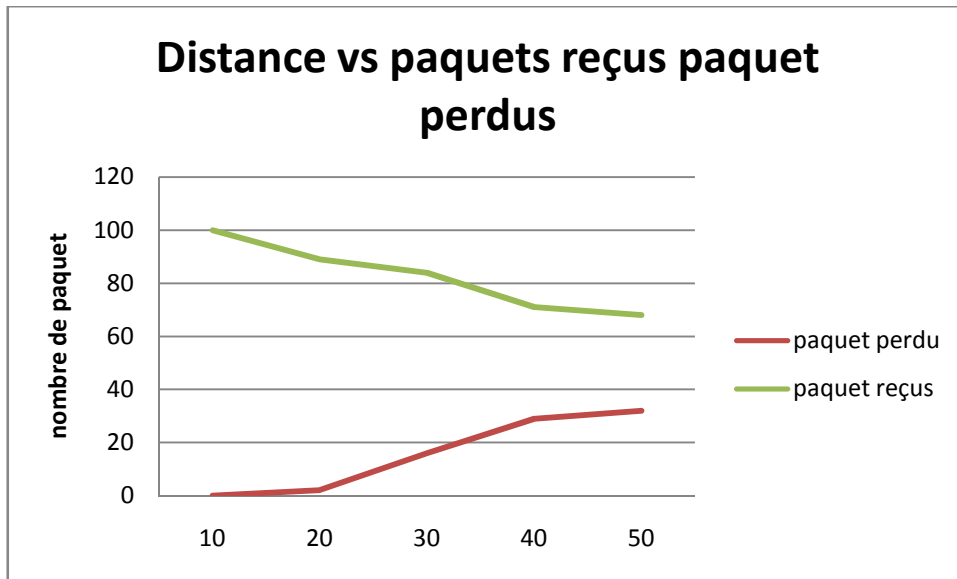


Figure 3.22: La perte de paquets en fonction de la distance

Analyse et interprétation:

Le graphe représente la variation de nombre de paquets reçus et perdus en fonction de la distance. On constate que plus la distance augmente plus on perd de paquets. Lors de leur transmission, les données sont à tout moment sujettes aux perturbations affectant le réseau et la densité de la couverture diminue en s'éloignant du module radio, ce qui implique des pertes de paquets.

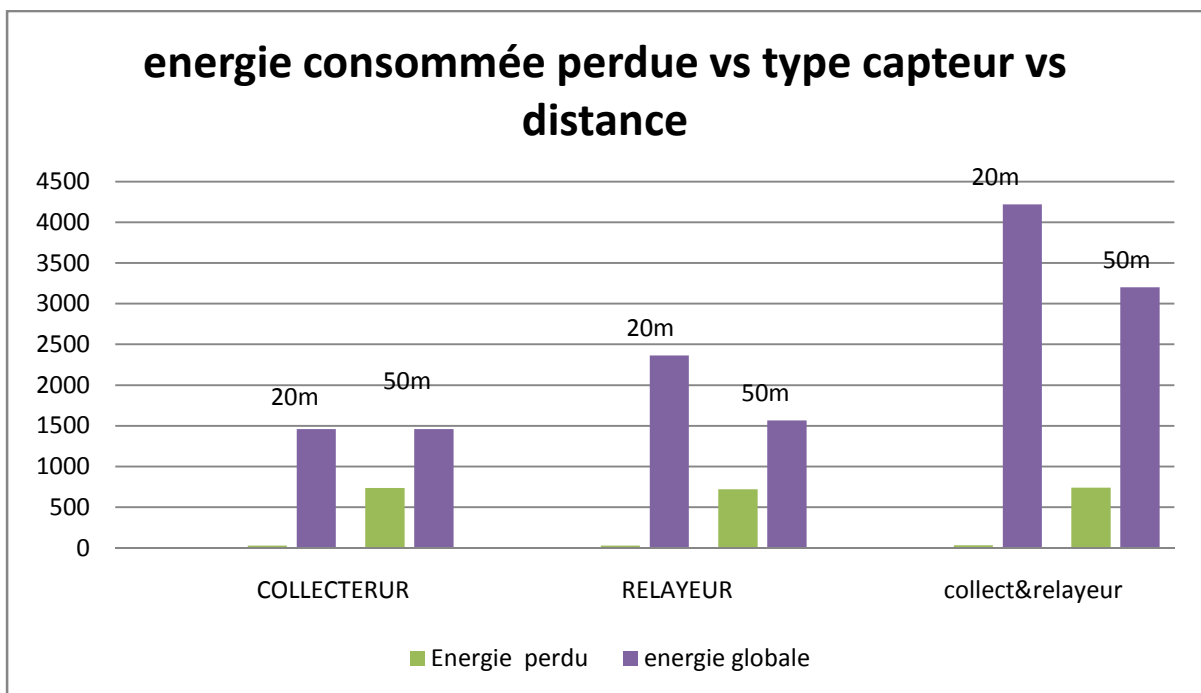


Figure 3.23: Comparaison entre les trois types de nœud

Analyse et interprétation:

Le graphe représente l'énergie perdue et consommé par les différents types de capteurs. On constate tout d'abord que pour les trois types de nœud, l'énergie perdue augmente selon la distance comme expliqué ci-dessous la densité de couverture diminue en s'éloignant du module radio.

En second lieu, on remarque que le nœud collecteur-relayeur consomme le plus d'énergie par rapport au nœud collecteur et le nœud relayeur.

Parce que à la différence des autres types de nœud, les nœuds collecteurs et relayeurs, le nœud collecteur-relayeur, son énergie consommée est due aux opérations de capture plus la communication de données.

Résultats des expérimentations zone stockage

Le tableau 6 représente l'énergie consommée par un nœud capteur (ultrason) en fonction de la distance par rapport à un obstacle.

Distance	temps	nb de tests	énergie/paquet	Energie/100 paquets
99cm	5,77	100	0,437	43,7
155cm	9,042	100	0,648	64,8
189cm	11,035	100	0,836	83,6
266cm	15,514	100	1,175	117,5
328cm	19,14	100	1,453	145,3

Tableau 6: Résultat des expérimentations zone stockage

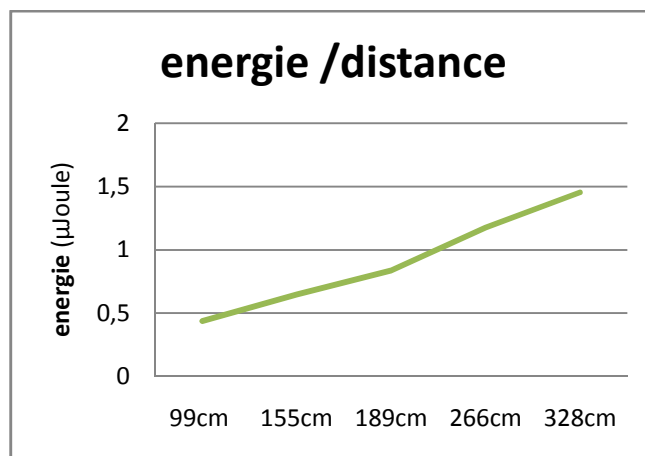


Figure 3.24: Energie en fonction de la distance (cas ultrasons)

Analyse et interprétation:

Le graphe représente la variation de l'énergie par un des capteurs de la zone de stockage

(capteur de distance ultrasonique) en fonction de la distance $d = \frac{V \cdot t}{2}$.

L'énergie consommée par ce dernier augmente en fonction de la distance.

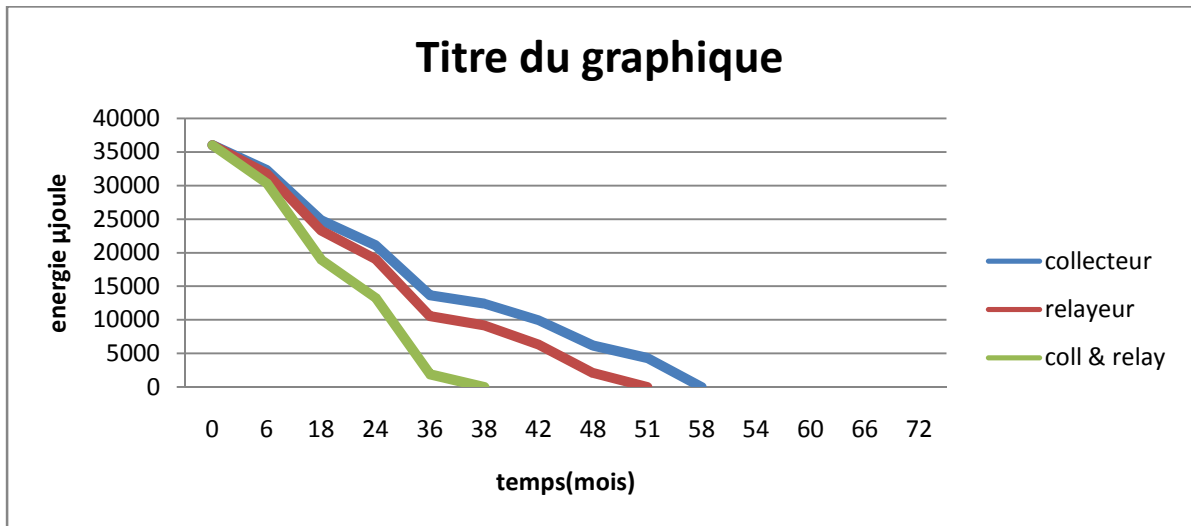


Figure 3.25: Durée de vie de chacun des trois types de noeud

D'après ce graphe, nous avons constaté que la batterie de nœuds collecteur-relayeur s'achève plus rapidement que celle d'autre types de nœud et du coup ça nécessite un remplacement plus souvent. Ensuite vient le nœud relayeur (le relais) enfin le collecteur qui consomme moins d'énergie.

Interprétations:

L'énergie consommée par un nœud collecteur = énergie de capture + communication

L'énergie consommée par un nœud relayeur (relais) = énergie de communication

L'énergie consommée par un nœud collecteur-relayeur = énergie de communication (réception+envoi)+ l'énergie de capture .

Dans une batterie de 9 V (Le voltage le plus utilisé) mais convertir en 5 V on a donc :

La puissance : $2mA \cdot 5 = 10W/H \rightarrow 36000 w/s$

On a aussi 1 joule = 1W /s

$36000 w/s \rightarrow 36000$ joule

-On aura donc $36000 * 10^6$ micro joule dans une batterie de 5V .

-Pour ce qui suit on prend le cas taille de paquet **10 bytes** (id nœud codé sur 4 octet -espace-
valeur sur 5 octet) et fréquence d'envoi **200 milliseconde**

Nœud collecteur :

Energie pour envoyer un seule paquet = **28,8 micro joule**.

Énergie de capture = **18,2 micro joule**.

Energie consommée pour un seule paquet = **47 micro joule**

Nombre de paquets qu'on peut envoyés : $\frac{36000*10^6}{47} = 766 * 10^6$ paquets

La durée de vie du nœud collecteur est : **4,85 ans** .

Nœud relayeur :

Consommation d'énergie par un seul paquet = $24.04 + 28.8 =$ **52,84 micro joule**

La durée de vie du nœud relayeur : **4,3 ans**

Nœud collecteur relayeur

Consommation d'énergie pour un paquet $18,2+52,84 =$ **71,04 micro joule**

La durée de vie du nœud collecteur relayeur est : **3,2 ans**

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réalisé trois types de nœud : collecteur, relayeur, collecteur_relayeur utilisant cartes arduino uno, module xbee, 2 capteurs (DHT11 et ULTRASON). Ensuite nous avons proposé une topologie de réseau de capteurs sans fil pour l'installation pétrolière qui est composée principalement de trois 03 zones : zone puits, zone canalisation, zone stockage. Enfin nous avons réalisé des tests selon la topologie de chaque zone et sous différentes conditions en utilisant les trois 03 types de nœud réalisés auparavant et nous avons affiché les résultats (paquets perdus, reçus, énergie de capture, énergie de communication...) sous forme de graphes et tableaux.

Conclusion générale

Le monde industriel du pétrole et du gaz implique des processus et des machines critiques pour l'exploration, l'extraction, le raffinage, le transport et la commercialisation des produits pétroliers. Les sociétés pétrolières et gazières doivent contrôler, surveiller, entretenir et sécuriser les processus et les actifs industriels de manière efficace. Pour résoudre les problèmes critiques liés à l'état des pipelines, à la surveillance de la corrosion et de l'intégrité, à la détection des fuites de gaz et à d'autres problèmes connexes.

Notre travail a pour but de proposer un schéma de déploiement d'un réseau de capteurs sans fils pour une installation pétrolière, Les capteurs câblés ont été largement utilisés mais sont coûteux et difficiles à déployer et à entretenir, pour cela nous proposons un RCSF qu'est une alternative émergente, nous avons proposé un déploiement déterministe hétérogène comportant des nœuds collecteurs ,nœuds relayeurs et des nœuds collecteur-relayeurs et des station de base avec une distance inférieurs ou égale à 50m entre chaque nœud. Au niveau de la zone réservoirs nous songeons placer des nœuds collecteurs reliés à une station base. Pour les pipelines ou il faut surveiller la pression tout au long de la canalisation, nous proposons de placer des nœuds collecteur-relayeur. Enfin, Au niveau de la zone puits, où on effectue les traitements les plus sensibles, nous proposons d'utiliser les trois types de nœuds .

Ce projet a fait objet d'une expérience intéressante qui nous a permis de renforcer et d'enrichir nos connaissances concernant les systèmes embarqués (la carte arduino, modules xbee, fonctionnement de quelques capteurs...) et les réseaux de capteurs sans fils ainsi que découvrir le monde de l'industrie pétrolière.

Pour la suite de ce projet, nous avons envisagé les perspectives suivantes :

- Implémenter la sécurité des données en terme de confidentialité en appliquant un chiffrements.
- Implémenter les modules solaires pour les capteurs terrestres notamment les nœuds collecteur-relayeur qui consomme le plus d'énergie.

Bibliographies

- [1] J.N Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey", Magazine: IEEE Communications, vol. 11, no. 6, pp. 6-28, December 2004.
- [2] C. Townsend and S. Arms, "Wireless Sensor Networks: Principles and Applications", MicroStrain, Inc.
- [3] https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_15.html
- [4] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/8284/1/Evaluation-de-LEACH-dans-un-environnement-fortement-bruite.pdf>
- [5] Mécanismes de sécurité pour l'intégration des RCSFs à l'IoT (Internet of Things) Somia SAHRAOUI
- [6] https://pmb.univsaida.dz/butecopac/doc_num.php?explnum_id=668
- [7] <http://ijses.com/wp-content/uploads/2017/12/106-IJSES-V1N11.pdf>
- [8] Système de surveillance d'infrastructure publiques à l'aide des réseaux de capteurs video sans fil
BENDIMERAD Nawel 2015
- [9] <https://fr.scribd.com/doc/14475933/deploiement-reseau-2G-3G>
- [10] <https://www.commentcamarche.net/contents/1122-le-standard-gsm>
- [11] [https://fr.scribd.com/doc/50634760/MANET-vs-WSN\(comparaison-ad-hoc-manet-et-wsn\)](https://fr.scribd.com/doc/50634760/MANET-vs-WSN(comparaison-ad-hoc-manet-et-wsn))
- [12] <https://shiverware.com/iot/iot-vs-wsn.html>
déploiement ds un env. heterogene
- [13] http://www.cs.nthu.edu.tw/~ychung/conference/GPC2007_Irregular-sensor.pdf
- [14] Par Cheick Tidjane KONE
Conception de l'architecture d'un réseau de capteurs sans fil de grande dimension

[15] Nouveau modèle pour le positionnement des senseurs avec contraintes de localisation
FATIMA MOURCHID

[16] <https://www.theses.fr/2012ISAL0066.pdf>

[17] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00650839/document> page 49

[18] CERISTNEWS Bulletin d'information trimestriel Seizième numéro - Décembre 2014

[19] <https://pdfs.semanticscholar.org/37d2/74e415d6d1c713de19bf27cd0fed95fb2985.pdf>

[20] http://oatao.univ-toulouse.fr/13074/1/mnasri_13074.pdf

[21] Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau Diery Ngom

[22] B. Wang, "Coverage Problems in Sensor Networks: A survey", in *ACM Computing Surveys* 43, 2011, pp. 1-56.