

République Algérienne Démocratique et
Populaire Ministère de l'Enseignement
Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draia - Adrar Faculté des
Sciences et de la Technologie
Département des sciences et technologie



Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de Master
en électrotechnique
Spécialité : Commande Electrique

Thème

L'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Préparé par :

BEN ABDELKARIM Nasrelddin.

ABDAD Abdelkader.

Membres de jury :

Dr. KADDI Mohammed

Encadreur

Mr. BELBAKRI.T:

Examinateur

Dr. MASMOUDI.R

Examinateur:

Année Universitaire 2021/2022

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria

Ministry of Higher Education and
Scientific Research
University Ahmed Draia of Adrar
The central library



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة أحمد دراية- أدرار
المكتبة المركزية
مصلحة البحث البليوغرافي

شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة): قاضي محمد KADDI MOHAMMED

المشرف مذكرة الماستر الموسومة بـ : L'énergie Dans Les Réseau De Capteur Sans Fil

من إنجاز الطالب(ة): عباد عبد القادر ABDAD ABDELKADER

و الطالب(ة): بن عبد الكريم نصر الدين BEN ABDELKARIM NASRELDINE

كلية : علوم وتكنولوجيا

القسم : الإلكتروني

التخصص: تحكم كهربائي

تاريخ تقييم / مناقشة: 2022 / 06

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين
النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها.
وبإمكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والالكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:

ادرار في : 2022/06/20

مساعد رئيس القسم:



ملاحظة: لاتقبل أي شهادة بدون التوقيع والمصادقة.

Résumé

Un réseau de capteurs / micro capteurs est un ensemble coopérant de nœuds capteurs utilisant des communications sans fil dans le cadre d'un réseau ad-hoc. Chaque nœud comporte un capteur permettant d'observer un phénomène se produisant à proximité. Cette technologie de micro capteurs a ouvert de nouvelles perspectives applicatives variées dans de nombreux domaines (militaires, domotiques, environnementales, etc.). Cependant, son exploitation reste difficile et pose beaucoup de problèmes. Les difficultés se situent au niveau algorithmique, localisation, déploiement, collecte/fusion de données, ainsi que la couverture et la réduction de la consommation d'énergie pour maximiser la durée de vie du réseau. En effet, la seule source d'énergie d'un nœud capteur est sa batterie à durée de vie déterminée. Et le réseau doit assurer ses fonctions avec la quantité d'énergie dont il dispose sans l'intervention de l'opérateur qui l'a déployé. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est d'étudier le problème d'énergie dans le réseau de capteur sans fil.

Mots clés : Nœud capteur, réseau de capteurs sans fil, énergie.

Abstract

A sensor/micro sensor network is a cooperating set of sensor nodes using wireless communications as part of an ad-hoc network. Each node comprises a sensor making it possible to observe a phenomenon occurring nearby. This micro-sensor technology has opened up new and varied application perspectives in many fields (military, home automation, environmental, etc.). However, its exploitation remains difficult and poses many problems. The challenges are at the algorithmic level, localization, deployment, data collection/fusion, as well as coverage and reducing power consumption to maximize network lifetime. Indeed, the only energy source of a sensor node is its battery with a determined lifespan. And the network must perform its functions with the amount of energy it has without the intervention of the operator who deployed it. In this context, the objective of this work is to study the energy problem in the wireless sensor network.

Keywords: Sensor node, wireless sensor network, energy.

Remercîment

Avant toutes choses, nous tenons à remercier « Allah » le tout Puissant Qui nous a donné patience et persévérance pour achever notre travail.

Je remercie très vivement mon encadreur Dr. Kaddi Mohammed pour m'avoir conseillé et encouragé et pour m'avoir fait partager son expérience et ses connaissances.

Je rends honneur à tous les membres du jury pour leur acceptation de faire partie de cette commission à l'effet d'apprécier et d'évaluer objectivement notre mémoire

Enfin, je remercie notre parents et toute notre famille, mes notre pour leur soutien et leurs encouragements.

Dédicace

Je remercie avant tout, DIEU tout puissant qui, sans Sa volonté, ce travail

n'aurait jamais vu le jour. « الحمد لله والشكر »

A mes chers parents, qui sont la cause de mon existence dans cette vie, pour leur soutien, patience et amour qui m'ont donné la force pour continuer mes études.

Je remercie mon directeur de projet, Mr le Dr Kaddi Mohammed pour avoir bien voulu diriger et superviser ce projet ayant pour thème un domaine très instructif et intéressant, mais aussi, pour ses conseils avisés, ses encouragements, sa patience et la confiance qu'il m'a accordé.

Mes remerciements les plus chaleureux vont enfin, à toute personne ayant contribué un temps sois peu, de près ou de loin, à l'accomplissement de ce modeste travail.

Table de matière

Table des matières

Résumé	I
<i>Remercîment</i>	II
<i>Dédicace</i>	III
Table de matière	IV
Liste de Figures	VIII
Liste de Tableau	VIII
Table des acronymes	IIX
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Généralité sur les réseaux de capteurs sans fil	1
Sommaire	1
1.1 Introduction.....	4
1.2 Capteur	4
1.2.1 Définition d'un capteur	4
1.2.2 Types de capteurs.....	5
1.3.1 Capteurs sans fil	6
1.3.2 Architecture d'un capteur sans fil	6
1.3.2.1 Architecture matérielle	6
1.3.2.2 Architecture logiciel.....	8
1.4 Réseaux de capteurs sans fil	8
1.4.2 Architecture d'un RCSF :.....	9
1.4.3 Caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil	10
1.4.4 Architecture protocolaire (pile protocolaire)	11
1.4.5 Topologies du réseau.....	14
1.4.6 Facteurs de conception d'un RCSF.....	15
1.4.7 Classification des RCSF	15
1.4.8 Applications des RCSF.....	17
1.4.8.1 Applications militaires.....	17
1.4.8.3 Applications dans le domaine médical	18
1.4.9. Comparaison entre les RC SF et les réseaux Ad-Hoc	20
1.5 Conclusion.....	21
Chapitre 2 Techniques de la récolte d'énergie	22

Sommaire	22
2.1 Introduction.....	23
2.2 Définition de la récolte d'énergie.....	23
2.3 Sources d'énergie.....	23
2.3.1 Les sources d'énergie primaires.....	23
2.3.2 Les sources d'énergie secondaires	25
2.3.3 Définition d'une source d'énergie.....	26
2.3.4 Les sources d'énergie propres	26
2.4 Techniques de la récolte d'énergie.....	26
2.4.2 Génération de l'énergie	27
2.4.3 Conversion de l'énergie.....	28
2.5 Avantages.....	32
2.6 Conclusion	33
Chapitre 3 Capteurs solaires thermiques	34
Sommaire	34
3.1 Introduction.....	35
3.2 L'énergie solaire.....	35
3.3 Capteurs solaires thermiques.....	36
3.4 Principe.....	36
3.5 Types de capteurs.....	37
3.6 Classification des capteurs thermiques	37
3.6.1 Capteurs plans.....	39
3.6.2 Capteur solaire à tube sous vide.....	42
3.6.3 Capteurs à concentration	43
3.7 Avantages et inconvénients des capteurs solaires thermiques.....	46
3.8 Conclusion.....	47
Chapitre 4 Contribution et implémentation	48
Sommaire	48
4.1 Introduction	49
4.2 Description de notre solution proposée	49
4.2.1 Communication intra-cluster	49
4.2.2 Communication inter-clusters.....	50
4.3 Evaluation des performances de notre solution proposée.....	52
4.3.1 Environnement de simulation	52

4.3.2 Caractéristiques matérielles	53
4.3.3 Modèle d'énergie	53
4.3.4 Paramètres de simulation.....	54
4.3.5 Résultats de simulation et analyses	55
4.3.5.1 Durée de vie.....	55
4.3.5.2 Consommation d'énergie.....	56
4.3.5.3 Taux de livraison de paquets	56
4.4 Conclusion.....	57
Conclusion Générale	59
Référence	61

Liste de Figures

Figure1. 1 Fonctionnement d'un capteur	5
Figure1. 2 Les composants d'un capteur	7
Figure1. 3 Exemple de réseau de capteurs	9
Figure1. 4 Architecture d'un réseau de capteurs	10
Figure1. 5 Pile protocolaire d'une architecture de réseau de senseurs	12
Figure1. 6 La topologie en étoile	14
Figure1. 7 La topologie maillée	14
Figure1. 8 La topologie hybride	15
Figure1. 9 Classification des RCSF	16
Figure1. 10 Quelques applications des RCSF	19
Figure2. 1 Générateur piézo-électrique	28
Figure2. 2 Générateur thermoélectrique	29
Figure2. 3 Schéma de bloc d'un μ CTag flexible et intelligent	30
Figure2. 4 Récolteur d'énergie d'oreille	32
Figure2. 5 Récolteur d'énergie du cœur	32
Figure2. 6 Récolteur d'énergie à partir des mouvements de transpiration	32
Figure3. 1 classifications de l'exploitation de l'énergie solaire	35
Figure3. 2 processus dans un capteur solaire plan	37
Figure3. 3 Vue schématique en coupe d'un capteur plan à circulation de liquide avec un tube en serpentin	40
Figure3. 4 Tube sous vide	42
Figure3. 5 Capteur sous vide	42
Figure3. 6 Capteur sous vide a caloduc	43
Figure3. 7 Capteur à concentration	43
Figure3. 8 Concentrateur entièrement mobile	45
Figure3. 9 Capteur à chaudière fixe et concentrateur mobile	45
Figure 3. 10 Capteur à renforcement du rayonnement	46
Figure 4. 1 Communication inter-clusters de notre solution proposée.....	52
Figure 4. 2 Le modèle de dissipation de l'énergie utilisé.....	54
Figure 4. 3 Durée de vie de réseau.....	56
Figure 4. 4 Energie résiduelle moyenne pour un réseau.....	56
Figure 4. 5 Taux de livraison de paquets (PDR) pour un réseau.....	57

Liste de Tableau

Tableau 1. 1 Quelques exemples de capteurs et leurs différentes propriétés.....	5
Tableau 1. 2 Comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad-Hoc.....	21
Tableau 3. 1.1classification des capteurs solaires.....	38
Tableau 4.1 Caractéristique des trois types des cellules de silicium	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 4.2 Caractéristique physique du composant du capteur PV/T	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 4.3 Potentiel solaire en Algérie	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 4. 1 caractéristiques matérielles de l'ordinateur utilisé.....	53
Tableau 4. 2 Paramètres de simulation.....	54

Table des acronymes

RCSF	Réseaux de Capteurs Sans Fil.
WSN	Wireless Sensor Network.
LLC	Pour Logiciel Link Control.
MAC	Pour Medium Access Control.
WPAN	Wireless Personal Area Network.
RFID	Radio Frequency Identification.
RF	Fréquence
ECS	Chauffe-eau solaire
PV-T	Photovoltaïque thermique

Introduction générale

Introduction générale

Les progrès technologiques réalisés ces dernières années dans le domaine des réseaux sans fil, de la micro fabrication et des microprocesseurs embarqués ont permis la production de nouveaux types de capteurs dotés de moyens de communication sans fil, peu onéreux et pouvant être configurés pour former des réseaux à hautes autonomies et à infrastructures non prédéfinies. Ensemble, ils forment un réseau de capteurs sans fil capable de surveiller une région ou un phénomène d'intérêt, de fournir des informations utiles par la combinaison des mesures prises par les différents capteurs, de les traiter pour les communiquer ensuite via le support sans fil à un ou plusieurs points de collecte.

De nombreux domaines d'application sont alors envisagés pour ces réseaux, tels que le contrôle de l'environnement, la détection et la surveillance des désastres, le domaine militaire et médical, la domotique et bien d'autres.

En effet, la petite taille des nœuds capteurs impose des limites sur leurs capacités de traitement, de stockage et surtout d'énergie ; car ils sont généralement alimentés par des batteries à capacités limitées. Recharger les batteries dans un réseau de capteurs est parfois impossible en raison de l'emplacement des nœuds, mais le plus souvent pour la simple raison que cette opération est pratiquement irréalisable. Il est donc couramment admis que la limitation énergétique est une question incontournable dans la conception des réseaux de capteurs en raison des contraintes strictes qu'elle impose sur son exploitation.

L'objectif de ce travail est la recherche d'innovations dans le domaine de l'intégration de l'énergie solaire thermique et photovoltaïque afin d'améliorer les performances de cette technologie. Ce travail de thèse se découpe en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons un présenté génialité sur les Réseaux de capteur sans fil, définition, leurs architectures, leur classification, pile protocolaire et contraintes qui influencent la conception de ce type de réseaux puis en fait une comparaison entre les RCSF et réseaux ad hoc ainsi que les différents domaines d'applications.

Dans le deuxième chapitre, Cette section introduit le concept de la récolte d'énergie puis explicite ses principales techniques et son importance pour les RCSF.

Dans Le troisième chapitre, constitue une synthèse bibliographique à la fois technologique et scientifique sur les capteurs solaires thermiques.

Introduction générale

Dans le quatrième chapitre, nous avons réalisé des expériences de simulation pour mesurer les performances de notre protocole MOD-GRASP. L'évaluation des performances a montré que MOD-GRASP fournit une de meilleures économies d'énergie et une meilleure durée de vie du réseau que le protocole LEACH.

Chapitre 1

Généralité sur les réseaux de capteurs sans fil

Sommaire

1.1 Introduction

1.2 Capteur

1.3 Capteurs sans fil

1.4 Réseau de capteurs sans fil

1.4.1 Définition d'un réseau de capteur

1.4.2 Architecture d'un RCSF La pile protocolaire des RCSF

1.4.3 Caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil

1.4.4 Architecture protocolaire (pile protocolaire)

1.4.5 Topologies du réseau

1.4.6 Facteurs de conception d'un RCSF

1.4.7 Classification des RCSF

1.4.8 Applications des RCSF

1.4.9 Comparaison entre les RC SF et les réseaux Ad-Hoc

1.5 Conclusion

1.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont une nouvelle classe des réseaux qui deviennent très populaires avec un grand nombre d'applications civiles et militaires. Le RCSF est un réseau sans fil qui contient des dispositifs (capteurs) indépendants et distribués destinés à surveiller les conditions physiques ou environnementales. Un réseau de capteurs sans fil se compose d'un ensemble de nœuds capteurs minuscules, qui communiquent entre eux et échangent des informations et des données. Ces nœuds obtiennent des informations sur l'environnement telles que la température, la pression, l'humidité ou les polluants et envoient ces informations à une station de base. Cette dernière envoie les informations à un réseau filaire ou active une alarme ou une action, selon le type et l'ampleur des données surveillées [1] [2].

Les applications typiques incluent la surveillance du temps et des forêts, la surveillance du champ de bataille, la surveillance physique des conditions environnementales, telles que la pression, la température, les vibrations, les polluants ou le traçage des mouvements humains et animaux dans les forêts et les frontières [1] [3].

L'objectif de ce chapitre est de fournir une présentation générale des réseaux de capteurs sans fil, caractéristiques, Architecture protocolaire, Facteurs de conception, Classification, applications, Comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad Hoc.

1.2 Capteur

L'utilisation des capteurs sans fil est de plus en plus demandée dans la vie courante. Les industries proposent des capteurs sans fil qui peuvent renseigner l'utilisateur sur plusieurs données selon le domaine d'application. Ces capteurs ont une architecture et des caractéristiques bien déterminées qui seront détaillées par la suite.

1.2.1 Définition d'un capteur

Un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique (telles que la température, les vibrations et la pression) observée en une grandeur utilisable comme le montre la figure 1.1. Cet appareil est augmenté de capacités de calcul et de communication avec d'autres nœuds afin de faire circuler les informations détectées à travers un réseau sans fil [1].

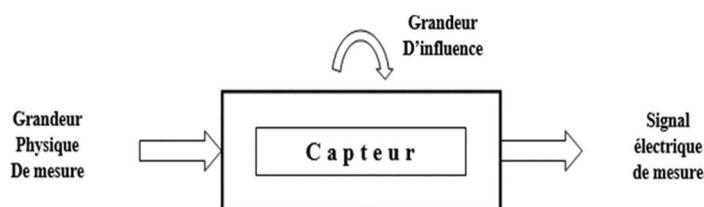


Figure 1. 1 Fonctionnement d'un capteur [1].

1.2.2 Types de capteurs

Il existe actuellement un grand nombre de capteurs, avec des fonctionnalités diverses et variées. La plupart des capteurs dépendent de l'application pour laquelle ils ont été conçus (capteurs aquatiques, sous-terrain, etc.) [4]

Depuis un peu plus de 10 ans, la technologie des capteurs sans fil a beaucoup évoluée. Les modules deviennent de plus en plus petits et les durées de vie prévues augmentent.

Le tableau suivant résume quelques exemples de capteur et leurs différentes propriétés :

Tableau 1. 1 Quelques exemples de capteurs et leurs différentes propriétés [5].

Type de Nœud	 Telos (Intel [Web17])	 Mica2 (Berkeley [Web18])	 SunSPOT (Sun[Web19])	 Imote2 (Crossbow [Web20])
Type de Micro	8 Mhz,	7.37 Mhz,	180 Mhz,	13-416 Mhz,
Contrôleur	8 bits	8 bits	32 bits	16 bits
RAM	2 Ko	4 Ko	512 Ko	256 Ko
ROM	256 Ko	512 Ko	4 Mo	32 Mo
Bande passante	250 Kbps	38.4 Kbps	250 Kbps	250 Kbps
Capacité de la batterie	Coin cell 1000 mAh	2xAA 5700 mAh	Rechargeable 750 mAh	3xAAA 3750 mAh
Portée maximale (m)	100	150-300 m	100	100

Radio	Chipcon CC2420 2.4GHz 250 Kbps IEEE 802.15.4	Chipcon CC1000 315/433/33/868 916 Mhz 38.4 Kbauds	Chipcon CC2420 2.4GHz 250 Kbps IEEE 802.15.4	Chipcon CC2420 2.4GHz 250 Kbps IEEE 802.15.4
Système	TinyOS	TinyOS	Squawk	TinyOS
D'exploitation			(Machine virtuelle Java)	
Connexion au PC	Port série	Carte de Programmation	Interface USB	Interface USB

1.3 Capteur sans fil (CSF)

1.3.1 Capteurs sans fil

Les capteurs sont des dispositifs de taille extrêmement réduite avec des ressources très limitées, autonomes, capable 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. [6]

1.3.2 Architecture d'un capteur sans fil

1.3.2.1 Architecture matérielle

Un nœud capteur est un assemblage de quatre composants principaux représentés sur la figure 1.2. Une unité de capture, une unité de traitement, une unité de communication et une unité d'énergie ainsi que trois autres composants additionnels sont envisageables selon le domaine d'application tels qu'un système de localisation, un mobilisateur chargé de déplacer le micro capteur en cas de nécessité et un générateur d'énergie (cellule solaire) [7].

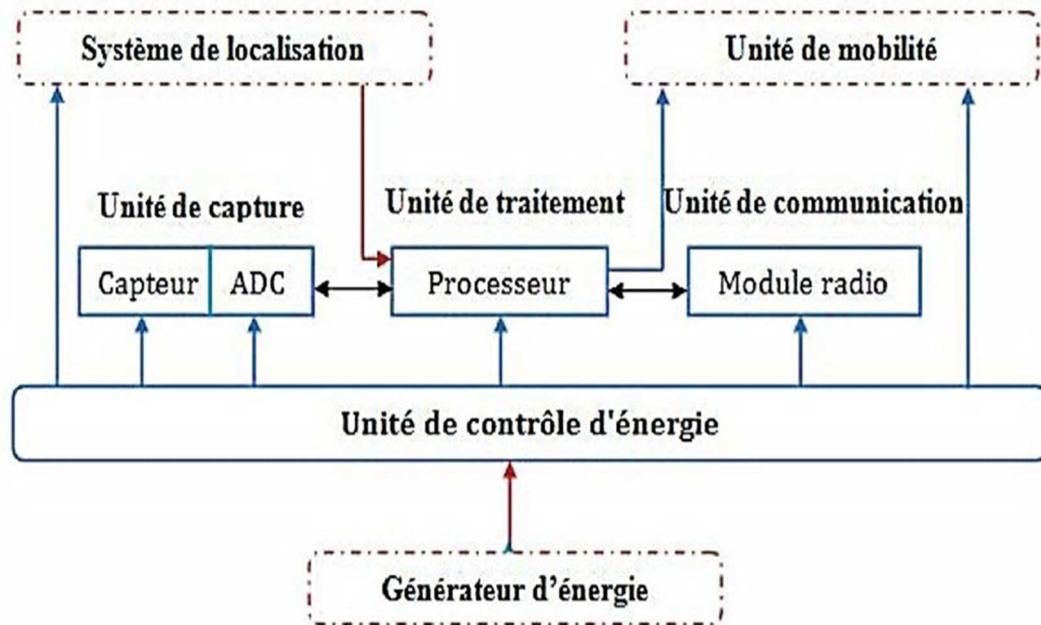


Figure 1. 2 Les composants d'un capteur [7].

On peut voir sur la figure.1.2. Les différents composants qui constituent un nœud capteur. Pour être plus précis chaque partie des composants possède son propre rôle :

- **Unité de capture** : Elle permet de capter le phénomène observé et le convertir depuis un signal analogique en un numérique. Il sera, ensuite, fourni à l'unité de calcul.
- **Unité de traitement** : C'est l'unité principale du capteur, elle est chargée d'exécuter les protocoles de communication qui permettent aux nœuds capteurs de collaborer avec les autres nœuds du réseau afin d'accomplir la requête en question.
- **Unité de communication** : Elle a pour fonction l'exécution de toutes les émissions et les réceptions des données.
- **Unité de contrôle d'énergie** : Elle effectue des opérations de contrôle de l'énergie restante et de mesure de la durée de vie du capteur.
- **Système de localisation** : Il présente des informations sur la position du nœud capteur.
- **Unité de mobilité** : Selon le type du réseau, il est appelé si le capteur doit être déplacé afin d'accomplir sa tâche.
- **Générateur d'énergie** : Il récupère l'énergie de l'environnement extérieur tel que l'énergie solaire puisque le capteur se laisse pendant des mois et même durant des années sans l'intervention humaine. Celle-ci n'est pas un grand problème pour les réseaux sans fil traditionnel, car on peut toujours recharger les batteries des dispositifs sans fil comme les téléphones portables ou les ordinateurs portables. Mais, dans un RCSF, il est difficile (parfois impossible dans certaines applications) de changer la batterie [8].

1.3.2.2 Architecture logiciel

En plus des plateformes matérielles et des standards, plusieurs plateformes logicielles ont été également développées spécifiquement pour les réseaux de capteurs sans fil. La plateforme la plus répandue est le TinyOS, qui est un système d'exploitation open source conçu pour les RCSF [8].

En plus de TinyOS, plusieurs plateformes logicielles et systèmes d'exploitation ont été introduits récemment, comme LiteOS ou CONTIKI par exemple. Tandis que plusieurs systèmes d'exploitation avec des capacités supplémentaires sont devenus disponibles, TinyOS est toujours employé couramment dans la recherche sur les RCSF, une des raisons principales de cette popularité est le vaste espace de code établi dans toutes les solutions développées.

1.4 Réseaux de capteurs sans fil

Contrairement aux réseaux filaires traditionnels, les réseaux de capteurs sans fil offrent une grande flexibilité tout en s'affranchissant aux problèmes liés aux câblages et la mobilité des nœuds.

Dans le paragraphe suivant, nous étudierons ce nouveau type de réseaux sans fil, son architecture, les différences qui le distingue des réseaux ad hoc ainsi que ses principales caractéristiques.

1.4.1 Définition d'un réseau de capteurs

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN pour Wireless Sensor Networks) sont considérés comme un type spécial de réseaux ad hoc. Cela sous-entend que ces réseaux sont dépourvus d'infrastructure préexistante et d'administration centralisée, où chaque nœud peut communiquer via des interfaces sans fil (généralement en utilisant le support radio) [9].

Les nœuds de réseaux consistent en un grand nombre (centaines voire des milliers) de capteurs matériellement petits, construits à partir des composants pas chers pour maintenir un coût de réseau maniable, et placés généralement près des objets auxquels ils s'intéressent dans les environnements où ils sont déployés. Ces capteurs sont capables de récolter, traiter et d'acheminer les données environnementales de la région surveillée d'une manière autonome, vers une ou plusieurs stations de collecte appelées nœuds puits ou stations de base [10] [11] (voir figure 1.3).

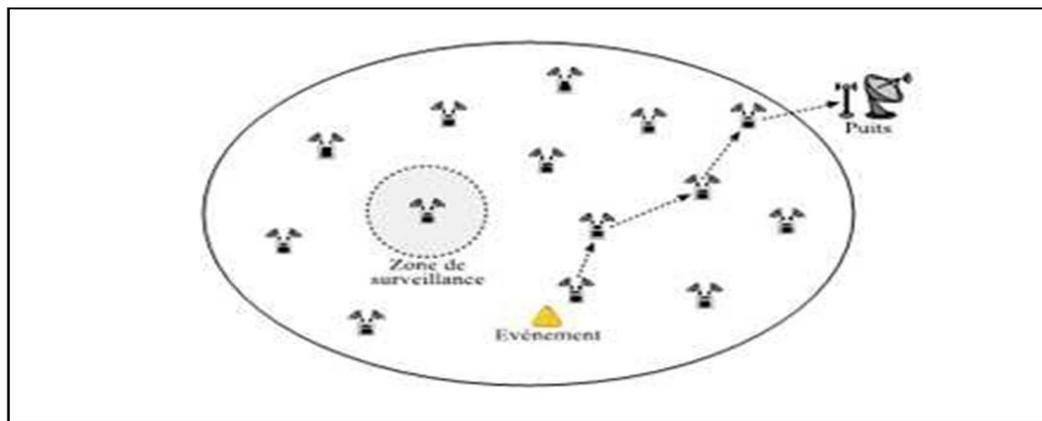


Figure 1. 3 Exemple de réseau de capteurs [10] [11].

En effet, ces réseaux se trouvent à la confluence d'une variété de domaines de recherche : systèmes distribués, réseaux mobiles ad hoc, robotiques et systèmes de sécurité. Et donc, leur capacité de communication et souplesse de déploiement, par simple dissémination aléatoire des nœuds capteurs (par exemple : largage depuis un avion ou un bateau) dans la zone de surveillance, comporter à leur utilisation dans des secteurs différents et permettant ainsi leur intégration dans des environnements hostiles où l'intervention humaine après déploiement est difficile et parfois impossible. Comme par exemple : les incendies de forêts, un site après tremblement de terre, champs de surveillances des ennemies et dans des régions glaciaires ou tropicales dans le but est de suivre de manière précise les effets du réchauffement de la planète, les changements climatiques et l'augmentation de la pollution [12] [13].

1.4.2 Architecture d'un RCSF :

L'architecture du réseau de capteurs est montrée dans la figure suivante (figure 1.4). L'utilisateur accède à distance aux données capturées à travers un nœud appelé le nœud directeur de tâche "Task Manager Node". Le nœud directeur de tâche est relié à l'Internet ou au satellite à travers un nœud destinataire "puits" (sink en anglais). Ce dernier agit en tant que passerelle pour le réseau de capteurs, c'est-à-dire qu'il relie des réseaux de capteurs à d'autres réseaux. Ce nœud est responsable, en plus de la collecte des rapports, de la diffusion des demandes sur les types de données requises aux capteurs via des messages de requêtes. Il a également d'autre capacité de traitement de l'information pour une transformation ultérieure s'il y a lieu. Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés dans une zone de capture appelée champ de captage. Les nœuds capteurs rassemblent les données et les conduisent au destinataire. De cette manière, les utilisateurs peuvent rechercher l'information dans les

nœuds commander l'environnement à distance. Notons qu'un réseau de capteurs peut contenir plusieurs nœuds puits diffusant des intérêts (ce sont la description des données requises par le nœud destinataire en utilisant une appellation combinée attribut valeur) différents. Par exemple, un nœud puits peut demander à tous les capteurs se trouvant dans la région nord du champ de captage d'envoyer un rapport de température chaque 1 minute, pendant qu'un autre peut être intéressé seulement par les hautes températures ($> 40^{\circ}\text{C}$) dans la région sud. Par conséquent, un capteur doit pouvoir stocker toutes les requêtes reçues, et les traiter séparément [14].

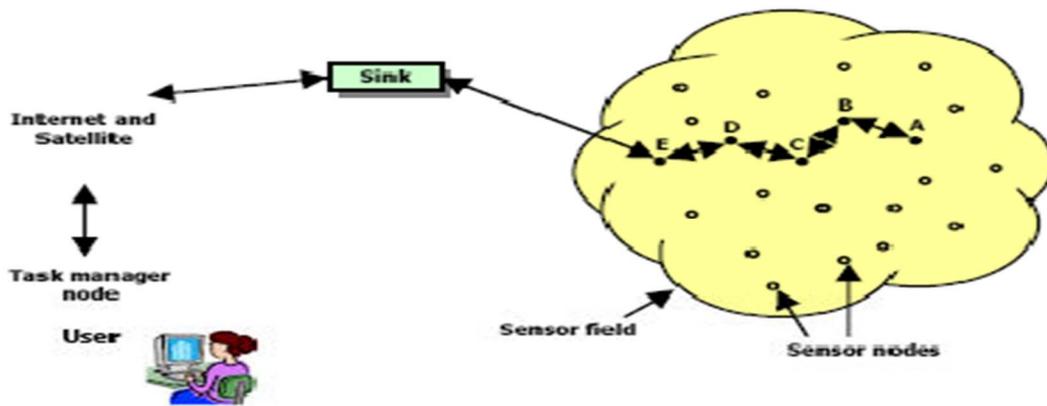


Figure 1. 4 Architecture d'un réseau de capteurs [14].

1.4.3 Caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil

Les applications des WSN devraient supporter la mise en œuvre et le fonctionnement de base d'un réseau de capteurs tout en tenant compte de certaines des caractéristiques suivantes :

- Les nœuds capteurs sont des dispositifs de petite taille (avec des volumes approchant un millimétré cube dans un proche avenir [15]).
- Les capteurs sont limités en termes de quantité d'énergie stockée et/ou récoltée partir de l'environnement. Ceci fait souvent de l'énergie la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteurs. Toutes les applications des RCSF : le routage [16] [17], le maintien de la connectivité. Ils utilisent des techniques pour assurer une conservation et une bonne gestion d'énergie, car cette dernière influe directement sur la dure de vie des nœuds capteurs et donc sur le réseau global.
- Les capteurs sont susceptibles de tomber en panne, suite à l'épuisement de leurs batteries ou à des influences environnementales. Ainsi, l'auto-configuration des nœuds capteurs et le développement des protocoles de détection et de remplacement des nœuds défectueux aident prolonger la durée de vie du réseau.

- Les capteurs ont des ressources limitées : la performance du processeur, la capacité mémoire, la largeur de bande et la portée de la communication sans fil.
- La mobilité des nœuds, les défaillances de nœuds, et les obstacles environnementaux causent de fréquents changements de topologie de réseau. Les défaillances de communication sont également un problème répandu dans les réseaux de capteurs sans fil. Un autre problème est l'hétérogénéité, car le réseau peut se composer d'un grand nombre de nœuds différents en termes de capteurs, de puissance de calcul, et de mémoire. D'une part, ce nombre lev de nœuds soulève des questions d'évolutivité, d'autre part, il fournit un niveau élevé de redondance. Les nœuds doivent également pouvoir fonctionner en mode sans surveillance puisqu'il est impossible d'entretenir un grand nombre de nœuds dans des endroits éloignés ou inaccessibles.

1.4.4 Architecture protocolaire (pile protocolaire)

Le rôle de cette pile consiste à standardiser la communication entre les participants afin que différents constructeurs puissent mettre au point des produits (logiciels ou matériels) compatibles.

Ce modèle comprend 5 couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI ainsi que 3 couches pour la gestion de la puissance, la gestion de la mobilité et la gestion des tâches.

Le but d'un système en couches est de séparer le problème en différentes parties (les couches) selon leur niveau d'abstraction.

Chaque couche du modèle communique avec une couche adjacente (celle du dessus ou celle du dessous). Chaque couche utilise ainsi les services des couches inférieures et en fournit à celle de niveau supérieur.

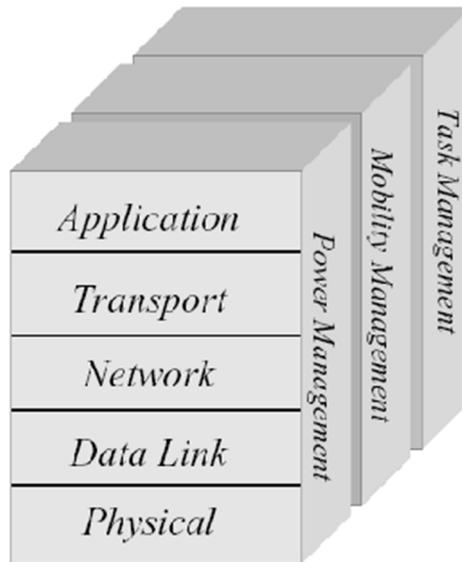


Figure 1. 5 Pile protocolaire d'une architecture de réseau de senseurs [18].

1.4.4.1 Couche physique

S'occupe de la spécification du câblage, des fréquences porteuses, etc.

Cette couche doit assurer des techniques d'émission, de réception et de modulation de données d'une manière robuste.

1.4.4.2 Couche liaison

Elle spécifie comment les données sont expédiées entre deux nœuds/routeurs dans une distance d'un saut. Elle est responsable du multiplexage des données, du contrôle d'erreurs, de l'accès sur le média, ...

Elle assure la liaison point à point et point à multipoint dans un réseau de communication. Elle est composée de la couche de contrôle de liaison logique (LLC pour Logiciel Link Control) qui fournit une interface entre la couche liaison et la couche réseau en encapsulant les segments de messages de la couche réseau avec des informations d'entête additionnelles, et la couche de contrôle d'accès au médium (MAC pour Medium Access Control) qui contrôle la radio.

Comme l'environnement des réseaux de capteurs est bruyant et les nœuds peuvent être mobiles, la couche de liaison de données doit garantir une faible consommation d'énergie et minimiser les collisions entre les données diffusées par les nœuds voisins.

1.4.4.3 Couche réseau

Cette couche permet de gérer l'adressage et le routage des données, c'est-à-dire leur acheminement via le réseau.

1.4.4.4 Couche transport

Cette couche est chargée du transport des données, de leur découpage en paquets, du contrôle de flux, de la conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.

1.4.4.5 Couche application

Cette couche assure l'interface avec les applications. Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par les logiciels.

1.4.4.6 Niveau de gestion d'énergie

Les fonctions intégrées à ce niveau consistent à gérer l'énergie consommée par les capteurs. Dès lors, un capteur peut par exemple éteindre son interface de réception dès qu'il reçoit un message d'un nœud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués. De plus, quand un nœud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser un message aux autres capteurs pour ne pas participer aux tâches de routage, et conserver l'énergie restante aux fonctionnalités de capture [19].

1.4.4.7 Niveau de gestion de mobilité

Ce niveau détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds capteurs, de manière à leur permettre de garder continuellement une route vers l'utilisateur final, et maintenir une image récente sur les nœuds voisins. Cette image est nécessaire pour pouvoir équilibrer l'exécution des tâches et la consommation d'énergie [19].

1.4.4.8 Niveau de gestion des tâches

Lors d'une opération de capture dans une région donnée, les nœuds composant le réseau ne doivent pas obligatoirement travailler avec le même rythme. Cela dépend essentiellement de la nature du capteur, son niveau d'énergie et la région dans laquelle il a été déployé. Pour cela, le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau [19].

1.4.5 Topologies du réseau

Pour prendre en charge le transfert de données depuis les nœuds capteurs jusqu'au nœud puits, le réseau peut être configuré selon différentes topologies [20] [21].

1.4.5.1 Topologie en étoile (Star Network)

C'est une topologie simple (représentée par la figure 1.6), où chaque nœud communique ses mesures directement à l'unique station de base sans avoir la possibilité d'échanger des messages avec les autres capteurs. La station de base est la seule à pouvoir recevoir ou envoyer des messages aux nœuds du réseau. Cette approche peut de manière significative simplifier la conception, car les soucis de gestion du réseau sont réduits au minimum. Néanmoins, elle présente des limites en terme : de scalabilité et de robustesse, due à sa dépendance sur un seul nœud pour contrôler et gérer le réseau.

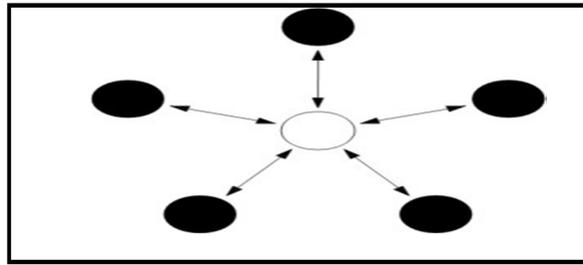


Figure 1. 6 La topologie en étoile [20] [21].

1.4.5.2 Topologie maillée (Réseau maillé)

Dans ce type de topologie, une communication multi sauts est utilisée comme mode d'acheminement de messages, où n'importe quel nœud peut envoyer à n'importe quel autre nœud dans le réseau à condition qu'il soit dans sa portée de transmission, sinon un nœud intermédiaire intervient pour envoyer le message au nœud destinataire (voir figure 1.7).

L'avantage de cette topologie est la possibilité du passage à l'échelle et la tolérance aux pannes, par contre la consommation d'énergie dans la communication multi sauts et les latences créées sont les inconvénients majeurs de cette topologie.

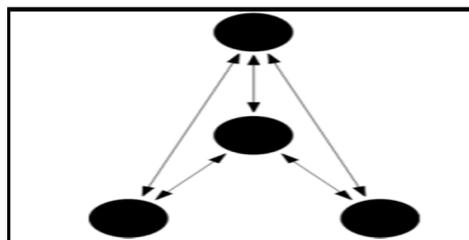


Figure 1. 7 La topologie maillée [20] [21].

1.4.5.3 Topologie hybride (Hybride Star – Réseau maillé)

Pour minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs, une topologie hybride entre celle en étoile et en **mesh** est conçue (voir figure 1.8). Elle fournit des communications réseau robustes et diverses. Il existe des nœuds qui ont la possibilité de router les messages des autres nœuds à faible puissance. Généralement, ces nœuds à capacité multi sauts ont une puissance plus élevée que les autres nœuds du réseau.

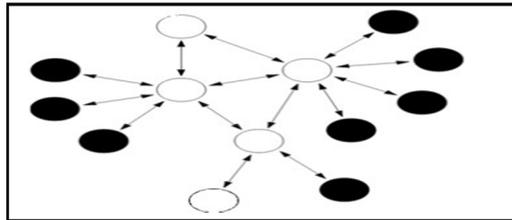


Figure 1. 8 La topologie hybride [20][21].

1.4.6 Facteurs de conception d'un RCSF

La conception d'un RCSF prend en compte différents facteurs, allant de la tolérance aux pannes à la consommation d'énergie, en passant par la scalabilité, le coût de production, la topologie du RCSF ainsi que les contraintes matérielles et les supports de transmission.

Bon nombre de recherches ont été effectuées sur chacun de ces facteurs, sans pour autant considérer l'ensemble de ceux-ci lors de la conception effective d'un RCSF, ce qui se répercute négativement sur le résultat obtenu. Nous exposant dans ce qui suit d'une manière non exhaustive, chacun de ces facteurs considérés comme repères lors de la conception d'algorithmes ou protocoles pour les RCSF [22].

1.4.7 Classification des RCSF

Il existe plusieurs critères pour classifier les réseaux des capteurs [23] [24] [25]. En effet, pour chaque type d'application, ces réseaux ont des caractéristiques différentes. Ils se distinguent par le mode d'acquisition et de livraison des données au puits, la distance entre les nœuds capteurs et le puits, le modèle de mobilité dans le réseau, les capacités des nœuds du réseau, etc.

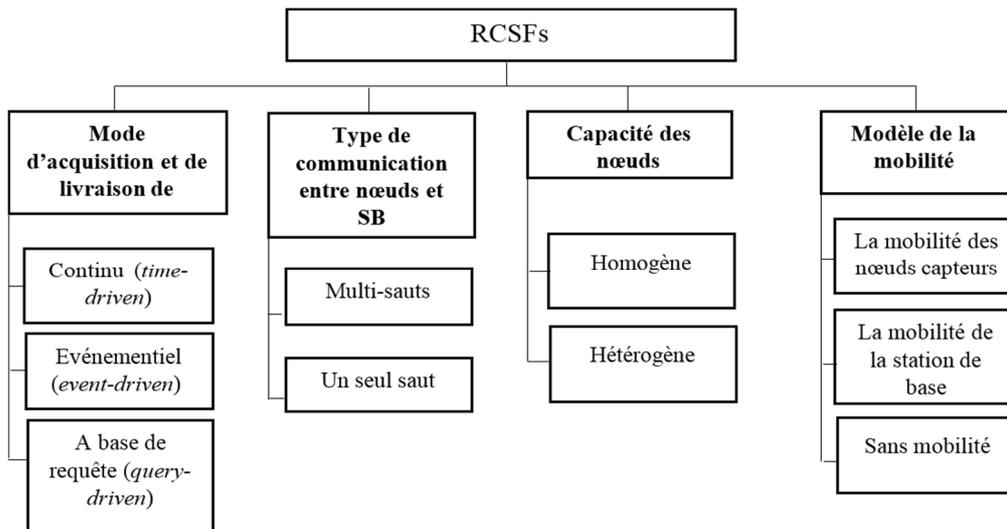


Figure 1. 9 Classification des RCSF [25].

Nous s'intéressons dans ce chapitre par le mode d'acquisition et de livraison des données.

1.4.7.1 Selon le mode d'acquisition et de livraison des données au puits

Dans les réseaux de capteurs, le modèle d'acquisition et de livraison des données au puits dépend de l'application et de ses exigences. Il peut être :

Continu (time-driven)

Les nœuds doivent périodiquement (intervalle de temps constant) veiller leurs metteurs pour envoyer les données captées la station de base. Ce type de modèle est recommandé dans les applications de surveillance où le but principal est d'avoir des informations régulières de la zone surveillée.

Événementiel (event-driven)

Les capteurs envoient leurs mesures seulement quand il y a un évènement qui se produit. Ce type de modèle est recommandé pour les applications de surveillance d'évènements critiques, le but principal est l'obtention d'une information sur l'évènement le plus rapidement possible.

A base de requête (query-driven)

Dans le modèle orient requêtes, les capteurs mesurent des phénomènes et stockent ces mesures dans leurs mémoires. Ils envoient ces mesures seulement quand ils reçoivent des requêtes de la station de base.

Hybride

C'est une combinaison des trois modèles précédents.

1.4.8 Applications des RCSF

Les nœuds des réseaux de capteurs peuvent comporter différents types de capteurs, tels que les capteurs sismiques, thermiques, visuels, infrarouges, acoustiques et radar, qui sont capables de surveiller une grande variété de phénomènes ambiants, notamment [26] :

- Température
- Humidité
- Mouvement des véhicules
- Pression
- Différents niveaux de bruits
- Présence ou absence de certains types d'objets

Niveaux de stress mécanique sur des objets attachés, ainsi que les caractéristiques courantes d'un objet, telles la vitesse, la direction ou encore le volume de l'objet donné.

Les nœuds capteurs peuvent être utilisés pour la surveillance continue d'un phénomène, la détection d'événements, l'identification d'événements ou encore la surveillance d'une position ou emplacement donné.

Le concept de micro-capteurs interconnectés via un support sans fil ouvre la voie vers de nombreux et nouveaux domaines d'applications qui peuvent être catégorisés en des domaines touchant au militaire, à l'environnement, la santé, les milieux ambiants (maisons) ainsi qu'à d'autres applications commerciales. Il existe aussi d'autres catégories telles que les RCSF destinés à l'exploration spatiale, aux traitements chimiques ou aux secours en cas de désastres[22] [27].

1.4.8.1 Applications militaires

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être une partie intégrante dans les systèmes militaires de Commandes, Contrôle, Communication, Calcul, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance et Ciblage (Targeting), ou systèmes « C4ISRT ». Le déploiement rapide, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des RCSF en font une solution prometteuse dans un tel domaine [28].

Le fait que les RCSF soient basés sur le déploiement dense d'un grand nombre de nœuds capteurs jetables et à coût réduit, la destruction de certains nœuds n'affectera pas le déroulement d'une opération militaire, ce qui favorise l'utilisation des RCSF sur les champs de bataille. Voici des exemples concrets d'applications militaires qui font appel aux réseaux de capteurs sans fil :

A) Contrôle et surveillance des forces, équipements et munitions

B) Reconnaissance et surveillance du champ de bataille

C) Détection et reconnaissance des attaques nucléaires, biologiques et chimiques

1.4.8.2 Applications dans l'environnement

Parmi les applications des RCSF dans l'environnement, on trouve :

- Pistier le mouvement d'oiseaux, de petits animaux et d'insectes.
- Surveillance et contrôle des aspects environnementaux qui peuvent affecter les récoltes et le bétail.
- Détection chimique et biologique.
- Détection d'incendies de forêts.
- Travaux de recherche météorologiques et géophysiques.
- Détection d'inondations.
- Études de pollution et schématisation de la bio-complexité de l'environnement etc...

1.4.8.3 Applications dans le domaine médical

Les réseaux de capteurs peuvent être très utiles dans le domaine médical :

- Fournir des interfaces d'aides aux handicapés.
- Capteurs intégrés pour la surveillance de patients.
- Diagnostique.
- Administration des médicaments au sein de l'hôpital.
- Surveillance des mouvements et processus internes d'insectes ou d'autres petits animaux.

Télésurveillance et contrôle de données physiologiques humaines

Les informations physiologiques collectées par un RCSF peuvent être stockées pendant une longue période et utilisées par la suite pour des fins multiples, notamment les explorations.

1.4.8.4 Applications dans les maisons Automatisation des maisons

Grâce aux avancées technologiques, des nœuds capteurs intelligents peuvent être intégrés dans les appareils électroménagers tels que les aspirateurs, fours micro-ondes, réfrigérateurs et magnétoscopes. Ces nœuds capteurs peuvent interagir entre eux ainsi qu'avec les réseaux externes via Internet ou à travers les satellites pour permettre à l'utilisateur de contrôler plus aisément ces appareils d'une façon locale ou distante.

1.4.8.5 Autres applications commerciales

Les réseaux de capteurs possèdent également d'autres applications dans le domaine commercial telles que :

Surveillance de l'état du matériel,

- Gestion des inventaires,
- Contrôle de qualité des produits,
- Construction des espaces d'achat intelligents,
- Contrôle des robots dans les environnements de fabrications automatiques,
- Les musées interactifs,
- Diagnostic des machines,
- Détection et la surveillance des vols de voitures, etc.

Détection et surveillance des vols de voitures

Gestion et contrôle de l'inventaire

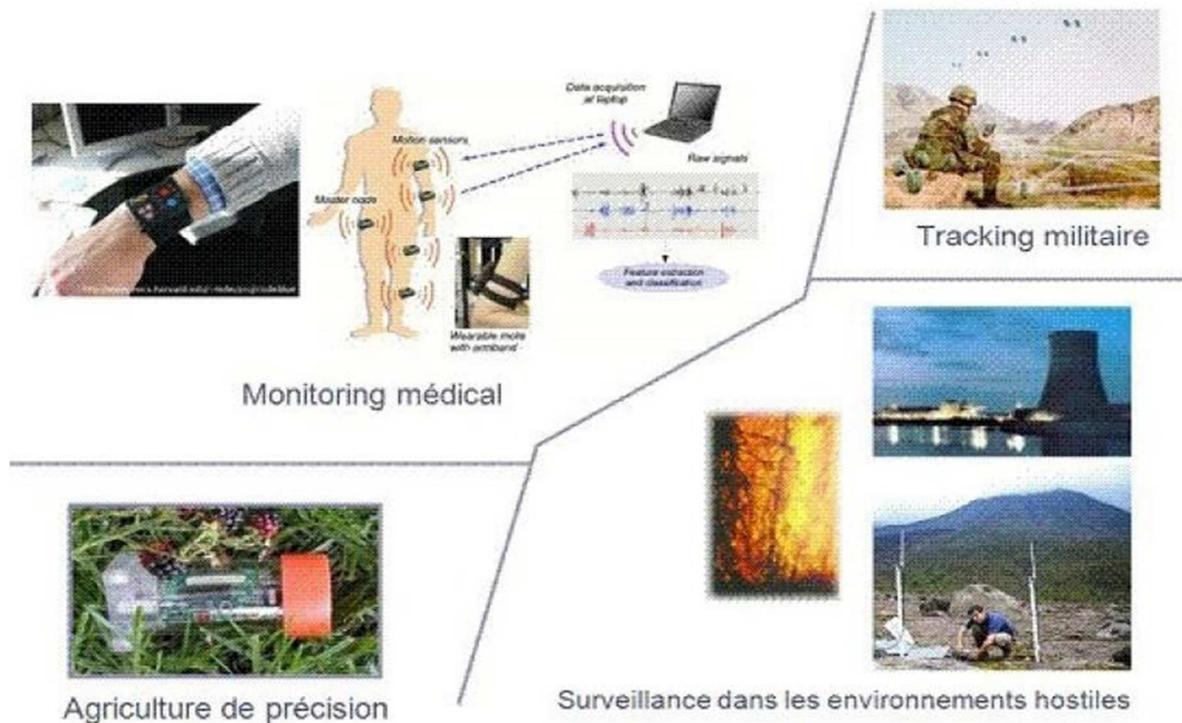


Figure 1. 10 Quelques applications des RCSF [28].

1.4.9. Comparaison entre les RC SF et les réseaux Ad-Hoc

Les réseaux ad hoc mobiles et les réseaux de capteurs s-f partagent beaucoup de points communs mais quelques fois avec un poids différent. Parmi lesquels, nous trouvons : L'utilisation de médium de communications sans fil et de sources d'énergie limitées, la possibilité de défaillance des liaisons, une faible bande passante, une communication multi-saut, la possibilité d'auto organisation et sécurité physique limitée [29].

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

- **Un grand nombre de nœuds** : en tenant capteurs peut contenir des milliers de nœuds. La gestion de cet énorme nombre de nœuds est un problème majeur qu'on doit prendre en considération pendant la conception des réseaux de capteurs.
- **Traitement collaboratif des signaux** : un autre facteur qui distingue ce type de réseaux des réseaux ad hoc traditionnels est que l'objectif final est de détecter ou d'estimer un certain nombre d'évènements de l'objet intéressé, et pas seulement la communication.
- **Une utilisation efficace de la mémoire** : à cause de leur petite taille, les ressources mémoires des capteurs sont restreintes. Donc à la conception des capteurs, les problèmes des tables de routage et la réplique des données doivent être pris en considération.
- **Une gestion efficace de l'énergie** : La contrainte d'énergie est un aspect critique dans les réseaux de capteurs. Généralement, le réseau est déployé dans une région difficile d'accès, ce qui rend presque impossible de changer les batteries des nœuds. La durée de vie d'un réseau de capteurs est liée à sa réserve d'énergie. Pour augmenter cette durée, une meilleure gestion de la consommation d'énergie doit être instaurée.
- **Une auto-organisation** : un réseau de capteurs doit avoir un haut niveau de tolérance aux pannes. Les nœuds sont dans la plupart des cas sujets aux pannes, ou à l'épuisement de leurs réserves d'énergie. Le coût du remplacement d'une batterie étant très élevé dans les réseaux de capteurs, les nœuds sont à éliminer du réseau. Donc le seul moyen d'assurer les fonctionnalités du réseau est d'ajouter d'autres nœuds pour couvrir les régions épuisées ce qui exige une réorganisation des nœuds du réseau.
- **Data centrique** : contrairement aux réseaux ad hoc traditionnels qui ont un mode de communication "any to any", la destination dans les réseaux de capteurs est connue et

les communications se font normalement de plusieurs sources de données vers une station de bases (many to one), L'objectif n'est donc pas de maximiser le taux de données communiquées, mais de maximiser la quantité d'informations utiles transmises vers les destinations, ce qui ne nécessite pas une large bande passante.

- **Agrégation des données** : Un grand nombre de nœuds peut encombrer le réseau avec les informations communiquées. Pour résoudre ce problème, quelques nœuds peuvent effectuer l'agrégation des données avant de les rediffuser vers les autres nœuds.
- **Réseaux orientés applications** : contrairement aux réseaux traditionnels (filaire ou sans fil) qui sont attendus de couvrir une grande variété d'applications, les réseaux de capteurs sont généralement déployés pour accomplir des tâches spécifiques. donc le type d'applications a une grande influence sur les caractéristiques du capteur, la topologie du compte de l'avantage de la petite taille des capteurs et leur faible coût dû à l'évolution de la technologie MEMS, un réseau de réseau et les protocoles utilisés.

Le tableau suivant illustre la différence entre un RCSF et un réseau ad hoc :

Tableau 1. 2 Comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad-Hoc [30].

Réseau de capteurs sans fil	Ad-Hoc
Objectif ciblé	Générique / communication
Nœuds collaborent pour remplir un Objectif	Chaque nœud a son propre objectif
Flot de données tous vers un (Many-to-one)	Flot tous vers tous (Any-to-any)
Très grand nombre de nœuds n'ayant pas tous un identificateur ID	Notion d'ID
Énergie est un facteur déterminant, nœud capteur sujet aux pannes	Débit est majeur

1.5 Conclusion

Dans un grand nombre d'applications des RCSF, le déploiement manuel des capteurs est impossible. De plus, même lorsque l'application permet un déploiement déterministe, le déploiement aléatoire est adopté dans la majorité des scénarios à cause des raisons pratiques tels que le coût et le temps. Ce qui déclenche le problème de la localisation dans ce type de réseaux. Ce chapitre a été axé sur la présentation des concepts fondamentaux des RCSF.

Chapitre 2

Techniques de la récolte d'énergie

Sommaire

2.1 Introduction

2.2 Définition de la récolte d'énergie

2.3 Sources d'énergie

2.3.1 Les sources d'énergie primaires

2.3.2 Les sources d'énergie secondaires

2.3.3 Définition d'une source d'énergie

2.3.4 Les sources d'énergie propres

2.4 Techniques de la récolte d'énergie

2.4.1 Quelques exemples d'application

2.4.2 Génération de l'énergie

2.4.3 Conversion de l'énergie

2.5 Avantages

2.6 Conclusion

2.1 Introduction

Les RCSF forment une classe de réseaux sans fil qui doivent faire face à plusieurs défis comme la fiabilité et la robustesse dans des environnements difficiles. En outre, les dispositifs qui forment les RCSF devraient avoir une longue durée de vie et un faible coût, un compromis difficile à satisfaire. À ces termes, la technologie de la récolte d'énergie s'avère intéressante à utiliser comme source d'énergie potentielle au lieu des techniques citées.

Cette section introduit le concept de la récolte d'énergie puis explicite ses principales techniques et son importance pour les RCSF [30].

2.2 Définition de la récolte d'énergie

La récolte d'énergie (energy harvesting ou energy scavenging en anglais) est le processus par lequel de l'énergie est tirée de sources externes (solaire, éolienne, thermique, vibratoire, cinétique, chimique, etc.) en quantités infinitésimales, puis emmagasinée pour servir au fonctionnement autonome d'appareils portables de petite taille comme ceux de l'électronique vestimentaire (wearable electronics en anglais), les réseaux de capteurs sans fil mais aussi des applications de grande taille, notamment pour les sources thermiques: fonderies, spatial (générateur thermoélectrique à radioisotope), etc [30].

2.3 Sources d'énergie

2.3.1 Les sources d'énergie primaires

Les sources d'énergie primaires sont issues des phénomènes naturels qui nous entourent, comme :

- Le soleil.
- Le vent.
- Les marées.
- L'eau en mouvement.
- Les courants marins.
- La chaleur des sols et des sous-sols.
- Les réactions chimiques des matières organiques vivantes.
- La méthanisation.
- La combustion.

2.3.1.1 Les sources d'énergie primaires renouvelables

Il existe un grand nombre de sources d'énergie primaires renouvelables. L'être humain en exploite plusieurs, avant tout pour diversifier les provenances de ces sources d'énergie, davantage disponibles à certains endroits que d'autres selon leur type. Parmi les sources d'énergie primaires renouvelables, on peut citer :

- L'énergie solaire, qui est ensuite transformée en énergie thermique.
- L'énergie éolienne, qui exploite l'énergie cinétique des vents.
- L'énergie marémotrice, qui utilise la variation des marées pour produire de l'électricité.
- L'énergie hydraulique, créée par le mouvement de l'eau et exploitée dans les centrales hydrauliques.
- L'énergie hydrolienne, issue des courants marins et transformée en électricité grâce aux hydroliennes en mer.
- La géothermie, une source d'énergie primaire renouvelable qui exploite la chaleur du noyau terrestre.
- La biochimie ou l'énergie biochimique.
- La bioénergie, qui est issue de la biomasse, obtenue par combustion ou méthanisation des matières organiques [31].

2.3.1.2 Les sources d'énergie primaires non renouvelables

Les sources d'énergie primaires non renouvelables sont principalement d'origine fossile. On peut citer :

- Le charbon.
- Le pétrole.
- Le gaz naturel.
- L'uranium.

Ces sources d'énergie primaires sont utilisées comme combustibles, qui deviennent donc des sources d'énergie secondaires transformées en électricité ou en carburant.

L'énergie nucléaire, issue de la fission nucléaire ou plus rarement de la fusion nucléaire, est une autre source d'énergie non renouvelable. Elle est utilisée dans les centrales nucléaires afin de produire de l'électricité.

2.3.2 Les sources d'énergie secondaires

Les sources d'énergie primaires permettent de créer des sources d'énergie secondaires. Prenons l'exemple du vent, source d'énergie primaire : l'énergie éolienne qu'il permet d'obtenir est une source d'énergie secondaire, qui peut produire de l'électricité.

Autrement dit, on parle de sources d'énergie secondaires dès lors que la source d'énergie primaire est transformée [31].

2.3.2.1. Exemples d'énergie secondaire

Les sources d'énergie secondaires peuvent être renouvelables ou non renouvelables. Cela dépend essentiellement de la source d'énergie primaire sur lesquelles elles reposent. Parmi les énergies secondaires, on peut citer :

- L'énergie nucléaire.
- La géothermie.
- L'énergie éolienne.
- L'énergie solaire photovoltaïque.
- L'énergie hydroélectrique.
- L'énergie thermique issue de la combustion du gaz naturel, du charbon ou du pétrole

Tout cela va servir à produire de l'électricité, des carburants et bien plus.

2.3.2.2 La provenance des sources d'énergie secondaires

Comme nous l'avons vu, les sources d'énergie secondaires proviennent d'horizons variés. On peut citer :

- Les sous-sols, pour les hydrocarbures ou encore la géothermie.
- Les océans, pour l'énergie marémotrice.
- L'air, pour le vent.
- Le soleil
- Les montagnes, pour l'énergie qui utilise la force de chute de l'eau
- L'exploitation de ces énergies découle du contexte géologique de chaque région.

En France, plusieurs sources d'énergie primaires sont exploitées, car le pays compte des paysages variés et un vaste littoral. Ceci permet de diversifier les énergies secondaires afin de ne pas dépendre d'une seule source [31].

2.3.3 Définition d'une source d'énergie

Une source d'énergie est un phénomène physique ou chimique qui sert à produire un autre type d'énergie. Cette dernière peut être primaire ou secondaire, selon si elle est issue d'un mécanisme naturel ou si elle est transformée volontairement. Ces sources d'énergie sont ensuite classées en deux catégories, les sources d'énergie renouvelables et les sources d'énergie non renouvelables [31].

Au quotidien, nous utilisons différentes sources d'énergie, que ce soit pour nous éclairer, nous chauffer, nous déplacer ou vivre, tout simplement.

2.3.4 Les sources d'énergie propres

Les sources d'énergie propres représentent toutes les sources d'énergies primaires renouvelables qui ne polluent pas la planète. Ces dernières peuvent être exploitées à grande échelle, sans que leur approvisionnement s'amenuise (vent, soleil, eau, etc.).

2.4 Techniques de la récolte d'énergie

Les dernières années ont connu d'importantes activités dans le domaine du développement de nouveaux protocoles de Communication sans fil. Plusieurs de ces Protocoles promettent des systèmes à très Faible consommation, capables de fonctionner plusieurs mois (voire plusieurs années) avant de devoir changer les piles.

Les progrès enregistrés sont à mettre au compte de facteurs tels que l'amélioration de la structure des protocoles et l'utilisation de composants de faible consommation.

Cependant, il existe des situations où l'utilisation de piles reste inappropriée. Par exemple, lorsque la quantité de stations de communication (par exemple capteurs) utilisées est telle que la détection et le remplacement de piles usées implique des ressources humaines importantes, lorsque l'utilisation de piles introduit un risque inacceptable (feu, explosion, etc.) ou lorsque l'emplacement de l'émetteur/récepteur ou son contenant est tel qu'un remplacement de piles est impossible.

Parallèlement, le souci de produire des solutions plus respectueuses de l'environnement (réduction de la quantité de câbles et de piles ainsi que de problèmes liés à leur disposition) a encouragé le développement de réseaux personnels sans fil (WPAN ou Wireless Personal Area Network) utilisant l'énergie ambiante comme source d'alimentation (Energy Harvesting ou Energy Scavenging).

Quelle que soit l'application à laquelle il est dédié, un système sans fil alimenté par récolte d'énergie doit prendre en compte plusieurs facteurs, tels que le mode de génération d'énergie,

le conditionnement nécessaire avant de pouvoir utiliser l'énergie électrique, le stockage d'énergie et le choix d'un protocole approprié pour le transfert de données.

2.4.1 Quelques exemples d'applications

2.4.1.1 La domotique

L'utilisation de réseaux sans fil dans les environnements résidentiels, commerciaux ou industriels permet de gagner en flexibilité. Les interrupteurs et capteurs (luminosité, présence, température, humidité, etc.) peuvent être placés ou déplacés rapidement, sans installation de câbles (donc avec un minimum de main d'œuvre), afin de s'adapter à une nouvelle configuration du poste de travail. L'utilisation de la récolte d'énergie permet dans ce cas de réduire les coûts associés au remplacement des piles, tout en gardant la flexibilité découlant de l'emploi de réseaux sans fil [32][33].

2.4.1.2 La détection d'incendies

Dans cette application, les capteurs de détection d'incendie, associés à un réseau sans fil sont placés à différents endroits, par exemple dans les arbres. Les radios sont configurées si possible de manière à pouvoir servir aussi comme postes de relais, et ainsi à faciliter le transfert des données. L'utilisation de la récolte d'énergie permet de réduire considérablement les coûts d'entretien, sans pour autant diminuer l'efficacité du dispositif. L'utilisation d'un réseau maillé permet d'obtenir une bonne fiabilité sur une très large surface, ce qui convient parfaitement à la surveillance des forêts [34].

2.4.2 Génération de l'énergie

Il existe plusieurs technologies permettant de récupérer l'énergie ambiante. Cette énergie qui peut exister dans l'environnement de l'application sous forme mécanique, lumineuse, électromagnétique ou calorifique, est transformée en énergie électrique par des convertisseurs appropriés.

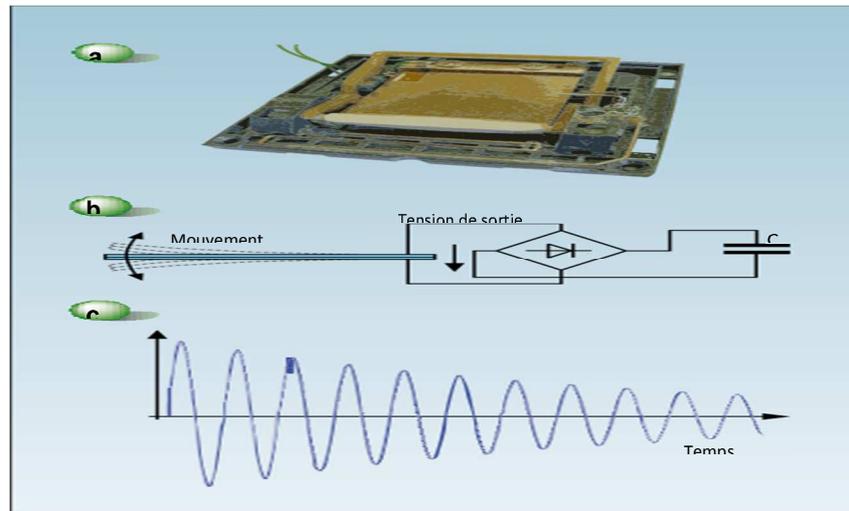


Figure 2. 1 Générateur piézo-électrique [31].

- A) Élément piézo-électrique de la société Lightning Switch.
- b) Accumulation de l'énergie générée par l'élément piézo-électrique.
- c) Tension de sortie pour une impulsion mécanique.

2.4.3 Conversion de l'énergie

Dans ce qui suit, quelques exemples des techniques de récolte d'énergie fréquemment utilisées sont présentés.

2.4.3.1 Les convertisseurs piézo-électriques

Grâce à l'effet piézo-électrique, une force mécanique (provenant par exemple de vibrations, impulsions, pression acoustique) peut être utilisée pour fournir de l'énergie électrique.

Lorsqu'il est en mouvement, l'élément piézo-électrique génère une tension alternative. Cette tension peut être transformée en courant continu en utilisant un pont de diodes et un condensateur (figure 2.1). Le mouvement peut résulter d'une impulsion (pousser un interrupteur), ou d'une action continue (vibrations produites par un moteur en marche).

Quelques exemples de sociétés qui produisent des convertisseurs piézo-électriques sont donnés dans les références [36] [37].

2.4.3.2 Les convertisseurs thermoélectriques

Les éléments Peltier permettent de transformer des différences de température en énergie électrique.

Le courant est important, mais la tension est généralement faible. Une des grandes difficultés est d'élever cette tension à une valeur permettant son utilisation (Figure 2.2).

En utilisant des composants spéciaux, il est possible de monter des convertisseurs DC/DC qui travaillent avec une tension d'entrée de quelque dizaine de millivolts. Une autre approche est celle de la société micropelt [38] en Allemagne qui développe des capteurs thermoélectriques capables de délivrer une tension suffisante pour alimenter directement les circuits électroniques.

2.4.3.3 Les convertisseurs de rayonnement électromagnétique

L'énergie présente dans le rayonnement électromagnétique peut aussi être exploitée. Cette énergie peut provenir de diverses stations émettrices situées dans les environs (radar, radio, télévision, etc.) ou de lecteurs RFID (Radio Frequency Identification). Les éléments utilisés pour la récolte d'énergie doivent bien sûr être adaptés à la fréquence des émetteurs. La faible valeur de la tension générée nécessite l'emploi d'un multiplicateur de tension.

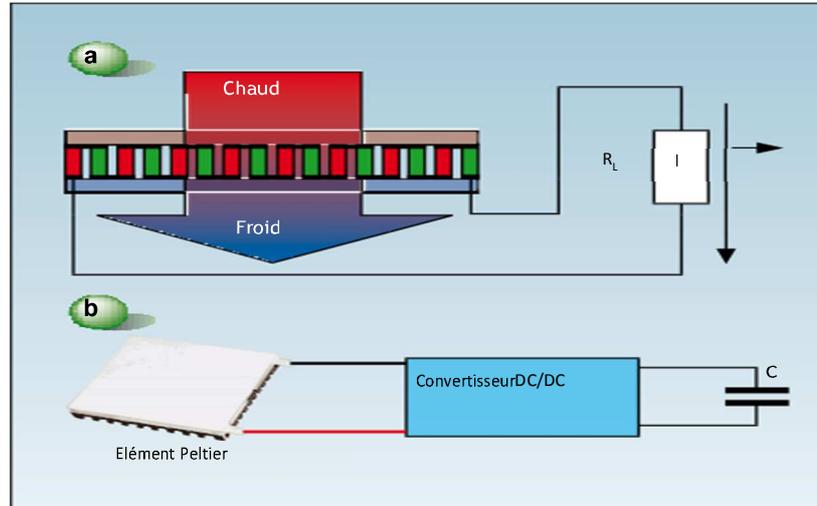


Figure 2. 2 Générateur thermoélectrique [38].

- Une différence de température entre les 2 plaques d'un élément Peltier conduit à la production d'énergie électrique.
- La tension générée est faible et doit être multipliée en utilisant par exemple un convertisseur DC/DC. Le condensateur permet un stockage d'énergie.

2.4.3.4 Les convertisseurs électromagnétiques

Le mouvement peut aussi être transformé en énergie électrique lorsqu'un champ magnétique est présent (Loi de Faraday sur l'induction électromagnétique). Ce principe est exploité par la société Perpetuum [39] dont les générateurs peuvent délivrer plusieurs milliwatts de puissance électrique lorsqu'ils sont soumis à des vibrations. La firme En OCEAN a développé l'Eco100 [40] pour le marché de la domotique. Ce générateur bien adapté à la fabrication d'interrupteurs sans fil, peut générer plusieurs centaines de micro-joules à chaque impulsion mécanique. La dynamo des bicyclettes, les générateurs « Shake » de certaines lampes de poche, sont autant de convertisseurs électromagnétiques qui peuvent aussi être utilisés dans les systèmes sans fils.

2.4.3.5 Les convertisseurs photovoltaïques

Ces cellules génèrent de l'électricité en présence de la lumière. La quantité d'énergie dépend entre autres du nombre de cellules utilisées et de la luminosité. Pour des raisons de place et d'économie, il est avantageux de travailler avec un petit nombre de cellules, ce qui a pour conséquence de réduire la quantité d'énergie disponible. Le suivi du point maximum de transfert d'énergie (Maximum Power Point Tracking) et l'utilisation d'un élément de stockage adéquat permettent d'optimiser la production d'énergie lorsque des variations importantes de luminosité sont à prendre en compte.

2.4.3.6 Les autres types de convertisseurs

Il existe également des convertisseurs électrostatiques, des nano générateurs (Georgia Tech [41]) ainsi que des convertisseurs basés sur des sources biologiques ou chimiques [42]. Bien que moins populaires, ils permettront de nouvelles applications dans les années à venir.

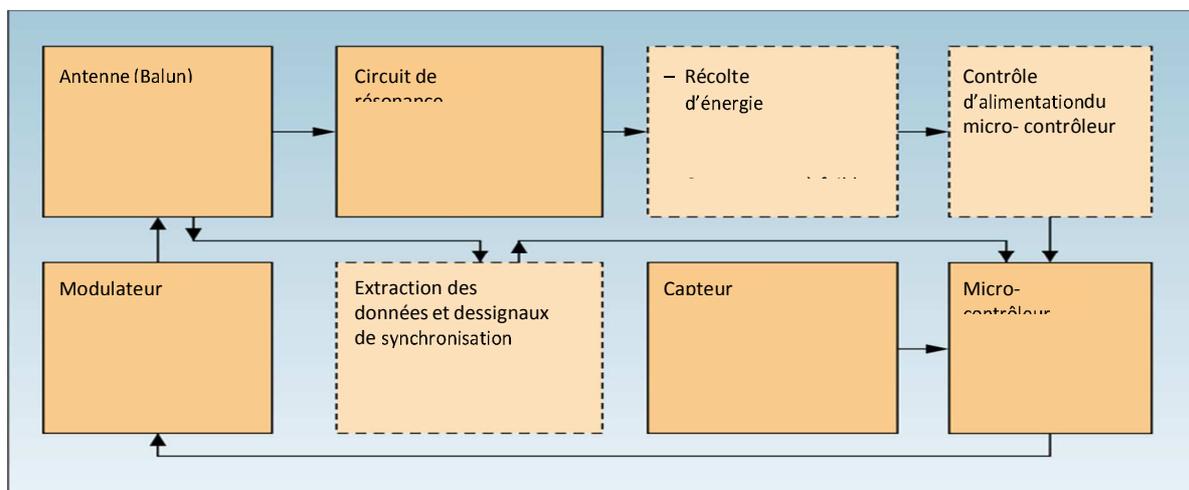


Figure 2. 3 Schéma de bloc d'un μ CTag flexible et intelligent [42].

Le signal du capteur est lu par le microcontrôleur et la valeur lue est transmise au lecteur RFID avec la modulation appropriée. L'énergie nécessaire provient du lecteur RFID.

2.4.3.7 Récolte de l'énergie à partir du corps humain

Le corps humain constitue une source intéressante pour la production d'énergie à partir de la dissipation de chaleur, des rotations, l'application du poids du corps ainsi que la déformation élastique des tissus et autres accessoires. En effet, [43] estime que le corps humain brûle en moyenne environ 10,5 MJ d'énergie par jour, ce qui est l'équivalent d'une dissipation de puissance moyenne de 121 W. Cela ouvre des possibilités de récolte d'énergie pour alimenter des dispositifs médicaux implantables ou mobiles qui pourraient être utilisés pendant une longue période ou être rechargés en permanence.

Dans ce qui suit, on cite quelques appareils de mouvement humain utilisés pour la récolte d'énergie [44]. Parmi les sources possibles, on trouve l'oreille. En effet, on peut récolter l'énergie en utilisant le potentiel électrique de la cochlée comme une batterie biologique qui est essentielle pour transformer les ondes de pression sonores en signaux électriques envoyés au cerveau. Les chercheurs ont mis au point une puce qui peut exploiter cette énergie électrique sans interférer avec une audition normale telle qu'illustré dans la figure 2.4. Des chercheurs français ont aussi développé un stimulateur cardiaque de faible puissance ($5\mu\text{W}$ au lieu de $25\mu\text{W}$ dans les stimulateurs actuels) alimenté par l'énergie mécanique de battements cardiaques d'un patient. L'objectif est d'éliminer le besoin de batteries, qui devaient être remplacé chirurgicalement tous les six à dix ans. Ce système est illustré par la figure 2.5. João Paulo Lammoglia, un designer industriel basé à Londres, a créé un masque qui convertit l'énergie éolienne fournie par la respiration du porteur en électricité pour la recharge de petits appareils électroniques. À l'intérieur de l'unité, il y a des petites éoliennes qui font la conversion et l'énergie est transférée par l'intermédiaire d'un câble au petit appareil électronique. Ce masque est présenté à la figure 2.6.

2.4.3.8 Conversion de l'énergie des signaux radio fréquence (RF)

Il est possible de récolter l'énergie à partir des signaux radio fréquence (RF) qui se propagent dans l'air. Par exemple, à partir des signaux Wifi, les signaux de signalisation dans les réseaux cellulaires, etc. Cette technique de récolte d'énergie requiert une densité suffisante de signaux RF pour être effective.

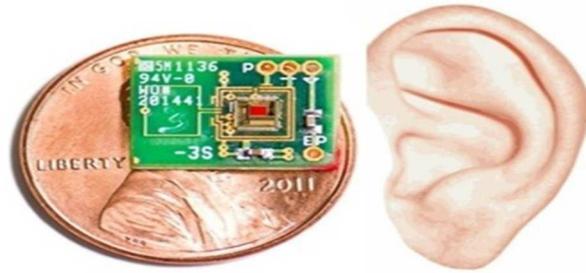


Figure 2. 4 Récolteur d'énergie d'oreille [44].

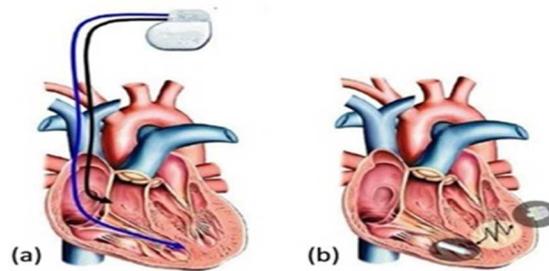


Figure 2. 5 Récolteur d'énergie du cœur [44].



Figure 2. 6 Récolteur d'énergie à partir des mouvements de transpiration [44].

2.5 Avantages

Nous pouvons utiliser la récolte d'énergie pour fournir de l'électricité pour les éléments aussi petits que les capteurs ou aussi grands que les satellites. Les principales raisons de son utilisation sont [45] :

-Commodité :

Les consommateurs ne sont pas soucieux de changer ou de recharger les batteries pour les appareils tels que les ordinateurs portables ou les téléphones cellulaires ou d'autres appareils électroniques.

-Sauvegarde d'énergie :

De tels dispositifs récolteurs d'énergie peuvent servir comme alternative aux sources d'énergie primaires. En d'autres termes, ils représentent un secours et constituent une solution

aux coupures de courant. Par exemple, ceci est important pour les hôpitaux qui ont besoin d'énergie, surtout lors des pannes des sources primaires.

-Pratiques commerciales :

Les coûts proposés aux consommateurs seraient réduits en termes d'emballage, de développement, d'élimination, de longévité et de réutilisation de certains produits. L'installation et la maintenance du produit aurait également un coût réduit. Un exemple est celui des coûts qui seraient enregistrés avec l'élimination des batteries et des chargeurs chimiques, ainsi que le vaste câblage exigé normalement dans l'utilisation des téléphones cellulaires.

2.6 Conclusion

Les éléments nécessaires à des solutions sans fil, alimentés par récolte d'énergie, existent et vont continuer de se développer dans les années à venir. Le développement de composants permettant de travailler à basse tension, la mise au point de nouvelles méthodes pour récolter l'énergie, les progrès dans le domaine du stockage vont s'accroître. Plusieurs applications existent déjà dans la domotique, l'entretien des machines ou la sécurité. Pour une bonne mise en œuvre, il est important de considérer plusieurs facteurs allant des demandes énergétiques des composants électroniques aux caractéristiques du protocole de communication.

Chapitre 3

Capteurs solaires thermiques

Sommaire

3.1 Introduction

3.2 L'énergie solaire

3.3 Capteurs solaires thermiques

3.4 Principe

3.5 Types de capteurs

3.6 Classification des capteurs thermiques

3.6.1 Capture plan

3.6.2 Capture à tube sous vide

3.6.3 Capture à concentration

3.7 Avantages et inconvénients des capteurs solaires thermiques

3.8 Conclusion

3.1 Introduction

La technologie solaire offre un grand potentiel en matière de fourniture des besoins énergétiques de la planète. Cependant, l'utilisation de cette énergie reste dans le monde est encore limitée. Le facteur principal est lié à coût initial élevé de la construction du système. Les rayonnements solaires sont des rayonnements électromagnétiques émis par le soleil qui peut être captée et transformée en énergies utiles, telles que la chaleur et l'électricité, en utilisant une variété de technologies. Toutefois, la faisabilité technique et le fonctionnement économique de ces technologies à un endroit précis dépend de la ressource solaire disponible [46] [47].

3.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire peut être utilisée par trois procédés technologiques suivants [48] ; chimiques, électriques et thermiques (voir figure 3.1).

1) Le Processus chimique grâce à la photosynthèse, maintient la vie sur la terre par la production d'aliments et convertir le CO₂ à O₂.

2) Processus électrique, utilisant des convertisseurs photovoltaïques, fournit de l'énergie pour les satellites et est utilisé dans de nombreuses applications terrestres.

3) Procédé thermique peut être utilisée pour fournir une grande partie de l'énergie thermique nécessaire pour le chauffage solaire de l'eau et le chauffage du bâtiment. Une autre forme de converti le rayonnement solaire est l'énergie mécanique du vent et de vapeur d'eau.

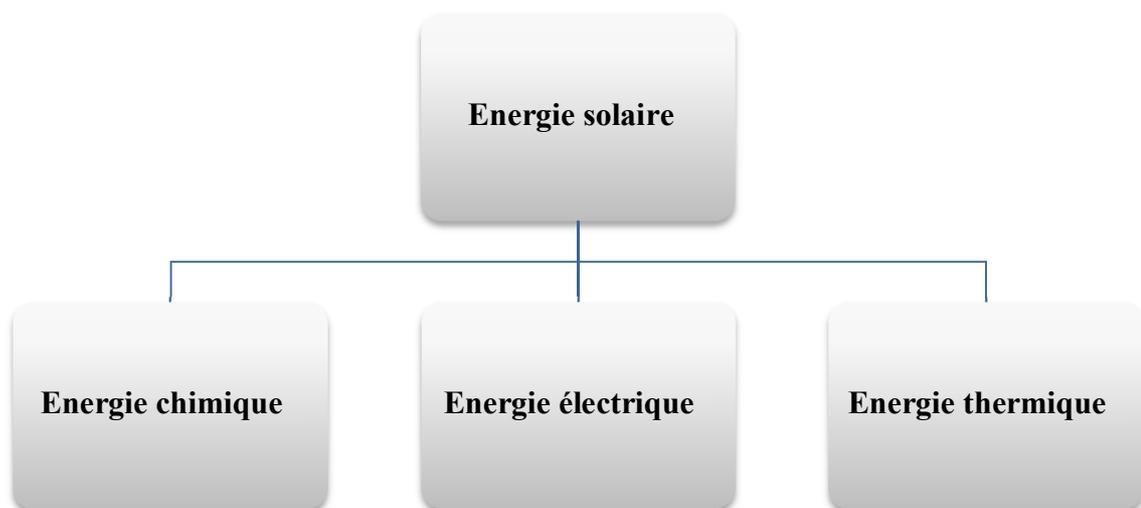


Figure 3. 1 Classifications de l'exploitation de l'énergie solaire [48].

La composante la plus importante et la plus coûteuse d'un système solaire actif de l'énergie est le capteur solaire, qui peut être effectuée dans un plusieurs versions, à partir des Constructions des capteurs solaires. Un Capteur solaire est un dispositif mécanique qui capte l'énergie solaire rayonnante et la convertit en énergie utile.

3.3 Capteurs solaires thermiques

Un capteur solaire thermique (ou capteur solaire, ou capteur héliothermique, ou encore panneau solaire [49] [50]) est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie solaire transmise par rayonnement et la transférer à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) sous forme de chaleur. Cette énergie thermique peut ensuite être utilisée pour le chauffage de bâtiments, pour la production d'eau chaude sanitaire ou encore dans divers procédés industriels.

Cette technologie est différente de celle des panneaux photovoltaïques, qui transforment la lumière (les photons) en électricité. Les deux peuvent toutefois être combinées dans des panneaux photovoltaïques et thermiques.

3.4 Principe

Un capteur solaire thermique est un échangeur de chaleur qui transforme le rayonnement solaire en énergie thermique [50]. Il se distingue d'un échangeur classique sur plusieurs points. La densité surfacique du flux énergétique solaire (irradiance) à la surface de la Terre est variable et faible, dépassant rarement, sans système de concentration, 1 100 W/m². Par ailleurs, le rayonnement solaire incident a une longueur d'onde entre 0,3 et 3 μm, bien plus courte que celle du rayonnement émis par la plupart des surfaces radiatives [50].

Le capteur absorbe le rayonnement solaire incident, le transformant ainsi en énergie thermique qui est ensuite transférée à un fluide caloporteur circulant dans le capteur. Les fluides utilisés peuvent être de l'air, de l'eau ou une huile ou encore un mélange avec du glycol (fluide antigel) notamment pour les systèmes à circulation forcée. Des matériaux à changement de phase (les sels fondus par exemple) sont aussi utilisés pour les systèmes à concentration. L'énergie du fluide caloporteur est ensuite utilisée directement ou stockée pour un usage ultérieur.

Le transfert thermique se fait par convection, naturelle ou forcée en fonction du système considéré.

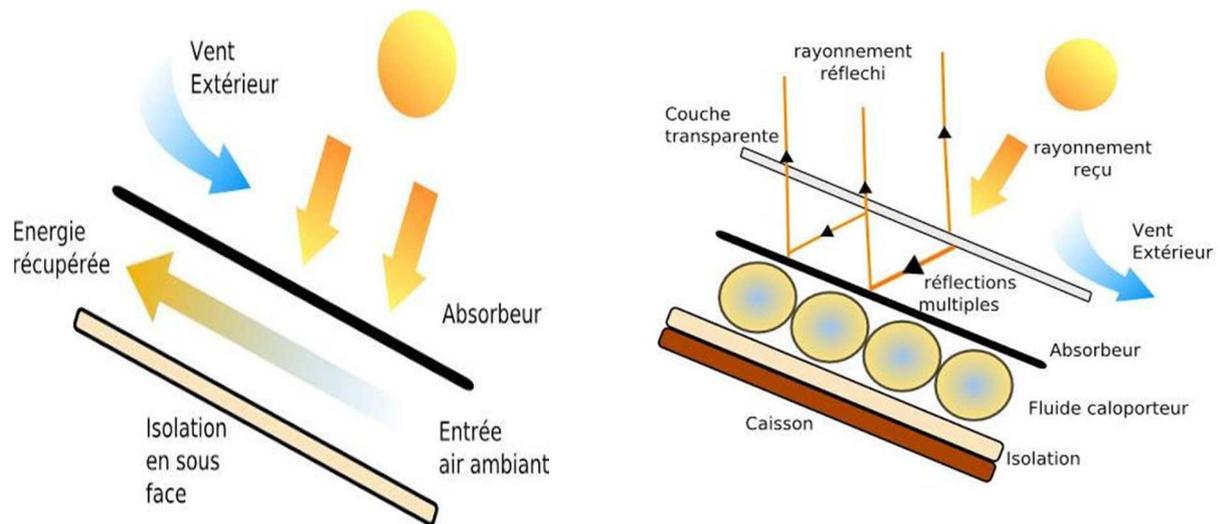


Figure 3. 2 processus dans un capteur solaire plan [50].

3.5 Types de capteurs

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques. Dans la littérature, ils sont généralement classés dans deux grandes familles, les capteurs sans concentration (stationnaires) et les capteurs à concentration équipés d'un système de suivi (traqueur) de la course du Soleil.

Les capteurs sur traqueur se différencient par ailleurs selon que le suivi s'effectue suivant un axe ou deux axes. Les caractéristiques d'un capteur déterminent sa plage de températures de fonctionnement et donc les applications pouvant être couvertes [51].

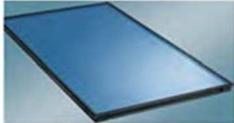
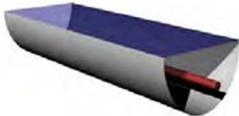
3.6 Classification des capteurs thermiques

On peut classer le capteur solaire selon la température ; les capteurs à faible température, moyen température, haut température [52] [53].

Suivant ce classement, il existe essentiellement trois types des capteurs solaires thermiques.

- Capteurs plans
- Capteurs à tube sous vide
- Capteurs à concentration

Tableau 3. 1.classification des capteurs solaires [53].

	Type de capteur		Rapport de concentration pour rayonnement direct	Intervalle Température T(K)
	Nom	Diagramme schématique		
Stationnaire	Capteur à absorbeur plan		$C \leq 1$	$300 < T > 360$
	Tube sous vide		$C \leq 1$	$300 < T > 460$
Un axe	Réflecteur parabolique composé		$1 \leq C \leq 1$	$340 < T > 510$
			$5 \leq C \leq 15$	$340 < T > 560$
	Réflecteur Parabolique		$15 < C > 40$	$340 < T > 560$
	Réflecteur Fresnel		$10 < C > 40$	$340 < T > 540$
	Réflecteur cylindro-Parabolique		$10 < C > 50$	$340 < T > 540$
Deux axes	Réflecteur disque parabolique		$100 < C > 1000$	$340 < T > 1200$
	Réflecteur sphérique		$100 < C > 300$	$340 < T > 1000$
	Champs d'Héliostat		$100 < C > 1500$	$340 < T > 3000$

Bien qu'il existe de grande différence géométrique mais leur but reste le même : pour convertir le rayonnement solaire en chaleur afin de satisfaire certains besoins énergétiques. La chaleur produite par les capteurs solaires peut être utilisée directement ou être stocké.

Pour évaluer la quantité d'énergie produite dans un capteur solaire, il est nécessaire de considérer les propriétés physiques des matériaux. Le rayonnement solaire, principalement à courte longueur d'onde, passe par une couverture pour atteindre le récepteur. Le verre faible teneur en fer est souvent utilisé comme une couverture de vitrage en raison de sa forte transmissibilité couverture aussi réduit considérablement les pertes de chaleur.

Les caractéristiques optiques du récepteur doivent être aussi proches que possible de celles d'un corps noir, en particulier à haute capacité d'absorption. Les propriétés de la conductivité thermique peuvent être améliorées en ajoutant des revêtements sélectifs. Qui est en collaboration avec l'absorption de rayonnement et une augmentation de la température de l'absorbeur, Le matériau de vitrage devient essentiellement opaque à la nouvelle condition de longueur d'onde favorisant l'effet de serre. Une combinaison de la haute transmissibilité du rayonnement solaire par la couverture et de haute capacité d'absorption du récepteur apporte une grande performance pour un capteur solaire bien conçu.

3.6.1 Capteurs plans

Vue schématique en coupe d'un capteur plan à circulation de liquide avec un tube en serpentin.

Les capteurs plans sont certainement la technologie la plus ancienne, la plus fondamentale et la plus étudiée pour les applications basses températures (eau chaude sanitaire, chauffage) [54] [55].

Un capteur plan est un système relativement simple composé d'un absorbeur, une surface « noire » absorbant l'énergie solaire et munie de moyens pour transférer l'énergie absorbée vers le fluide caloporteur, ainsi que d'une couverture protégeant l'absorbeur tout en étant transparente au rayonnement solaire. La face arrière de l'absorbeur ainsi que les côtés de la boîte où le tout est inséré sont isolés pour limiter les pertes thermiques par conduction.

Dans les capteurs à circulation de liquide, le fluide caloporteur circule dans des tubes, remplacés par des conduits dans les capteurs à air [56].

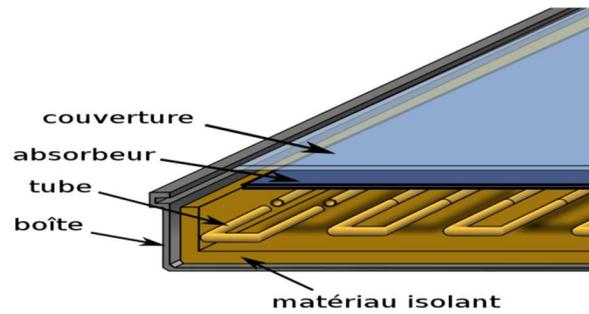


Figure 3. 3 Vue schématique en coupe d'un capteur plan à circulation de liquide avec un tube en serpentin [56].

3.6.1.1 Couverture

La couverture du capteur a pour objectif de transmettre un maximum du rayonnement solaire incident et de limiter les pertes thermiques par radiation dans le domaine infrarouge (effet de serre) et par convection. La couverture protège par ailleurs l'absorbeur, et notamment son revêtement sélectif (voir ci-dessous) des intempéries, qui pourraient entraîner son oxydation notamment [57].

La couverture est composée d'une ou plusieurs surfaces de verre ou autres matériaux possédant une transmittance élevée pour le rayonnement solaire (rayonnement à ondes courtes entre 0,3 et 3 μm) et une transmittance faible pour le rayonnement infrarouge (rayonnement à ondes longues entre 5 et 50 μm) émis par l'absorbeur. Le verre est un candidat idéal pour réaliser la couverture, grâce à sa transmittance élevée pour le rayonnement à ondes courtes, son coût faible et sa grande stabilité à long terme [58].

Divers traitements peuvent lui être appliqués afin d'améliorer ses propriétés optiques et particulièrement son opacité au rayonnement infrarouge.

Le verre trempé à faible teneur en fer a une transmittance élevée pour le rayonnement solaire (entre 0,85 et 0,9 en incidence normale) et compte parmi les vitrages solaires les moins chers du marché (8 à 10 €/m² en 2014). Des verres haute performance avec traitement antireflet sont aussi sur le marché pour des prix variant entre 15 et 20 €/m² en 2014 [58].

3.6.1.2 L'absorbeur

Le fluide caloporteur, très souvent de l'eau mélangée à un antigel alimentaire, de type mon propylène, passe dans un serpentin plaqué en sous face d'une feuille absorbante, le tout placé derrière une vitre, dans un caisson isolé de laine minérale et/ou de mousses composites

polyuréthanes (polyisocyanurate) ; la vitre est transparente à la lumière du soleil mais opaque aux rayons infrarouges de l'intérieur, ce qui piège la chaleur.

Dans les capteurs thermiques, le liquide circule dans des tubes soudés sur une plaque noire appelée absorbeur. Pour obtenir un meilleur rendement, l'ensemble est placé dans une boîte vitrée isolante afin d'obtenir une couche d'air isolante. Avec un bon ensoleillement, et si la température ambiante n'est pas trop basse, un simple réseau de tubes à ailettes peut constituer un panneau avec un bon rendement. L'absorbeur est chauffé par le rayonnement solaire et transmet sa chaleur à l'eau qui circule dans les tubes.

Les premiers absorbeurs étaient peints en noir mat afin de capter un maximum d'énergie lumineuse. Mais la peinture noir mat a souvent l'inconvénient d'avoir une émissivité importante dans l'infrarouge. Ce qui provoque un rayonnement plus élevé depuis l'absorbeur. Ce rayonnement réchauffe la vitre, qui dissipe une partie de cette énergie à l'extérieur, par convection et rayonnement. Ce phénomène augmente les déperditions et nuit au rendement. C'est pourquoi il est intéressant d'utiliser des absorbeurs traités au chrome (par exemple), qui émettent un rayonnement infrarouge beaucoup plus faible. On parle de surfaces sélectives, elles absorbent bien le rayonnement visible où se situe la grande partie de l'énergie provenant du Soleil (un corps noir à haute température), mais réémettent peu dans l'infrarouge (rayonnement de l'absorbeur, corps à relativement basse température).

Si l'eau ne circule pas, la température interne au capteur monte jusqu'à ce que les déperditions soient égales à l'énergie reçue, ce qui peut entraîner l'ébullition de l'eau. Cette température peut être très élevée en été, l'après-midi, quand les besoins de chauffage sont déjà couverts. On appelle température de stagnation la température de l'absorbeur dans cette situation.

De nombreuses autres innovations techniques ont permis d'augmenter le rendement des panneaux thermiques, telles que :

- Des vitres ayant une faible teneur en fer pour améliorer la transparence (de 85 % à 95 %, si on y ajoute un traitement antireflet) ;
- Des soudures entre la plaque absorbante et le réseau de tuyauterie réalisées par impacts lasers au lieu de sonotrodes (soudure ultrason).

Les capteurs solaires à eau sont utilisés pour le chauffage et/ou pour produire de l'eau chaude sanitaire (ECS) dans un chauffe-eau solaire.

Dans les capteurs thermiques à air, c'est de l'air qui circule et qui s'échauffe au contact des absorbeurs. L'air ainsi chauffé est ensuite ventilé dans les habitats pour le chauffage ou dans des hangars agricoles pour le séchage des produits.

3.6.2 Capteur solaire à tube sous vide

Un capteur solaire "sous vide" est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm. de diamètre. Dans chaque tube, il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique [59].

Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur et l'absorbeur reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement.

Un capteur solaire thermique sous vide est composé :

- d'une série de tubes de verre sous vide (il n'y a pas d'air).
- d'un absorbeur à l'intérieur des tubes de verre.
- d'un tube en cuivre à l'intérieur des tubes de verre.

Les tubes en cuivre sont parcourus par un fluide caloporteur (eau + antigel). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes.

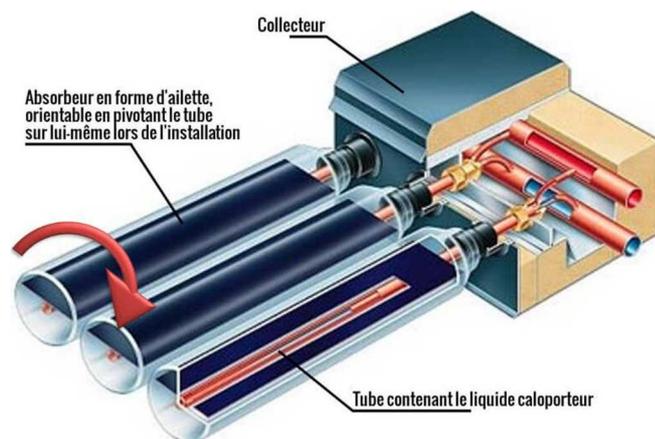


Figure 3. 4 Tube sous vide [60].



Figure 3. 5 Capteur sous vide [60].

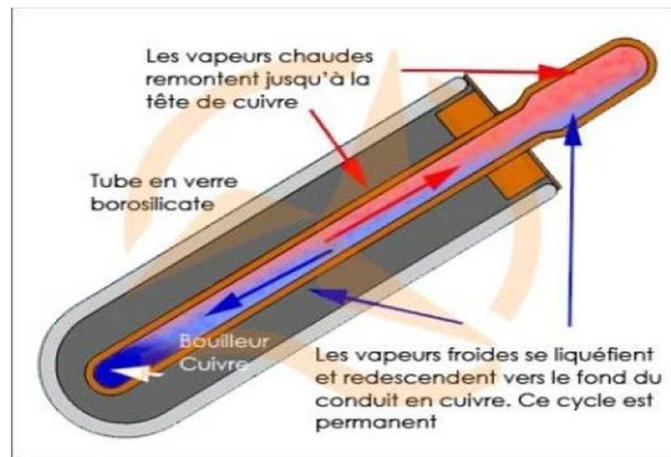


Figure 3. 6 Capteur sous vide a caloduc [59].

3.6.3 Capteurs à concentration

Un capteur solaire thermique à concentration est composé [60] :

- D'un châssis, d'un isolant permettant de limiter les fuites thermiques en sous face et sur les bords.
- D'un système de réflexion de la lumière.
- D'un absorbeur.
- D'un réseau de tubes en cuivre.

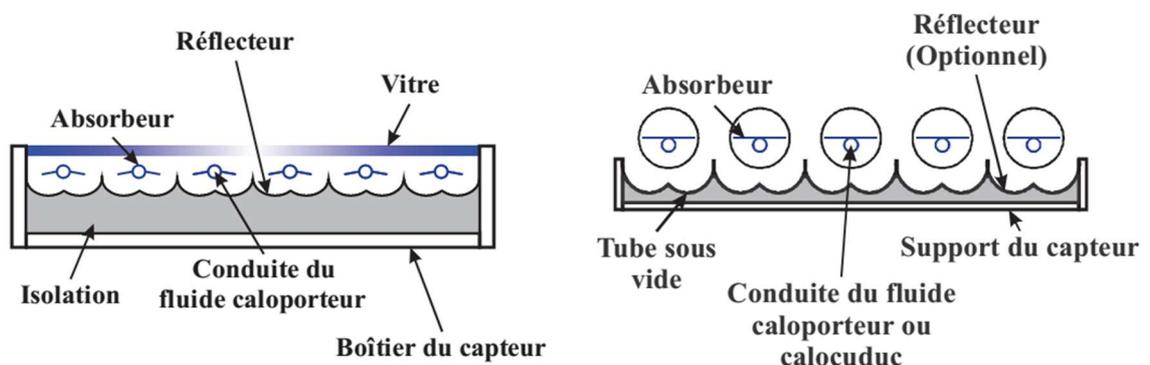


Figure 3. 7 Capteur à concentration [60].

3.6.3.1 Avantage et inconvénient

Le concentrateur est un dispositif qui permet, par réflexion ou réfraction du rayonnement incident, de soumettre le convertisseur à des flux surfaciques intenses ; la conversion héliothermique à température élevée devient alors envisageable ; jusqu'à environ 300°C, sous quelques centaines de $w.m^{-2}$ avec des concentrateurs de révolution. Cet avantage essentiel ne va toutefois pas sans inconvénients [61][62].

- D'ordre physique

Perte à la réflexion ou à la transmission, d'une fraction du rayonnement direct (partie rayonnement global directement issue du soleil) selon la valeur du facteur de réflexion, ou de transmission du concentrateur (par exemple 0.9)

Perte totale ou partielle du rayonnement diffus (seconde composante du rayonnement global) qui provient de l'environnement, et non plus du soleil, par rapport auquel les calculs de trajectoires optiques ont été effectués (plusieurs dizaines de KW.m⁻²).

- D'ordre technologie et économique

Le capteur à concentration est souvent plus sophistiqué (par exemple, mobile) et donc plus cher par unité de surface que le capteur plan traditionnel à l'investissement comme à la maintenance.

3.6.3.2 Classification des capteurs à concentration

Les solutions pour concentrer le rayonnement solaire sont trop nombreuses pour que l'on puisse ici en faire une présentation exhaustive aussi, avant de songer à concevoir un concentrateur original, il est impératif de consulter une documentation spécialisée (livres et périodique cités en bibliographie). Beaucoup de ces solutions ne sont d'ailleurs pas satisfaisantes en vue de la production d'énergie solaire en raison des contraintes technologique et économique.

Nous avons retenu ci-dessous que des solutions réalistes ayant pour la plupart fait l'objet de réalisation [62].

Pour les présenter, nous avons distingué les capteurs entièrement mobiles autour d'un ou deux axes, les capteurs à chaudière fixe, les capteurs à concentrateur fixe et les capteurs à renforcement du rayonnement incident.

-Capteur entièrement mobile

Ce sont des capteurs à concentration ponctuelle, linéaire ; les ponctuels sont équipés de concentrateurs de révolution orientables autour de deux axes (voir Figure 3. 9). Linéaires utilisent des concentrateurs cylindriques mobiles autour d'un axe de rotation, de préférence parallèle à l'axe du monde.

La différence essentielle entre ponctuels et linéaires réside dans les niveaux accessibles de concentration géométrique et donc de fonctionnement : au-delà d'environ 300°C, le ponctuel est préférable.

On doit remarquer l'avantage de la concentration linéaire que :

-Un seul mouvement de rotation est nécessaire

-L'énergie est véhiculé en même temps qu'elle est captée le convertisseur héliothermique sert de réseau caloporteur qui devient alors excrément réduit.

-Dans le cas d'intégration du capteur dans une centrale, les effets d'ombre portée sont plus faibles que pour les ponctuelles.

Ces avantages ne vont toutefois pas sans inconvénient

-L'énergie solaire disponible est réduite de l'effet cosinus ;

-La largeur du champ de flux sur l'absorbeur varie au cours de la journée

-En extrémité de chaudière, il y a des pertes énergétiques que l'on réduit, en valeur relative, en concevant des longs concentrateurs.



Figure 3. 8 Concentrateur entièrement mobile [62].

-Capteurs à chaudière fixe et concentrateur mobile

La solution chaudière fixe concentrateur mobile correspond essentiellement aux centrales à tour ou aux grosses centrales à foyer linéaire ; la chaudière de grande dimension est fixe et le concentrateur est constitué d'un ensemble d'héliostats qui réfléchissent le rayonnement solaire vers cette chaudière, la difficulté tient généralement à la grande précision requise par l'optique de tels systèmes. L'avantage, en contrepartie, tient au quasi suppression du réseau caloporteur.



Figure 3. 9 Capteur à chaudière fixe et concentrateur mobile [62]

-Capteur à concentration fixe et chaudière mobile

Le réflecteur ou le réfracteur constitue la partie encombrante et pesante du capteur ,d'où les solutions à concentrateur fixe, qui présentent également l'avantage de poser un minimum de difficultés concernant la tenue au vent ,l'immobilité du concentrateur n'est toutefois pas sans inconvénient ,car l'effet cosinus est alors très pénalisant ,le meilleur positionnement sera obtenu comme pour les capteurs plans ,en inclinant l'axe (ou le plan) optique d'un angle égal à la latitude du lieu dans le plan méridien.

-Capteur à renforcement du rayonnement

Les solutions dites à renforcement du rayonnement incident, capteur fixe, ne peuvent être considérées comme réellement satisfaisantes, deux propositions sont toutes signalées ; le premier conduit au meilleur rapport concentration géométrique /angle d'acceptance mais au prix d'une surface de miroir très importante ; la seconde est la plus immédiate pour améliorer les performances d'un capteur plan.



Figure 3. 10 Capteur à renforcement du rayonnement [62].

3.7 Avantages et inconvénients des capteurs solaires thermiques

a) Avantages :

Outre les économies d'énergie déjà énoncées, les capteurs solaires thermiques respectent l'environnement.

L'énergie solaire recueillie par les capteurs solaires thermiques est une énergie propre et renouvelable. Installer ce type de matériel permet de participer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

b) Inconvénients :

La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil.

L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.

Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes.

3.8 Conclusion

Le Vu le rôle important que joue le capteur solaire dans la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique, la recherche d'innovations dans sa conception pour améliorer ses performances afin d'introduire la technologie de l'énergie solaire thermique est indispensable.

En étudiant qu'on a obtenu, on constate que les performances du module photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'éclairement solaire et la température.

Chapitre 4

Contribution et implémentation

Sommaire

4.1 Introduction

4.2 Description de notre solution proposée

4.2.1 Communication intra-cluster

4.2.2 Communication inter-clusters

4.3 Evaluation des performances de notre solution proposée

4.3.1 Environnement de simulation

4.3.2 Caractéristiques matérielles

4.3.3 Modèle d'énergie

4.3.4 Paramètres de simulation

4.3.5 Résultats de simulation et analyses

4.3.5.1 Durée de vie

4.3.5.2 Consommation d'énergie

4.3.5.3 Taux de livraison de paquets

4.4 Conclusion

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons notre solution proposée pour améliorer l'efficacité énergétique de réseau de capteurs sans fil ainsi que les résultats de simulation obtenus. Pour évaluer les performances de notre solution proposée, nous comparons nos résultats obtenus avec ceux obtenus par le protocole LEACH proposé dans la littérature.

4.2 Description de notre solution proposée

Notre solution proposée consiste à trouver une solution au problème d'énergie dans le réseau de capteur sans fil pour prolonger la durée de vie de réseau.

Dans notre solution, nous considérons :

- Un réseau où tous les nœuds capteurs sont déployés de manière aléatoire dans un espace bidimensionnel et une station de base à une position fixe.
- Les nœuds de capteurs sont considérés fixes après le déploiement.
- Les nœuds capteurs ne sont pas homogènes. Un petit pourcentage (5%) des nœuds sont supposés être alimentés par un panneau solaire (une énergie solaire).
- Chaque nœud de capteur peut communiquer directement ou via d'autre nœud avec tous les nœuds du réseau.

Notre solution proposée s'exécute en plusieurs itération dont chaque itération passe par deux phases : la phase de communication intra-cluster et la communication inter-clusters.

4.2.1 Communication intra-cluster

Dans un cluster, chaque nœud ordinaire *NOR* peut transmettre ses données détectées soit directement à son cluster-head (*CH*), soit en se servant d'un nœud relais *NR* appartenant au même cluster. Un nœud capteur ne peut être utilisé comme relais que si deux conditions sont vérifiées :

- Son énergie résiduelle est supérieure à un seuil donné.
- L'énergie totale consommée sur le chemin *NOR-NR-CH* est inférieure à celle consommée sur le chemin direct *NOR-CH*.

L'algorithme suivant décrit le choix du nœud intermédiaire pour la communication intra-cluster.

Pseudo-code 1 : Sélection d'un nœud intermédiaire pour une communication intra-cluster

1. Chaque nœud ordinaire *NOR* diffuse un paquet RTS pour informer ses voisins dans

- le même cluster ;
2. Pour chaque nœud I dans le cluster (ayant C comme cluster-head) recevant le paquet RTS
 3. Si $E_I > E_{seuil} \ \&\& \ E_{NOR-CH} > E_{NOR-NR-CH}$ alors
 4. Répondre avec un paquet CTS ;
 5. Sinon
 6. Session annulée et paquet RTS rejeté ;
 7. Fin si ;
 8. Fin pour ;
 9. Si aucun paquet CTS reçu alors
 10. Transmission directe vers le CH ;
 11. Sinon
 12. Calculer la distance entre ce nœud ordinaire NOR et chaque nœud a envoyé un paquet CTS ;
 13. Sélectionner le nœud le plus proche comme nœud NR ;
 14. Transmission des données vers le nœud NR ;
 15. Fin si ;
 16. Fin.

4.2.2 Communication inter-clusters

Soit un CH source en train de diffuser des paquets RREQ pour découvrir le chemin de routage vers la SB. La station de base exécute l'algorithme Dijkstra [63] pour trouver le plus court chemin entre les différents CHs. Elle calcule des plus courts chemins à partir d'un CH source vers tous les autres CHs de réseau. Cet algorithme permet de calculer pour chaque itération le plus court chemin entre un CH de départ et un sommet d'arrivée (la SB).

Pour cela, le puits (SB) calcule la distance entre lui-même et tous les CH pour trouver le CH le plus éloigné. La distance euclidienne est utilisée pour calculer la distance entre le CH et le SB :

$$distance = \sqrt{(x_{SB} - x_i)^2 + (y_{SB} - y_i)^2} \quad (4.1)$$

Où

x_{SB} et y_{SB} (respectivement x_i et y_i) sont les coordonnées de la SB (respectivement CH_i).

Le CHs le plus éloignés est désignés comme le CH source pour l'itération courante.

Après l'exécution de l'algorithme, le SB diffuse un paquet REPLY à tous les CHs,

Ce paquet contient les données relatives au chemin le plus court vers la SB.

Le Pseudo-code² suivant montre l'algorithme Dijkstra utilisé pour sélectionner le chemin le plus court entre la SB et les différents CHs dans l'itération courante pour communication inter-clusters.

Pseudo-code² : Sélection d'un chemin pour une communication inter-clusters

Entrées : $R = (X, U, d)$ un réseau, s un CH

Sorties : chemin le plus court entre les CHs vers la SB.

Variables intermédiaires : S et S' deux sous-ensembles de CHs, x et y deux nœuds, *sortie* un booléen.

Début

$S \leftarrow \emptyset$; { S est l'ensemble des CHs optimaux}

$S' \leftarrow X$; { S' est l'ensemble de tout les CHs}

/*Au démarrage, On affecte au CH source x la valeur 0 et à tous les autres CHs la valeur "infini" */

Pour tout $x \in X$ faire

$P(x) \leftarrow +\infty$; { $p()$ une fonction indiquant la plus courte distance qui sépare un point de s }

$Pred(x) \leftarrow 0$; { $pred()$ une fonction indiquant par quel arc on arrive à un point si on emprunte le plus court chemin}

Fin pour ;

$P(s) \leftarrow 0$;

Sortie \leftarrow faux ;

Tant que $S' \neq \emptyset$ et non sortie faire

Choisir $x \in S'$ tel que $p(x) = \min \{p(y) \mid y \in S'\}$ {choisir un CH de distance minimum}

Sortie $\leftarrow (p(x) = +\infty)$;

$S \leftarrow S \cup \{x\}$; {ajouter le CH x à l'ensemble des CHs optimaux}

$S' \leftarrow S' - \{x\}$; {éliminer le CH choisi de l'ensemble de tout les CHs}

Pour chaque arc $u=(x; y) \mid y \in S'$ faire

Si $p(y) > p(x) + d(u)$ alors {relâchement de l'arc u }

$P(y) \leftarrow p(x) + d(u)$;

$Pred(y) \leftarrow u$; {mémoriser en y que l'on vient de u }

Fin si ;

Fin pour ;
Fin tant que ;
Fin.

La figure 4.1 suivant illustre la communication inter-clusters de notre solution proposée.

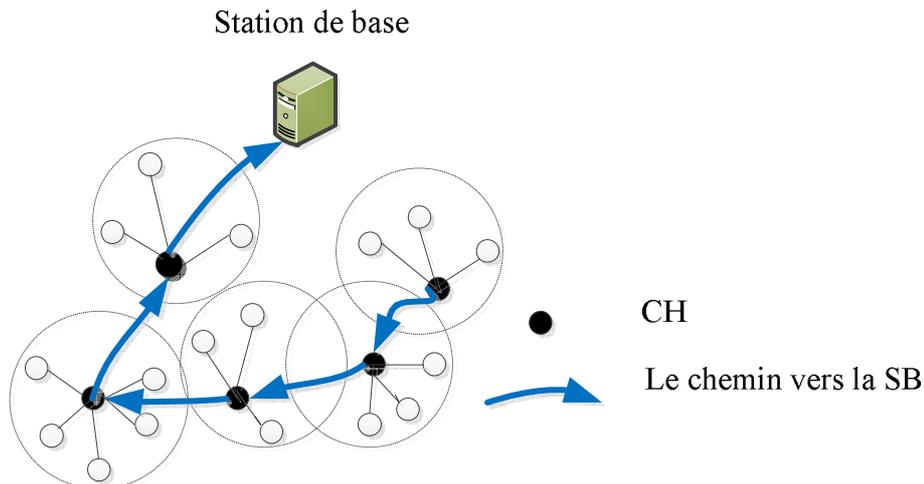


Figure 4. 1 Communication inter-clusters de notre solution proposée.

4.3 Evaluation des performances de notre solution proposée

Une série de simulations sont réalisées afin de mesurer l'impact de notre solution sur les performances d'un réseau à petit échelle. Nous comparons les résultats obtenus avec le protocole de routage LEACH [64].

4.3.1 Environnement de simulation

L'environnement de simulation utilisé pour l'implémentation est Matlab version 7.8.0 (R2009a).

MATLAB (*MATrix LABORatory*) est un langage de programmation de quatrième génération émulé par un environnement de développement du même nom. Il est utilisé à des fins de calcul numérique. Il est développé par la société *MathWorks*. MATLAB nous permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, d'implémenter des algorithmes, de créer des interfaces utilisateur et peut s'interfacer avec d'autres langages tels que C, C++, Java et Fortran. Les utilisateurs de MATLAB viennent d'horizons très différents

(tels que l'ingénierie, la science, etc.). MATLAB peut être utilisé seul ou avec des boîtes à outils.

4.3.2 Caractéristiques matérielles

Le tableau 4.1 montre les caractéristiques de l'ordinateur utilisé.

Tableau 4. 1 caractéristiques matérielles de l'ordinateur utilisé.

Hardware	Caractéristique
Processeur	Intel (R) Core (TM) i5-6300U CPU @ 2.40 GHZ 2.50 GHZ
Mémoire (RAM)	8,00GO
Système d'exploitation	Microsoft Windows 10 64 bits

4.3.3 Modèle d'énergie

Le modèle utilisé pour calculer l'énergie consommée dans les deux opérations de transmission et de réception est le modèle de propagation du signal de premier ordre utilisé dans [65]. Lorsque la distance entre deux nœuds est supérieure à une distance d_0 , le modèle (ε_{mp}) est utilisé, et dans le cas inférieur, le modèle (ε_{fs}) est utilisé.

Les équations utilisées pour calculer les coûts de transmission et de réception pour un paquet de l bits pour une distance d sont indiqués ci-dessous :

➤ Pour transmettre un paquet de l bits pour une distance de d mètres, le nœud de capteur consomme :

$$E_{TX}(l, d) = \begin{cases} l * E_{elec}(l, d) + \varepsilon_{fs} * d^2 & d < d_0 \\ l * E_{elec}(l, d) + \varepsilon_{mp} * d^4 & d > d_0 \end{cases} \quad (4.2)$$

- E_{elec} : L'énergie suffisante pour transmettre ou recevoir un seul bit

- ε_{fs} : Facteur de l'amplification correspond au modèle *free space channel*.

- ε_{mp} : Facteur de l'amplification correspond au modèle *multipath fading channel*.

- l : La taille d'un paquet.

- d : La distance entre l'émetteur et le récepteur.

d_0 : La distance limite pour laquelle le facteur d'amplification change sa valeur. Elle est donnée par :

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \tag{5.3}$$

➤ Pour recevoir un paquet de L bits, le nœud de capteur consomme :

$$E_{RX}(l) = l * E_{elec} \tag{5.4}$$

La figure 4.2 suivante montre le modèle de propagation du signal radio utilisé par notre solution proposée.

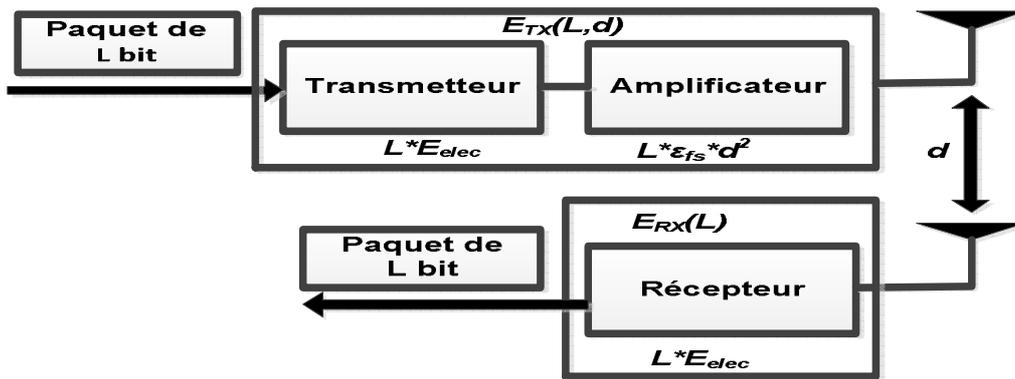


Figure 4. 2 Le modèle de dissipation de l'énergie utilisé.

4.3.4 Paramètres de simulation

Le tableau (4.2) illustre la configuration de nos paramètres de simulation.

Tableau 4. 2 Paramètres de simulation.

Paramètres	Valeurs
Nombre des nœuds	100
Position de la SB	(50,50)
Énergie initiale (E_0)	0.5 J
E_{TX} (Transmitter Electronics)	50 nJ/bit
E_{RX} (Receiver Electronics)	50 nJ/bit
Taille des paquets	1000 bits
ϵ_{fs} (Amplifier of transmitter) si $d < d_0$	10 pJ/bit/m ²
ϵ_{mp} (Amplifier of transmitter) si $d \geq d_0$	0.0013 pJ/bit/m ⁴

Energie de l'agrégation de données (<i>EDA</i>)	5 nJ/bit
Seuil de l'énergie résiduelle	5%

4.3.5 Résultats de simulation et analyses

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulations et analyses pour notre solution proposée ainsi que les résultats de simulation pour le protocole LEACH. Ces deux algorithmes ont été appliqués à une superficie de réseau de $100 \times 100 \text{ m}^2$ et pour la position de la station de base de coordonnées (50, 50). Nous avons considéré un nombre de nœuds $N=100$ pour évaluer la performance de notre solution proposée. Les métriques utilisées sont : la durée de vie exprimée par le nombre de nœuds morts en fonction du nombre d'itération, l'énergie résiduelle moyenne et le PDR (le taux de paquets reçus).

4.3.5.1 Durée de vie

La figure 4.3 représente la variation du nombre de nœuds morts en fonction du nombre d'itération. Pour le protocole LEACH, nous constatons que le premier nœud mort apparaît après 900 itérations. Pour notre solution, le premier nœud mort apparaît après 1100 itérations. Nous mettons ainsi clairement en évidence la contribution de notre solution proposée dans l'allongement de la durée de vie du réseau. De plus, l'intégration du paramètre seuil d'énergie résiduelle empêche les nœuds à faibles réserves d'énergie de participer à la remontée des données des voisins. Ils se contentent de se consacrer à la détection et à la transmission de leurs propres données. De même, l'algorithme proposé dans la phase inter-clusters permet de minimiser le nombre de nœuds morts dans chaque itération et permet aussi de garantir la qualité de service.

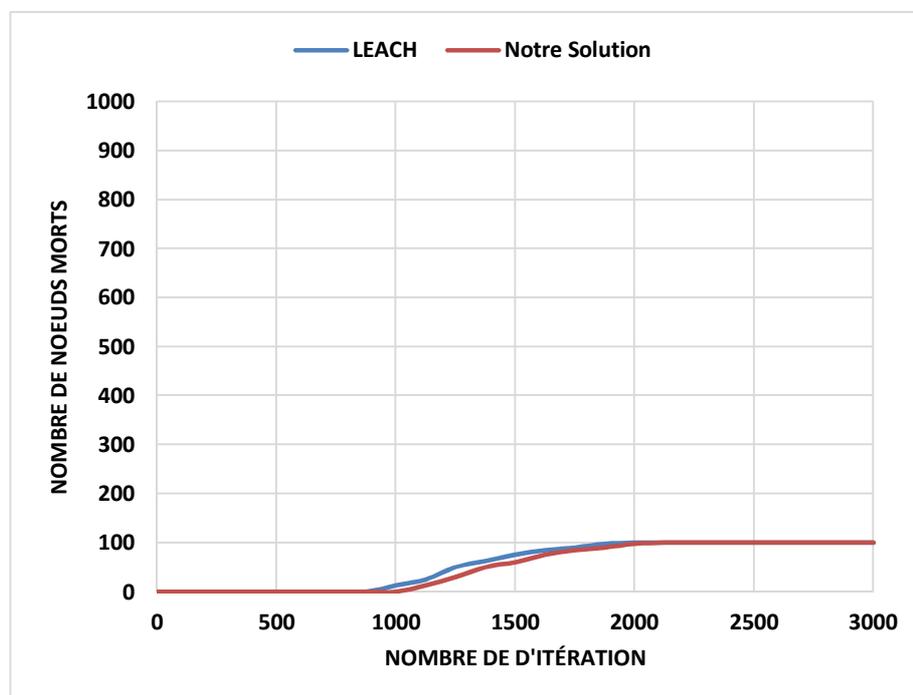
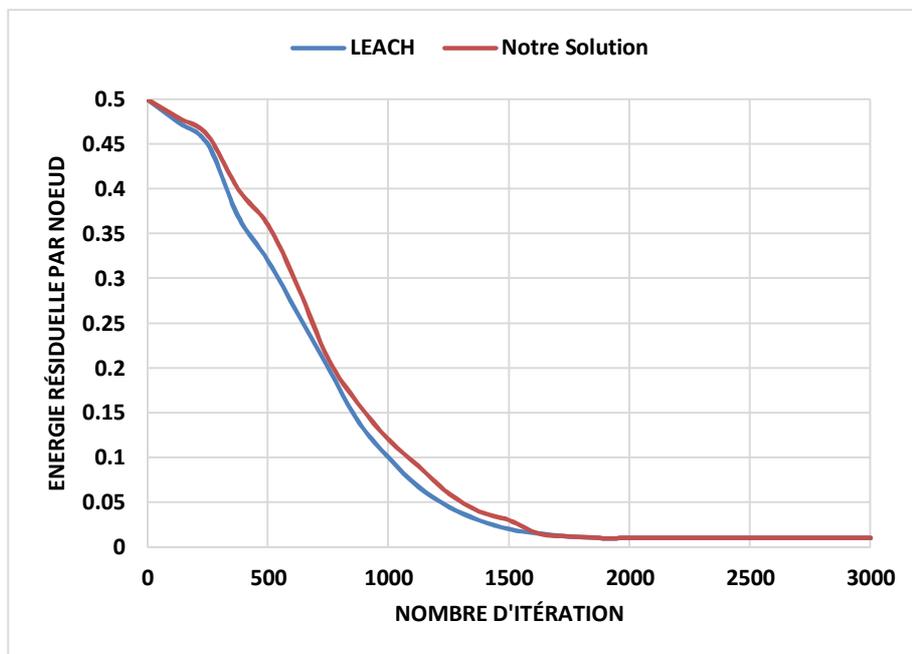


Figure 4. 3 Durée de vie de réseau.

4.3.5.2 Consommation d'énergie

La figure 5.4 représente l'énergie résiduelle moyenne des nœuds capteurs. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux de la métrique précédente. En effet, si le nombre de paquets échangés est augmenté, la consommation d'énergie est augmentée et par conséquent l'énergie résiduelle moyenne est réduite. De même, en considérant le seuil de l'énergie résiduelle, on choisit des liens avec les meilleures qualités entre l'émetteur et le récepteur par conséquent, on diminue la puissance d'émission et par conséquent la consommation d'énergie.

**Figure 4. 4** Energie résiduelle moyenne pour un réseau.

4.3.5.3 Taux de livraison de paquets

Le PDR (taux de livraison des paquets) est exprimé comme le nombre de paquets reçus par la SB divisé par le nombre total de paquets envoyés. La figure 5.5 présente le débit de livraison de paquets pour le protocole LEACH et pour notre solution proposée. Nous constatons que notre solution a un taux d'environ 96% de paquets livrés. En effet, l'intégration d'un paramètre seuil de l'énergie résiduelle permet de garantir une qualité minimale du lien, d'où la fiabilité et la robustesse des chemins choisis par les nœuds pour s'associer à leurs CHs. En revanche, LEACH présente un taux de livraison légèrement inférieur même pour un

nombre insuffisant de nœuds car il ne prend pas en compte les liaisons radio lors de la sélection des CH. Nous remarquons que le débit de livraison des paquets est important pour les deux protocoles et cela s'explique par le fait que les deux protocoles utilisent TDMA pendant la phase de transmission des données. Ainsi, chaque nœud membre transmet ses données pendant le temps qui lui est alloué par le CH, ce qui évite les collisions et les pertes de paquets.

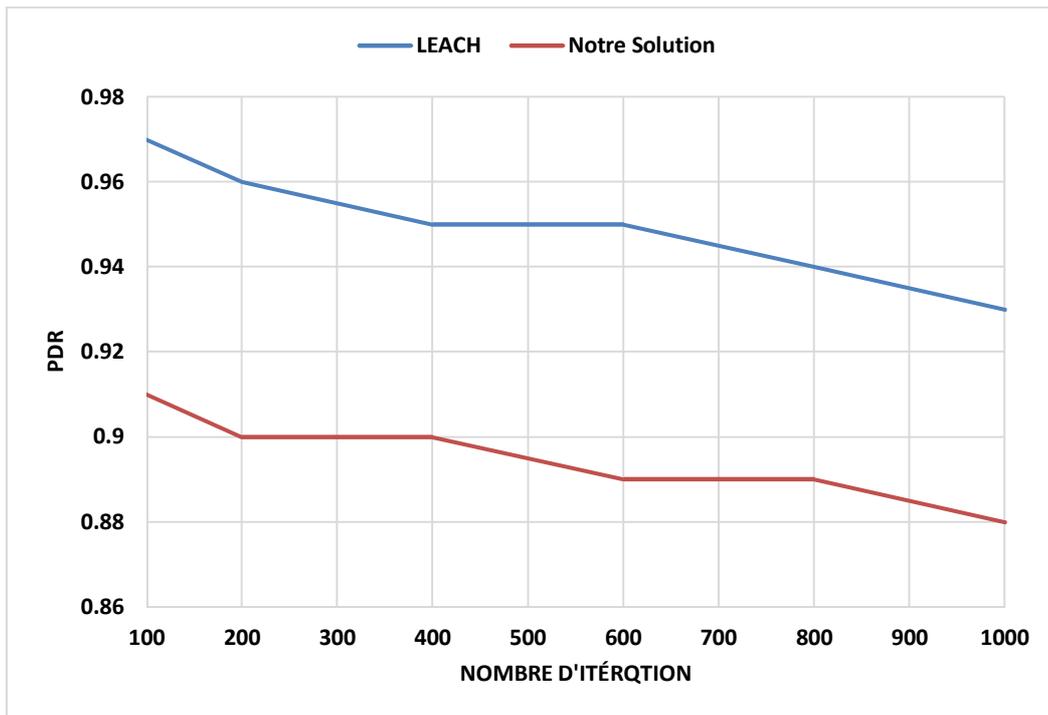


Figure 4. 5 Taux de livraison de paquets (PDR) pour un réseau.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté et implémenté notre solution pour augmenter la durée de vie de réseau et optimiser la consommation d'énergie dans le réseau de capteurs sans fil. Les résultats de simulation nous a permis de montrer l'efficacité énergétique de notre solution proposée par rapport le protocole LEACH.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les réseaux de capteurs sont des réseaux formés d'un grand nombre de nœuds capteurs qui se collabore entre eux pour fournir un service bien déterminé.

La consommation d'énergie est un problème fondamental lorsque les capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles ou encore déployés sur de grands espaces. Pour cela, les nœuds limités en termes d'énergie vont avoir un impact sur la durée de vie du réseau tout entier.

Le capteur solaire est l'élément essentiel pour l'exploitation de l'énergie solaire, il capte le rayonnement solaire et le transforme sous forme de chaleur par effet de serre par des matériaux qui ont des grands coefficients d'absorption. Cette chaleur peut être utilisée dans le chauffage de l'eau sanitaire ou pour la climatisation des bâtiments. Il peut également transformer le rayonnement solaire en courant à l'aide de matériaux semi-conducteur appelés cellules solaires.

La phase de recherche, nous avons discuté et implémenté notre solution pour augmenter la durée de vie de réseau et optimiser la consommation d'énergie dans le réseau de capteurs sans fil. Les résultats de simulation nous a permis de montrer l'efficacité énergétique de notre solution proposée par apport le protocole LEACH.

Référence

Référence

Référence

- [1] B.Deng H.Liu L.Zhang, L.Duan and G.Huang. S-mrl distributedo localization algorithm for wireless Networking and Mobile Computing, 2008. WICOM '08. 4th International Conference on, pages 1-4, 2008. sensor networks. Wireless Communications,
- [2] K. Sohraby, D. Minoli and T. Znati, Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications, John Wiley & Sons, 2007.
- [3] W. Dargie and C. Poellabauer, Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice, John Wiley & Sons, 2010.
- [4] D.MARTINS, Sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil, Stéganographie et réseaux de confiance, Thèse de doctorat, 2010.]
- [5] Datasheettmoteky:<http://www.eecs.harvard.edu/konrad/projects/shimmer/references/tmotekydatasheet.pdf>.
- [6] SAHRAOUI Belkheyr; La Géo-localisation dans les Réseaux de Capteurs sans Fil; Mémoire de fin d'études; Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, 2010-2011.
- [7] Y. Sankarasubramaniam E. Cayirci I.F. Akyildiz, W. Su*. Wireless sensor networks: a survey. volume 4, pages 393-422, December 2001.
- [8]K Lin, J. Yu, J. Hsu, S. Zahedi, D. Lee, J. Friedman, A. Kansal, V. Raghunathan, and M. Srivastava. 'Helimote: enabling long-lived sensor networks through solar energy harvesting'. In SenSys 05: Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems, pages 309_309, New York, NY, USA, 2005.ACM.
- [9] I.F. AKYILDIZ, W. S. SANKARASUBRAMANIAM, E. CAYIRCI : Wireless Sensor Networks: A Survey. Computer networks, 2002, 38, pp. 393-422.
- [10] Melle. REZKI YASMINA Melle. BOURDJAH SIHAM,« «Etude des mécanismes de localisation dans les réseaux de capteurs sans fil »mémoire de master, Université A/Mira de
- [11] YOUSSEF BENABBASSI, « application de la redondance pour la surveillance réseaux de capteurs sans »,Diplôme de Doctorat, université d'Oran,2014

Référence

- [12] M. A. M. Vieira and al, "Survey on wireless sensor network devices", In 9th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'03), Lisbon, Portugal, septembre 2003.
- [13] François Ingelrest, "Protocoles localisés de diffusion et économie d'énergie dans les réseaux ad ho et de capteurs", Thèse de doctorat (spécialité Informatique), le 30 juin 2006.
- [14] kemal Akkaya, Mohamed Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor network", Ad Hoc Networks, Vol. 3, No. 3, pp. 325-349, 2005.
- [15] Guillermo BARRENETXEA, "Distributed Routing Algorithms For Sensor Networks", école polytechnique fédérale de Lausanne, 2006.
- [16] Youssef, Mohamed; El-Sheimy, Naser; "Wireless Sensor Network: Research vs. Reality Design and Deployment Issues", Communication Networks and Services Research CNSR '07, Mai 2007.
- [17] Equipe de Get 2005 Capt'Ad-hoc. "Sensor networks: State of the art". Technical Report, Telecom Paris, ENST Br, INT, INRIA, Mars 2006.
- [18] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. "Wireless sensor networks: a survey". *Computer Networks* 38, Elsevier Science, pp. 393–422, 2002.
- [19] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. I. Cayirci. "A survey on sensor networks". *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 8, pp. 102-116, August 2002.
- [20] Bhaskar Krishnamachari, "Networking Wireless Sensors", Cambridge University Press, 2005.
- [21] Jon S. Wilson, "Sensor Technology Handbook", Elsevier, 2005.
- [22] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. I. Cayirci. "Wireless sensor networks: A survey". *IEEE Computer Networks*, Vol. 38, No. 4, pp. 393-422, March 2002.
- [23] TILAK, Sameer, ABU-GHAZALEH, Nael B., et HEINZELMAN, Wendi. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2002, vol. 6, no 2, p. 28-36.

Référence

- [24] SINGH, Shio Kumar, SINGH, M. P., et SINGH, D. K. Applications, Classifications, and Selections of Energy-Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies, 2010.
- [25] MIELKE, ANGELA M. Heterogeneous Wireless Sensor Networks. Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks, 2008, vol. 62, p. 21.
- [26] KARL, Holger et WILLIG, Andreas. Protocols and architectures for wireless sensor networks. John Wiley & Sons, 2007.
- [27] Kazem Sohraby, Daniel Minoli, Taieb Znati « Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications » *Wiley e-book*, 2007.
- [28] Jeremy Elson and Deborah Estrin. « Sensor Networks: A bridge to the physical world » *Wireless Sensor Networks (e-book)*, 2004 - Springer.
- [29] Kazem Sohraby, Daniel Minoli, and Taieb Znati. "Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications". John Wiley & Sons, Inc. edition, 2007.
- [30] Q. Zhao and L. Tong. "Distributed opportunistic transmission for wireless sensor networks". Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2004), may 2004.
- [31] <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/comprendre-le-marche-de-l-energie/tout-savoir-sur-les-sources-d-energie>
- [32] www.enocean.com.
- [33] www.lightningswitch.com.
- [34] www.voltreepower.com.
- [35] Article Récolte d'énergie pour alimentation des réseaux personnels sans fil
- [36] www.faceinternational.com.
- [37] www.advancedceramics.com.
- [38] www.micropelt.com.
- [39] www.perpetuum.co.uk.
- [40] Eco100 datasheet: www.enocean.com.
- [41] www.nanoscience.gatech.edu/zlwang.
- [42] C.J. Love, S. Zhang, A. Mershin: Source of Sustained Voltage Difference between the Xylem of a Potted Ficus benjamina Tree and Its Soil. www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0002963.
- [43] Roundy, D. Steingart, L. Wright, et J. Rabaey, Power sources for wireless sensor

Référence

networks. Proc. IEEE EWSN, 2004.

[44] Pele, “10 energy harvesting solutions for 2012”, 2012. En line : [http : //www.embedded.com/print/4403423](http://www.embedded.com/print/4403423)

[45] Wang, T. Zhang, et R. Feng, “Limited feedback scheme in the presence of feedback delay using kalman filter”, dans Proc. IEEE ICCTA, Beijing, oct 2011.

[46] F.A. peuser, K.H.remmers, M.schanauss, installations solaires thermiques conception et mise en œuvre, (2005).

[47] O.gergaud, modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, école normale supérieure de Cachan, France, (2002).

[48] V. quaschnig, renewable energy and climate, (2010).

[49] ISO, Énergie solaire – Vocabulaire (ISO 9488 :1999), Comité Européen de Normalisation, mars 2001, 34 p.

[50] Duffie, John A. et Beckman, William A., Solar engineering of thermal processes, Wiley, 2013, 4e éd. (ISBN 978-1-118-41812-3, 1-118-41812-3 et 978-1-118-67160-3, OCLC 836402985)

[51] Soteris A. Kalogirou, « Solar thermal collectors and applications », Progress in Energy and Combustion Science, vol. 30, no 3, 2004, p. 231–295 (DOI 10.1016/j.pecs.2004.02.001.

[52] Lucas Witmer, « 3.1 Overview of Flat Plate Collectors » [archive], sur www.e-education.psu.edu, n.d. (consulté le 9 août 2020).

[53] G.iordanou, flat-plate solar collectors for water heating with improved heat transfer for application in climatic, thesis, university of durham, (2009).

[54] De Winter, Francis, Solar collectors, energy storage, and materials, MIT Press, 1990 (ISBN 0-262-04104-9 et 978-0-262-04104-1, OCLC 22206465)

[55] Lucas Witmer, « 3.1 Overview of Flat Plate Collectors, sur www.e-education.psu.edu, n.d. (consulté le 9 août 2020).

[56] Soteris A. Kalogirou, « Solar thermal collectors and applications », Progress in Energy and Combustion Science, vol. 30, no 3, 2004, p. 231–295 (DOI 10.1016/j.pecs.2004.02.001

[57] F. Giovannetti, S. Föste, N. Ehrmann et G. Rockendorf, « High transmittance, low emissivity glass covers for flat plate collectors: Applications and performance », Solar Energy, vol. 104, juin 2014, p. 52–59

(DOI 10.1016/j.solener.2013.10.006, lire en ligne [archive], consulté le 15 août 2020)

[58] F. Giovannetti, S. Föste, N. Ehrmann et G. Rockendorf, « High transmittance, low emissivity glass covers for flat plate collectors : Applications and performance », Solar

Référence

Energy, vol. 104, juin 2014, p. 52–59 (DOI 10.1016/j.solener.2013.10.006, lire en ligne [archive], consulté le 15 août 2020)

[59] T. Hauser & H. Rogash «Latent heat storage on photovoltaics», In Proc. 16th European PV Solar Energy Conf. Glasgow, U.K. Vol III, 2265-2267. 2000

[60] T. M. Alaphilippe, "Recherche d'un nouveau procédé de conversion thermodynamique de l'énergie solaire, en vue de son application à la cogénération de petite puissance," Docteur, École Doctorale des Siens Exates et de leurs Appliations, Université de Pau et des Pays de L'Adour, 07 PAU U 03036, 2007

[61] H. P. garg, M. dayal, G. furlan, A. A. M. Sayigh, physics and technology of solar energy volume 1, solar thermal applications, proceedings of the international workshop on physics of solar energy, New Delhi, India, (1986).

[62] R. pasquetti, chauffage de fluides par capteurs solaires à concentration, dossier technique d'ingénieur, (1987).

[63] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest et Clifford Stein, Introduction to Algorithms, MIT Press et McGraw-Hill, 2001, 2e éd. [détail de l'édition], section 24.3, « Dijkstra's algorithm », pages 595–601.

[64] R. Kaur, D. Sharma, N. Kaur, "Comparative Analysis Of Leach And Its Descendant Protocols In Wireless Sensor Network», International Journal of P2P Network Trends and Technology (IJPNTT), vol. 3, no 1, pp. 51-55, 2013.

[65] W.B. Heinzelman, A.P. Chandrakasan, H. Balakrishnan, An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks, IEEE Trans. Wirel.Commun. vol. 1, no 4, pp. 660-670, 2002.