الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique
Et de l'Informatique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en systèmes de télécommunications.

Evaluation du protocole LEACH dans un WSN basé sur les capteurs MSP430

Proposé et dirigé par :

M. GUEDMANI Mohamed

Préparé et présenté par :

Mme. LAKHDARI Amina

Mme. LAIDI Nawel



﴿قَالُوا سُبْحَانَكَ لاَ عِلْمَ لَنَا
إِلاَّ مَا عَلَّمْتَنَا إِنَّكَ أَنْتَ
العَلِيمُ الحَكِيمُ﴾

سورة البقرة، الآية ٣٢.

Remerciements

Louange à notre Seigneur "ALLAH" qui nous a doté de la merveilleuse faculté de raisonnement. Louange à notre Créateur qui nous a incité à acquérir le savoir.

C'est à lui que nous adressons toute notre gratitude.

Ce travail tient son aboutissement grâce aux encouragements de Monsieur mohamed Guedmani auquel nous tenons à exprimer nos remerciements pour avoir bien voulu diriger cette étude, et se montrer objectif dans ses orientations et patient dans notre fébrilité.

Nos remerciements vont également vers les membres du jury,

de l'intérêt qu'ils témoignent à ce travail en participant à l'évaluation de cette étude et de bien vouloir faire partie du jury.

Nous tenons aussi à exprimer nos remerciements au tout les étudiants de notre promo.

Notre gratitude va également à nos proches, nos familles, nos frères et sœurs qui nous ont appuyé, et encouragé.

A toutes et à tous, nous leur exprimons notre reconnaissance pour le soutien qu'ils nous ont accordé.

Amina et Nawel



didécace

بسم الله الرحمن الرحيم والحمد لله رب العالمين

سبحان الله الذي وهبنا نعمة العقل، سبحان الذي يستحق الشكر على نعمته وحده لا شريك له، سبحان الذي جعل لنا العلم نورا وهدانا سبيل الرشاد.

***J**e dédie ce modeste travail à ma mère mon père mes frères ainsi qu'à mon mari qui ma beaucoup encourager pour continuer mes études et mon bébé wail.*

Comme je dédie ce travail à toute la famille LAIDI plus spécialement, et la famille SAYAHOUI

A tous mes amis sans exception. A tous ceux qui m'aiment ; et tous ceux que j'aime.

LAIDI NAWEL

.



didécace

بسم الله الرحمن الرحيم والحمد لله رب العالمين

سبحان الله الذي وهبنا نعمة العقل، سبحان الذي يستحق الشكر على نعمته وحده لا شريك له، سبحان الذي جعل لنا العلم نورا وهدانا سبيل الرشاد.

Je dédie ce modeste travail particulièrement :
A ma maman, A celle qui a tout souffert, sans me faire Souffrir, Qu'elle m'a tout offert pour me voir réussir ;

A mon papa, A l'homme que je dois ma réussite, mon bonheur, et tout le respect ; Qu'il trouve ici l'expression de mon affection et une récompense des sacrifices consentis pour moi.

A ma petite famille et surtout mon mari qui m'a vraiment aidé et mon fils ABDELKADER, à ma famille LAKHDARI grands et petits, frères et sœurs et la famille BENZIREG,

A tous mes amis sans exception. A tous ceux qui m'aiment ; et tous ceux que j'aime.

LAKHDARI Amina



Table des matières

	Remerciement	
	Dédicaces amina	
	Dédicaces nawel	
	Table des matiéres	
	Introduction générale	
	Introduction Générale	1
	Chapitre I: Généralité Sur Les Réseaux De Capteurs Sans fil	
I-1	***Introduction***	***3***
I-2	***Définition du réseau de capteurs***	***3***
I-3	***Architecture d'un réseau de capteurs sans fil***	***4***
I-4	***Topologies des réseaux de capteurs sans ils***	***5***
4-1	***Topologie Hiérarchique***	***5***
4-2	***Topologie plate (Flat)***	***6***
4-3	***Topologie basée sur la Localisation***	***7***
I-5	***Caractéristiques des RCSFs***	***7***
5-1	***Densité importante des nœuds***	***7***
5-2	***Topologie dynamique***	***8***
5-3	***Auto organisation***	***9***
5-4	***Scalabilité (passage à l'échèle)***	***9***
I-6	***Composition d'un capteur sans fil***	***9***
6-1	***Schéma synoptique***	***9***
	a- L'unité d'acquisition	***10***
	b- L'unité de traitement	***10***
	c- Un module de communication (Transceiver)	***10***
	d- Batterie	***10***
6-2	***Description technique***	***11***
	➢ ***Capteur MicaZ***	***11***
	➢ ***Capteurs MSP430F2274***	***13***
I-7	***Les standards de communication pour les RCSFs***	***13***
7-1	***Bluetooth***	***13***
7-1	***ZigBee***	***14***
I-8	***Le système d'exploitation pour RCSF : TinyOS***	***15***
I-9	***Pile protocolaire***	***16***
9-6	***Gestion d'énergie***	***16***
9-7	***Gestion de mobilité***	***17***
9-8	***La gestion des tâches***	***17***

I-10	Connectivité du RCSF……	17
I-11	La localisation dans les RCSFs……	18
I-12	Les applications des RCSF……	18
12-1	Contrôle de l'environnement……	18
12-2	Militaire ……	19
12-3	Santé……	19
12-4	Applications industrielles……	20
12-5	La sécurité des infrastructures……	20
I-13	Classes d'applications des RCSF……	24
13-1	Applications orientées temps……	21
13-2	Applications orientées événements……	21
13-3	Applications orientées requêtes……	22
13-4	Applications hybrides……	22
I-14	Problématiques ……	22
I-15	Conclusion……	23

Chapitre II: le protocole de routage LEACH

II-1	Introduction ……	24
II-2	Caractéristique d'un protocole hiérarchique ……	24
2-1	L'algorithme de Clustring utilisé ……	24
2-2	La réélection des ClusterHeads ……	25
2-3	La nature des clusters générés ……	25
2-4	La communication intra-cluster ... ……	25
2-5	La communication inter-cluster ……	26
II-3	Architecture de LEACH ……	26
II-4	Algorithme détaillé de LEACH ……	27
4.1.1	Phase d'annonce ……	27
4.1.2	Phase d'organisation des groupes ……	28
4.1.3	Phase d'ordonnancement ……	29
4.2	Phase de transmission ……	29
4.2.1	Interférences entre groupes ……	29
II-5	Simulation De Protocole LEACH ……	35
5.1	La simulation ……	37
5.2	La modélisation du système ……	37
5.3	Le modèle énergétique ……	37
II-6	Avantages et inconvénients du protocole LEACH ……	38
6.1	Avantages ……	38
6.2	Inconvénients ……	42
II-7	Conclusion ……	43

Chapitre III: Evaluation du protocole LEACH avec MSP430

III-1	*Introduction ……*	*34*
III-2	*Présentation du matériel ……*	*34*
2-1	*2-1- L'outil de développement eZ430-RF2500 ……*	*34*
2-2	*2-2- Le microcontrôleur MSP430F2274 ……*	*35*
2-3	*2-3- Expérimentation ……*	*35*
2-4	*2-4- Matériel: ……*	*36*
III-3	*3- L'algorithme d'auto-organisation LEACH :……*	*37*
III-4	*4- L'organigramme De Protocole LEACH :……*	*38*
III-5	*5-Métriques utilisées :……*	*40*
III-6	*Calcul des paramètres utilisé dans le protocole LEACH pour le MSP 430……*	*40*
III-7	*7-Résultats des simulations:……*	*43*
7-1	*7-1-Les fréquences : ……*	*43*
7-2	*7-2-Influence de facteur d'amplification εfs dans la stabilité :……*	*44*
III-8	*III-8-Influence de facteur d'amplification εmp dans la stabilité.……*	*54*
III-9	*III- 9- Conclusion :……*	*60*
	Conclusion générale ……	
	Bibliographie	

Liste des Abréviations

ADC: Analog Digital Converter.

ACLK: Auxiliaries Clock.

CCS: Code Composer Studio.

CDMA : Code Division Multiple Access.

CH: Cluster Head.

CSMA: Carrier Sense Multiple Access.

CPU: Central Processing Unit.

EUI: End-system Unique Identifier.

FDMA: Frequency Division Multiple Access.

GPS: Global Position System.

IDE: Integrated Development Environment.

ISM: Industrial Scientific and Medical.

LAN: Local Area Network.

LDA: Location Dépendant Address.

LEACH : Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy.

LND: Last Node Dies.

MAC: Media Access Control.

MCK: Maitresse Clock.

RAM: Random Access Memory.

RCSF : Réseaux De Capteur Sans Fil.

ROM: Read Only Memory.

RSSI: Received Signal Strength Indicator.

SMCLK: Sub-Main Clock.

TDMA: Time Division Multiple Access.

USB: Universal Serial Bus.

WSN: Wireless Sensor network.

Table Des Figures

Chapitre I

Figure I-1	*Réseau de capteurs sans fil.*	*4*
Figure I-2	*Architecture générale d'un réseau de capteurs sans fils.*	*5*
Figure I-3	*Topologie Hiérarchique.*	*6*
Figure I-4	*Topologie plate (Flat)*	*6*
Figure I-5	*Topologie Basée Localisation.*	*7*
Figure I-6	*Schéma synoptique d'un nœud capteur.*	*9*
Figure I-7-	*Consommation d'énergie dans un nœud capteur*	*10*
Figure I-8-a	*Capteur MicaZ.*	*11*
Figure I-8-b	*Carte MTS400.*	*11*
Figure I-9	*Station de base.*	*12*
Figure I-10	*composition matérielle du MSP430F2274.*	*12*
Figure I-11-	*Les différentes normes sans fil*	*13*
Figure I-12	*Pile protocolaire des RCSF.*	*16*
Figure I-13	*Contrôle de l'environnement.*	*19*
Figure I-14	*Un service militaire utilisant les RCSF.*	*19*
Figure I-15	*Application des RCSF dans le domaine de la médecine.*	*20*
Figure I-16	*Quelques domaines d'application pour les RCSF.*	*21*

Chapitre II

Figure II-1	*Architecture du routage hiérarchique LEACH …….*	*27*
Figure II-2	*Modèle de consommation d'énergie pour la communication ……*	*32*

Chapitre III

Figure III-1	*eZ430-RF2500……*	*34*
Figure III-2	*L'organigramme De Protocole LEACH ……*	*37*
Figure III-3	*Décomposition du canal ISM……*	*39*
Figure III-4	*Les variations de facteur d'amplification εfs en fonction de la fréquence ……*	*45*
Figure III-5	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs0……*	*46*
FigureIII-6	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs1……*	*46*
FigureIII-7	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs2……*	*47*
Figure III-8	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs3……*	*47*
Figure III-9	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs4……*	*48*
Figure III-10	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs5……*	*48*
Figure III-11	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs6……*	*49*
Figure III-12	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs7……*	*49*
FigureIII-13	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs8……*	*50*
FigureIII-14	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs9……*	*50*
Figure III-15	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs10……*	*51*

Figure III-16	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs11…….*	*51*
Figure III-17	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs12……..……..……*	*52*
Figure III-18	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs13……*	*52*
Figure III-19	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs14…….……*	*53*
Figure III-20	*Stabilité du réseau MSP430 avec εfs15……*	*53*
Figure III-21	l'évolution de la stabilité moyenne ……..……	*54*
Figure III-22	*Stabilité du réseau MSP430 avec la hauteur h=0,5m …….*	*55*
Figure III-23	*Stabilité du réseau MSP430 avec la hauteur h=0,75m……*	*56*
Figure III-24	*Stabilité du réseau MSP430 avec la hauteur h=1m…….*	*57*
Figure III-25	*Stabilité du réseau MSP430 avec la hauteur h=1,25m……*	*58*
Figure III-26	*Stabilité du réseau MSP430 avec la hauteur h=1,5m……..……*	*59*
Figure III-27	Les variations de εmp en fonction des hauteurs……..…….	*59*
Figure III-28	les variations des stabilités en fonction de la variation des hauteurs…….	*60*

Liste Des Tableaux

Chapitre I

Tableau I-1	Tableau comparatif chiffré entre différents protocoles de communication sans fil…….…….	14

Chapitre III

Tableau III-1	Les Paramètres de Simulation……	42
Tableau III-2	Le codage typique de la bande ISM ……..……	43
Tableau III -3	Les différentes valeurs deλ……..…….……	44
Tableau III -4	Les valeurs de εfs…….....……..……	44
Tableau III-5	Calcule La valeurs de εfs0……..	46
Tableau III-6	Calcule La valeurs de εfs1 ……..	46
Tableau III-7	Calcule La valeurs de εfs2 ……	47
Tableau III-8	Calcule La valeurs de εfs3……..…..	47
Tableau III-9	Calcule La valeurs de εfs4 ……	48
Tableau III-10	Calcule La valeurs de εfs5…….	48
Tableau III-11	Calcule La valeurs de εfs6…….	49
Tableau III-12	Calcule La valeurs de εfs7…….	49
Tableau III-13	Calcule La valeurs de εfs8…….	50
Tableau III-14	Calcule La valeurs de εfs9…….	50
Tableau III-15	Calcule La valeurs de εfs10……	51
Tableau III-16	Calcule La valeurs de εfs11……	51
Tableau III-17	Calcule La valeurs de εfs12……	52

Tableau III-18	*Calcule La valeurs de εfs13……*	*52*
Tableau III-19	*Calcule La valeurs de εfs14……*	*53*
Tableau III-20	*Calcule La valeurs de εfs15……*	*53*
Tableau III-21	*Calcule La valeurs de εmp1……*	*55*
Tableau III-22	*Calcule La valeurs de εmp2……*	*55*
Tableau III-23	*Calcule La valeurs de εmp3……*	*56*
Tableau III-24	*Calcule La valeurs de εmp4……..*	*56*
Tableau III-25	*Calcule La valeurs de εmp5……*	*57*
Tableau III-26	*Calcule La valeurs de εmp6……*	*58*

الملخص

في السنوات الأخيرة كان هناك تطور سريع جدا لشبكات الاتصالات اللاسلكية. وقد أدى هذا التطور إلى اهتمام أكثر وأكثر بالشبكات اللاسلكية دون أي بنية تحتية خاصة. وبالتالي فإن سوق الشبكات والتطبيقات اللاسلكية نمت بشكل كبير والبحوث في مجال أجهزة الاستشعار تشهد ثورة كبرى، تفتح آفاقا واسعة للتأثير في العديد من المجالات التطبيقية (العسكرية، الصحة والبيئة وسلامة الأغذية، والتصنيع، والاتصالات، والروبوتات، ...).

تتكون شبكة الاستشعار اللاسلكية عادة من عدد كبير من الأجهزة اللاسلكية قادرة على أداء التدابير البيئية وتنتقل هذه القياسات الاستشعارية من خلال البث الإذاعي إلى عقدة مركزية تسمى **محطة قاعدة** حيث تعتبر همزة وصال مع الوسط الخارجي لشبكة الاستشعار اللاسلكية. الطاقة عنصر أساسي في تصميم شبكة من الفروع وأجهزة الاستشعار اللاسلكية التي عادة ما تعمل بواسطة الاستشعارMSP430. البطاريات. الهدف من هذا العمل هو دراسة و تقييم معاييربروتوكول ليتش و تطبيقها على جهاز ندرس بشكل خاص تأثير عامل التضخيم بالتحديد في بروتوكول ليتش لأنه يتأثر جدا بمن اشارات الراديو مثل المرتفعات و الاتجاهات و تحديد مواقع الهوائيات بالنسبة للارض كما أن عامل التضخيم يؤثر تأثيرا مباشرا على الاستقرار و مدة حياة الشبكة لكل نوع من عقد الاستشعار.

Résumé :

Depuis ces dernières années, on constate un développement très rapide des réseaux de communication sans fil. C'est ainsi que le marché des réseaux et des applications sans fil s'est considérablement développé et la recherche dans le domaine des capteurs subit actuellement une révolution importante, ouvrant des perspectives d'impacts significatifs dans de nombreux domaines d'application (militaire, santé, environnement, sécurité alimentaire, fabrication, télécommunication, robotique,. . .).

Un réseau de capteurs sans fil se compose généralement d'un nombre important de dispositifs sans fil capable de réaliser des mesures environnementales, Ces mesures de capteurs sont transmises à travers une transmission radio vers un nœud central appelé Station de Base qui constitue la passerelle vers une application utilisateur dédiée qui prend des décisions basées sur ces lectures de capteurs. L'énergie est une donnée essentielle dans le design d'un réseau de capteurs sans fil du fait que les nœuds sont généralement alimentés par des batteries. L'objectif de ce travail est l'études et l'évaluation des paramètres du protocole LEACH appliqué à un réseau de capteurs sans fil WSNs à base des nœuds capteurs MSP 430, on étudiera en particulier l'impact du facteur d'amplification (ε_{FS} **:free space factor et** ε_{amp} **: multipath factor)** spécifié dans le protocole LEACH car ce dernier paramètre est très influencé par les caractéristiques des signaux radio comme les hauteurs et les directions de positionnement des antennes des nœuds par rapport au sol, en plus le facteur d'amplification influe directement sur la stabilité et la durée de vie du réseau et il est propre pour chaque type de nœud capteur.

Abstract:

In recent years there has been a very rapid development of wireless communication networks. This development has led to an interest of more and more important to wireless networks without any special infrastructure. Thus the market networks and wireless applications has grown considerably and research in the field of sensors is undergoing a major revolution, opening up significant opportunities for impact in many application areas (military, health, environment, food safety, manufacturing, telecommunications, robotics, ..).

A wireless sensor network typically consists of a large number of wireless devices capable of performing environmental measures. These sensor measurements are transmitted through a radio transmission to a central node called Base Station which is the gateway to a dedicated user application that makes decisions based on these sensor readings. Energy is an essential element in the design of a network of wireless sensor nodes that are usually powered by batteries. The objective of this work is the study and evaluation of the parameters of the protocol LEACH applied to a wireless sensor network WSNs based to a sensor nodes MSP430, we particularly study of the impact of amplification factor..Specifying the LEACH

Protocol parameter because it is very influenced by the characteristic of radio signals like heights and directions positioning antenna nodes to the ground and amplification factor directly affects to the stability and during of life of the network and it is specified for each type of sensor node.

Introduction général

Introduction Générale :

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

La technique des WSNs peut être appliquée dans de nombreux domaines : surveillance des déplacements des véhicules en zone hostile, observation de la vie des espèces rares, surveillance de la structure des infrastructures, optimisation de traitement pour les patients etc.

Le routage est fondamental dans ce type de réseau car il n'existe pas d'infrastructure qui gère les informations échangées entre les différents nœuds du réseau (comme par exemple les routeurs dans les réseaux filaires). En effet, c'est à chaque nœud du réseau de jouer le rôle d'un routeur. Ainsi, tous les nœuds collaborent afin de router une information vers une certaine destination.

Le routage de données dans les réseaux de capteurs sans fil (WSNs) est reconnu comme un domaine de recherche très actif vu les spécificités de ce type de réseau, où la consommation de l'énergie et le passage à l'échelle sont considérés comme les défis majeurs des protocoles de communication proposés.

Le routage hiérarchique des données dans les WSNs, est une classe spécifique des protocoles de routage, elle englobe les solutions qui adoptent une restructuration du réseau physique en un système d'hiérarchie logique, visant l'optimisation de la consommation de l'énergie et le passage à l'échelle. Plusieurs solutions de routage hiérarchiques utilisent la technique du Clustering pour minimiser la consommation de l'énergie et permettre un passage à l'échelle ; à titre d'exemples : le protocole de routage hierarchique de clustering et d'auto-organisation LEACH.

Notre travail consiste à étudié et à évaluer les paramètres du protocole LEACH appliqué à un réseau de capteurs sans fil WSNs à base des nœuds capteurs MSP 430, on étudiera en particulier l'impact du facteur d'amplification (ε_{FS} **:free space factor et** ε_{amp} **: multipath factor)** spécifié dans le protocole LEACH car ce dernier paramètre est très influencé par les caractéristiques des signaux radio comme la puissance et la fréquence utilisé par la radio du nœud capteur ainsi que par les hauteurs et les directions de positionnement des antennes des nœuds par

rapport au sol, en plus le facteur d'amplification influe directement sur la stabilité et la durée de vie du réseau et il est propre pour chaque type de nœud capteur.

Ce manuscrite est composé par trois chapitres :

Le premier chapitre donne une généralité sur les réseaux de capteurs sans fils WSNs.

Le chapitre deux sera consacré à l'étude du protocole LEACH ainsi que les paramètres d'influence sur ce dernier.

Dans le dernier chapitre une simulation du protocole LAECH sera réalisé avec les paramètres et les caractéristiques des nœuds capteurs MSP430 afin d'étudier et analyser l'impact du facteur d'amplification sur le protocole LEACH et la stabilité du réseau.

Chapitre 1

Généralités sur les Réseaux de Capteurs Sans Fil

CHAPITRE I
GENERALITE SUR LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

1- Introduction :

Grâce aux avancées technologiques de plusieurs secteurs des technologies de l'information, il devient aujourd'hui envisageable de produire en masse des systèmes d'une taille extrêmement réduite (de quelques centimètres) et embarquant des unités de calcul et de communication sans fil pour un coût réduit. Ayant ces caractéristiques, les nœuds capteurs sont capables de générer et d'échanger des données d'une manière autonome et complètement transparente pour les utilisateurs.

Les réseaux de capteurs représentent actuellement un nouveau domaine, en plein développement, émergeant des innovations des technologies de communication.

L'objectif de ce chapitre est de faire une description synthétique des réseaux de capteurs, leurs architectures, leurs caractéristiques et contraintes ainsi que leurs domaines d'applications variés.

2- Définition du réseau de capteurs :

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF**)** [13], [11] est un système distribué de grande échelle mettant en communication un grand nombre d'entités autonomes communément appelées « capteurs sans fil », ou simplement « capteurs ». Ces capteurs forment donc les nœuds du réseau.

Dans un scénario d'application classique, plusieurs nœuds capteurs sont déployés dans un certain environnement pour mesurer certains phénomènes physiques et faire remonter les informations collectées à une station de base, nommée le nœud puit (une porte d'entrée vers le monde extérieur qui fait l'interface entre le réseau de capteurs et l'utilisateur des données).

Dans le cas le plus simple, les capteurs seront dans le voisinage direct du puit (un réseau de type étoile à un saut). Cependant, dans le cas d'un réseau à grande échelle, les capteurs ne sont pas tous dans le voisinage du puit et les messages seront acheminés du nœud source vers le puit en transitant par plusieurs nœuds, selon un mode de communication multi-sauts comme l'illustre la Figure I-1.

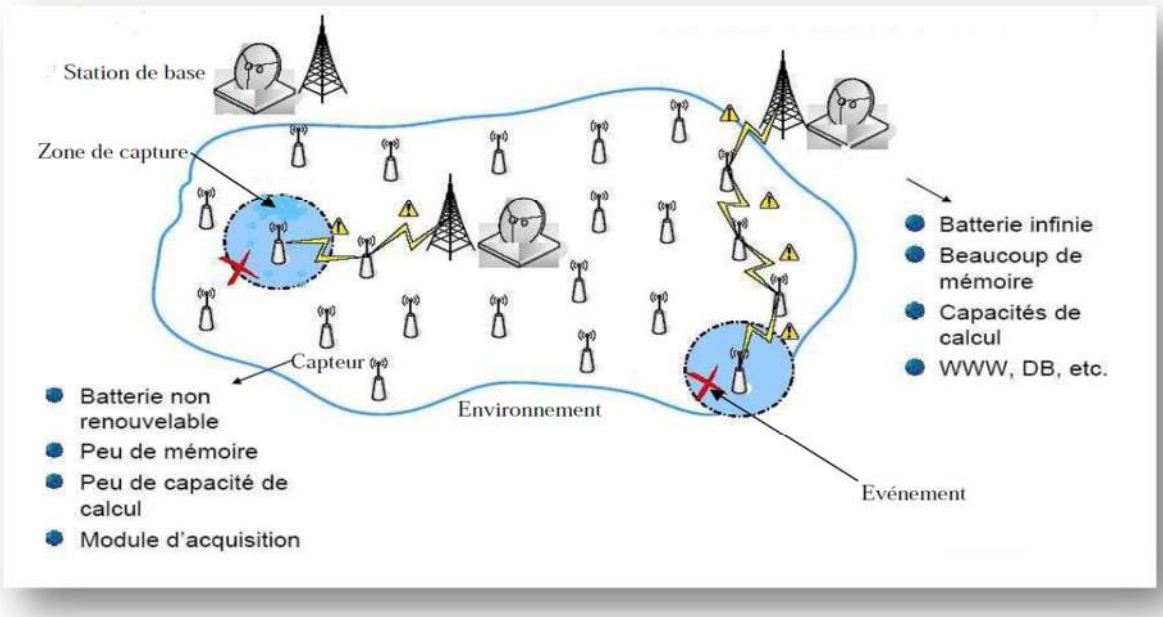


Figure I-1 : Réseau de capteurs sans fil [07].

3- Architecture d'un réseau de capteurs sans fil:

Un réseau de capteurs est constitué essentiellement de plusieurs nœuds capteurs, un nœud Sink (station de base) et un centre de traitement des données [07]:

- *Nœuds* : ceux sont des capteurs, leur type, leur architecture et leur disposition géographique dépendent de l'exigence de l'application en question. Leur énergie est souvent limitée puisqu'ils sont alimentés par des piles.
- *Sink (Station de base)* : c'est un nœud particulier du réseau. Il est chargé de la collecte des données issues des différents nœuds du réseau. Il doit être toujours actif puisque l'arrivée des informations est aléatoire. C'est pourquoi son énergie doit être illimitée. Dans un réseau de capteur sans fils plus ou moins large et à charge un peu élevée, on peut trouver deux Sink ou plus pour alléger la charge.
- *Centre de traitement des données* : c'est le centre vers lequel les données collectées par la station de base sont envoyées. Ce centre a le rôle de regrouper les données issues des nœuds et les traiter de façon à en extraire l'information utile et exploitable.

Le centre de traitement peut être éloigné du Sink, alors les données doivent être transférées à travers un autre réseau, c'est pourquoi on introduit une passerelle entre le Sink et le réseau de transfert pour adapter le type de données au type du canal (comme c'est illustré dans la Figure I-2).

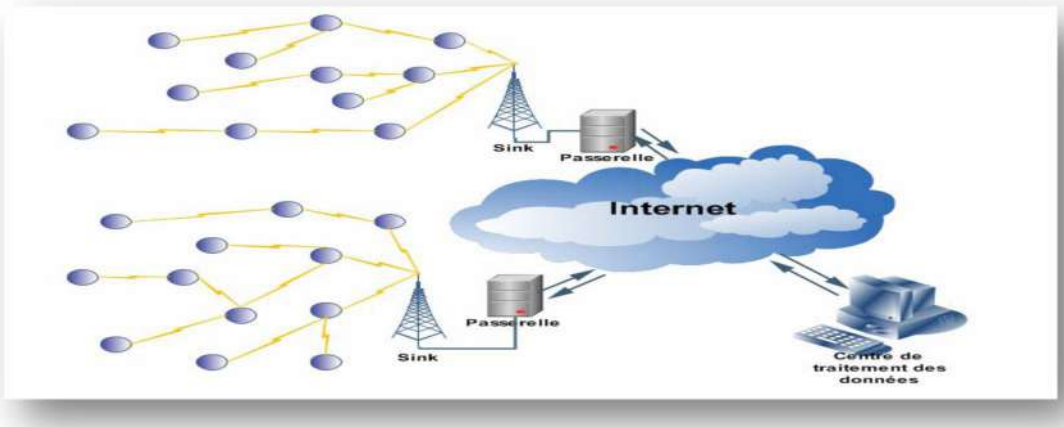


Figure I-2 : Architecture générale d'un réseau de capteurs sans fils [07].

La Figure I-2 représente une architecture générale d'un RCSF où les nœuds capteurs transmettent leurs données vers un nœud Sink.

Et puisque le centre de traitement des données est éloigné, les données sont acheminées via Internet, une passerelle est utilisée pour adapter le type des données au canal.

La conception d'un réseau de capteurs, est influencée par beaucoup de factures, y compris les coûts de production, le passage à l'échelle, et l'environnement.

4- Topologies des réseaux de capteurs sans fils :

Les topologies des réseaux de capteurs sont déterminées à partir des protocoles de routage utilisés pour l'acheminement des données entre les nœuds et le Puit (Sink).

Ces protocoles peuvent être Hiérarchique, Plate (Flat) ou Topologie basée sur la localisation**.**

4-1-Topologie Hiérarchique :

Les protocoles à topologie hiérarchique forment des réseaux dans lesquels un nœud central *Sink* (le niveau supérieur de la hiérarchie) est relié à un ou plusieurs autres nœuds qui appartiennent à un niveau plus bas dans la hiérarchie (deuxième niveau) avec une liaison point à point. Aussi, chacun des nœuds du deuxième niveau aura également un ou plusieurs autres nœuds de niveau plus bas dans la hiérarchie (troisième niveau) reliés à lui avec une liaison point à point. Chaque ensemble de nœuds forme une sorte de motif (Cluster).

Le nœud central n'a aucun autre nœud au-dessus de lui dans la hiérarchie sauf le centre de traitement des données ou la passerelle si elle existe.

Les nœuds du deuxième niveau jouent le rôle des passerelles entre ceux du troisième niveau et le Sink. Dans ce cas, le routage devient plus simple, puisqu'il s'agit de passer par les passerelles pour atteindre le nœud destination.

Un réseau basé sur une topologie hiérarchique doit avoir au moins trois niveaux dans sa hiérarchie, puisqu'un réseau avec un nœud central *Sink* et seulement un niveau hiérarchique au-dessous, forme une topologie en étoile [13].

Si les nœuds dans un réseau basé sur la topologie hiérarchique doivent effectuer un tel traitement sur les données transmises entre les nœuds dans le réseau, alors les nœuds qui sont à des niveaux plus élevés dans la hiérarchie doivent effectuer plus de traitement que les nœuds de niveau inférieur.

La figure I-3- montre que, les informations sont transmises d'un nœud capteur vers le nœud Sink (station de base) en passant par le *Clusterhead (chef de groupe)* déjà élu.

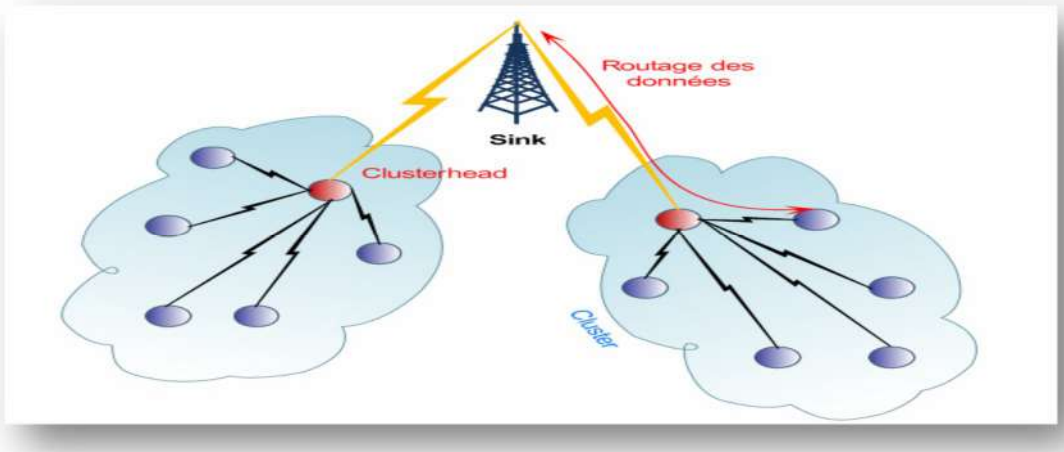


Figure I-3 : Topologie Hiérarchique [07].

4-2-Topologie plate (Flat) :

Les protocoles à topologie plate (*flat*) considèrent que tous les nœuds sont égaux, ont les mêmes fonctions, et peuvent communiquer entre eux sans devoir passer par un nœud particulier ou une passerelle. Seul un nœud particulier, le *Sink*, est chargé de la collecte des données issues des différents nœuds capteurs afin de les transmettre vers les centres de traitement.

En cas où la destination ne fait pas partie du voisinage de la source, les données seront transmises en utilisant les sauts multiples à travers les nœuds intermédiaires comme c'est illustré dans la Figure I-4. Ce type de réseau représente l'avantage de l'existence de différents chemins d'une source vers une destination et c'est pour remédier au problème de changement brusque de topologie ou la défaillance d'un nœud intermédiaire [13]

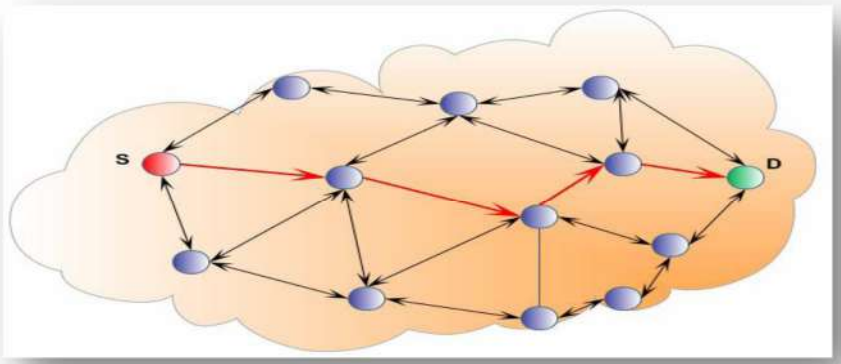


Figure I-4 : Topologie plate (Flat) [07].

4-3- Topologie basée sur la Localisation :

Dans cette topologie le réseau est supposé comme suit :

- Le réseau est partitionné en plusieurs zones de localisation.
- Chaque zone à son identifiant.
- Chaque nœud a un identifiant EUI (End-system Unique Identifier) et enregistre dynamiquement l'identifiant de la zone à laquelle il appartient temporairement.

L'information temporaire de localisation appelée LDA, [36] (*Location Dépendent Address*) qui est un triplet de coordonnées géographiques (longitude, latitude, altitude) obtenues, par exemple, au moyen d'un GPS avec une précision dépendant du type de l'application.

Une telle topologie exige l'implémentation d'un algorithme de gestion de localisation qui permet aux nœuds de déterminer les endroits approximatifs des autres nœuds. Ce type de topologie est mieux adapté aux réseaux avec une forte mobilité.

Avant d'envoyer ses données à un nœud destination, le nœud source utilise un mécanisme pour déterminer la localisation de la destination puis inclus l'identifiant de zone de localisation et du nœud destination dans l'entête du paquet à envoyer.

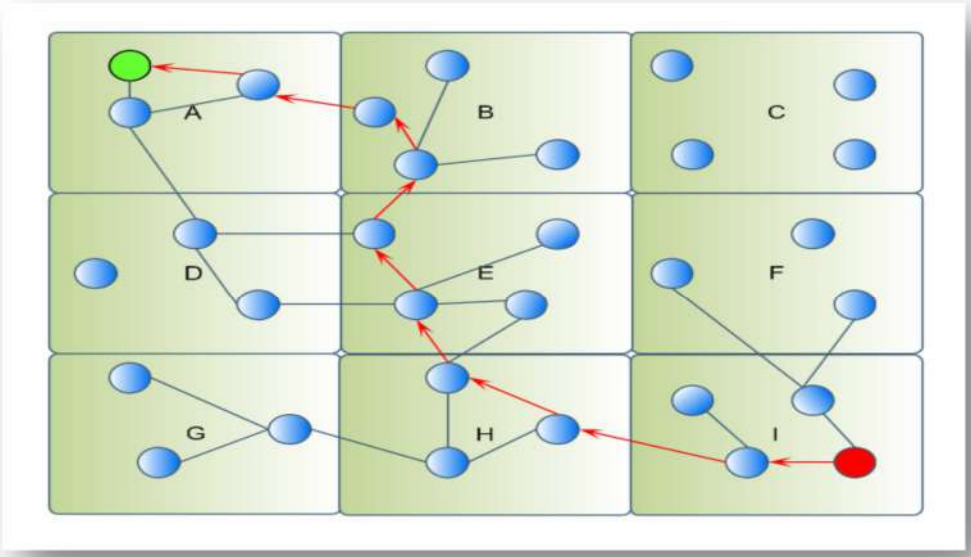


Figure I-5 : Topologie Basée Localisation [07].

5- Caractéristiques des RCSFs [13] [03]:

Les principaux caractéristiques des réseaux de capteurs se résument dans ce qui suit :

5-1- Densité importante des nœuds :

Les réseaux de capteurs se composent généralement d'un nombre très important des nœuds pour garantir une couverture totale de la zone surveillée. Ceci engendre un niveau de surveillance élevé et assure une transmission plus fiable des données sur l'état du champ de capteur.

5-2- Topologie dynamique :

La topologie des réseaux de capteurs instable est le résultat des trois facteurs essentiels suivants [04]:

- *La mobilité des nœuds* **:** les nœuds capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent librement et arbitrairement, introduisant ainsi une topologie instable du réseau.
- *La défaillance des nœuds* **:** du fait de l'autonomie énergétique limitée des nœuds, la topologie du réseau n'est pas fixée (les nœuds « morts » sont, d'un point de vue logique, simplement supprimés).
- *L'ajout de nouveaux nœuds* **:** de nouveaux nœuds peuvent facilement être rajoutés. Il suffit de placer un nouveau capteur qui soit dans la portée de communication d'au moins un autre nœud capteur du réseau déjà existant.

5-3- Auto organisation :

Dans un très grand RCSF, il n'est pas possible ni d'organiser la structure selon une approche centralisée (trop coûteuse en énergie), ni de préserver une structure de communication « à plat » (topologie adaptée aux petits réseaux dans laquelle tous les nœuds ont le même rôle et les mêmes caractéristiques), car plusieurs problématiques sont encore plus critiques avec le passage à l'échelle et la contrainte d'énergie. C'est pour cette raison, que dans les réseaux de capteurs, une stratégie d'auto-organisation doit être définie [04].

5-4- Scalabilité (passage à l'échelle) :

Les réseaux de capteurs peuvent contenir des centaines voire des milliers de nœuds capteurs. Un nombre aussi important engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que le nœud station de base soit équipé d'une mémoire importante pour stocker les formations reçues.

6- Composition d'un capteur sans fil :

6-1- schéma synoptique :

Les capteurs sont des dispositifs de taille extrêmement réduite avec des ressources très limitées, autonomes, capables de traiter des informations et de les transmettre, via les ondes radio, à une autre entité (capteurs, unité de traitements...) sur une distance limitée à quelques mètres [24].

Les réseaux de capteurs utilisent un très grand nombre de ces capteurs, pour former un réseau sans infrastructure établie. Un capteur analyse son environnement, et propage les données récoltées aux capteurs appartenant à sa zone de couverture.

Chaque capteur relayant l'information sur sa propre zone de couverture, le réseau se trouve entièrement couvert.

Un capteur est composé de quatre unités de base (voir *Figure I-6*)

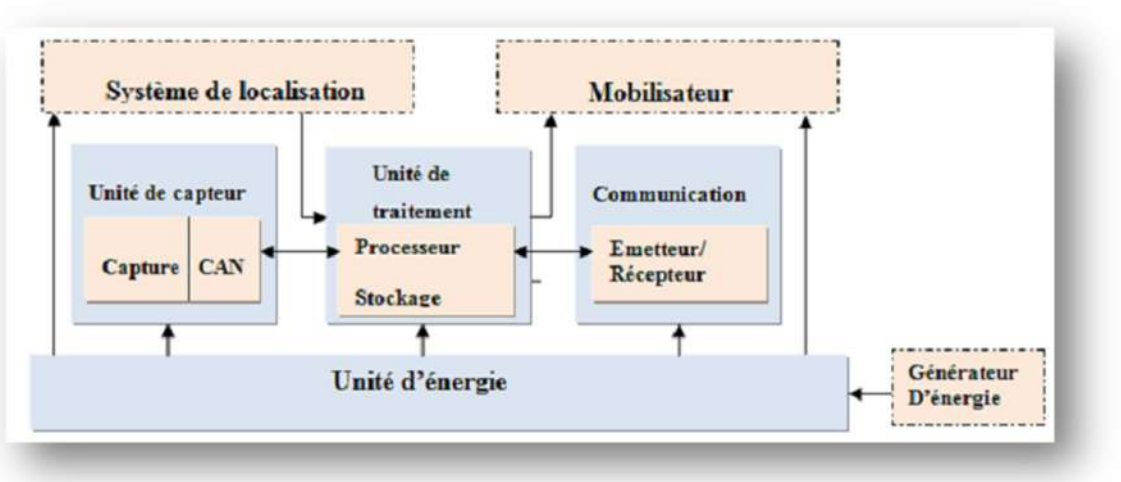


Figure I-6 : Schéma synoptique d'un nœud capteur [23].

a- L'unité d'acquisition des données:

elle est généralement composée de deux sous-unités qui sont les capteurs et les convertisseurs analogique-numérique ADCs (Analog- Digital Converter).

Les capteurs obtiennent des mesures sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques. Les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques.

b- L'unité de traitement :

l'unité de traitement est composée de deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une interface pour l'unité de transmission.

Cette unité est également composée d'un processeur et d'un système d'exploitation spécifique. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de transmission.

Les microcontrôleurs utilisés dans le cadre de réseaux de capteurs sans fil sont à faible consommation d'énergie. Leurs fréquences sont assez faibles, moins de 10 MHz pour une consommation de l'ordre de 1 mW. Une autre caractéristique est la taille de leur mémoire qui est de l'ordre de 10 Ko de RAM pour les données et de 10 Ko de ROM pour les programmes [12].

Outre le traitement des données, le microcontrôleur commande également toutes les autres unités notamment le système de transmission et gère les procédures et protocoles permettant la communication entre les nœuds.

c- Un module de communication (Transceiver) :

Il est composé d'un émetteur/récepteur permettant la communication entre les différents nœuds du réseau via un support de communication radio. Le système de transmission consomme environ 15 mW et possède une portée de quelques dizaines de mètres.

***d- L'unité d'énergie* :**

La gestion de l'énergie est un point primordial dans les réseaux de capteurs. Tout capteur est muni d'une ressource énergétique à durée de vie limitée, et ce, à cause de la taille réduite de la batterie et l'impossibilité de la recharger ou de la changer.

Il est à noter que la gestion de l'énergie est un réel problème pour les réseaux de capteurs, et divers travaux tentent d'y remédier**.** De ce fait, l'unité de contrôle d'énergie est sans doute le composant le plus important du capteur. Elle s'occupe de la répartition de l'énergie au sein du capteur entre les divers modules. Elle permet également quelques fois de réduire la consommation d'énergie en agissant sur les modules inactifs. [09].

La figure -I-7 résume la consommation d'énergie dans les différentes unités d'un capteur.

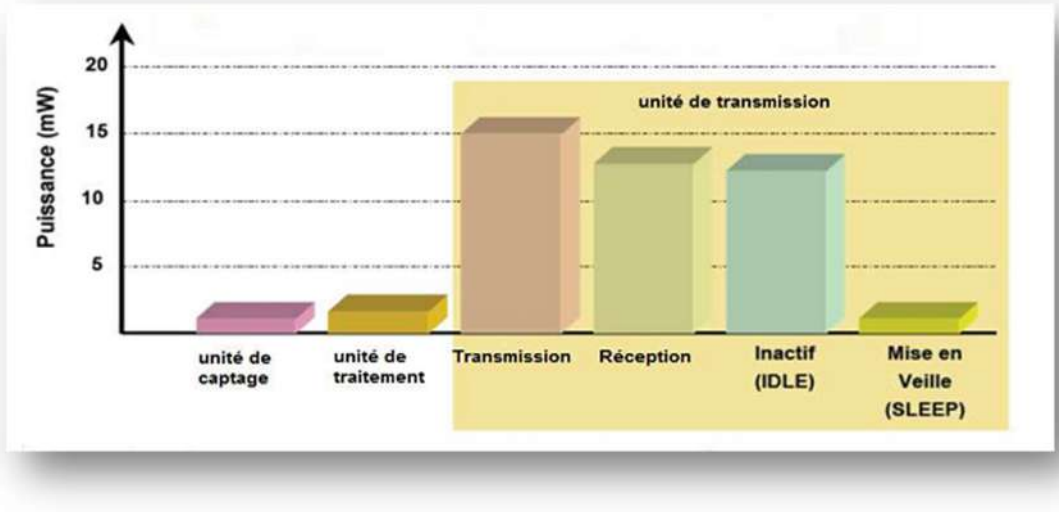


Figure I-7 : Consommation d'énergie dans un nœud capteur. [05].

On remarque que l'unité de transmission est très gourmande en consommation d'énergie. En effet la transmission d'un seul bit sur une distance de 100m consomme approximativement la même énergie que l'exécution de 3000 instructions. Toutefois, la mise en veille de la radio réduit de manière significative cette consommation.

Il existe des capteurs qui sont dotés d'autres composants additionnels tels que les systèmes de localisation GPS (Global Position System) et un mobilisateur lui permettant le déplacement.

6-2- Description technique d'un capteur sans fil :

Par exemple :

- ***Capteur MicaZ :***

Un capteur MicaZ se compose de deux modules comme le montre la figure I-7-a : une carte MPR2600 et une carte MTS400 [13].

La carte MPR 2600 contient un microcontrôleur et un transceiver :

- ✓ Le microcontrôleur contient une mémoire flash de 128kB, une mémoire vive de 4kB et un processeur de 4MHz. Il réalise le calcul et le traitement des informations des capteurs.
- ✓ Le transceiver est un module de communication permettant des transmissions à fréquence radio de 2.4 GHz allant jusqu'à 250kbps entre les capteurs et des capteurs vers la station de base.

La carte MTS400 (carte des senseurs) capte des mesures environnementales : température, accélération, pression, luminosité et l'humidité, les transforme en valeurs numériques, puis elle les communique à la carte MPR 2600 (figure I-7-b).

Une nouvelle génération de carte MTS420 est également fournie chez Crossbow avec une fonctionnalité supplémentaire. Elle fonctionne comme une carte MTS400 et elle offre également la position géographique du capteur GPS.



Figure I-8-a : Capteur MicaZ [13].

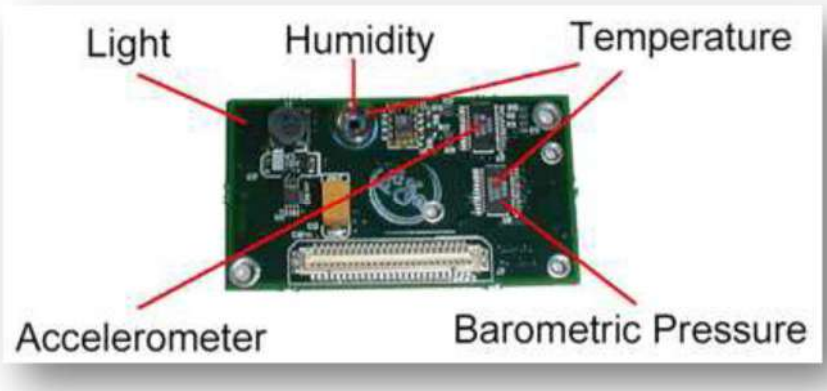


Figure I-8-b : Carte MTS400 [13].

Station de base :

La station de base contient deux composants comme montre la figure I-8 : un pour récupérer les mesures transmises sans fil par les capteurs et l'autre pour envoyer les données à l'ordinateur [13]:

- ✓ Le premier composant est une carte MPR2600 qui récupère les données transmises par les capteurs via des ondes radio.

- ✓ Le deuxième composant est une carte MIB520 qui est dotée d'une liaison filaire vers l'ordinateur via un câble USB. Cette carte reçoit des données de la carte MPR2600 et les transmet à l'ordinateur via le câble USB. Elle sert également à injecter des programmes sur les capteurs MicaZ afin d'accomplir des tâches bien précises.



Figure I-9 : Station de base [13].

- ➢ *Capteurs MSP430F2274 [10]:*

L'eZ430 qui est de la taille d'une clé USB est une plateforme sans fil permettant de programmer le microcontrôleur MSP430F2274 de Texas Instruments.

Elle comporte un transmetteur sans fil 2,4 GHz : CC2500. En effet, il sert de programmateur, de débuggeur et de simulateur pour le MSP430F2274. C'est un système de développement pas cher : environ une vingtaine d'euros.

Construit autour d'un CPU 16 bits, le MSP430 à été conçu pour des applications embarquées à basse consommation et à faible cout. Il est particulièrement adapté aux applications sans fil fonctionnant sur batteries.

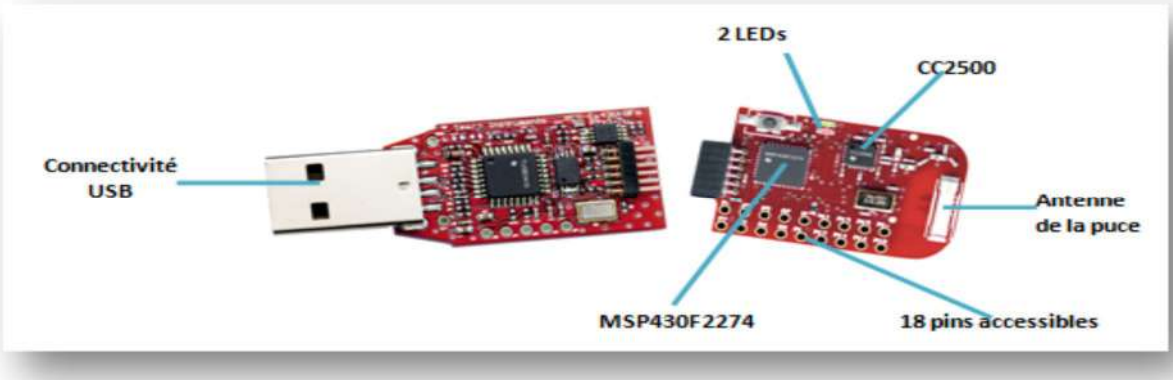


Figure I-10 : composition matérielle du MSP430F2274 [19].

Le code en langage C est programmé, compilé puis chargé dans la ROM du microcontrôleur MSP430-F2274 du capteur par l'intermédiaire du programmateur eZ430-RF2500.

Composition matérielle de la plateforme eZ430-RF2500 :

- ✓ Une interface USB de programmation et de débogage ne nécessitant aucune installation de pilote.
- ✓ 18 pins accessibles
- ✓ Une antenne de la puce
- ✓ Le microcontrôleur MSP430
- ✓ 2 Timers : Timer A et Timer B
- ✓ Le transmetteur sans fil CC2500
- ✓ 2 pins d'entrée/sortie connectés aux LEDs rouge et verte pour un feedback visuel

7- Les standards de communication pour les RCSFs :

Il y a une multitude de normes sans fil comme le Wi-Fi(le standard IEEE 802.11) et le WiMax (le standard IEEE 802.16) qui s'adresse au transport des données à haut débit.

Certains dispositifs comme les capteurs n'ont pas besoin d'une largeur de bande très élevée, mais plutôt d'un temps de latence faible ainsi qu'une consommation d'énergie très basse, pour une longue durée de vie sur batterie et un grand nombre de dispositifs. D'où la nécessité de concevoir d'autres normes sans fil capables de répondre à ces exigences.

Parmi les standards les plus aptes à être exploités dans les réseaux de capteurs sans fil se retrouvent les standards *Bluetooth* et *ZigBee*, présentés ci-après [15] [18].

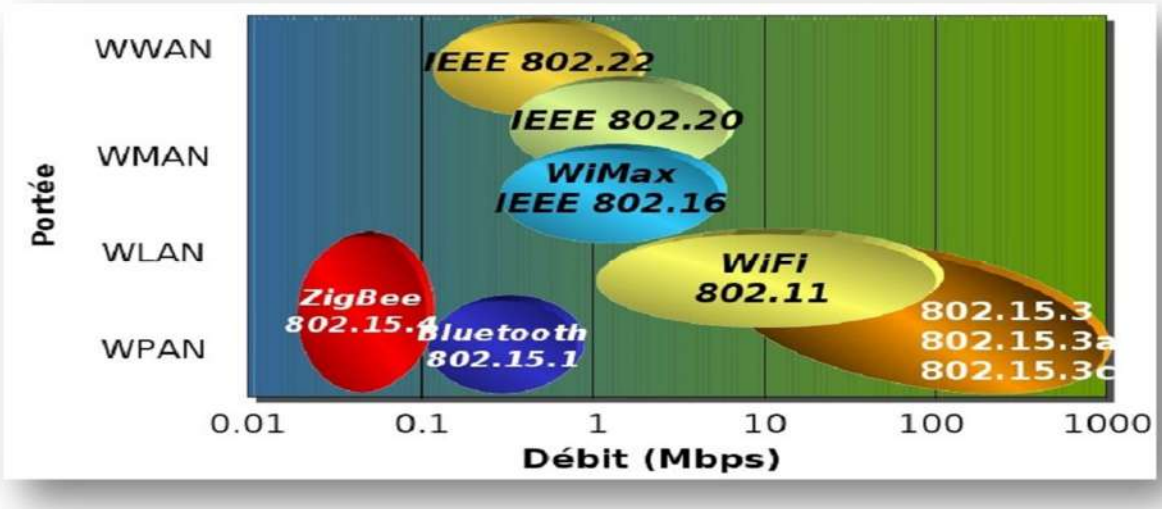


Figure I-11 : Les différentes normes sans fil. [06].

7-1 Bluetooth :

Le Bluetooth [08] est un standard de communication sans fil utilisant une technologie radio courte distance destinée à simplifier les connexions entre les appareils électroniques. Il représente l'équivalent de l'USB mais sans fil et sert donc à relier des périphériques avec un

ordinateur ou d'autres périphériques (imprimantes, scanners, claviers, souris, téléphones portables, PDA, …).

Le succès de la technologie Bluetooth l'a amené à être utilisée dans le cadre des LAN (Local Area Network) sans fil. L'avantage du Bluetooth par rapport au Wi-Fi, qui offre apparemment de meilleures performances, se trouve au niveau de la consommation : en effet, la connexion sans fil est surtout utilisée pour les appareils mobiles, et donc n'étant pas directement reliés au secteur.

Par conséquent, la technologie Bluetooth a une plus faible consommation que le Wi-Fi. Le second avantage est le prix attractif de cette technologie grâce à son faible coût de réalisation des puces. Cependant, cette faible consommation d'énergie ne répond pas encore à des exigences des capteurs. En plus de cette consommation d'énergie, la technologie Bluetooth soufre d'un problème de passage à l'échelle.

7- 2- ZigBee :

Beaucoup moins connue que Bluetooth, ZigBee est le nom d'une suite de protocoles de hauts niveaux basée sur le standard IEEE 802.15 [16], [14]. Pour les réseaux personnels sans fil (Wireless Personal Area Network : WPAN).

La technologie ZigBee a pour but la communication à courte distance telle que le propose déjà la technologie Bluetooth, tout en étant moins chère et plus simple. Les nœuds sont conçus pour fonctionner plusieurs mois (Jusqu'à deux ans) en autonomie complète grâce à une simple pile de 1,5V. Sa très faible consommation électrique et ses coûts de production très bas en font une candidate idéale pour les RCSFs.

Le petit débit qu'il offre (250Kbps théorique contre 1Mbps pour Bluetooth), n'est pas vraiment un handicap pour un réseau de capteurs puisque la taille des paquets échangés n'est pas vraiment importante

Pour montrer l'intérêt du ZigBee dans son aspect économique du point de vue énergétique, voici un tableau comparatif chiffré entre différents normes de communication sans fil.

	ZigBee	GSM/GPRS	Wi Fi	Bluetooth
Ressources systèmes	4 Ko – 32 Ko	+ 16 Mo	+ 1 Mo	+ 250 Ko
Durée de vie de la batterie	100 à + 1000 jours	1 à 7 jours	0,5 à 5 jours	1 à 7 jours
Taille du réseau	Illimité (2^{64})	1	32	7
Bande passante	20 à 250 Ko/s	64 à > 128 Ko/s	> 11000 Ko/s	720 Ko/s
Portée	1 à > 100 mètres	> 1000 mètres	1 à 100 mètres	1 à > 10 mètres

Tableau I-1 : Tableau comparatif chiffré entre différents protocoles de communication sans fil. [06].

Au vu de ce tableau on comprend qu'on retrouve naturellement ce protocole dans des environnements embarqués où la consommation énergétique est primordiale et où le nombre de membres du réseau est important.

En 2005, une estimation du coût unitaire pour un nœud ZigBee a révélé un prix de 1,10 $ par unité dans le cadre d'une production en très grand nombre. Il faut ajouter le prix du microcontrôleur qui commande le circuit, ce qui augmente légèrement le prix. À titre de comparaison, la technologie Bluetooth, lancée en 1998, annonçait à cette époque un prix unitaire de production compris entre 4 et 6 $, maintenant redescendu à moins de 3 $.

8- Le système d'exploitation pour RCSF TinyOS :

TinyOS est un système d'exploitation open-source conçu pour des réseaux de capteurs sans fil. Il respecte une architecture basée sur une association de composants, réduisant la taille du code nécessaire à sa mise en place. Cela s'inscrit dans le respect des contraintes de mémoires qu'observent les réseaux de capteurs [07].

Pour autant, la bibliothèque de composant de TinyOS est particulièrement complète puisqu'on y retrouve des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données. L'ensemble de ces composants peut être utilisé tel quel, il peut aussi être adapté à une application précise.

En s'appuyant sur un fonctionnement événementiel, TinyOS propose à l'utilisateur une gestion très précise de la consommation du capteur et permet de mieux s'adapter à la nature aléatoire de la communication sans fil entre interfaces physiques.

Disponibilité et sources :

TinyOS est un système principalement développé et soutenu par l'université américaine de Berkeley, qui le propose en téléchargement sous la licence BSD et en assure le suivi. Ainsi, l'ensemble des sources sont disponibles pour de nombreuses cibles matérielles [03].

Event-driven :

Le fonctionnement d'un système basé sur TinyOS s'appuie sur la gestion des évènements se produisant. Ainsi, l'activation de tâches, leur interruption ou encore la mise en veille du capteur s'effectue à l'apparition d'évènements, ceux-ci ayant la plus forte priorité. Ce fonctionnement évènementiel (event-driven) s'oppose au fonctionnement dit temporel (time-driven) où les actions du système sont gérées par une horloge donnée.

Consommation :

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

9- Pile protocolaire :

La pile protocolaire utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs du réseau est illustrée par la Figure I-10 [03].

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.

De plus, cette pile possède trois plans (niveaux) de gestion, le plan de gestion des tâches qui permet de bien affecter les tâches aux nœuds capteurs, le plan de gestion de mobilité qui permet de garder une image sur la localisation des nœuds pendant la phase de routage et le plan de gestion de l'énergie qui permet de conserver le maximum d'énergie.

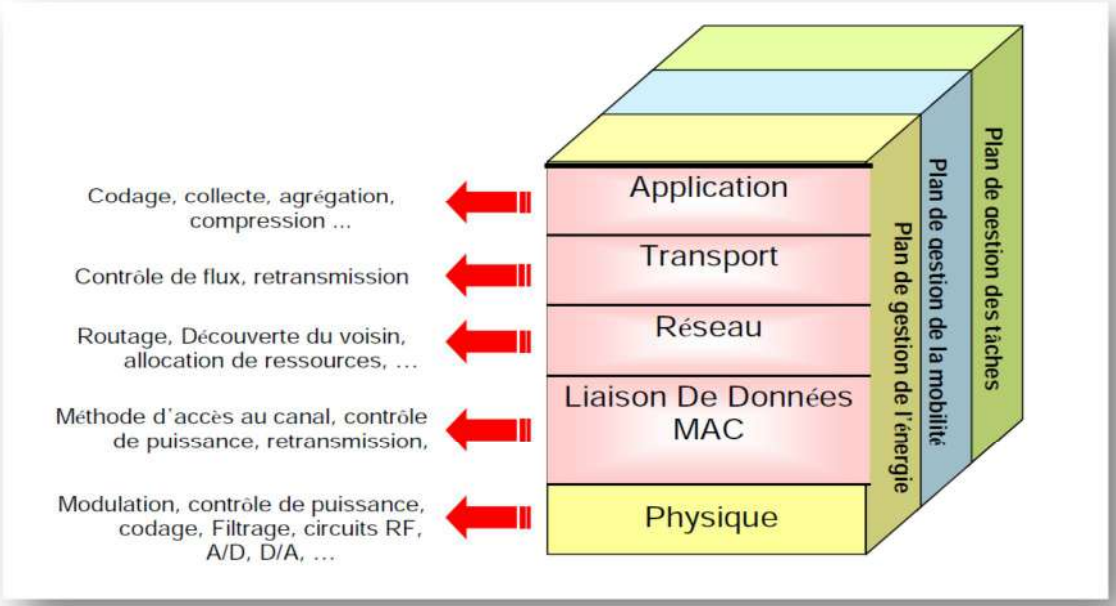


Figure I-12 : Pile protocolaire des RCSF [15].

9-1 - Couche physique.
9-2 - Couche liaison de données.
9-3 - Couche réseau.
9-4 - La couche transport.
9-5 - La couche application.

9-6 - 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) [15]. 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 conséquence il ne va pas participer au routage des données, et l'énergie restante va être utilisée pour capter et détecter des tâches.

9-7 - 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 connaitre 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.

9-8 - La gestion des tâches :

La couche de gestion des tâches assure la coopération des efforts des nœuds capteurs, elle ordonnance les événements captés, et les tâches détectées dans une zone de capture spécifique. Par conséquent, les nœuds capteurs qui appartiennent à la même zone de capture ne sont pas obligés d'effectuer les tâches de capture en même temps.

Selon leur niveau d'énergie, quelques nœuds capteurs peuvent accomplir des tâches de capture mieux que d'autres.

10- Connectivité du RCSF :

Dans un réseau de capteurs, le principal défi est de réaliser un ensemble de tâches tout en dépensant le moins possible d'énergie. Par exemple, lorsque l'ensemble des capteurs transmet simultanément de l'information, on peut assister à l'apparition d'interférences ou de collisions engendrant une perte significative de l'information transmise. Une mise en veille de certains capteurs devient nécessaire.

Ceci conduit au problème de la couverture complète de la zone de déploiement, et cela d'une manière connexe, en dépit de capteurs inactifs. Une extension des solutions basées sur la construction de couvertures logiques (overlays) sensibles à la dégradation énergétique semble prometteuse.

Un réseau de capteurs est dit connecté si et seulement s'il existe au moins une route entre chaque paire de nœuds**.** La connectivité dépend essentiellement de l'existence des routes. Elle est affectée par les changements de topologie dus à la mobilité, la défaillance des nœuds, les attaques, etc. Ce qui a pour conséquences : la perte de liens, l'isolement des nœuds, le partitionnement du réseau, la mises à jours des routes et le routage, . . . etc.

Un graphe G est dit k-connecté, s'il y a au moins k disjoint chemins entre deux nœuds quelconques v, u Є *V*. La connectivité est une mesure de tolérance aux fautes ou de diversité de chemin dans le réseau [14]. Le 1-connectivité est une condition fondamentale pour que le réseau soit opérationnel. En effet la connectivité d'un réseau s'exprime de la façon suivante :

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

Où :

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

11- La localisation dans les RCSFs :

Dans cette phase les capteurs communiquent entre eux et collectent différents indicateurs de qualité des communications radios. Le hardware radio peut rapporter diverses informations sur le signal radio entre deux nœuds.

En effet le simple fait qu'ils communiquent entre eux nous indique qu'ils sont à portée radio l'un de l'autre. De plus le hardware radio des capteurs peut nous rapporter diverses caractéristiques à propos du signal radio entre les deux nœuds, à partir desquelles les distances séparant les nœuds peuvent être estimées.

L'estimation se fait en fonction des propriétés du signal. Le temps de propagation, l'atténuation ou la forme sont évaluées au niveau du nœud pour déduire cette distance [VAN 07].

Il existe deux grandes familles d'estimation des distances entre les nœuds capteurs du réseau : [26]

- Estimation des distances à partir des liens de communications.
- Calcul des distances manquantes.

En **annexe** vous trouverez une explication détaillée sur l'estimation des distances entre les nœuds capteurs du réseau.

12- Les applications des RCSF :

Le déploiement rapide des RCSFs autonomes a faible prix, même sur une très grande échelle géographique, a été la source d'émergence de plusieurs applications différentes en termes des besoins et des caractéristiques. On cite ci-dessous les principaux domaines d'application des RCSFs.

12-1 Contrôle de l'environnement :

Dans ce domaine, les capteurs peuvent être exploités pour détecter les catastrophes naturelles (feux de forêts, tremblements de terre, …), traquer les mouvements des animaux et surveiller les conditions d'environnement qui affectent les récoltes, les stocks et tout autre système d'agriculture

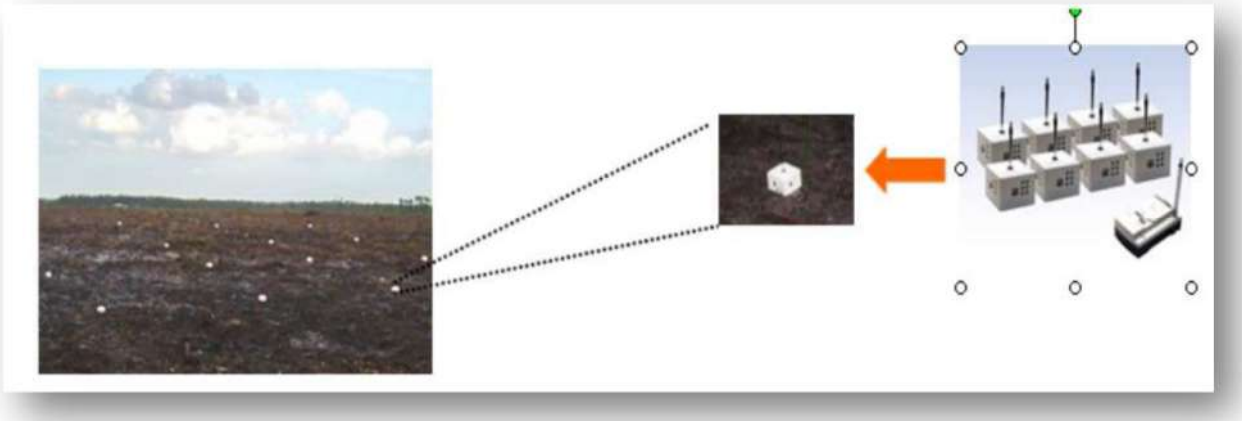


Figure I-13 : Contrôle de l'environnement [15].

12-2 Militaire :

Pour les services de sécurité, la détection de dangers chimiques, etc. ...
Par exemple :

- La surveillance des munitions et des équipements militaires.
- L'évaluation des dommages.
- La connaissance de la position de ses propres soldats.
- Repérage des cibles



Figure I-14 : Un service militaire utilisant les RCSF [22].

12-3 Santé :

Cette technologie consiste en la surveillance de la température, la fréquence cardiaque, l'oxygénation du sang et le pouls du patient,…etc.

• repérage et surveillance des médecins et des patients dans les hôpitaux;

• télésurveillance des données physiologiques humaines.

Par exemple :

On peut placer sur le corps d'un patient des capteurs qui surveille constamment sa température, sa fréquence cardiaque, l'oxygénation du sang et son pouls.

Un émetteur-récepteur transmet les données à une station de base branchée à un ordinateur personnel ou poste des soins infirmier ou même à un assistant numérique.

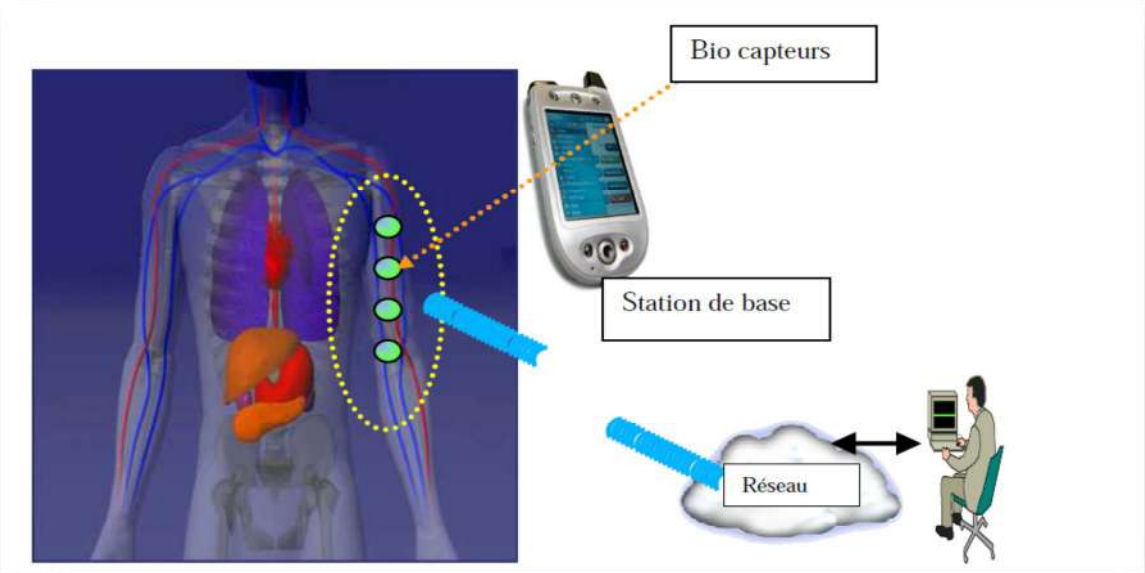


Figure I-15 : Application des RCSF dans le domaine de la médecine [22].

12-4 Applications industrielles :

Pour gérer la circulation, la direction d'un objet, la lumière, etc.

Par exemple *:*

Contrôle de la pollution : On pourrait disperser des capteurs au-dessus d'un emplacement industriel pour détecter et contrôler des fuites de gaz ou de produits chimiques. Ces applications permettraient de donner l'alerte en un temps record et de pouvoir suivre l'évolution de la catastrophe.

12-5 La sécurité des infrastructures:

Les RCSF est un candidat prometteur pour assurer la sécurité des bâtis stratégiques contre toute attaque à caractère terroriste. En effet, un réseau de cameras vidéo, capteur acoustiques ou autres types de capteurs peuvent être déployés facilement autour de ces bâtiments pour détecter toute intrusion en temps record et avec une précision imbattable.

Le grand nombre de capteurs réduit énormément les fausses alertes grâce à une fusion d'informations; les nouveaux capteurs peuvent également détecter les attaques d'ordre biologique, chimique ou nucléaire [18].

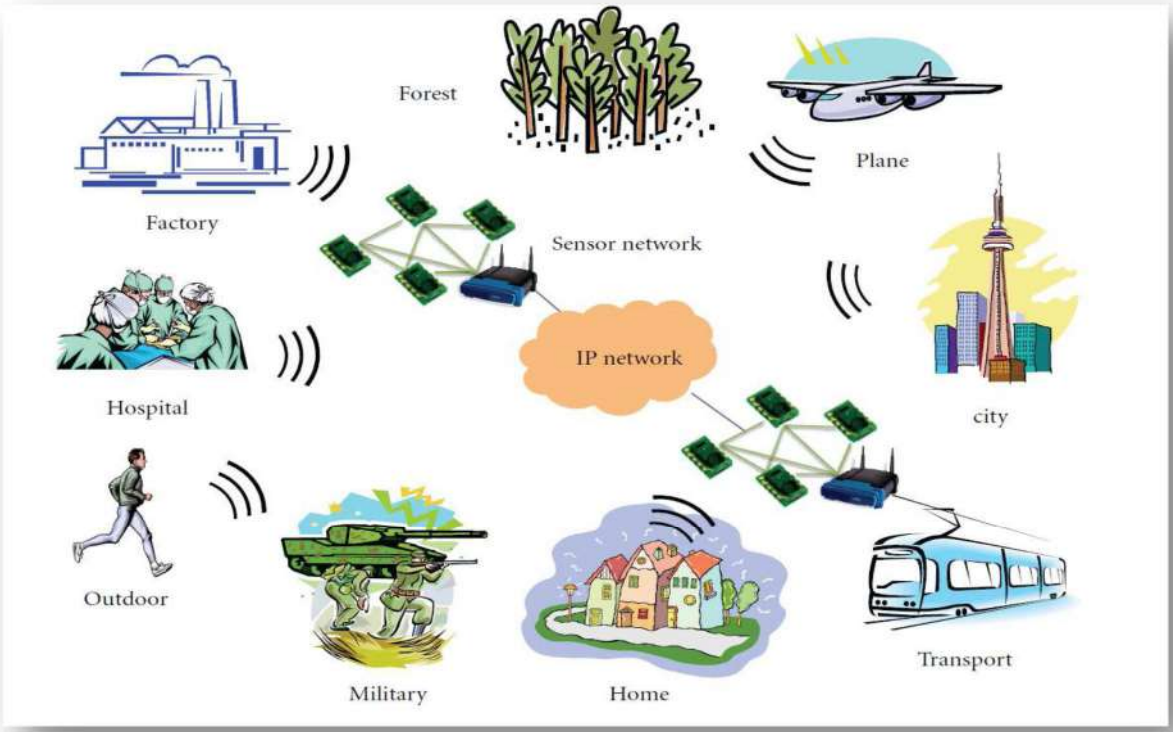


Figure I-16 : Quelques domaines d'application pour les RCSF [22].

13- Classes d'applications des RCSF *[22]*:

13-1 Applications orientées temps (time driven):

Cette classe représente les applications où l'acquisition et la transmission des données capturées sont liées au temps : instant précis, période d'acquisition [18]. Cette période d'acquisition peut être plus au moins longue selon l'application (de quelques secondes jusqu'à quelques heures voire des jours).

Ainsi, la quantité de données échangées dans le réseau dépend de la périodicité des mesures à effectuer sur l'environnement local. La collecte de données environnementales peut représenter un bon exemple de cette classe d'application dans des domaines variés : agriculture, expérimentation scientifique, etc.

13-2 Applications orientées événements (event driven):

Dans ce cas, les capteurs envoient leurs données seulement si un événement spécifique se produit. On peut citer l'exemple de surveillance des feux dans les forêts où un capteur envoie des alarmes à la station de base dès que la température dépasse un certain seuil.

Au départ, cette classe d'application était conçue à des fins militaires, comme la surveillance du déplacement d'objets dans le champ de bataille.

Par la suite, cette classe a rapidement trouvé de nouvelles perspectives comme le contrôle industriel, le contrôle médical des patients, la surveillance d'édifices (barrages, ponts, voies de chemins de fer, etc.).

13-3 Applications orientées requêtent :

Dans ce cas, un capteur envoie de l'information uniquement suite à une demande explicite de la station de base. Cette classe d'application est destinée aux applications adaptées à l'utilisateur.

Ce dernier peut requérir des informations à partir de certaines régions dans le réseau ou interroger les capteurs pour acquérir des mesures d'intérêts. Dans ce cas, des connaissances sur la topologie du réseau et l'emplacement des capteurs sont nécessaires.

13-4 Applications hybrides :

Ce type d'application met en œuvre les trois modes de fonctionnement décrits précédemment. Par exemple, dans un réseau conçu pour le suivi d'objets, le réseau peut combiner entre un réseau de surveillance (time driven) et un réseau de collecte de données par événements (event driven) [18].

Par exemple, pendant les longues périodes d'inactivité des capteurs et lorsque aucun objet n'est présent, le réseau peut assurer une fonction de surveillance.

14- Problématiques :

Pour réaliser des systèmes capables de fournir de telles applications, un certain nombre d'obstacles doivent être levés. Les plus importants sont :

- ***La topologie dynamique :*** La mobilité des nœuds, la possibilité d'étendre le réseau par ajout de nouveaux nœuds et la suppression de nœuds défaillants changent fréquemment la topologie des réseaux. Ceci nécessite une maintenance permanente pour assurer le bon fonctionnement des réseaux de capteurs.
- ***L'environnement :*** Les nœuds capteurs doivent être conçus d'une manière à résister aux différentes et sévères conditions de l'environnement : forte chaleur, pluie,...etc.
- ***La consommation d'énergie :*** Un capteur, de par sa taille, est limité en énergie. Dans la plupart des cas, le remplacement de la batterie est impossible, ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend de la durée de vie de sa batterie. Les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens d'optimiser la consommation d'énergie par les nœuds capteurs.
- ***Le routage*** : Pour obtenir une consommation énergétique minimale.

Tous ces thèmes sont des domaines de recherche actifs. Dans la suite, nous nous intéresserons plus particulièrement au protocole de routage de données LEACH et les paramètres influençant sur ce dernier.

15- Conclusion :

La flexibilité, le prix réduit et les caractéristiques rapides de déploiement des réseaux de capteurs offrent des possibilités infinies de développement dans tous les domaines d'application. Ceci nous permet de penser que les réseaux de capteurs feront bientôt partie intégrante de nos vies et satisferont sûrement les plus grands projets.

Cependant, la réalisation des réseaux de capteurs doit satisfaire quelques contraintes parmi lesquelles on peut citer : la consommation d'énergie, le changement de topologie, la densité importante des nœuds réseaux... Ces contraintes exigent qu'une auto-organisation des réseaux de capteurs soit mise au point.

Nous nous intéressons, Dans le deuxième chapitre de ce projet, à la présentation des différents principes et objectifs de l'auto-organisation, plus particulièrement au protocole d'auto organisation et de routage de données LEACH et les paramètres influençant sur ce dernier.

Chapitre 2

le protocol de routage

LEACH

CHAPITRE II

LE PROTOCOLE DE ROUTAGE LEACH

1- Introduction

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

Deux grandes approches sont dérivées de ce type de protocoles à savoir : chaîne-based approach (approche chaînée) et cluster-based approach (approche à grappe). LEACH est considéré comme étant le premier protocole de routage hiérarchique basé sur la seconde approche.

Il est aussi l'un des algorithmes de routage hiérarchique le plus populaire pour les réseaux de capteurs. L'idée est de former des clusters de nœuds de capteurs basés sur les zones où il y a un fort signal reçu, puis utiliser des clusters-heads locaux comme passerelle pour atteindre la destination [1].

Dans ce chapitre, nous expliquerons l'architecture et l'algorithme détaillé du protocole LEACH et nous discuterons les avantages et inconvénients de ce dernier.

2- Caractéristique d'un protocole hiérarchique :

Un protocole de routage hiérarchique doit spécifier plusieurs tâches que nous pouvons classer selon

2.1- L'algorithme de Clustring utilisé :

Plusieurs algorithmes sont proposés dans la littérature, un classement en trois types de ces algorithmes est proposé en se basant sur le type d'algorithme de contrôle exécuté :

- **Centralisé** :

L'algorithme est exécuté sur le nœud qui a une vue globale du réseau, généralement, au niveau du puits.

Ce type d'algorithme est peu utilisé à cause de l'overhead généré suite aux transmissions exécutées pour pouvoir garder la vue globale du réseau et la dynamique de la topologie qui fait que cette vue soit très variable.

La vue obtenue par un nœud peut ne plus être valide à l' instant où le nœud la récupère à cause des pannes et des imprévisibles déconnexions.

- **Distribué** :

L'algorithme est exécuté en coopération au niveau de chaque nœud du réseau. La synchronisation des taches de contrôle est obtenue en échangeant des messages de contrôle.

Ce type d'algorithmes minimise la communication relative à la sauvegarde de la vue globale du réseau, car chaque nœud décide, indépendamment des autres de son rôle et fait connaitre sa décision par l'envoi de message. Cependant, l'efficacité de ces algorithmes dépend de la taille et du nombre de ces messages de synchronisation.

- **Géographique** :

L'algorithme de la tache de contrôle à exécuter par un nœud dépend de sa position géographique.

2.2-La réélection des ClusterHeads :

Par sa fonction, le nœud ClusterHead consomme plus d'énergie par rapport aux autres nœud du réseau .le ClusterHead coordonne le fonctionnement des nœuds membres de son cluster et agrège leurs données, de ce fait, il dissipe plus d'énergie créant un déséquilibre de la distribution de l'énergie sur le réseau.

Pour palier à ce problème, une relation de ce rôle de ClusterHead est organisée au sein du cluster ou bien au sein du réseau entier. La rotation effectuée périodiquement ou bien en fonction de la consommation de l'énergie du nœud ClusterHead.

2.3-La nature des clusters générés :

Les algorithmes de Clustring utilisés peuvent générer deux types de cluster : des clusters disjoints et des clusters interconnectés (overlapped).

Dans le premier type, un nœud ne peut appartenir qu'à un seul cluster à la fois (le cas le plus fréquent) ;sauf que pour des applications spécifiques telles que le routage inter-cluster, la localisation et la synchronisation des nœud ; les clusters interconnectés sont utilisés.

Ce type de Clustering permet aux nœuds d'appartenir à un ou plusieurs clusters à la fois.

2.4-La communication intra-cluster :

La communication entre le nœud ClusterHead et l'autre nœud membres de cluster peut se faire, soit en un seul saut soit, en plusieurs sauts. Dans le cas d'un communication direct(en un saut),les paquets de données sont envoyés directement au ClusterHead. Cela suppose que les nœud membres sont capables d'atteindre le CH en utilisant une transmission assez puissante pour une bonne réception de données.

Ce type de communication engendre une consommation importante d'énergie si la distance, entre le CH et les nœuds, est grande. pour réduire la consommation de l'énergie, une communication en plusieurs sauts, de petites distances, est utilisée, dans ce cas chaque membre du cluster envoie ses données au plus proche membre de son cluster jusqu'à l'aboutissement au CH.

Des communications de type « unicast » sont souvent utilisées pour réduire le nombre de collisions. On trouve aussi des techniques employées au niveau MAC pour garantir un accès équitable et sans erreurs, à savoir, CDMA(code division multiple Access) en utilisant un code pour chaque cluster, FDMA (Frequency Division Multiple Access) ou chaque nœud utilise une fréquence spécifique pour l'envoi de données

2.5-La communication inter-cluster :

Les ClusterHeads communiquent avec la (les) station(s) de base soit directement, soit en deux ou plusieurs sauts via des nœuds appelés généralement des « nœuds gateway ».

Ces nœuds peuvent être des CH ou bien des nœuds membres d'un cluster. L'utilisation de la communication en multi-sauts permet de réduire la consommation d'énergie et d'augmenter la scalability du réseau

2.6-Le niveau d'agrégation de données :

Selon le type des capteurs utilisés, l'agrégation de données peut se faire à chaque nœud du réseau ou bien uniquement au niveau des ClusterHeads.

L'agrégation des données permet de réduire la taille des données échangées entre les nœuds, et par conséquence réduire l'énergie dépensée.

Plusieurs techniques d'agrégation sont utilisées à savoir des fonctions élémentaires comme la somme, la moyenne, l'écart type,…..etc .ou bien des fonctions plus complexes spécifiques aux applications utilisées.

3-Architecture de LEACH :

La hiérarchie de regroupement d'adaptation à faible énergie (LEACH) proposé par Heinzelman et al. [1] est un protocole de routage hiérarchique bien connu appliqué dans les RCSF.

LEACH divise le réseau en zones et clusters de façon distribuée, des nœuds CH (Cluster-Head) sont constitués puis utilisés comme relais pour atteindre le puits en optimisant la consommation d'énergie suivant un algorithme qui utilise la rotation randomisée des têtes de groupe (CH) pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds du réseau.

Un nœud décide quel cluster rejoindre en se basant sur la puissance des signaux reçus.

A la formation des groupes comme indique la figure 2.1, tous les nœuds non-CH transmettent leurs données a la tête du groupe. Quand le CH reçoit les données de tout les membres du groupe, il effectue des fonctions de traitement sur les données (agrégation et compression des données), et les transmet à la station de base (BS) selon une communication unicast (à un seul saut).

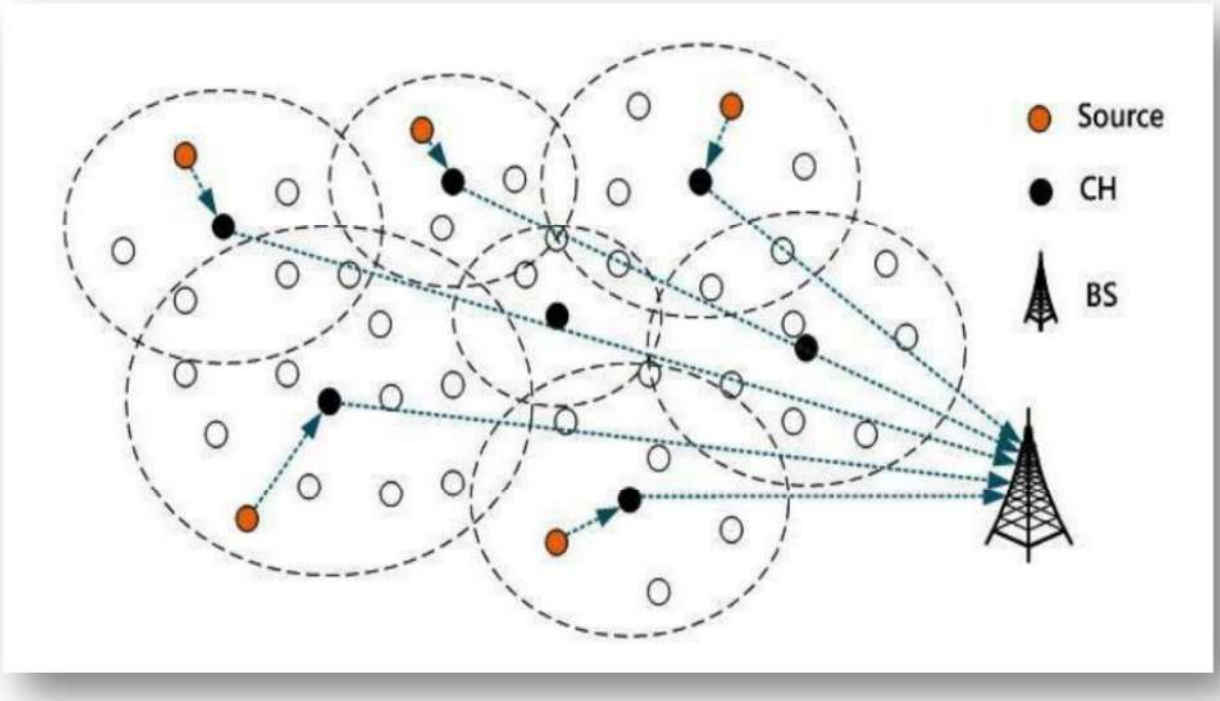


Figure II.1 : Architecture du routage hiérarchique LEACH.

4-Algorithme détaillé de LEACH :

L'algorithme se déroule en rounds (tours) qui ont approximativement le même intervalle de temps déterminé au préalable. Où chaque cycle commence par une phase d'initialisation suivie d'une phase de transmission.

4.1-Phase d'initialisation :

La phase d'initialisation est composée de 3 sous phases : d'annonce, d'organisation des groupes et enfin d'ordonnancement.

4.1.1-Phase d'annonce :

Initialement, lorsque les groupes sont créés, chaque nœud décide ou non de devenir un CH pour le tour courant. Cette décision est basée sur le suggéré pourcentage de CHs pour le réseau et le nombre de fois que le nœud a été un CH jusqu'ici.

Cette décision est faite par le nœud en choisissant un nombre aléatoire entre 0 et 1. Si le nombre est inférieur à un seuil T(n) le nœud devient un CH pour le cycle actuel. Le seuil est défini comme suit :

$$T(n)=\begin{cases}\dfrac{P}{1-P*(r \bmod \frac{1}{P})} & \text{Si } n \in G \\ 0 & \text{Sinon}\end{cases}$$

- p est le pourcentage souhaité de CH c'est-à-dire choisi comme p = 0,05 pour une condition

optimale ;

- r est le tour courant ;
- G est l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été CHs lors des (1/p) tours précédents.

Chaque nœud est donné une probabilité égale de (1/p) de devenir CH afin de partager la charge de l'énergie. Ainsi, lors du commencement d'un tour, chaque nœud a une probabilité égale de devenir un CH.

Les nœuds qui étaient CHs doivent attendre jusqu'à (1/p) tours, donc augmenter la probabilité contribue à augmenter la chance pour les non CH de devenir CH. Les nœuds sont de nouveau admissibles à devenir CHs si et seulement si tous les nœuds ont obtenu une fois la qualité de CH.

Tout nœud après ((1/p)-1) tours sera de nouveau élu CH en supposant que chaque nœud possède et dissipe une quantité égale d'énergie à des fins de transmission.

Chaque nœud qui se sera désigné CH pour le tour courant diffuse un message « d'initialisation » vers le reste des nœuds l'entourant. Lors de cette phase d'initialisation, les CHs utilisent le protocole MAC (Media Access Control) CSMA (Carrier Sense Multiple Access).

En utilisant le même niveau d'énergie, tous les CHs diffusent leur message d'initialisation qui contient l'ID du nœud et un entête distinguable.

Les autres nœuds doivent maintenir leurs récepteurs à l'écoute afin d'entendre les messages diffusés par les CHs, et chacun de ces nœuds décide quel groupe rejoindre pour le tour courant en se basant sur la puissance des messages reçus de la part des CHs.

Plus un nœud est proche du CH, plus le signal reçu sera puissant, indiquant à celui-ci qu'il aura besoin de moins d'énergie pour transmettre ses données vers le CH. Si deux signaux reçus ont la même puissance, alors le CH à rejoindre est choisi aléatoirement.

4.1.2-Phase d'organisation des groupes :

Après que chaque nœud ait choisi quel groupe rejoindre, le CH doit être informé des nœuds composant son groupe. Chaque nœud non-CH transmet une requête de ralliement vers le CH choisi en utilisant également un protocole CSMA MAC.

Ce message ou requête de ralliement se compose de l'ID du nœud, de l'ID du CH et d'un entête. Durant cette phase, tous les CHs doivent maintenir leurs récepteurs allumés.

4.1.3-Phase d'ordonnancement :

Après avoir reçu les requêtes de tous les nœuds l'ayant rejoint, le CH leur alloue chacun un tour dans un ordonnancement TDMA (Time Division Multiple Access) en se basant sur le nombre de nœuds.

Et ce n'est que pendant le temps qui leur est alloué que les nœuds peuvent transmettre leurs données vers le CH.

4.2-Phase de transmission :

Une fois que les groupes se sont organisés et le programme TDMA mis en place, la transmission de données commence avec l'hypothèse que les nœuds ont toujours des données à transmettre, mais ces données ne sont envoyées à la station de base que pendant l'intervalle de temps alloué au nœud.

Ce type de transmission requiert une énergie minimale pour la transmission. Les autres nœuds membres du groupe, dont ce n'est pas le tour, doivent éteindre leurs transmetteurs afin d'éviter la dissipation inutile d'énergie.

Mais le CH doit garder son récepteur allumé durant le tour courant pour recevoir toutes les données envoyées par les nœuds membres, après quoi il exécute les fonctions de traitement du signal afin de former un signal unique à transmettre.

Cette agrégation de données est alors envoyée à destination de la station de base. Le coût en énergie pour le CH est toujours supérieur à celui des membres à cause des différentes actions qu'il doit entreprendre et à cause de l'énergie nécessaire pour transmettre vers la station de base qui se trouve plus loin que la distance qui le sépare des nœuds membres.

Cela donne la phase d'état stable. Après que la transmission des données soit terminée, le prochain tour de sélection des CHs commence pour ce cycle là comme expliqué dans la phase d'initialisation.

4.2.1-Interférences entre groupes :

Dans ce qui précède, nous avons montré comment les nœuds communiquent avec leurs CH et les CHs avec la station de base. Ces communications ayant lieu par signaux radio, les transmissions des nœuds d'un groupe donné peuvent interférer avec celles d'un groupe voisin.

Ainsi, afin de réduire ces interférences, lorsqu'un nœud devient CH, il choisi parmi une liste éparse de codes CDMA (Code Division Multiple Access), celui qu'il désire utiliser et il informe tous les autres nœuds de son groupe de son choix.

Ils utiliseront alors ce code là lors de leurs futures transmissions et le CH filtrera les signaux reçus en utilisant ce même code afin de reconnaître ceux émis par les membres de son groupe.

L'assignement effectif des canaux de communication est une tâche difficile même en la présence d'une supervision centralisée. Et l'utilisation des codes CDMA n'est peut être pas une solution optimale à l'égard de la bande passante mais elle produit une solution pour le problème de l'accès multiple d'une manière distribuée.

5- Simulation De Protocole LEACH :

5.1-La simulation :

Selon Shannon [SHA 89], La simulation est « le processus de modélisation d'un système réel sur lequel on opère des expérimentations afin de comprendre son comportement et/ou d'évaluer plusieurs stratégies opérationnelles sur ce système ».

Cela veut dire qu'une simulation est une représentation fidele d'un système réel avec des hypothèses initiales qui permettent de réduire la complexité de la modélisation et qui la rendent faisable techniquement.

L'une des méthodes d'évaluation des performances d'un système est la simulation par la méthode analytique. Dans ce qui suit, nous présentons puis analysons les résultats des simulations obtenus par ***MATLAB***. En **annexe** vous trouverez le programme détaillée de LEACH utilisé dans cette simulation.

5.2- La modélisation du système :

L'évaluation et le développement de protocole d'auto-organisation LEACH est réalisée sur un réseau de capteurs sans fil de **N** nœuds déployés aléatoirement sur une zone carrée de longueur **L** (surface de déploiement : **L*L**). Ce réseau est caractérisé par :

- **Hétérogène:** un réseau hétérogène est constitué par deux types de nœuds à des caractéristiques techniques semblables [SMA 04].
  - Le 1er type : constitué par **m*n** nœuds appelés nœuds avancés (Advanced ondes).
  - Le 2eme type : constitué par **(1-m)*n** nœuds appelés nœuds normaux.

Avec **n** : Le nombre total des nœuds du réseau ;
m : La fraction (Pourcentage) des nœuds avancés .

L'énergie initiale:

- L'énergie initiale d'un nœud normal est égale à $\mathbf{E_0}$
- L'énergie initiale d'un nœud avancé est égale à $\mathbf{E_0\ (1+a)}$

Avec **a** : Le facteur supplémentaire d'énergie entre un nœud normal et nœud avancé.

- **Non uniforme:**

Les nœuds du réseau sont déployés d'une manière aléatoire sur la zone de captage.

- **Statique:**

les nœuds et la station de base sont immobiles durant toutes les simulations.

Et avec les hypothèses de départ suivantes :

- ✓ a station de base couvre toute la zone de captage.
- ✓ La distance, séparant deux nœuds, peut être calculée selon la formule qui donne la distance entre deux points dans un espace euclidien ou bien selon la force du signal reçu(ou **RSSI**).
- ✓ Les nœuds du réseau ne disposent d'aucun dispositif de géo-localisation.

- ✓ Tous les nœuds sont considérés comme source de données avec un prélèvement et une dissémination périodique.

5.3-Le modèle énergétique :

Un capteur utilise son énergie pour réaliser trois actions principales : l'acquisition, la communication et le traitement des données [02] [29].

- Acquisition : L'énergie consommée pour effectuer l'acquisition n'est pas très importante. Néanmoins, elle varie en fonction du phénomène et du type de surveillance effectuée.
- Communication : Les communications consomment beaucoup plus d'énergie que les autres taches. Elles couvrent les communications en émission et en réception. La figure II-2- présente le modèle d'antenne et les règles de consommation d'énergie associées utilisé par le protocole LEACH [22].

Pour transmettre un message de *k bits* sur une distance de *d mètres*, l'émetteur consomme :

$$\mathbf{ETX(k,d)=}\begin{cases}\mathbf{Eelec * k + \varepsilon_{fs} * k * d^2} & \textbf{si } \mathbf{d <= d_0}\\ \mathbf{Eelec * k + \varepsilon_{tr} * k * d^4} & \textbf{si non}\end{cases}$$

Pour recevoir un message de k bits, le récepteur consomme :

- L'énergie consommée pour recevoir un message de taille *k (bits)* est :

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

Avec :

$\mathbf{E_{elec}}$: C'est la consommation d'énergie du circuit de transmission et de réception d'un bit.

k : taille d'un message.

d : Distance entre l'émetteur et le récepteur.

$\boldsymbol{\varepsilon_{fs}}$: est le facteur d'amplification du signal pour une distance d'émission inferieur ou égale à la distance seuil $\mathbf{d_0}$ et $\boldsymbol{\varepsilon_{tr}}$: est le facteur d'amplification du signal pour une distance d'émission supérieure ou égale à la distance seuil $\boldsymbol{d_0}=\sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{tr}}}$.

(Cette distance seuil d_0 est nommée encore dans quelques références $d_{\text{cross over}}$ (Cross over distance))

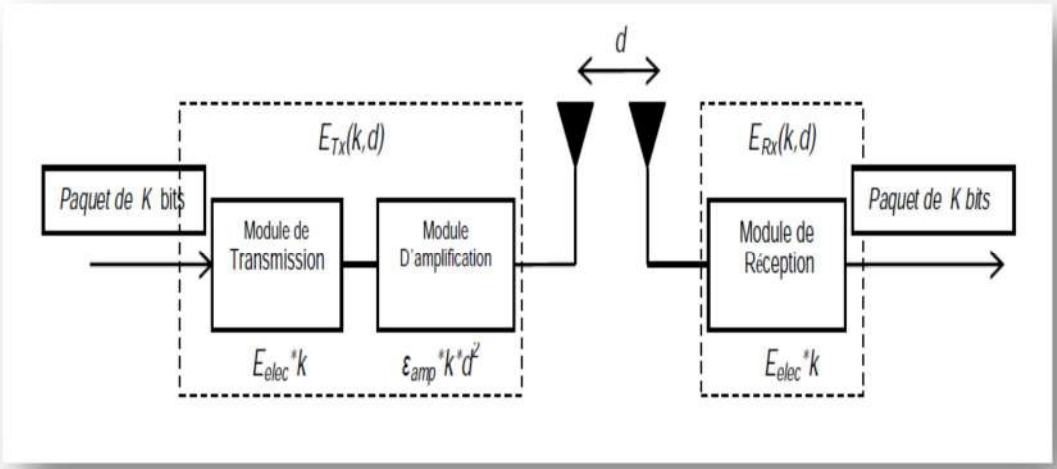


Figure II-2 : Modèle de consommation d'énergie pour la communication [02].

6-Avantages et inconvénients du protocole LEACH :

Bien que LEACH économise la consommation d'énergie comparé à la transmission directe, grâce à l'agrégation de données, un nombre d'inconvénients restent plus ou moins apparents.

Dans ce qui suit, nous citerons quelques avantages et inconvénients du protocole LEACH.

6.1-Avantages :

Parmi les avantages du protocole LEACH [4, 5] :

- Il fournit la scalabilité (évolutivité) dans le réseau en limitant la plupart des communications à l'intérieur des différents groupes (clusters) du réseau.
- Les cluster-heads (CH) agrègent ou fusionnent les informations rassemblées par les nœuds capteurs, ce qui aide à limiter le trafic produit dans le réseau. Ainsi, un réseau à grande échelle sans surcharge de trafic peut être déployé et une meilleure topologie préservant l'énergie peut être réalisée en comparaison à la topologie plate.
- La propriété de distributivité du rôle de CH entre les membres d'un cluster.
- Il ne requiert pas d'information sur la localisation des nœuds capteurs dans le réseau afin de former les groupes.

6.2-Inconvénients :

Le protocole LEACH présente les inconvénients suivants [6, 7] :

- Il s'appuie significativement sur les CHs plutôt que sur les nœuds membres du cluster pour communiquer avec la station de base. De ce fait, il encourt des problèmes de robustesse comme la défaillance des CHs.

- Les CHs ne sont pas uniformément distribués dans le cluster, ce qui signifie que les CHs peuvent se situer sur les bords du cluster. Par conséquent, certains nœuds n'auront pas de CH dans leurs voisinages.
- Il n'y a pas de communication intergroupe dans le réseau car les CHs communiquent directement avec la station de base. Ce processus nécessite une grande gamme de puissance de transmission dans le réseau. C'est pour cela que LEACH n'est pas le mieux adapté pour les réseaux de grande envergure qui requièrent une communication à un seul saut avec la station de base.
- Les CHs les plus éloignés de la station de base meurent rapidement par rapport à ceux qui sont proches de la station.
- On pourra ne pas avoir des CH durant un round si les nombres aléatoires générés par tous les nœuds du réseau sont supérieurs à la probabilité T(n).

7-Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le protocole de routage hiérarchique LEACH dont l'objectif principal est le prolongement de la durée de vie du réseau ainsi que la gestion efficace de la consommation énergétique.

Dans le chapitre suivant on réalise une simulation d'un réseau de capteur sans fil basé sur les nœuds capteurs MSP430 adoptant le protocole LEACH.

Chapitre 3

Evaluation du protocole LEACH avec MSP430

CHAPITRE III
Evaluation du protocole LEACH avec MSP430

1-Introduction :

Pour confirmer ce qui suit, un réseau de capteur sans fil à base des nœuds capteurs MSP 430 sera réalisé et adoptant le protocole LEACH afin d'analyser et interpréter les résultats obtenus et voir la réaction et l'influence des paramètres du protocole par les caractéristiques des signaux radio du nœud utilisé sur la stabilité et la durée de vie du réseau.

2-Présentation du matériel :

2-1- L'outil de développement eZ430-RF2500 :

L'eZ430-RF2500 est un outil de développement complet avec une interface USB permettant de programmer le microcontrôleur MSP430 ainsi que l'émetteur-récepteur sans fil CC2500. La carte électronique est équipée en plus du MSP430 qui peut fonctionner à 16MHz et du CC2500 de 18 E/S configurables, deux LEDs, un bouton poussoir et une antenne.

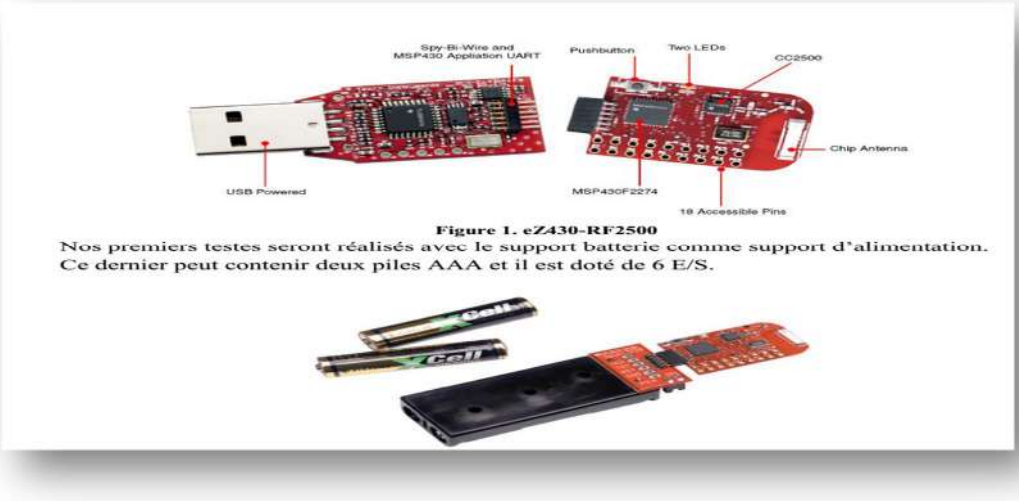


Figure 1. eZ430-RF2500

Nos premiers testes seront réalisés avec le support batterie comme support d'alimentation. Ce dernier peut contenir deux piles AAA et il est doté de 6 E/S.

Figure III-1: eZ430-RF2500.

2-3- Expérimentation :

Dans cette section nous présentons les scénarios des expérimentations ainsi que les conditions dans lesquelles elles ont été effectuées. Elles ont été réalisées grâce à des capteurs MSP430 de Texas instruments.

L'objectif de ces expérimentations est d'étudier l'influence des paramètres du protocole par les caractéristiques des signaux radio du nœud utilisé sur la stabilité et la durée de vie du réseau et exploiter les résultats obtenus pour savoir les domaines d'application adéquate.

2-4- Matériel:

L'ensemble des simulations ont été faite en utilisant les paramètres des capteurs MSP430 de Texas instrument fonctionnant dans la bande de fréquences ISM (industriel, scientifique, médical).

Cette fréquence, peu utilisée par le grand public, permet d'éviter au maximum les interférences dues aux signaux WIFI ou GSM. Le kit utilisé est un kit de développement sans fil eZ430-RF2500 est de la taille d'une clé USB permet d'envoyer et de recevoir des données du PC vers l'application MSP430, est un outil de développement complet pour les microcontrôleurs MSP430 de Texas Instrument, il comprend un module de programmation et débogage avec port USB pour communiquer avec un ordinateur hôte et deux cartes de circuits imprimés contenant chacune un microcontrôleur MSP430F2274 et un transmetteur RF CC2500 à faible courant opérant dans la bande de fréquences libres ISM 2.4 GHz.

Le module de programmation est alimenté à partir du port USB, ainsi que l'une des cartes cibles, et la deuxième carte cible est alimentée par batterie ou toute autre source à faible puissance.

L'antenne utilisée est intégrée au circuit imprimé (antenne PCB) et possède, en théorie, un rayonnement isotrope (les propriétés physiques du rayonnement de l'antenne sont identiques quelque soit la direction).

Le kit se sert de l'environnement de développement intégré IAR Embedded Workbench (Integrated Development Environment IDE) ou CCS (Code Composer Studio) qui s'exécutent sur l'ordinateur-hôte et communique avec le module de programmation pour écrire, télécharger, et debugger une application. Le code en langage C est programmé, compilé puis chargé dans la ROM du micro contrôleur MSP430-F2274 du capteur par l'intermédiaire du programmateur eZ430.

En plus d'IAR, le logiciel venant avec le kit comprend aussi la pile logicielle de communication SimpliciTI qui permet de configurer des réseaux de communication à faible consommation d'énergie. Les données envoyées par les capteurs (nœuds) sont récupérées par la station de base (sink) branché au pc via le port série USB ce qui va permettre de les stocker et de les traiter.

3- L'algorithme d'auto-organisation LEACH :

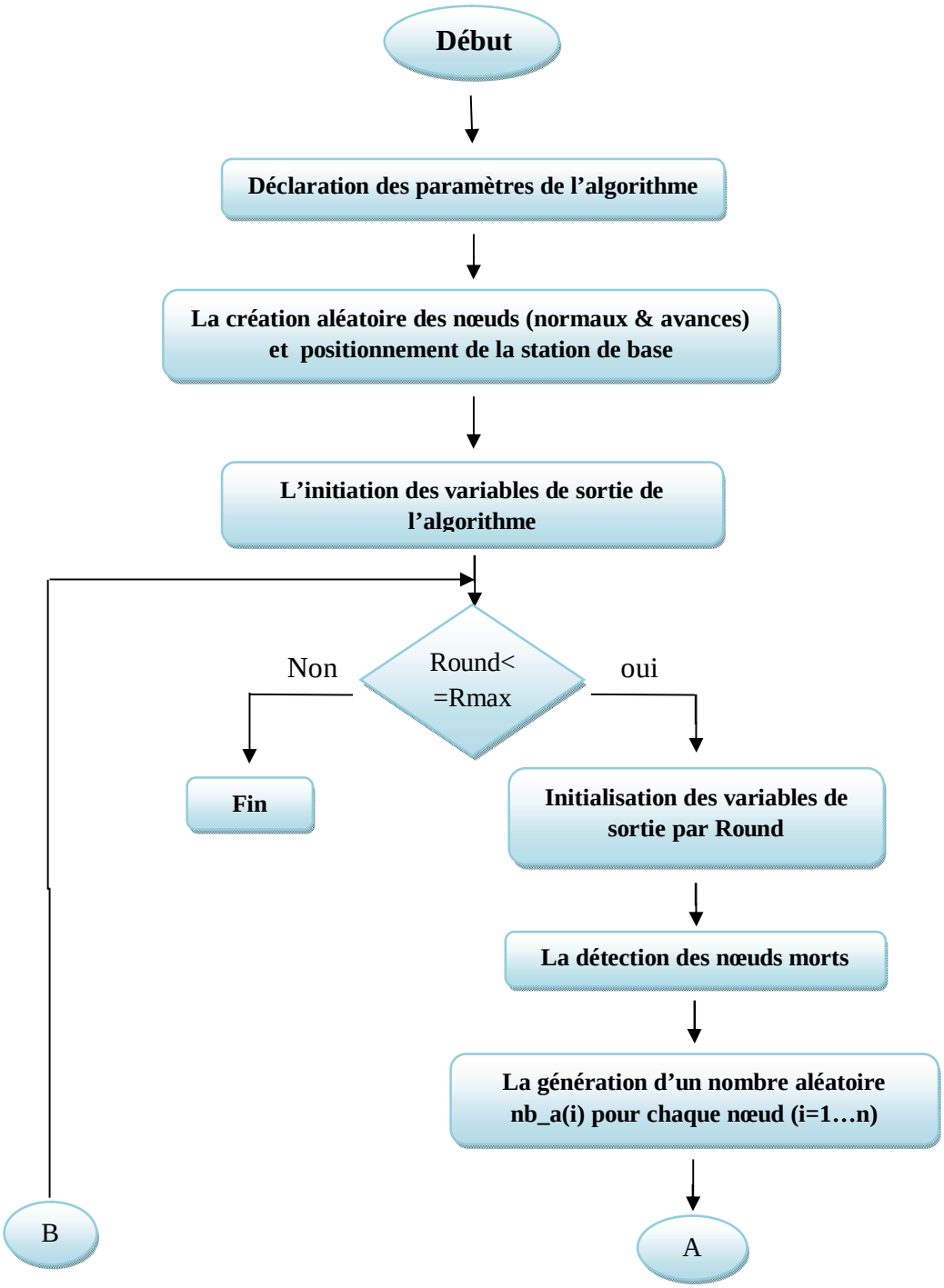
Paramètres d'algorithme:

- *Zone de captage* : La surface de déploiement des nœuds capteurs.
- Nombre total de nœuds (nœuds normaux et nœuds avancés).
- L'énergie initiale des nœuds, et position de la station de base.
- Les facteurs d'amplification du signal pour l'émission.
- Eelec: La consommation d'énergie par le circuit électrique / bit.
- EDA : C'est l'énergie consommée pour l'agrégation de données / bit.
- Probabilité d'élection des CHs.

Les Variables de sortie de l'algorithme :

- La période de stabilité du réseau.
- Nombre de nœuds morts par tour, et par types de nœuds.
- Nombre de messages réceptionnés par la station de base par tour.
- Nombre de messages réceptionnés par les CHs par tour.

4- L'organigramme De Protocole LEACH :



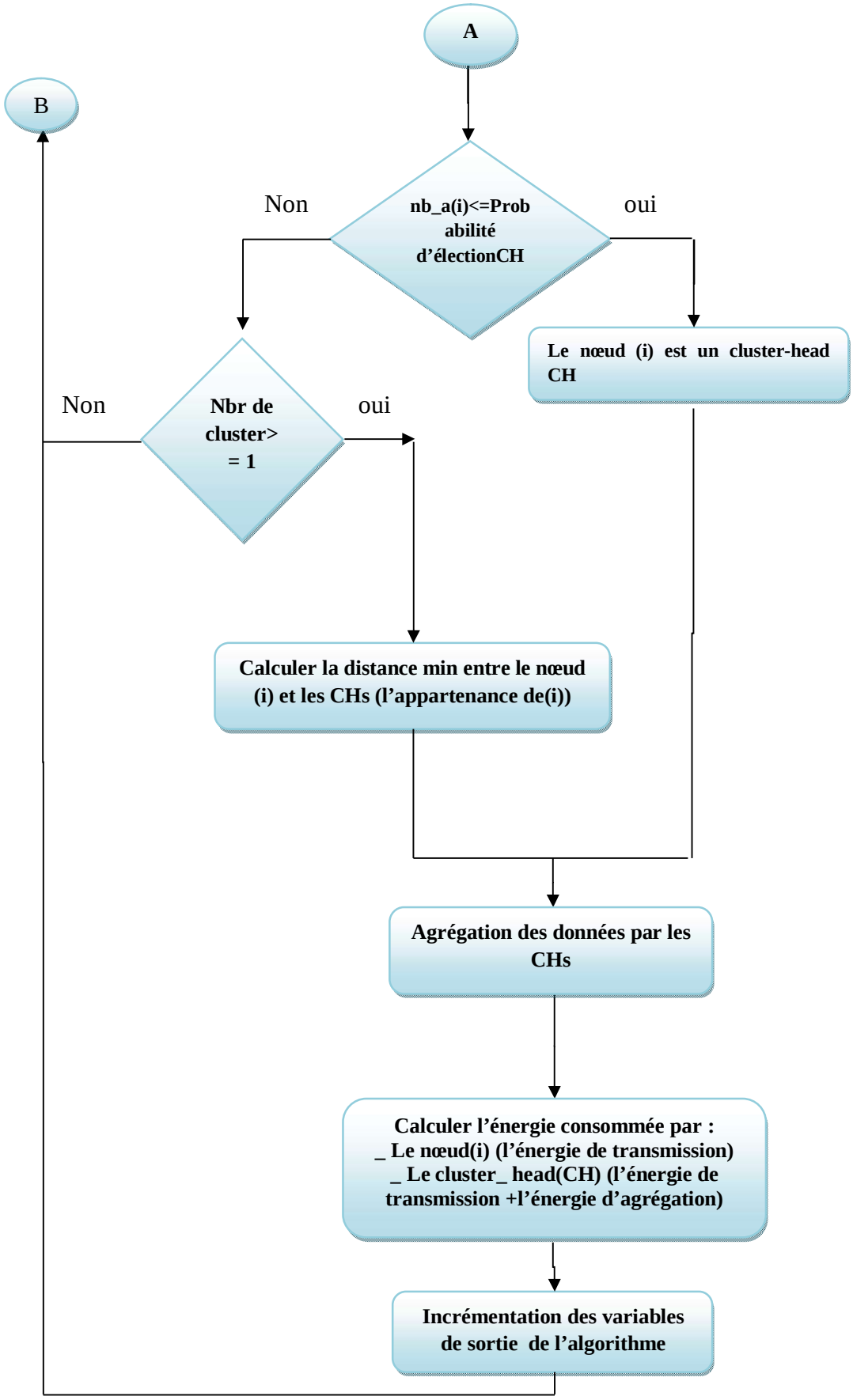


Figure III-2 : L'organigramme De Protocole LEACH.

5-Métriques utilisées :

Pour analyser les performances de protocole d'auto-organisation LEACH, nous avons opté pour les métriques suivantes :

✓ *La durée de vie de réseau [13] :*

Le problème de conservation d'énergie et de prolongement de la durée de vie dans les réseaux de capteurs tout en assurant une couverture entière de la zone d'intérêt est principalement contraint au taux de capteurs vivants dans le réseau.

Dans la plupart des applications, la durée de vie du réseau suit la métrique LND (Last Node Dies) c. à. d. Le temps qui s'écoule jusqu'à la mort du dernier nœud du réseau.

Cependant, cette métrique ne devrait pas être utilisée dans certaines applications critiques telles que les applications de détection et de surveillance d'intrusion, dans lesquelles le taux de couverture de la zone d'intérêt devrait être assez élevé.

Ainsi, pour que le réseau accomplisse ses missions pour lesquelles il a été déployé avec succès, nous exigeons souvent que le taux de capteurs vivants soit supérieur à une certaine valeur seuil noté α-coverage.

Cette dernière représente le taux nécessaire de capteurs vivants pour garantir la couverture totale de la zone d'intérêt.

Nous considérons que lorsque le taux de capteurs vivants descend sous le seuil α-coverage, le réseau deviendra dysfonctionnel.

✓ *Période de stabilité [17] :*

C'est la durée jusqu'à la mort du premier nœud du réseau.

✓ *La quantité d'information :*

C'est la quantité des données (messages) reçus par la station de base.

6-Calcul des paramètres utilisé dans le protocole LEACH pour le MSP 430 :

Choix du canal de communication, Par la suite, le spectre de fréquence du signal reçu du capteur sera affiché sur l'interface graphique afin de faire le choix de fréquence ou du canal de transmission à utiliser. La radio CC2500 permet de transmettre, quel que soit la fréquence appartient à la bande ISM avec une fréquence comprise entre 2400 Mhz et 2483.5Mhz.

Les fréquences choisies sont séparées de 0.2Mhz par défaut, le choix de fréquence ce fait au niveau du registre **CHANNR** de la radio CC2500. La figure **III.8** représente une décomposition du canal ISM. **[19]**

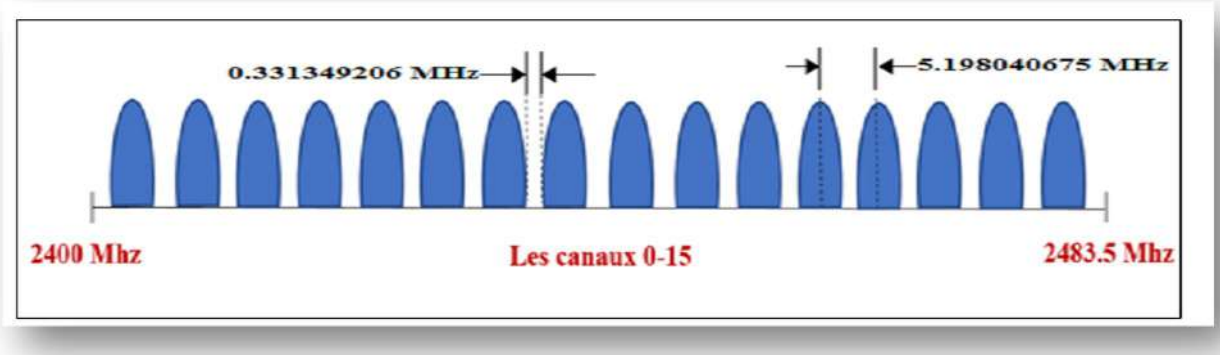


Figure III.3. Décomposition du canal ISM. **[19]**

Le tableau suivant résume l'ensemble des paramètres utilisés pour les simulations :

Tableau III-1 : Les Paramètres de Simulation.

Paramètres	Valeur
Le nombre des nœuds Total (n)	100
Surface de Déploiement (L*L)	100*100
La position de la station de base	X=50, Y=50
La taille des messages de donnée	4000 bits
Le cout de transmission d'un paquet	570 µJ/bit
Le cout de réception d'un paquet	10 µJ/bit
Le cout d'agrégation d'un paquet	57 nJ/bit
Le nombre des rounds 'tours' (r max)	2200

Pour le nombre total des nœuds et la surface de déploiement et la position de la station de base nous n'avons pas changé les paramètres de notre référence pour ne pas perdre la fiabilité du programme.

Concernant la taille des messages de donnée ça dépend de chaque message à transmettre et pour notre expérience nous avons choisi une taille de 4000bits et un nombre des tours de 2200tours.

✓ *Calcule de cout de transmission d'un paquet ETx :*

$$ETx = P.t = RI^2 . t \qquad (1.6)$$

et puisque **R = 1Ω** donc **ETx = I^2. t**

A .N :

ETx= $(26.10^{-3})^2 .0,840.10^{-3}$

ETx= 0,57.10^{-6} JOULE/BIT.

ETx= 570 nj/bit.

✓ *Calcule de cout de réception d'un paquet ERx :*

$$ERx = P. t = RI^2 . t$$

et puisque **R= 1Ω** donc **ERx = I^2. t**

A .N :
ERx= $(42,2.10^{-3})^2 .2,680.10^{-3}$
ERx= $\mathbf{1,6.10^{-6}}$ **JOULE/BIT.**
ERx= **1600** **nj/bit.**

✓ *Calcule de cout d'agrégation d'un paquet EDA :*

EDA= ***ETx / 10*** **(2.6)**
A.N :
EDA= $(0 ,57.10^{-7)} /10$
EDA= $\mathbf{0 ,57 .10^{-8}}$ **JOULE/BIT.**

7-Résultats des simulations:

Dans ce qui suit, nous présentons puis analysons les résultats des simulations obtenus.

7-1-Les fréquences :

Nous avons pris les fréquences résumées dans le tableau ci-dessous pour les 16 canaux. [27] Le tableau suivant montre le codage typique de la bande ISM.

Tableau III-2 : Le codage typique de la bande ISM.

N° de canal	Fréquence utilisé(MHZ)
0	2402.764695
1	2407.962736
2	2413.160777
3	2418.358818
4	2423.556859
5	2428.754900
6	2433.952941
7	2439.150982
8	2444.349023
9	2449.547064
10	2454.745105
11	2459.493146
12	2465.141187
13	2470.335928
14	2475.535269
15	2480.73531

✓ *Calcule de λ :*

$$\lambda = \frac{C}{f} \qquad \textbf{(3.6)}$$

Où :

C : la vitesse de la lumière dans l'air (3.10^8 m/s)
F : les fréquences utilisées
Donc les valeurs de **λ** sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau III-3- Les différentes valeurs de λ.

F(mHz)	F_0	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{15}
λ(m)	0,1248	0,1245	0,1243	0,1240	0,1237	0,1235	0,1232	0,1229	0,1227	0 ,1224	0,1222	0,1219	0,1216	0,1214	0,1211	0,1209

7-2-Influence de facteur d'amplification εfs dans la stabilité :

Nous avons effectué plusieurs simulations en variant les valeurs de facteur d'amplification du signal **Efs[**analyses of leach]:

- ***εfs*** **:** c'est le facteur d'amplification du signal pour une distance d'émission inférieure a d_0

$$\varepsilon fs = \frac{\mathbf{P\,r(4\pi)^2}}{\boldsymbol{\lambda^2 GtGrRb}} \qquad \textbf{(4.6)}$$

avec

Pr : puissance reçue.
λ : longueur d'onde.
Gt : Gain d'antenne d'émission.
Gr : Gain d'antenne de réception.
Rb : débit binaire

Les valeurs de εfs pour chaque valeurs de fréquence du bande ISM sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau III-4- Les valeurs de εfs.

Efs	Valeurs
Efs 0	4,051909E-12
Efs 1	4,069460E-12
Efs 2	4,087048E-12
Efs 3	4,104674E-12
Efs 4	4,122338E-12
Efs 5	4,140041E-12
Efs 6	4,157781E-12
Efs 7	4,175559E-12
Efs 8	4,193374E-12
Efs 9	4,211228E-12
Efs 10	4,229120E-12
Efs 11	4,245496E-12

Efs 12	4,265017E-12
Efs 13	4,283011E-12
Efs 14	4,301059E-12
Efs 15	4,319148E-12

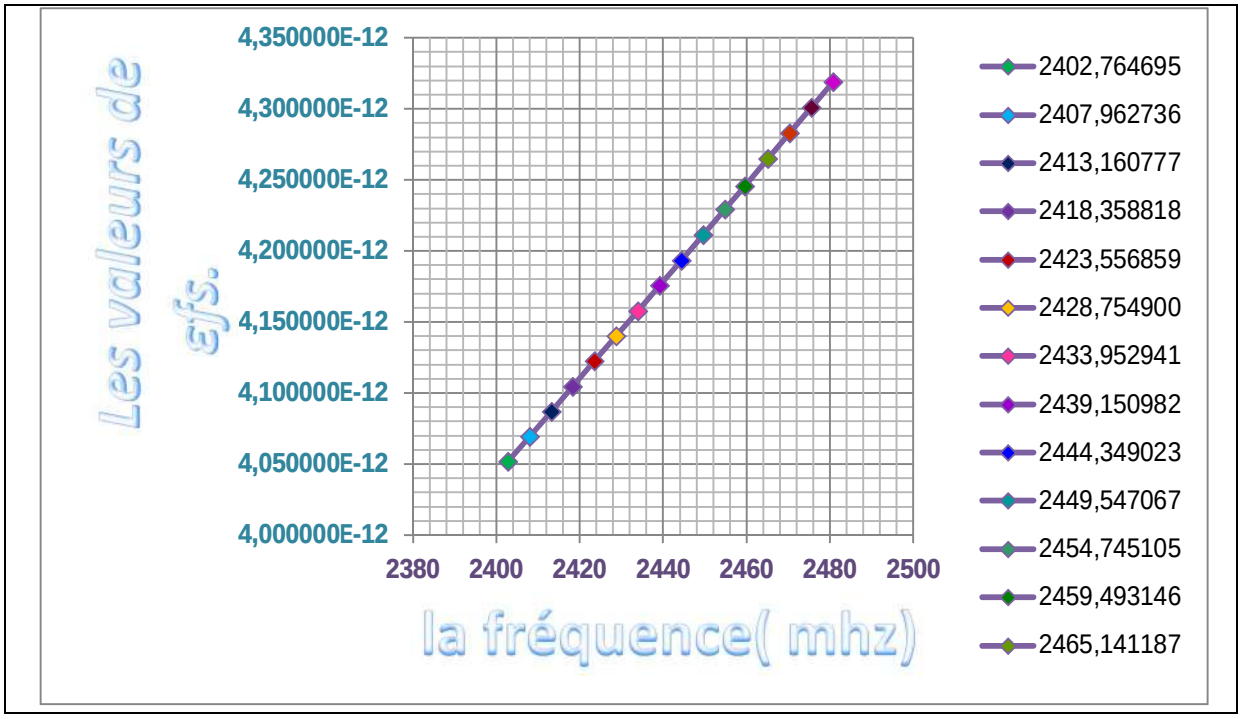


Figure III-4 : Les variations de facteur d'amplification εfs en fonction de la fréquence.

Dans cette courbe on remarque que les valeurs de εfs augmentent lorsque la valeur de fréquence augmente.

Pour lancer la simulation sur matlab nous devons calculer d'abord la valeur de Emp qui est une valeur fixe pendant toute la 1ere expérience et le calcule donné par l'équation suivante :

$$Emp = \frac{Pr}{Rb \cdot Gt \cdot Gr \cdot ht2 \cdot hr2} \qquad (5.6)$$

Avec

Pr= 10^{-11}**w**

$\mathbf{R_b}$= $250 \cdot 10^{3}$**bit/s**

$\mathbf{G_t} = \mathbf{G_r}$ = **-5db**

$\mathbf{H_t} = \mathbf{h_r}$ = **1m**

$$\mathbf{Emp} = \frac{10-11}{250 \cdot 103.0,1.1}$$

Emp = 4.10^{16} P_j /bit/m^4 .

Nous avons mis des simulations sur MATLAB ; pour chaque valeur de εfs nous avons établi 5 simulations et les résultats obtenus en termes de périodes de stabilité sont représentés par les tableaux et les figures ci-dessous :

Tableau III-5 Pour εfs0 :

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim5
S	2070	2085	2080	2077	2090

$$S_{moy} = \frac{2070+2085+2080+2077+2090}{5}$$

S_{moy} = 2080,4 tours.

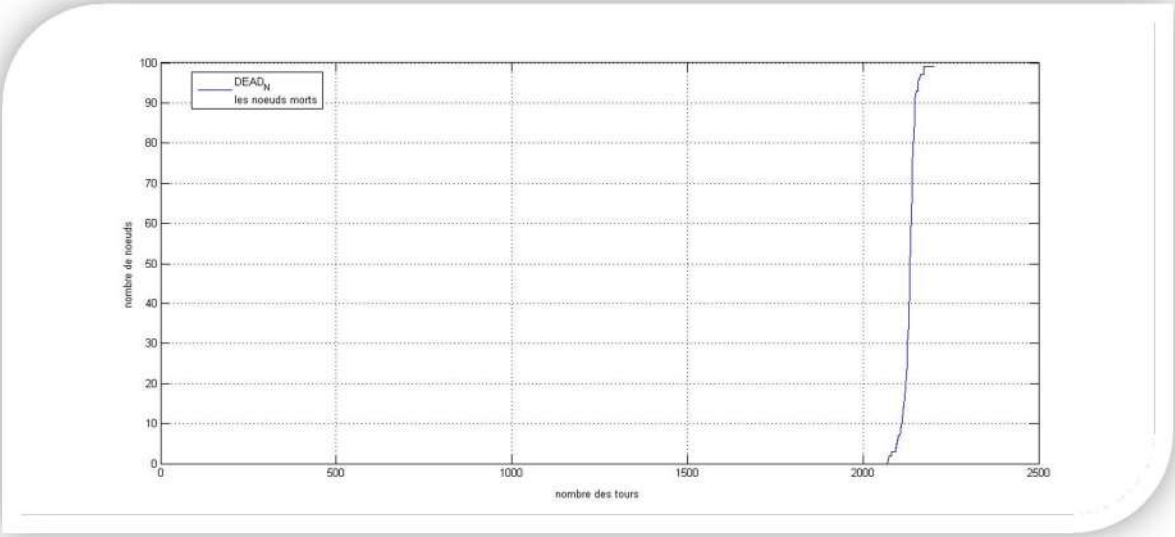


Figure III.5 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs0.

Tableau III-6 Pour εfs1 :

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim5
S	2087	2075	2078	2076	2090

$$S_{moy} = \frac{2087+2075+2078+2076+2090}{5}$$

S_{moy} = 2081,2 tours

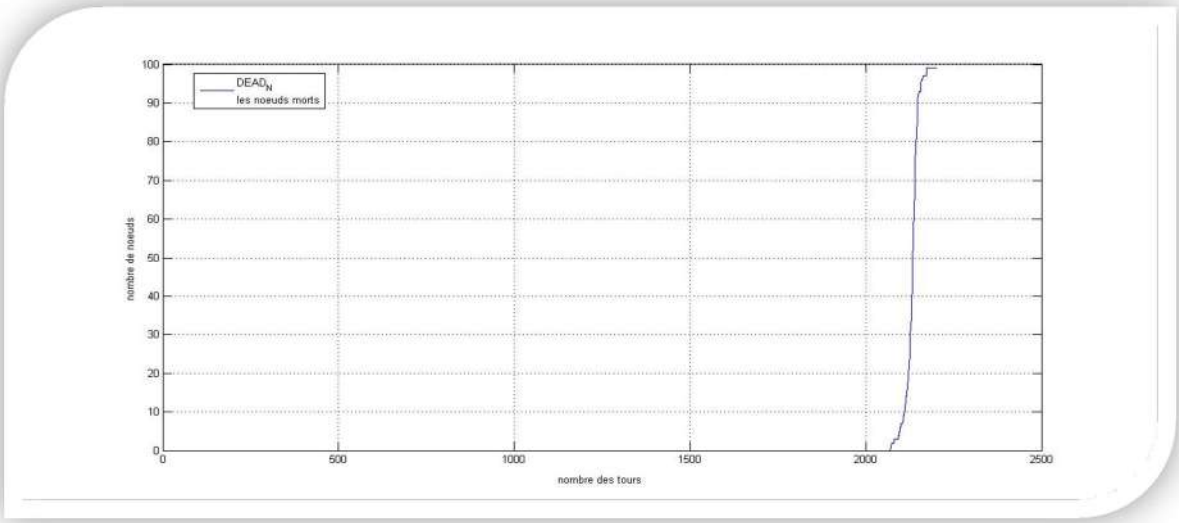


Figure III.6 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs1

Tableau III-7 ***Pour εfs2*** *:*

simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2075	2088	2095	2070	2085

$$S_{moy} = \frac{2075+2088+2095+2070+2085}{5}$$

S_{moy} = 2082,6 tours.

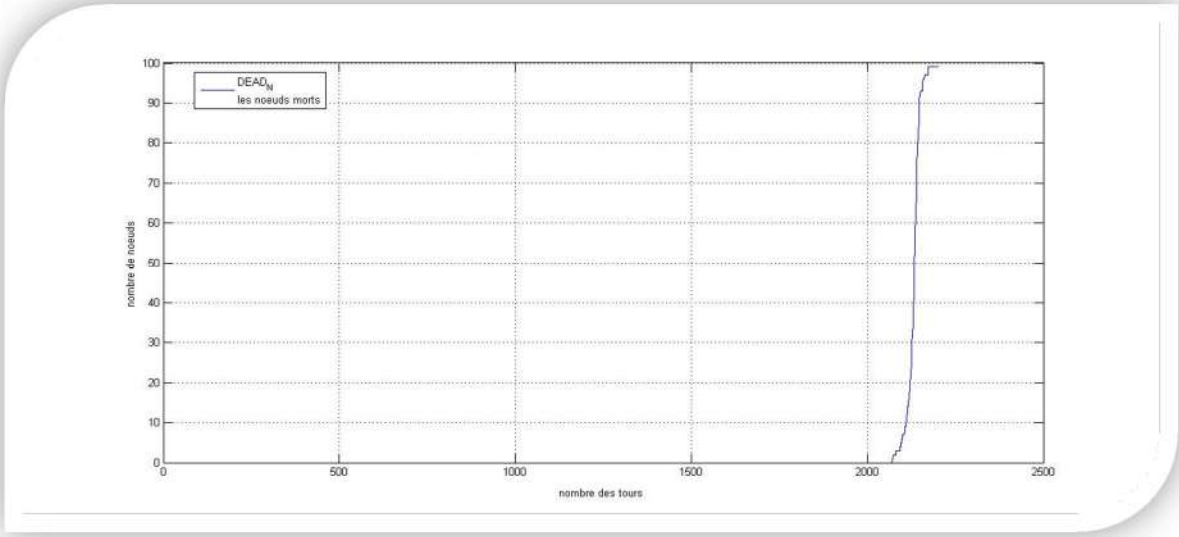


Figure III.7 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs2

Tableau III-8 ***Pour εfs3*** *:*

simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2085	2071	2073	2082	2087

$$S_{moy} = \frac{2085+2071+2073+2082+2087}{5}$$

S_{moy} = 2079,6 tours.

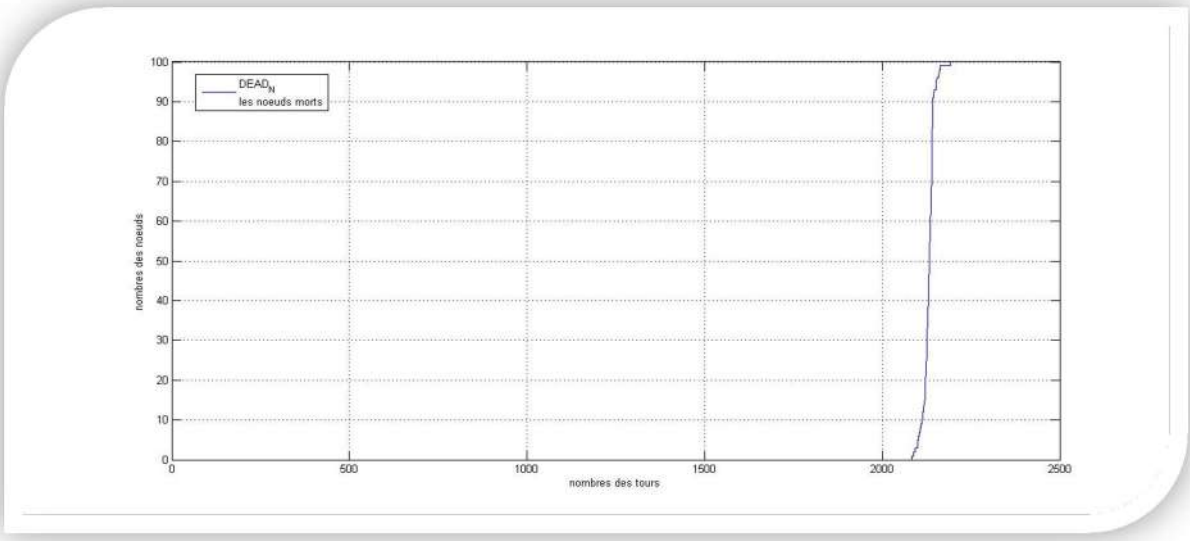


Figure III.8 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs3

Tableau III-9 Pour εfs4 :

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2081	2069	2066	2087	2082

$$S_{moy} = \frac{2081+2069+2066+2087+2082}{5}$$

S_{moy} = 2077 tours.

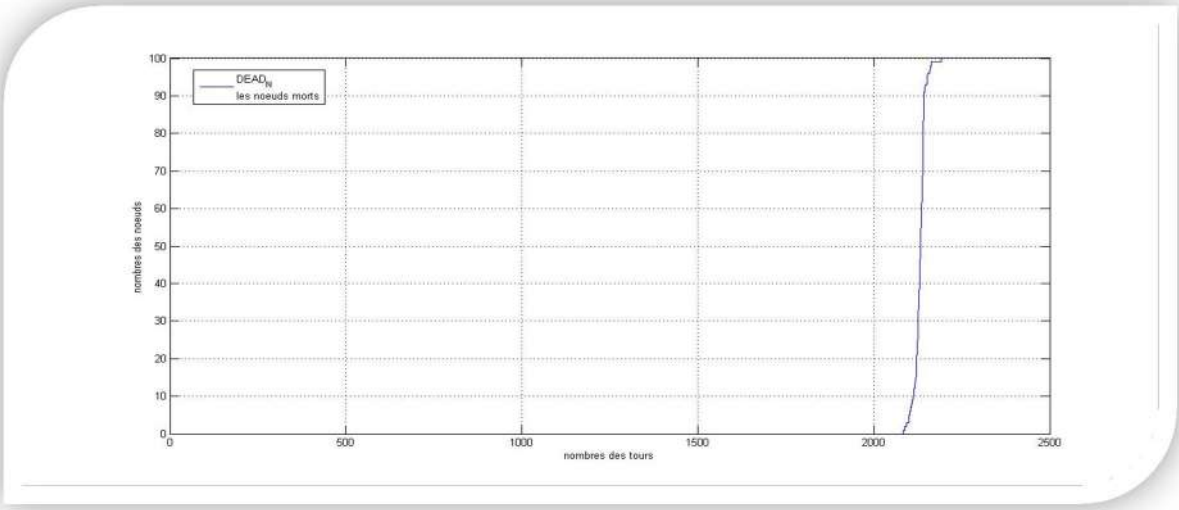


Figure III.9 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs4

Tableau III-10 Pour εfs5 :

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2082	2082	2077	2074	2076

$S_{moy} = \frac{2082+2082+2077+2074+2076}{5}$ S_{moy} = 2078,2 tours.

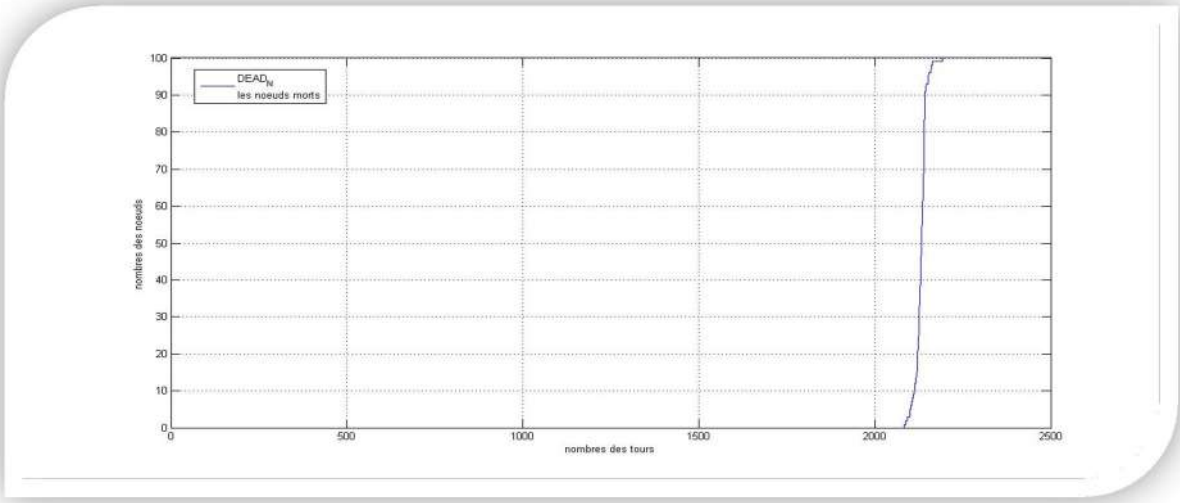


Figure III.10 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs5

Tableau III-11 *Pour εfs6 :*

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2076	2076	2080	2071	2068

$S_{moy} = \frac{2076+2076+2080+2071+2068}{5}$ S_{moy} = 2074,2 tours.

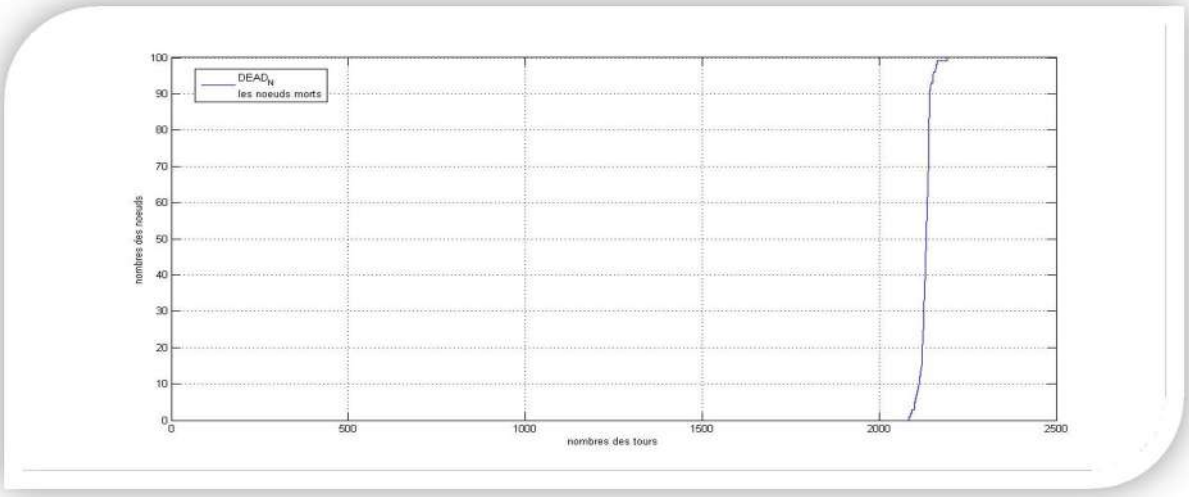


Figure III.11 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs6

Tableau III-12 *Pour εfs7 :*

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2077	2076	2070	2092	2070

$$S_{moy} = \frac{2077+2076+2070+2092+2070}{5}$$ S_{moy} = 2077 tours.

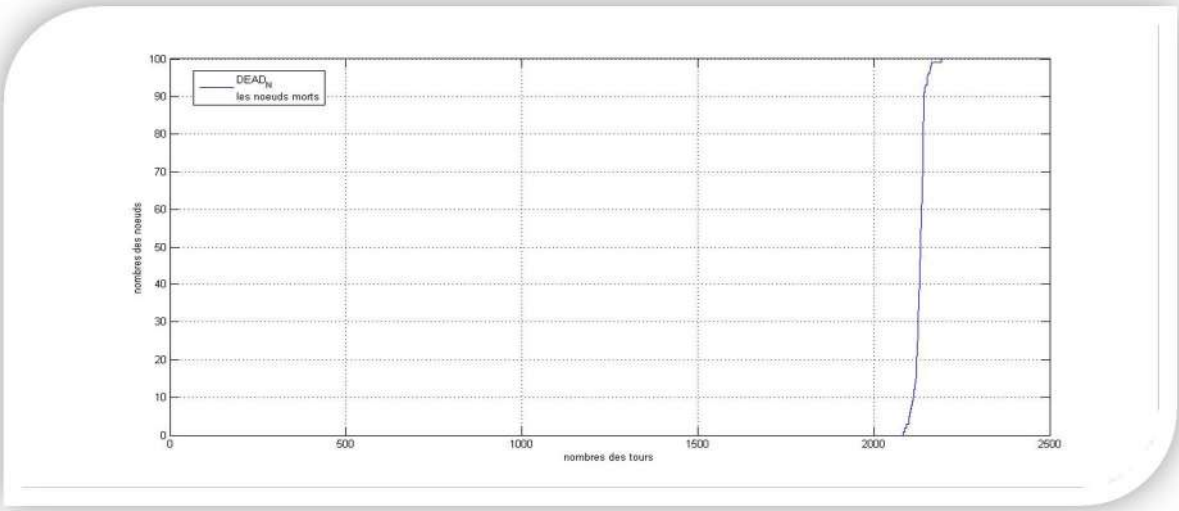


Figure III.12 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs7

Tableau III-13 ***Pour εfs8*** *:*

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2066	2071	2073	2080	2075

$$S_{moy} = \frac{2066+2071+2073+2080+2075}{5}$$ S_{moy} = 2073 tours .

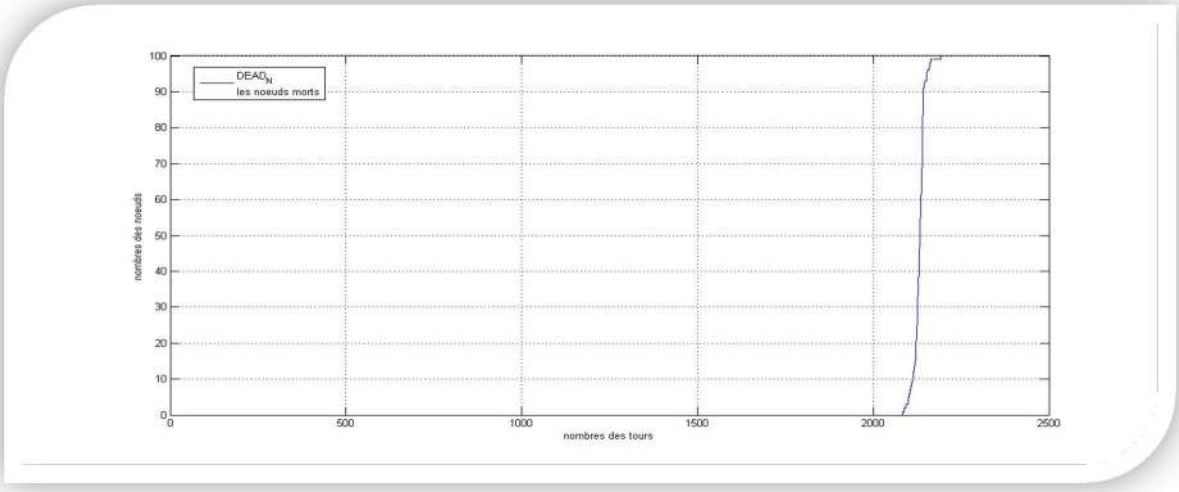


Figure III.13 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs8

Tableau III-14 ***Pour εfs9*** *:*

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2076	2076	2082	2075	2083

$$S_{moy} = \frac{2076+2076+2082+2075+2083}{5}$$ S_{moy} = 2078,4 tours.

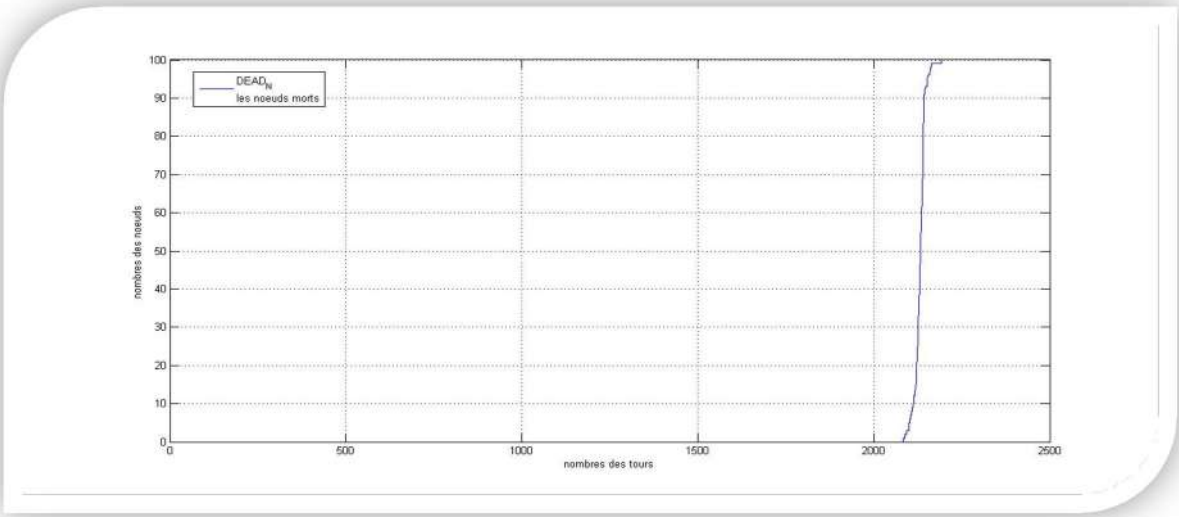


Figure III.14 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs9

Tableau III-15 ***Pour εfs10*** *:*

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2072	2069	2073	2078	2084

$$S_{moy} = \frac{2072+2069+2073+2078+2084}{5}$$

S_{moy} = 2075,2 **tours.**

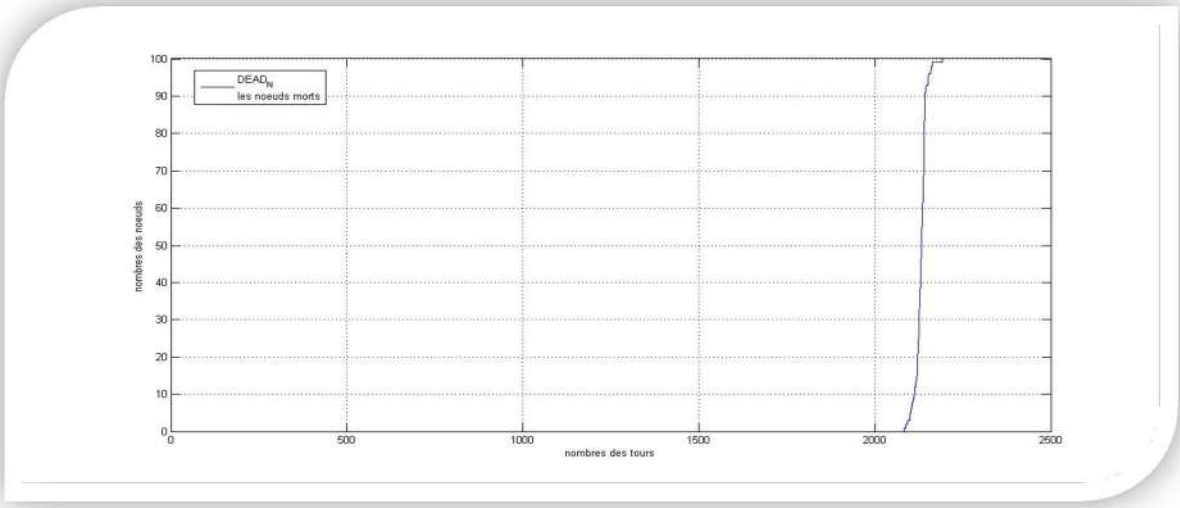


Figure III.15 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs10

Tableau III-16 ***Pour εfs11*** :

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2079	2075	2068	2090	2083

$$S_{moy} = \frac{2079+2075+2068+2090+2083}{5}$$

S_{moy} = 2079 **tours.**

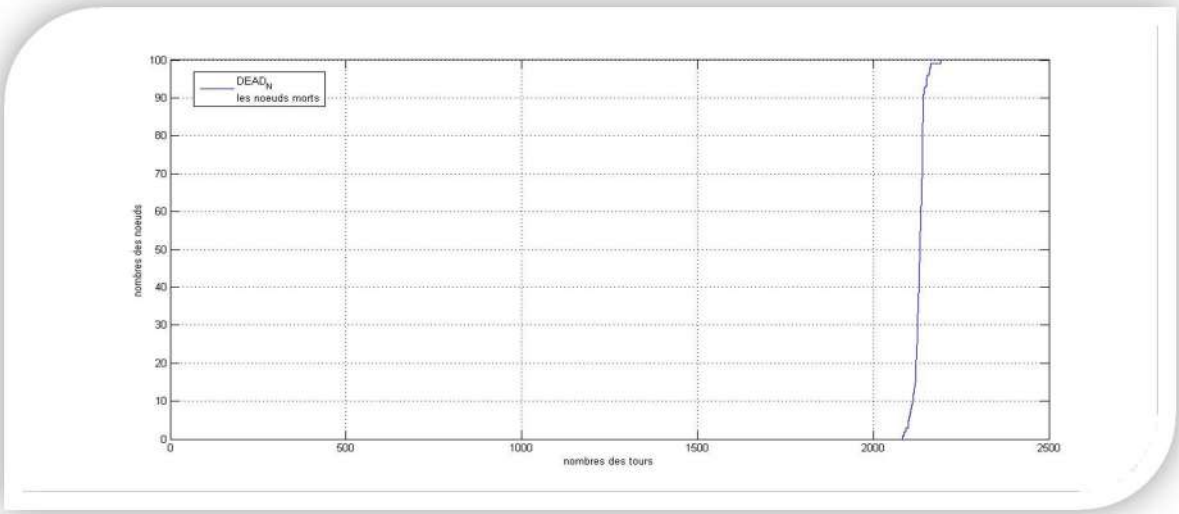


Figure III.16 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs11

Tableau III-17 ***Pour εfs12*** *:*

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2087	2075	2078	2076	2090

$$S_{moy} = \frac{2087+2075+2078+2076+2090}{5}$$

S_{moy} = 2085,6 **tours.**

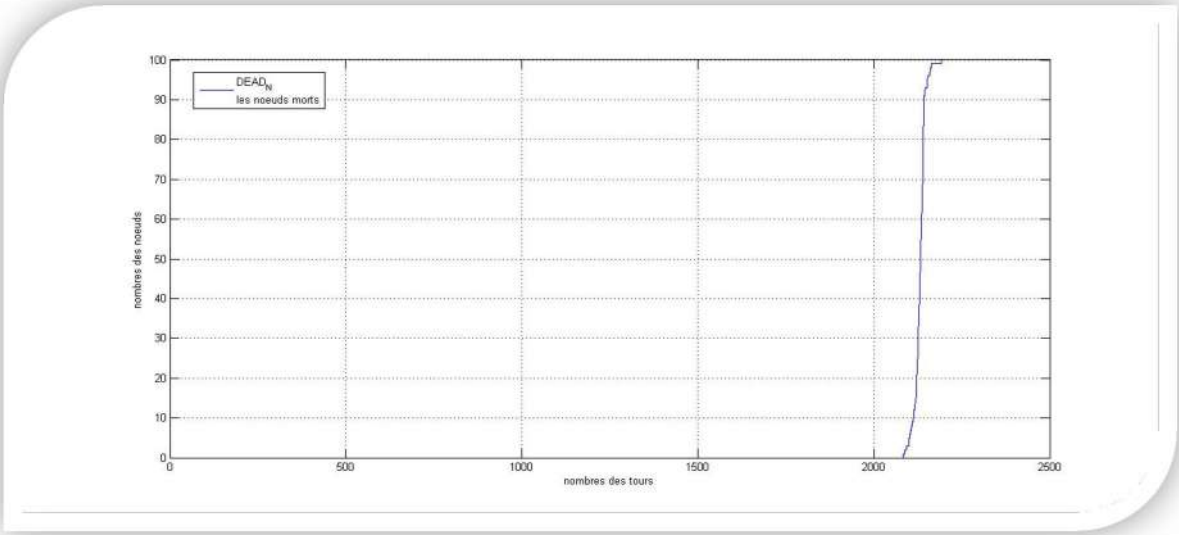


Figure III.17 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs12

Tableau III-18 ***Pour εfs13*** *:*

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2087	2075	2078	2076	2090

$$S_{moy} = \frac{2087+2075+2078+2076+2090}{5}$$ S_{moy} = 2079,4 tours.

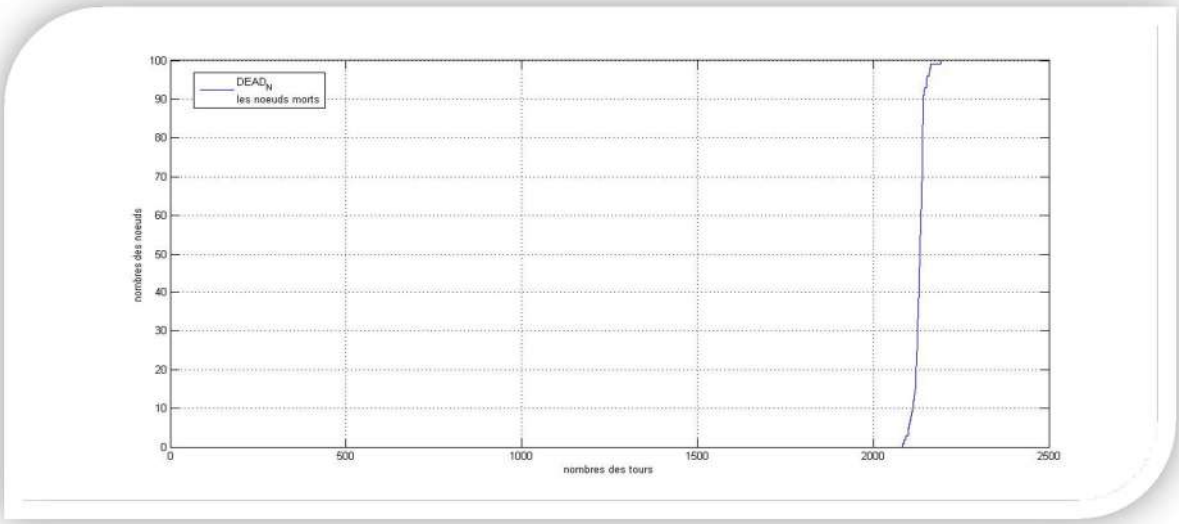


Figure III.18 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs13

Tableau III-19 ***Pour εfs14 :***

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2087	2075	2078	2076	2090

$$S_{moy} = \frac{2087+2075+2078+2076+2090}{5}$$ S_{moy} = 2080,4 tours.

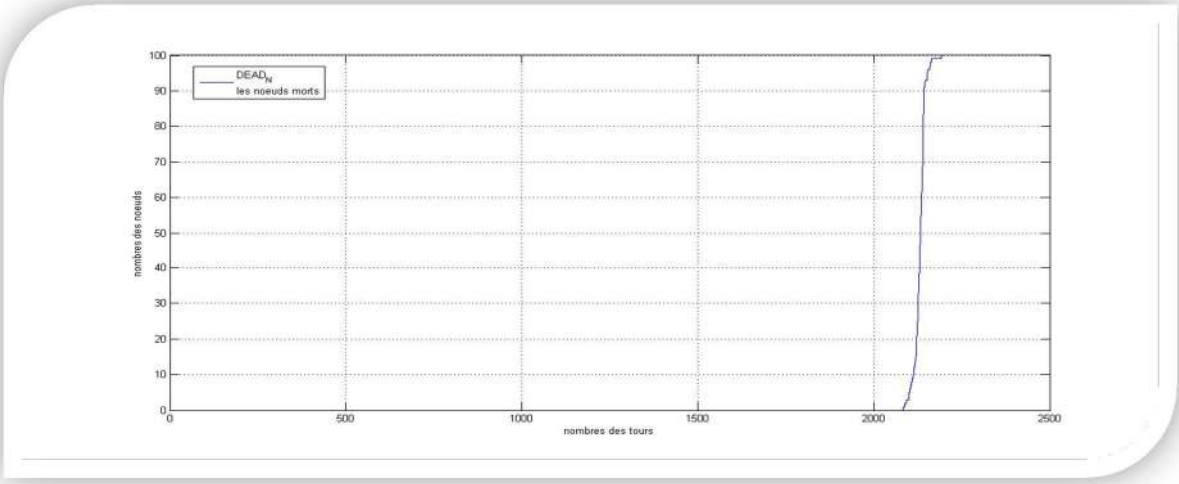


Figure III.19 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs14

Tableau III-20 ***Pour εfs15 :***

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2087	2075	2078	2076	2090

$$S_{moy} = \frac{2087+2075+2078+2076+2090}{5}$$ S_{moy} = 2083,2 tours.

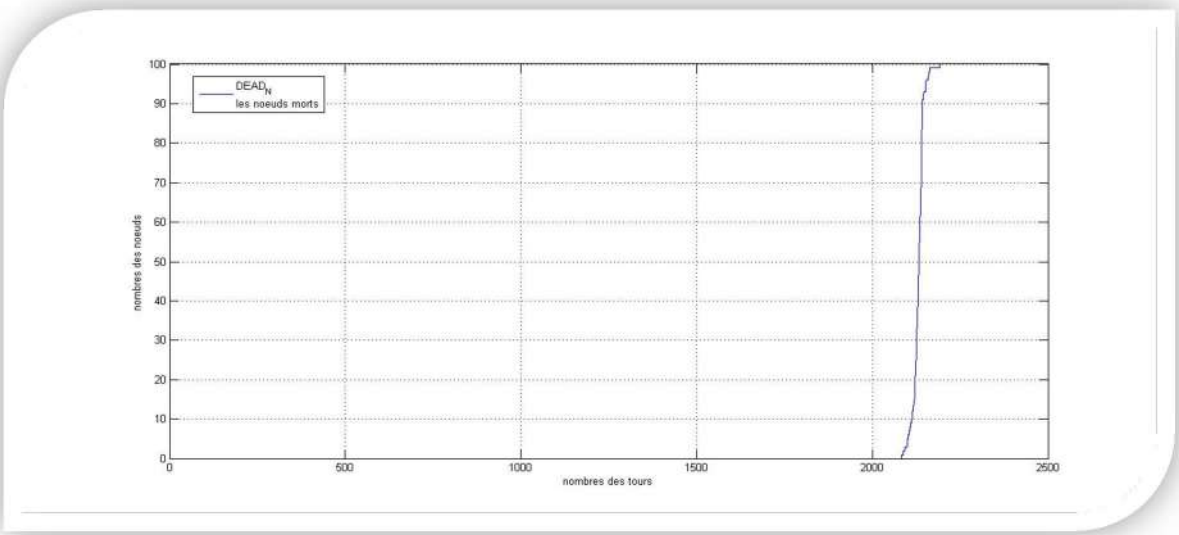


Figure III.20 : Stabilité du réseau MSP430 avec εfs15

La figure suivante montre l'évolution de la stabilité moyenne du réseau WSN à base des noeuds capteurs MSP430 en fonction de la variation du canal de communication.

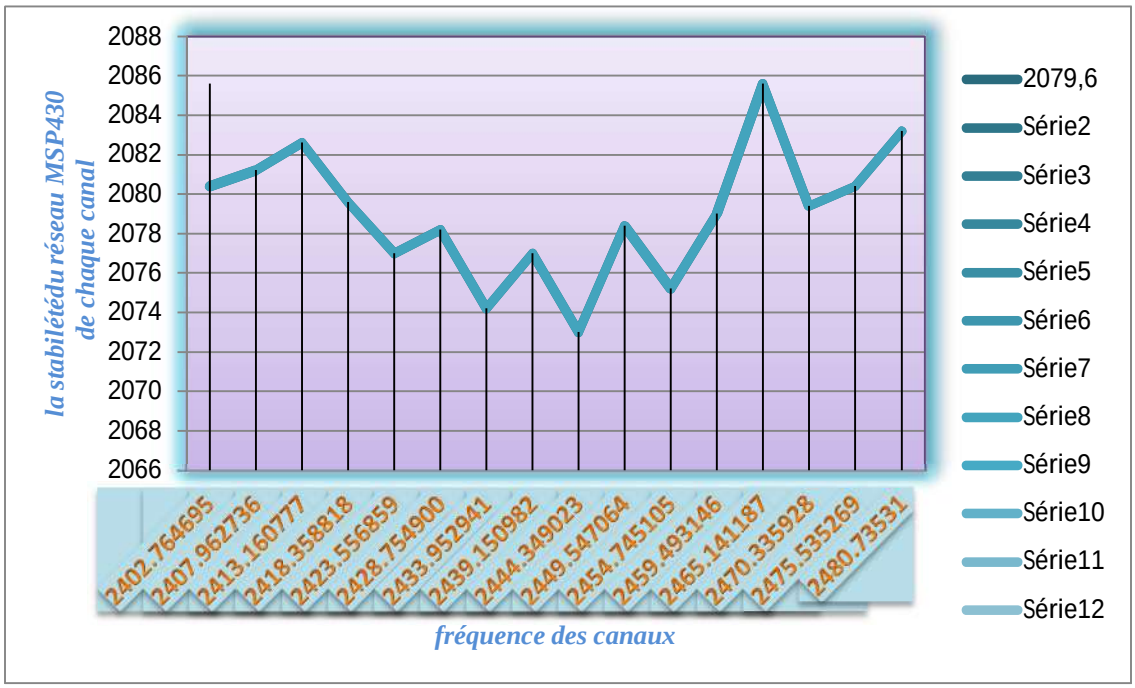


FIGURE III-21 .l'évolution de la stabilité moyenne

Le graphe de la figure représente les variations de stabilité en fonction de fréquence et le nombre des tours, nous avons constaté que la stabilité se varie pour chaque valeurs de

fréquence ; la meilleure valeur de stabilité correspond à la valeur 2465,14MHZ alors que la valeur min de stabilité correspond a la valeur 2444,34MHZ . donc le canal 12 c'est le plus stable par rapport ou outre canaux

III-8-Influence de facteur d'amplification εmp dans la stabilité.

Pour cette expérience nous avons fixé la valeur de εfs qui représente la meilleure valeur de stabilité et nous avons recalculé la valeur de εmp on variant les hauteurs.

Calcule de εmp pour des hauteurs variables :

- **Pour h=0,01m** (rmq : les nœuds sont mort rapidement ….)

$$Emp = \frac{Pr}{Rb.Gt.Gr.ht2} \qquad (6.6)$$

Avec

$Pr=10^{-11}w$.

$R_b=250 .10^3 bit/s$.

$G_t = G_r = -5db$.

$H_t = h_r = 0,01m$.

$$Emp = \frac{10-11}{250 .103.0,1.1}$$

$Emp = 4.10^{-8} P_j /bit/m^4$.

Tableau III-21 *εmp1 :*

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	0	0	0	0	0

- **Pour h=0,5m**

$Emp = 6,4.10^{-15} P_j /bit/m^4$.

Tableau III-22 *Pour εmp2 :*

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2060	2047	2050	2058	2051

$$S_{moy} = \frac{2060+2047+2050+2058+2051}{5}$$

$S_{moy} = 2053,2$ tours.

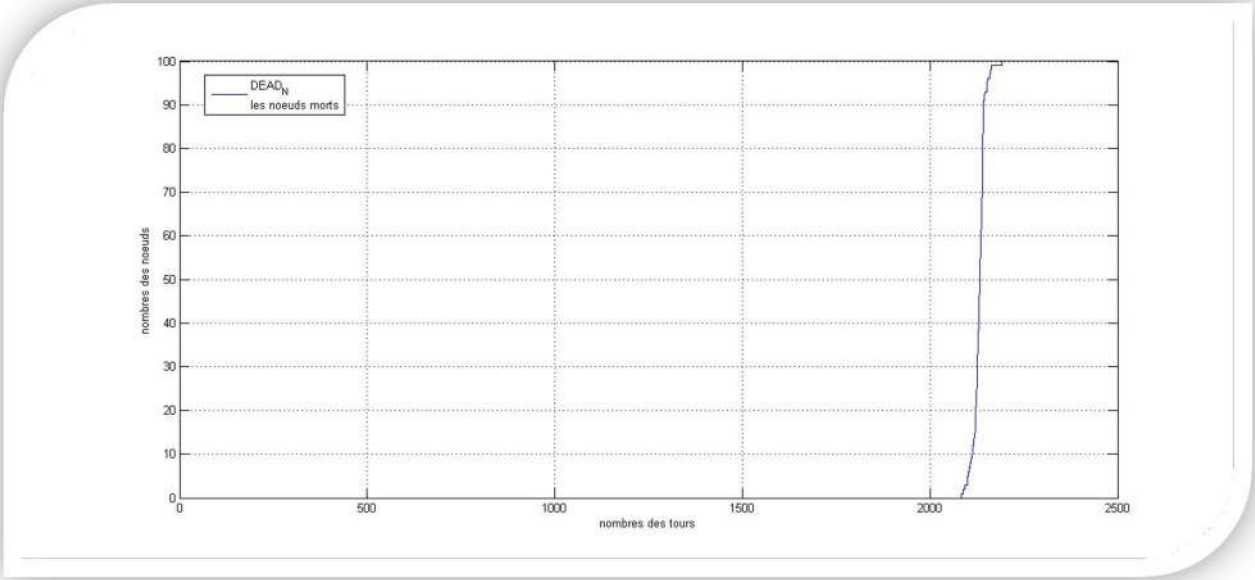


Figure III.22 : Stabilité du réseau MSP430 avec la hauteur h=0,5m

- **Pour h=0,75m**

$_{Emp}$ =1,26.10-^{15} P_j /bit/m^4 .

Tableau III-23 *Pour emp 3 :*

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	1963	1983	1975	1966	2008

$$S_{moy} = \frac{1963+1983+1975+1966+2008}{5}$$

S_{moy} =1979 tours.

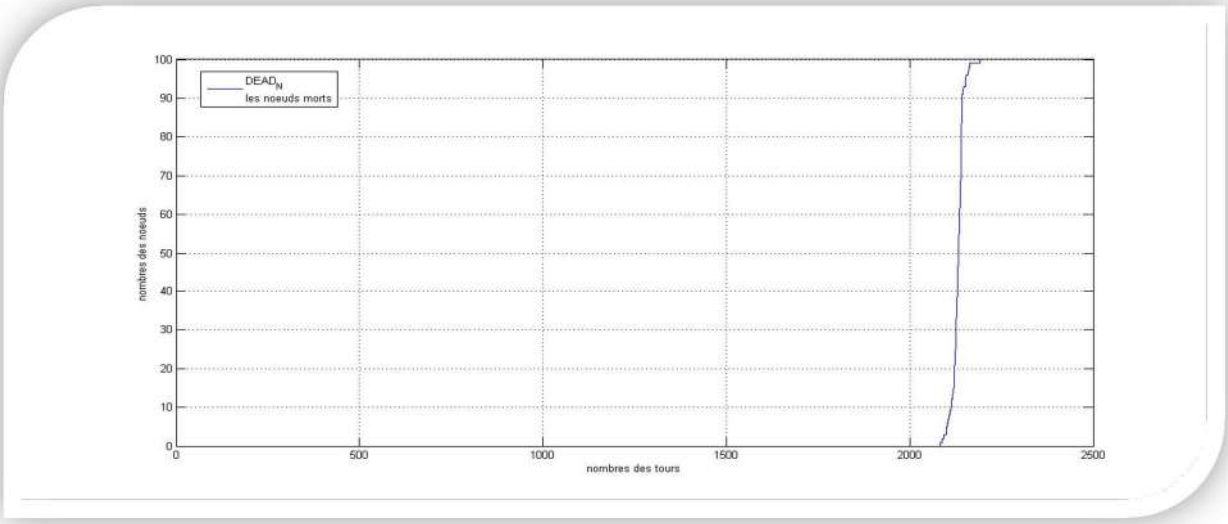


Figure III.23 : Stabilité du réseau MSP430 avec la hauteur h=0,75m

- **Pour h=1m.**

$_{Emp}$ =4.10-^{16} P_j /bit/m^4 .

Tableau III-24 *Pour εmp 4:*

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2082	2078	2081	2085	2083

$$S_{moy} = \frac{2082+2078+2081+2085+2083}{5}$$

S_{moy} =2081,8 tours.

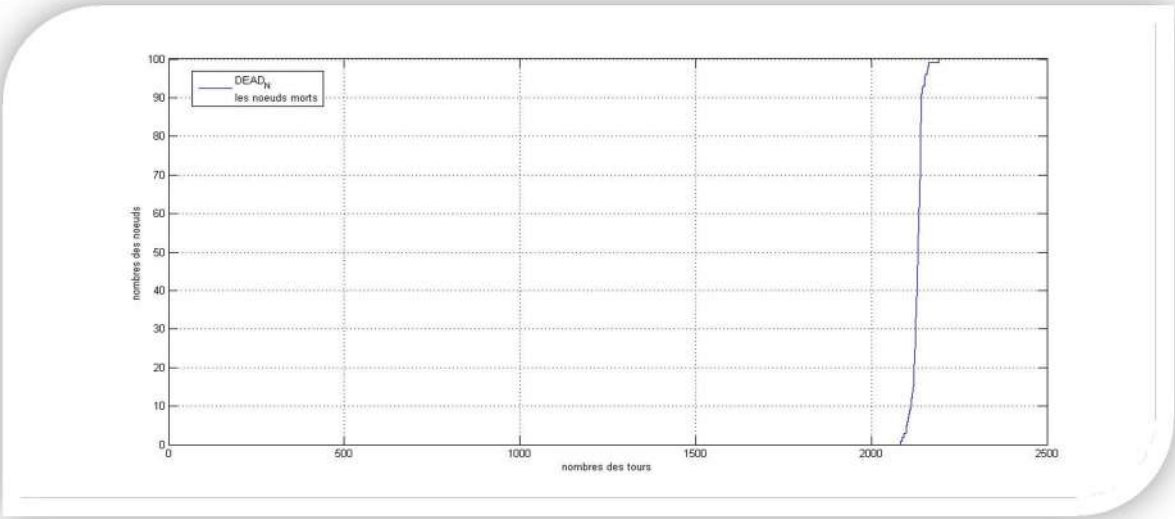


Figure III.24 : Stabilité du réseau MSP430 avec la hauteur h=1m

- **Pour h=1,25m**

$_{Emp}$ =1,63.10-^{16} P_j /bit/m^4 .

Tableau III-25 *Pour εmp 5 :*

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2076	2086	2064	2088	2080

$$S_{moy} = \frac{2076+2086+2064+2088+2080}{5}$$

S_{moy} =2078,8 tours.

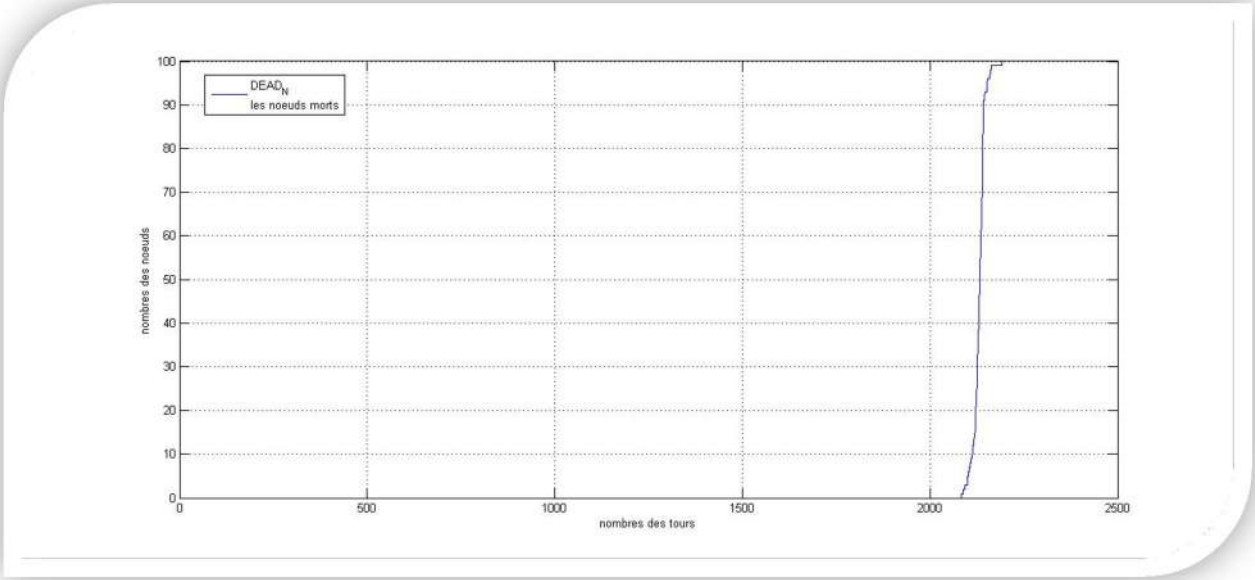


Figure III.25 : Stabilité du réseau MSP430 avec la hauteur h=1,25m

- **Pour h=1,5m**

E_{mp} =7,90.10-^{17} P_j /bit/m^4 .

Tableau III-26 *Pour εmp 6 :*

Simulation	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim4
S	2082	2087	2086	2082	2075

$$S_{moy} = \frac{2082+2087+2086+2082+2075}{5}$$

S_{moy} =2082,4 tours.

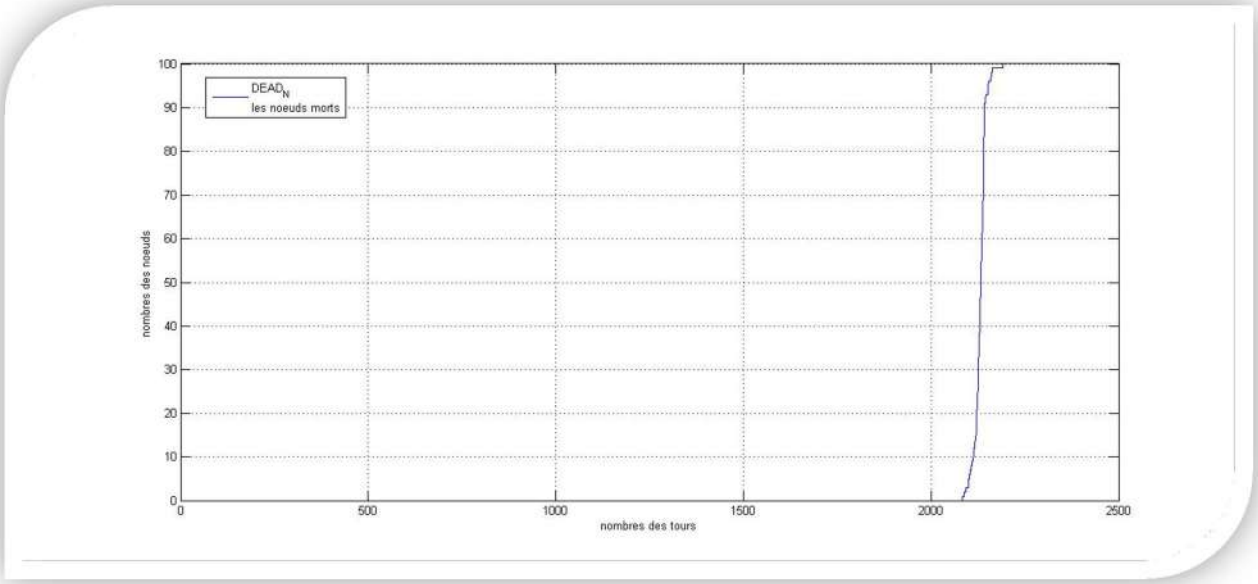
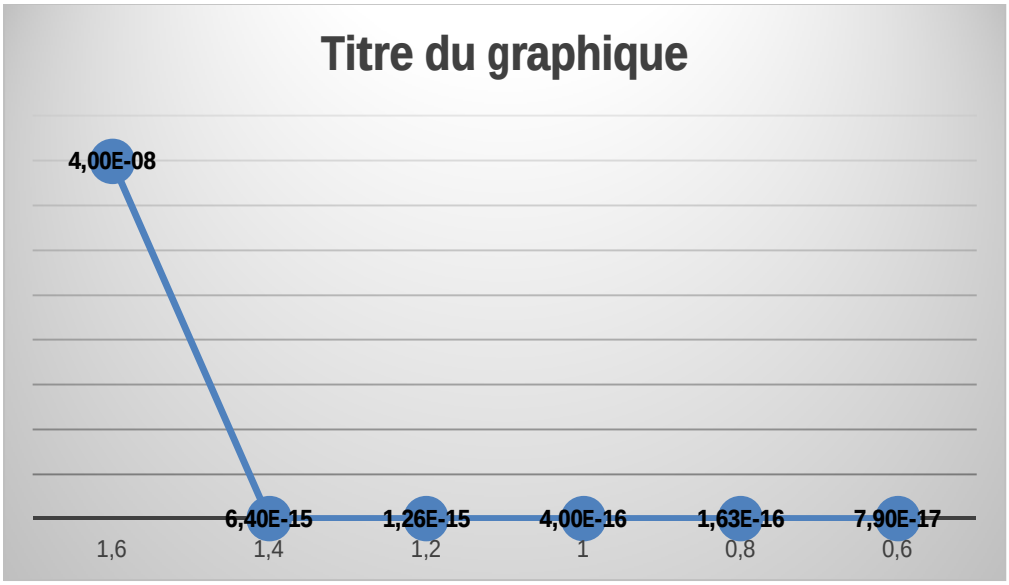


Figure III.26 : Stabilité du réseau MSP430 avec la hauteur h=1,5m

La figure suivante montre l'évolution de la stabilité moyenne du réseau WSN à base des noeuds capteurs MSP430 en fonction de la variation de la hauteur



FIGUREIII.27 : Les variations de εmp en fonction des hauteurs.

La figure suivante montre les variations des stabilités en fonction de la variation des hauteurs des antennes des capteurs par rapport au niveau de la terre.

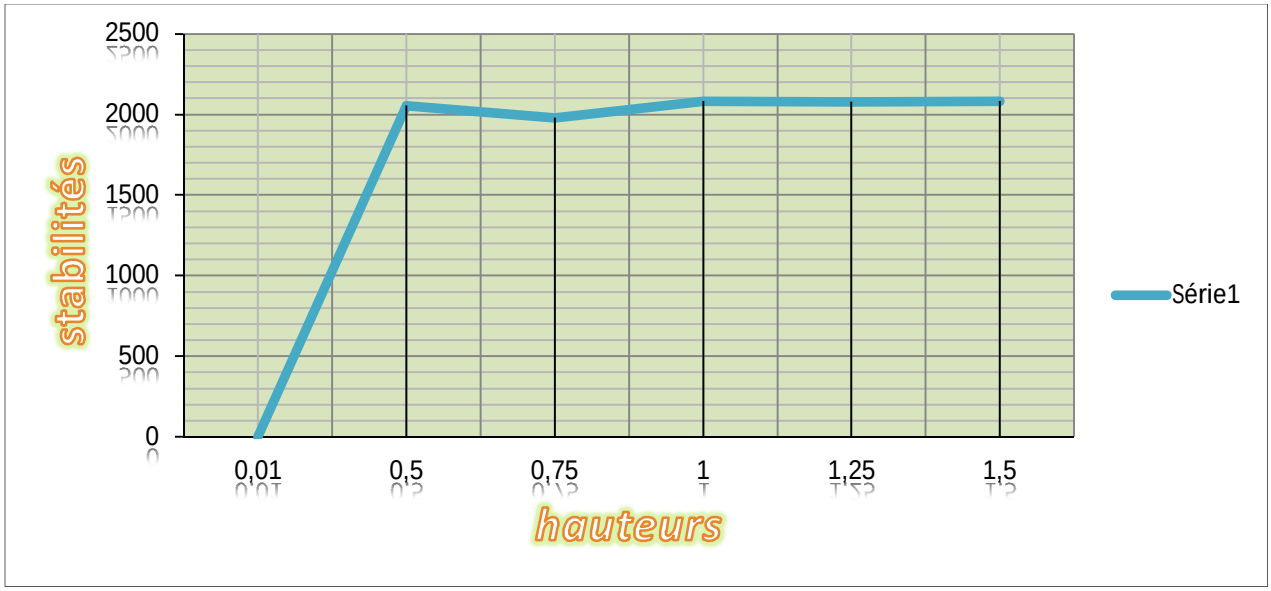


FIGURE III.28 : les variations des stabilités en fonction de la variation des hauteurs.

III- 9- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des simulations du protocole d'auto-organisation LEACH d'un réseau WSN à base des nœuds capteurs MSP 430.
Nous avons présenté les variations des paramètres du protocole LEACH en fonction des caractéristiques des signaux radio et on a bien montré l'influence de ces derniers sur le protocole LEACH.
Les courbes et les tableaux obtenus vont contribuer dans le choix du type de capteur a utilisé

Conclusion général

Conclusion Générale :

Le protocole LEACH est le protocole d'auto organisation et de routage de données le plus populaire et le plus utilisé dans les réseaux de capteurs sans file afin d'assurer une meilleure performance du point de vie stabilité et durée de vie.

Le protocole LEACH est conçu à l'aide des paramètres des capteurs bien spécifique comme la puissance et la fréquence de transmission des signaux radio ainsi que le débit de transmission de données en plus des paramètres du réseau lui-même (nombre des nœuds , surface du champ de captage , position de la station de base etc…).

Dans notre travail on a gardé les mêmes paramètres du champ de captage mais on a changé le type de capteur qui compose le réseau et voir la réaction du protocole LEACH avec les nouvelle paramètres dans le but d'avoir une idée sur la durée de vie, la stabilité et la consommation d'énergie afin de prendre les précautions nécessaire et d'éviter les mauvaise situations dans le cas d'utilisation d'un autre type de capteurs.

Les résultats de simulation ont montré que les capteurs MSP 430 meurent rapidement si ces derniers sont placés sur un niveau inférieur de 10 cm par rapport à la terre. Ces résultats nous informent de ne pas utiliser ce type de capteurs par exemple dans le domaine de l'agriculture où les capteurs d'humidité peuvent êtres placés sur le même niveau du sol.

BIBLIOGRAPHIE

[01]	Ameer-Ahmed Abbasi and Mohamed F. Younis, « A Survey on Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks », Computer Communications, 30(14-15) :2826–2841, 2007.
[02]	Aderohunmu, F. A., & Deng, J. D, « An Enhanced Stable Election Protocol (SEP) for Clustered Heterogeneous WSN », (No. 2009/07), Discussion Paper Series, 2009.
[03]	Samir ATHMANI, « Protocole de sécurité Pour les Réseaux de capteurs Sans Fil »memoire de magister, Université Hadj Lakhder - Batna, 2010.
[04]	Nacéra BENAOUDA, H. Guyennet, A.Hammad,A.H. Benaouda et M. Mostefai, « Modélisation par les groupes d'un réseau sans fil »,Conférence, Laboratoire d'informatique de Franche comté, Besançon, France,2007.
[05]	Bouabdellah Kechar, « problématique de la consommation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil », LIUPA, université d'Oran, Octobre 2007.
[06]	Cédric Bastien ; « Développement d'un outil permettant le suivi d'un objet Mobile » ; Rapport de projet de fin d'étude ; ISA-SERTR. 2008.
[07]	Yacine CHALLAL, « Les réseaux de capteurs sans fil », cours, université Compiègne, France, 2008.
[08]	Gérard Chalhoub « MaCARI : Une méthode d'accès d´déterministe et ´économe en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil », Thèse de Doctorat université blaise pascal, 1988.
[09]	Doufène, N et H Hadjammar. «Routage dans les réseaux de capteurs : optimisation du protocole Directed Diffusion.» Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état. Institut National de formation en Informatique, 2006.
[10]	GUEDMANI Mohamed, LA LOCALISATION DANS LES RESEAUX DE 0CAPTEURS SANS FIL (WSNs), mémoire de magistère, Université de MEDEA, 2012
[11]	Karel Heurtefeux « PROTOCOLES LOCALISÉS POUR RÉSEAUX DE CAPTEURS » Thèse de Doctorat, Ecole doctorale, Informatique et Mathématiques de Lyon, 2009.

[12]	K. Holger and Andreas Willig. « Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks . Wiley, 2005.
[13]	LEHSAINI Mohamed, « Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les Réseaux », Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté Besançon ,2009.
[14]	Bilel NEFZI « Qualité de service temps réel dans les Protocoles IEEE 802.15.4 Et ZigBee et leurs améliorations », memoire de magister, Université Henri Poincaré Nancy I, 2007
[15]	Nabil OUAZENE, «Pour une QoS au niveau de la Couche MAC dans les Réseaux Sans Fil », mémoire de magister, Université Hadj Lakhdar Batna ,2009.
[16]	George F. Riley «Using the Georgia Tech Network Simulator», Georgia Institute of Technology, 2000.
[17]	Smaragdakis, G., Matta, I., & Bestavros, A, « SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks ». Boston University Computer Science Department, 2004.
[18]	Kazem SOHRABY, Daniel MINOLI, Taieb ZNATI, « wireless sensor networks:Technology, Protocols, and Applications », John Wiley & Sons, Inc, 2007.
[19]	Thomas Watteyne, eZWSN, Rice University, Houston, Texas: Experimenting with Wireless Sensor Networks using the Ez430-RF2500, 2010.
[20]	Fabrice VALOIS, « AUTO-ORGANISATION DE RESEAUX RADIO MULTI-SAUTS », mémoire pour l'obtention du diplôme d'habilitation `a diriger des recherches, Université Claude Bernard - Lyon 1, 2007.
[21]	Adrien VAN DEN BOSSCHE, « Proposition d'une nouvelle méthode d'accès déterministe pour un réseau personnel sans fil à fortes contraintes temporelles » Thèse de Doctorat, université de TOULOUSE, 2007.
[22]	YACINE YOUNES, « Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs » memoire de magister, université MOULOUD MAMMERI de tizi-ouzou, 2012.
[23]	Yasser Romdhane, «évaluation des performances des protocoles S-MAC et directed diffusion dans les réseaux de capteurs », rapport de projet de fin d'étude, école supérieure des communications de Tunis, 2007.
[24]	YOUSEF Yaser « Routage pour la Gestion de l'Energie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil », Thèse de Doctorat, université de HAUTE ALSACE, 2010.

WEBOGRAPHIE

http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/ez430-rf2500.html.

http://www.ti.com/litv/zip/s lac139b.

http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/iar-kickstart.html.

http://www.cygwin.com/setup.exe.

http://the.eart h.li/~sgtatham/putty/latest/x86/putty.exe.

http://www.straightrunning.com/XmingNotes/.

www.TI/MSP430.com.

www.TI.com.

ANNEXE

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

  %%%%%%%%%%%%%%%%                                          %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
  %%%%%%%%%%%%%%%%    PROGRAMME DU PROTOCOLE                 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
  %%%%%%%%%%%%%%%%    D'AUTO-ORGANISATION LEACH              %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
  %%%%%%%%%%%%%%%%                                          %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear;

%%%%%%%%%%%%%%%% DECLARATION DES  PARAMETERS DU PROTOCOLE  %%%%%%%%%%%%%

%Surface de déploiement du réseau(in mètres)
xm=100;
ym=100;
%Position de la station de base
sink.x=0.5*xm;
sink.y=0.5*ym;
%nombre de nœuds
n=100

%Probabilité optimale d'élection des CHs
p=0.05;

%Energie initiale des nœuds (en joules)
Eo=0.5;
%Eelec=Etx=Erx: C'est la consommation d'énergie du circuit de transmission
%et de réception d'un bit
ETX=5.7*0.00000001;
ERX=0.1*0.00000001;
%Efs le facteur d'amplification du signal pour une distance d'émission
%inferieur à la distance seuil do
Efs=4.21*0.0000000000001;
%Emp le facteur d'amplification du signal pour une distance d'émission
%supérieure à la distance seuil do
Emp=0.042*0.000000000000001;
%EDA C'est l'énergie consommée pour l’agrégation de données (un bit)
EDA=0.57*0.000000001;

%pourcentage des nœuds avancés  (par exemple 30%)
m=0.3;
%Facteur supplémentaire d’énergie
a=1;
%nombre de tours max
rmax=2200
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% END OF PARAMETERS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%distance seuil d0 (Cross over  distance))
do=sqrt(Efs/Emp);

figure(1);

%%La création aléatoire des nœuds, les nœuds normaux sont représenté
%%Par 'o', les avancés par'+' et la station de base par 'x'
for i=1:1:n
    S(i).xd=rand(1,1)*xm;
    XR(i)=S(i).xd;
    S(i).yd=rand(1,1)*ym;
    YR(i)=S(i).yd;
    S(i).G=0;
    S(i).type='N';

    temp_rnd0=i;
    if (temp_rnd0>=m*n+1)
        S(i).E=Eo;
        S(i).ENERGY=0;
        plot(S(i).xd,S(i).yd,'o');
        hold on;
    end
    if (temp_rnd0<m*n+1)
        S(i).E=Eo*(1+a)
        S(i).ENERGY=1;
        plot(S(i).xd,S(i).yd,'+');
        hold on;
    end
end
S(n+1).xd=sink.x;
S(n+1).yd=sink.y;
plot(S(n+1).xd,S(n+1).yd,'x');
figure(1);

%%%%%%%%%%%%  INITIALISATION DES VARIABLES DE SORTIE   %%%%%%%%%%%%%%%%%%

%countCHs: nombre des  cluster- heads formé
%rcountCHs: nombre des  cluster- heads formé par cycle
%dead: nombre total de nœuds morts (et par cycle DEAD(r+1))
%dead_a: nombre de nœuds avancés morts (et par cycle DEAD_A(r+1))
%dead_n: nombre de nœuds normaux morts (et par cycle DEAD_N(r+1))
%packets_TO_BS: nombre de messages reçus par la station de base
%packets_TO_CH: nombre de messages reçus par les CH
%PACKETS_TO_CH(r+1) : nombre de messages reçus par les CH PAR CYCLE
%PACKETS_TO_BS(r+1) : nombre de messages reçus par la station de base/cycle

countCHs=0;

rcountCHs=0;
cluster=1;

countCHs;
rcountCHs=rcountCHs+countCHs;
flag_first_dead=0;
```

```
for r=0:1:rmax
    r

  if(mod(r, round(1/p) )==0)
    for i=1:1:n
        S(i).G=0;
        S(i).cl=0;
    end
  end

hold off;

dead=0;
dead_a=0;
dead_n=0;

packets_TO_BS=0;
packets_TO_CH=0;
PACKETS_TO_CH(r+1)=0;
PACKETS_TO_BS(r+1)=0;

figure(1);

for i=1:1:n
    %La représentation des nœuds morts par '.' et identification de leur
    %type
    if (S(i).E<=0)
        plot(S(i).xd,S(i).yd,'red .');
        dead=dead+1;
        if(S(i).ENERGY==1)
            dead_a=dead_a+1;
        end
        if(S(i).ENERGY==0)
            dead_n=dead_n+1;
        end
        hold on;
    end
    if S(i).E>0
        S(i).type='N';
        if (S(i).ENERGY==0)
        plot(S(i).xd,S(i).yd,'o');
        end
        if (S(i).ENERGY==1)
        plot(S(i).xd,S(i).yd,'+');
        end
        hold on;
    end
end
plot(S(n+1).xd,S(n+1).yd,'x');


STATISTICS(r+1).DEAD=dead;
DEAD(r+1)=dead;
DEAD_N(r+1)=dead_n;
DEAD_A(r+1)=dead_a;
```

```
if (dead==1)
    if(flag_first_dead==0)
        first_dead=r
        flag_first_dead=1;
    end
end

countCHs=0;
cluster=1;
for i=1:1:n
   if(S(i).E>0)
   temp_rand=rand;
   if ( (S(i).G)<=0)

%%%%%% L'élection des CHs

 if(temp_rand<= (p/(1-p*mod(r,round(1/p)))))
            countCHs=countCHs+1;
            packets_TO_BS=packets_TO_BS+1;
            PACKETS_TO_BS(r+1)=packets_TO_BS;

            S(i).type='C';
            S(i).G=round(1/p)-1;
            C(cluster).xd=S(i).xd;
            C(cluster).yd=S(i).yd;
            plot(S(i).xd,S(i).yd,'k*');

            distance=sqrt( (S(i).xd-(S(n+1).xd) )^2 + (S(i).yd-(S(n+1).yd) )^2
);
            C(cluster).distance=distance;
            C(cluster).id=i;
            X(cluster)=S(i).xd;
            Y(cluster)=S(i).yd;
            cluster=cluster+1;

          %calcul de l'énergie consommée par les CH (transmission vers la
          %station de base et d'agrégation de données
            distance;
            if (distance>do)
                S(i).E=S(i).E- ( (ETX+EDA)*(4000) + Emp*4000*(
distance*distance*distance*distance ));
            end
            if (distance<=do)
                S(i).E=S(i).E- ( (ETX+EDA)*(4000)  + Efs*4000*( distance *
distance ));
            end
        end

    end
  end
end

STATISTICS(r+1).CLUSTERHEADS=cluster-1;
CLUSTERHS(r+1)=cluster-1;
```

```
%%%%% L'appartenance des nœuds
for i=1:1:n
   if ( S(i).type=='N' && S(i).E>0 )
     if(cluster-1>=1)
       min_dis=sqrt( (S(i).xd-S(n+1).xd)^2 + (S(i).yd-S(n+1).yd)^2 );
       min_dis_cluster=1;
       for c=1:1:cluster-1
           temp=min(min_dis,sqrt( (S(i).xd-C(c).xd)^2 + (S(i).yd-C(c).yd)^2 )
);
           if ( temp<min_dis )
               min_dis=temp;
               min_dis_cluster=c;
           end
       end

      %Calcul de l'énergie consommée par les noeuds(l'énergie de
       %transmission vers les CH

            min_dis;
            if (min_dis>do)
                S(i).E=S(i).E- ( ETX*(4000) + Emp*4000*( min_dis * min_dis *
min_dis * min_dis));
            end
            if (min_dis<=do)
                S(i).E=S(i).E- ( ETX*(4000) + Efs*4000*( min_dis * min_dis));
            end
        %calcul de l'énergie consommée par les CH
        %(réception et d'agrégation de données)

        if(min_dis>0)
          S(C(min_dis_cluster).id).E = S(C(min_dis_cluster).id).E- ( (ERX +
EDA)*4000 );
         PACKETS_TO_CH(r+1)=n-dead-cluster+1;
        end
 %%%%% LA TABLE D'APPARTENANCE DES NOEUDS
       S(i).min_dis=min_dis;
       S(i).min_dis_cluster=min_dis_cluster;
   end
 end
end
hold on;
countCHs;
rcountCHs=rcountCHs+countCHs;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  PARAMETRES DE SORTIE   %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%                                                                  %%%%%%%
%  DEAD : nombre de nœuds morts  par tour)                                      %
%  DEAD_A : nombre de nœuds avancés morts  par tour)                            %
%  DEAD_N : nombre de nœuds normaux morts  par tour)                            %
%  CLUSTERHS : nombre de clusters formé par tour                                %
%  PACKETS_TO_BS : nombre de messages reçus par la station de base par          %
%  tour                                                                         %
%  PACKETS_TO_CH : nombre de messages reçus par les CHs par tour                %
%  first_dead: période de stabilité du réseau                                   %
%%%%%%%                                                                 %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```