



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université AMO de Bouira

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département d'Informatique

Mémoire de Master

en Informatique

Spécialité : Génie des Systèmes Informatique

Thème

Modélisation et Evaluation de Performances des
WSNs par les RDPs avec Contraintes de
récupération d'énergie et Double Stratégies de Mise
en Veille

Encadré par :

— OUKAS NOURREDINE

Réalisé par :

— BENGHERABI CHAIMAA

— HADIOUCHE HADDA

2020/2021

Remerciements

D'abord, Nous tenons à remercier le dieu le tout-puissant qui nous donne le courage et la volonté pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à remercier avec un grand plaisir et un grand respect à notre encadreur Mr OUKAS Nouredine, pour ses conseils, sa disponibilité et ses encouragements qui nous ont permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.

Nous tenons à remercier les membres du jury pour avoir fait le plaisir d'accepter d'examiner ce travail.

A tous les enseignants qui nous ont aidés pendant les années qui nous avons dépensés à L'Université Akli Mohand Oulhadj.

Nous tenons à exprimer reconnaissance envers les amis et collègues qui nous ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de nous démarchent.

Dédicaces

J'ai le plaisir de dédier ce travail à mes très chers parents à qui est l'expression de mes profonds sentiments de respect, de gratitude et de reconnaissance que dieu les garde pour nous. A tous la famille. A tous mes amis. A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

Bengherabi Chaimaa

Dédicaces

Je dédie ce travail A mes chers parents, merci beaucoup pour tout le soutien et les sacrifices que vous avez consentis pour moi ; A mes frères ; A mon fiancé et sa famille, je vous remercie pour l'amour et le soutien que vous m'avez donné. A toute ma famille ; A tous mes collègues et amies ; A tous ceux qui m'aiment.

Hadiouche hadda.

Abstract

This document introduces a new Generalized Stochastic Petri Nets modelling for sensor nodes (SNs) in wireless sensor networks (WSNs). All SNs are equipped with a solar Energy Harvesting (EH) system. Because there is no solar energy source at night, this formulation considers the case where SNs are intelligently configured to use a double sleeping strategy to get a trade-off between energy conservation and good performances. To achieve this aim, the SN joins the standby state most of the time in the night. In the day, the SN awakes most of the time to get good performances thanks to EH. From the proposed modelling, we derive performance formulas that allow determining the most suitable compromise between energy consumption reduction and rapidity of service.

keywords : Wireless sensor networks, Stochastic Petri Nets, solar energy harvesting, sleeping mechanism, quantization.

Résumé :

Ce document présente une nouvelle modélisation des réseaux de Petri stochastiques généralisés pour les nœuds de capteurs (SN) dans les réseaux de capteurs sans fil (WSN). Tous les SN sont équipés d'un système de récupération d'énergie solaire (EH). Puisqu'il n'y a pas de source d'énergie solaire la nuit, cette formulation considère le cas où les SN sont configurés intelligemment pour utiliser une stratégie de double sommeil pour obtenir un compromis entre la conservation de l'énergie et de bonnes performances. Pour atteindre cet objectif, le SN rejoint l'état de veille la plupart du temps dans la nuit. Dans la journée, la SN se réveille la plupart du temps pour obtenir de bonnes performances grâce à EH. De la modélisation proposée, nous dérivons des formules de performances qui permettent de déterminer le compromis le plus adapté entre réduction de la consommation énergétique et rapidité de service.

Mots clés : Réseaux de capteurs sans fil, réseaux de Petri stochastiques, récupération d'énergie solaire, mécanisme de sommeil, quantification.

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des abréviations	vii
Introduction générale	1
1 Les réseaux de capteur sans fil	4
1.1 Introduction	4
1.2 Réseaux de capteurs sans fil	4
1.2.1 Définition :	4
1.2.2 Caractéristiques des RCSF	5
1.2.3 Les domaines d'application des RCSFs :	6
1.2.4 Les protocoles de communication :	10
1.3 Le nœud de capteur :	12
1.3.1 Définition :	12
1.3.2 Architecture d'un nœud capteur :	13
1.4 Les problématiques des RCSFs :	15
1.5 Conclusion	17
2 Récupération d'énergie	18
2.1 Introduction	18

2.2	Les énergies renouvelables :	18
2.2.1	Définition :	18
2.3	Récolte d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil :	19
2.4	Architecteur de Récolte	21
2.5	solaire Énergie récolte pour les nœuds de capteurs sans fil :	22
2.5.1	Définition d'Énergie Solaire :	23
2.5.2	Système de collecte de l'énergie solaire :	23
2.5.3	Méthodes de récolte de l'énergie solaire :	27
2.5.4	Exploitation d'un nœud de collecte d'énergie solaire :	29
2.6	Conclusion	30
3	Les Réseaux de Petri stochastiques Généralisés	31
3.1	Introduction	31
3.2	Définition des RdPs :	31
3.2.1	Définition 1 (Un réseau de Petri) :	32
3.2.2	Définition 2 (RdP marqué) :	32
3.3	Règles d'activation :	33
3.4	Réseau de Petri stochastique (RDPS) :	33
3.4.1	Définition informelle :	34
3.4.2	Définition formelle :	34
3.5	mesure de performance :	35
3.6	Marquage et transitions :	35
3.6.1	Marquage d'un Réseau de Petri :	35
3.6.2	Franchissement de transitions :	37
3.7	Temps moyen de franchissement d'une transition	38
3.8	Réseau de Petri à arcs inhibiteurs :	39
3.9	Réseaux de Petri stochastiques généralisés (RDPSG) :	39
3.9.1	Représentation graphique d'un RDPSG :	40
3.9.2	Définition :	40
3.10	Outils de modélisation des RDPSG :	41
3.11	Description du logiciel TimeNet	42
3.11.1	Historique du logiciel TimeNet	42
3.11.2	Fonctionnalités du TimeNet	42

3.11.3	Interface graphique du TimeNet	43
3.11.4	Les méthodes d'analyse du TimeNet	43
3.12	Conclusion	44
4	Évaluation et Résultats Expérimentaux	45
4.1	Introduction	45
4.2	État de l'art	45
4.3	MODÉLISATION PROPOSÉE :	47
4.4	Analyse expérimentale :	50
4.4.1	L'impact du délai de récolte :	51
4.4.2	L'impact du rapport sommeil/veille :	53
4.4.3	L'impact de la durée du jour sur le système :	56
4.5	Conclusion :	58
	Conclusion générale et perspectives	59
	Bibliographie	61

Table des figures

1.1	Architecture générale d'un RCSF.	5
1.2	Les RCSFs dans le domaine militaire.	6
1.3	Les RCSFs pour Surveillance de la zone	7
1.4	Les RCSFs pour les applications sanitaires.	8
1.5	Les RCSFs pour les applications sanitaires.	8
1.6	Les RCSFs pour la surveillance des applications environnementales.	9
1.7	Station de base et la pyramide, montrant les panneaux solaires, le boîtier de la batterie, les antennes et la station météo[6].	9
1.8	protocole d'un réseau de capteurs.	12
1.9	Un nœud de capteur dans un réseau de capteurs sans fil.	12
1.10	Architecture de base d'un nœud capteur[15].	13
1.11	Architecture matérielle d'un nœud capteur[15]	13
2.1	Les énergies renouvelables.	19
2.2	Récolte d'énergie.	20
2.3	Collecteur d'énergie à source unique pour NC[23]	21
2.4	Une récolteuse d'énergie générale[24]	21
2.5	panneau photovoltaïque.	24
2.6	structure de cellule solaire[29].	24
2.7	Modèle de circuit d'un convertisseur Buck DC-DC[27].	25
2.8	un schéma fonctionnel d'un convertisseur Buck DC-DC le contrôle de suivi des points de puissance maximum (MPPT)[27].	26

2.9 un schéma fonctionnel d'un convertisseur Buck DC-DC à modulation de largeur d'impulsion (PWM)[27].	27
2.10 Schéma fonctionnel du nœud de réseau de capteurs sans fil de collecte d'énergie solaire[27].	29
3.1 Exemple d'un RDP.	33
3.2 Marquage d'un Réseau de Petri.	36
3.3 Réseau vivant.	37
3.4 Franchissement d'une transition.	38
3.5 arcs inhibiteurs.	39
3.6 Représentation des transitions immédiates et temporisées.	40
3.7 Les outils de modélisation des réseaux de Petri.. . . .	41
3.8 Résultat de l'exécution de la fonction Check Structure.	43
4.1 Un modèle basé sur les RDPSGs pour un capteur avec une double Stratégie de Mise en Veille.	48
4.2 Double Stratégies de Mise en Veille.	49
4.3 Charge moyenne de la batterie par rapport au délai de récolte.	52
4.4 Temps moyen du système par rapport au délai de récolte.	53
4.5 Temps moyen du système par rapport au rapport (sommeil/éveil).	54
4.6 Charge moyenne de la batterie par rapport au rapport (sommeil/éveil).	55
4.7 Charge moyenne de la batterie par rapport à la durée du jour.	56
4.8 Temps moyen du système par rapport a la durée du jour	57

Liste des tableaux

4.1	Nomenclature et description des places.	49
4.2	Nomenclature et description des transitions.	50
4.3	Les valeurs d'entrée pour l'analyse.	51

Liste des abréviations

RCSF	Réseau de Capture Sans Fil.
CAN	Convertisseur Analogique-Numérique.
RCC	Réseau de Capteurs Corporels.
MAC	Medium Access Control.
TDMA	Time Division Multiple Access .
TCP	Transmission Control Protocol.
UDP	User Datagram Protocol.
GPS	Global Positioning System.
ROM	Read Only Memory.
EnR	Énergie renouvelable.
NC	Nœud de Capture.
PV	PhotoVoltaïque.
RDP	Réseaux de Petri .
RDPS	Réseaux de Petri stochastiques.
RDPSG	Réseaux de Petri stochastiques Généralisés.
GSPN	Generalized Stochastic Petri Net.
EH	Energy Harvesting.

Introduction générale

Depuis sa création, les réseaux de communication sans fil connaissent de plus en plus de succès dans le monde. Grâce à ses différents avantages, cette technologie est devenue un acteur clé de l'architecture réseau actuelle. Les attributs des médias sans fil peuvent être résumés en trois points : Facile à déployer, L'information est partout et les coûts d'installation sont réduits. Au cours de son développement, le paradigme sans fil a été témoin de la naissance de diverses architectures dérivées, telles que les réseaux cellulaires, les réseaux locaux sans fil et d'autres. Au cours des dix dernières années, une nouvelle architecture a vu le jour : les réseaux de capteurs sans fil.

Les réseaux de capteurs sans fil se composent de centaines ou même des milliers de petits appareils, chacun avec une fonction de détection, des capacités de traitement et de communication pour surveiller l'environnement du monde réel. Ils sont conçus pour jouer un rôle important dans un large domaine d'application : la surveillance militaire, la surveillance des incendies de forêt et d'établir la surveillance de la sécurité dans un avenir proche. Dans ces réseaux, un grand nombre de nœuds de capteurs sont déployés pour surveiller une vaste zone, où les conditions de fonctionnement dans la plupart des cas sont hostiles.

Cependant, les nœuds de capteurs sont sévèrement restreints en raison du manque de ressources (puissance de traitement, mémoire limitée et l'énergie). Étant donné que ces réseaux sont habituellement déployés dans des régions éloignées et sans surveillance, ils devraient être équipés de mécanismes de sécurité pour se défendre contre la capture de nœuds, l'altération physique, l'écoute clandestine, le déni de service et d'autres attaques. Par conséquent, il est presque impossible de les remplacer ou de charger leurs batteries.

L'utilisation d'énergie renouvelable (ER) et sa conversion en énergie électrique comme ressource alternative pour alimenter le SN est appelée récolte d'énergie (EH : Energy Harvesting).

L'énergie renouvelable désigne un type d'énergie dont le réservoir ne sera pas épuisé. La chaleur, la lumière solaire photovoltaïque, l'énergie biologique, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie holométrique, et autres sont utilisées. La technologie de collecte d'énergie est désormais largement utilisée dans les réseaux de capteurs sans fil pour prolonger la durée de vie des batteries et assurer un fonctionnement à long terme. Nombreux travaux sont menés dans ce domaine afin d'exploiter les sources d'énergie pour la récolte d'énergie dans des domaines tels que la conception de la plate-forme, la mise en œuvre à long terme, la gestion de l'énergie et le routage solaire.

La lumière du soleil est l'une des sources d'énergie les plus abondantes et les plus facilement disponibles sur la planète. La quantité d'énergie solaire qui atteint la surface de la terre en une heure est suffisante pour alimenter notre planète pendant plus d'un an. Cela semble être une source parfaite d'énergie renouvelable, mais la quantité d'énergie solaire disponible dépend non seulement de l'emplacement géographique, mais aussi de l'heure du jour et de la saison.

L'évaluation des performances d'un réseau de capteurs sans fil se fait de deux façons différentes : par simulation et par modélisation. Dans la première méthode les gens utilisent des simulateurs conçus spécialement pour étudier le comportement d'un réseau d'une manière virtuelle avant l'installation réelle. Parmi les simulateurs utilisés, on trouve NS et sa famille (NS2 et NS3), OMNET++, OPNET, et autres.

Cependant, la modélisation utilise des formalismes mathématiques pour évaluer les performances d'un tel system. Les réseaux de Petri, les chaînes de Markov, les fils d'attente, les graphes, les automates, et autres sont utilisés pour concevoir des modèles aux systèmes dans lesquels on veut évaluer ses performances. Nous considérons dans ce document un réseau de capteurs sans fil avec des nœuds équipés par des systèmes de récolte d'énergie solaire. Nous allons proposer un modèle basé sur les réseaux de Petri pour étudier les paramètres de performances. Nous allons considérer plusieurs contraintes d'environnement

qui ont des effets sur le comportement du système.

L'objectif de ce projet est d'explorer les réseaux de capteurs sans fil avec récupération d'énergie et de proposer une modélisation par les réseaux de Petri avec le mécanisme de veille et récupération d'énergie .

Ce mémoire traite le thème : modélisation et évaluation de performances des réseaux de capteurs sans fil par les réseaux de Petri avec contraintes de récupération d'énergie et double stratégie de mise en veille. A cet effet, nous allons suivre le plan de travail suivant :

— Chapitre 1 : dans ce chapitre, nous allons donner une présentation générale au capteur et réseau de capteurs sans fil en décrivant leurs caractéristiques générales ainsi que leurs architectures et les domaines d'application de ce dernier.

— Chapitre 2 : nous allons présenter la récupération d'énergie et de récupération d'énergie solaire dans les réseaux de capteurs sans fil.

— Chapitre 3 : est une présentation générale aux réseaux de Petri stochastique généralisés, et une brève présentation de l'outil logiciel TimeNet. — chapitre 4 : nous allons présenter notre proposition pour la modélisation d'un réseau de capture avec les réseaux de Petri, et nous allons présenter une étude expérimentale pour l'évaluation des performances.

A la fin de ce document, nous allons donner une conclusion générale pour notre étude dans ce projet de fin d'étude.

Les réseaux de capteur sans fil

1.1 Introduction

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) est un réseau qui permet à un grand nombre de petits terminaux de capteurs dotés de fonctions de communication sans fil d'être installé à divers endroits dans un espace particulier, et ces dispositifs peuvent être utilisés en coopération pour contrôler les installations ou observer l'environnement. Les réseaux de capteurs sont de plus en plus utilisés dans divers domaines à mesure que l'Internet des objets (internet of things) continue de proliférer. Parce qu'il est sans fil, il élimine le besoin de câblage, et en se connectant au réseau, il est possible de gérer de manière centralisée les données de nombreux capteurs. D'autre part, les réseaux de capteurs ont encore des problèmes tels que l'absence de normes internationales telles que les normes de communication et les fréquences entre les réseaux et les terminaux.

1.2 Réseaux de capteurs sans fil

1.2.1 Définition :

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être définis comme étant des réseaux auto-configurés et une infrastructure moins sans fil permettant de surveiller les conditions physiques ou environnementales, telles que la température, le son, les vibrations, la pression, le mouvement ou les polluants, et de transmettre leurs données par le réseau en coopération à une station de base où les données peuvent être observées et analysées. une station de base agit comme une interface entre les utilisateurs et le réseau. En général, un

réseau de capteurs sans fil contient des centaines de milliers de nœuds de capteurs [1].

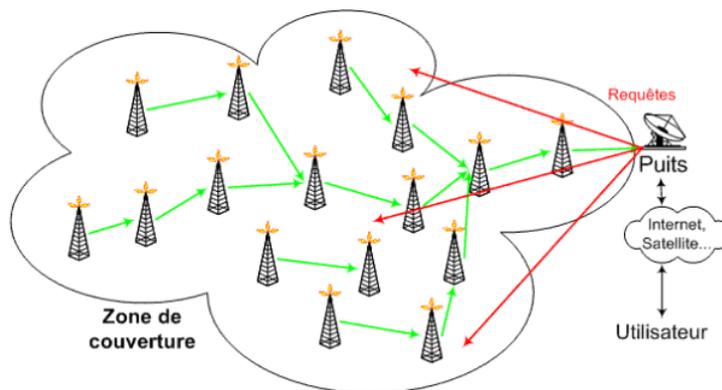


FIGURE 1.1 – Architecture générale d'un RCSF.

1.2.2 Caractéristiques des RCSF

Le nom de série de volume (RCSF) est actuellement utilisé pour les données physiques sans surveillance du monde réel pour mesurer de nombreux paramètres. Donc, les caractéristiques du WSN doivent être prises en compte pour le déploiement du réseau. Les caractéristiques significatives de Les RCSF sont décrites comme suit [2] :

Faible coût : Dans le RCSF, normalement des centaines ou des milliers des nœuds de capteurs sont déployés pour mesurer tout environnement. Afin de réduire le coût global de l'ensemble réseau le coût du nœud de capteur doit être maintenu aussi bas que possible.

Efficiace énergétique : Énergie dans le RCSF est utilisée pour différentes buts tels que le calcul, la communication et le stockage. Le nœud de capteur consomme plus d'énergie que les autres pour Communication. S'ils n'ont plus de pouvoir, ils le font souvent devenues invalide car nous n'avons aucune option de recharge. Donc, les protocoles et le développement d'algorithmes devraient prendre en compte consommation et récupération d'énergie en phase de conception.

Capacités de communication : Le RCSF communique généralement en utilisant des ondes radio sur un canal sans fil. Il a la propriété de communication à courte portée, étroite et dynamique bande passante. Le canal de communication peut être bidirectionnel ou unidirectionnel. Sans surveillance et hostile environnement opérationnel il est difficile d'exécuter le RCSF en douceur. Ainsi, le matériel et le logiciel pour la communication doivent avoir prendre en compte la robustesse, la sécurité et la résilience.

Sécurité et confidentialité : Chaque nœud de capteur doit avoir des mécanismes de sécurité suffisants pour prévenir accès non autorisé, attaques et dommages involontaires informations à l'intérieur du nœud de capteur. En outre, des mécanismes de protection de la vie privée doivent également être inclus.

1.2.3 Les domaines d'application des RCSFs :

Les réseaux de capteurs sans fil ont gagné en popularité en raison de leur flexibilité dans la résolution de problèmes dans différents domaines d'application et ont le potentiel de changer nos vies de nombreuses façons différentes. Les réseaux de capteurs sans fil ont été appliqués avec succès dans divers domaines d'application tels que [1] :

Applications militaires : Les réseaux de capteurs sans fil font probablement partie intégrante des systèmes militaires de commandement, de contrôle, de communication, d'informatique, de renseignement, de surveillance des champs de bataille, de reconnaissance et de ciblage.



FIGURE 1.2 – Les RCSFs dans le domaine militaire.

Surveillance de la zone : Dans la surveillance de la zone, les nœuds de capteurs sont déployés sur une région où un phénomène doit être surveillé. Lorsque les capteurs détectent l'événement surveillé (chaleur, pression, etc.), l'événement est signalé à l'une des stations de base, qui prend alors les mesures appropriées

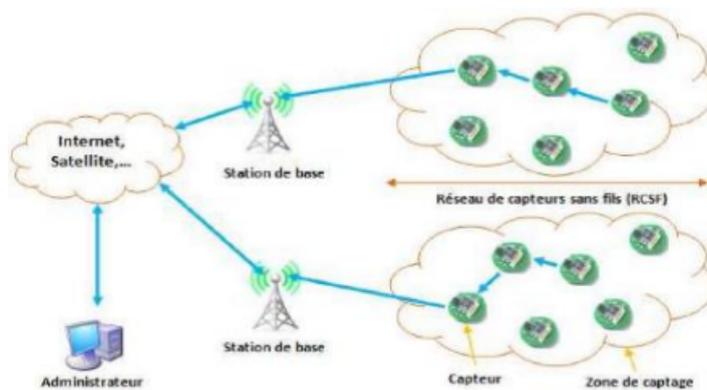


FIGURE 1.3 – Les RCSFs pour Surveillance de la zone

Surveillance de la santé : Le réseau de capteurs sans fil peut être intégré dans un bâtiment hospitalier pour suivre et surveiller les patients et toutes les ressources médicales. Des types spéciaux de capteurs qui peuvent mesurer la pression artérielle, la température corporelle et l'électrocardiogramme (ECG) peuvent même être tricotés dans des vêtements pour fournir des soins à distance pour les personnes âgées. Lorsque les capteurs sont usés ou implantés à des fins médicales, ils forment un type spécial de réseau de capteurs appelé réseau de capteurs corporels (RCC). RCC est un domaine interdisciplinaire riche qui révolutionne le système de santé en permettant une surveillance médicale peu coûteuse, continue et ambulatoire avec des mises à jour en temps réel des dossiers médicaux via Internet. L'une des premières recherches sur les RCC a été menée à Imperial College London, où un nœud de capteur RCC spécialisé et RCC Développement[3].

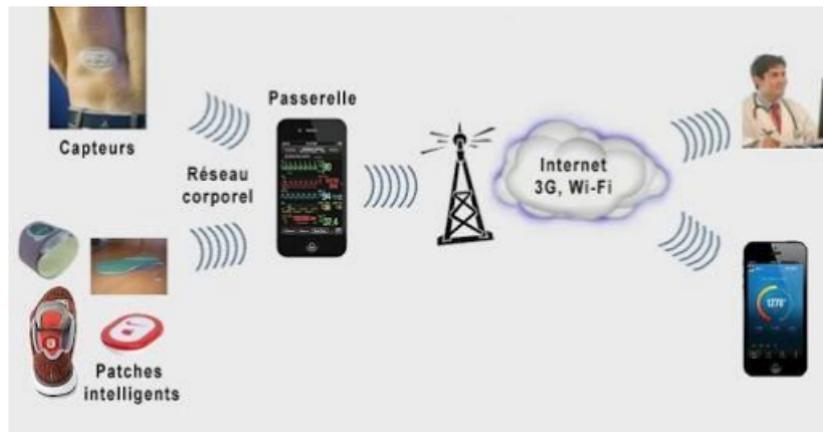


FIGURE 1.4 – Les RCSFs pour les applications sanitaires.

Contrôle de la circulation : Les réseaux de capteurs sont utilisés depuis un certain temps pour la surveillance et le contrôle de la circulation des véhicules. À de nombreux carrefours, il y a des capteurs aériens ou enfouis pour détecter les véhicules et contrôler les feux de circulation. De plus, les caméras vidéo sont fréquemment utilisées pour surveiller les tronçons routiers où la circulation est dense. Cependant, les réseaux de communication traditionnels utilisés pour raccorder ces capteurs sont coûteux et, par conséquent, la surveillance du trafic n'est généralement disponible qu'à quelques points critiques d'une ville [4]. Les RCSF changeront complètement le paysage de la surveillance et du contrôle de la circulation en installant des nœuds de capteur bon marché dans la voiture, dans les stationnements, le long de la route, etc.

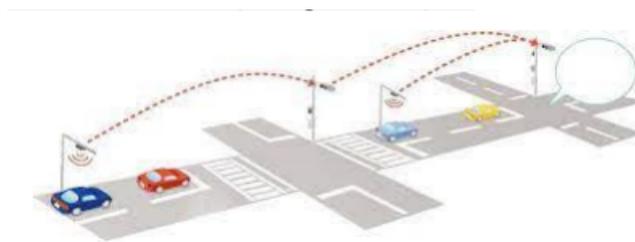


FIGURE 1.5 – Les RCSFs pour les applications sanitaires.

Surveillance de l'environnement : La surveillance environnementale [5] peut être utilisée pour le suivi des animaux, la surveillance des forêts, la détection des inondations et les prévisions météorologiques. C'est un candidat naturel pour l'application des RCSFs

[3], parce que les variables à surveiller, exemple : la température, sont habituellement réparties sur une grande région.

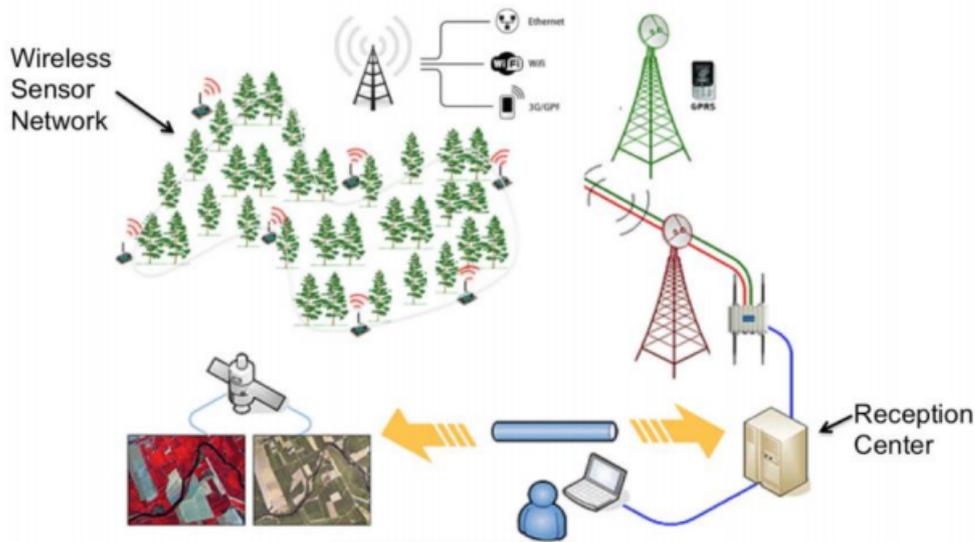


FIGURE 1.6 – Les RCSFs pour la surveillance des applications environnementales.

Par exemple, des chercheurs de l'Université de Southampton ont construit un système de surveillance de l'environnement glaciaire à l'aide de RCSF en Norvège [6]. Ils collectent les données des nœuds de capteurs installés dans la glace et les sédiments sub-glaciaires sans l'utilisation de fils qui pourraient perturber l'environnement.

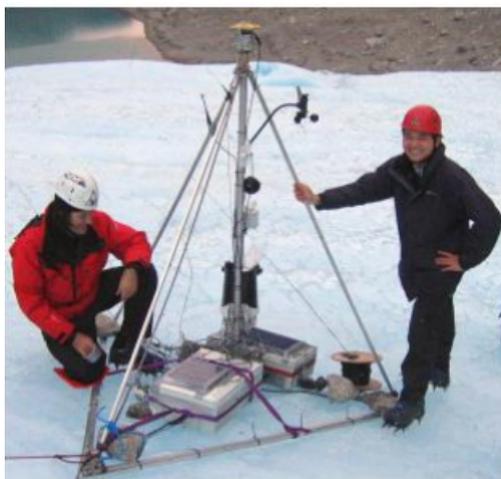


FIGURE 1.7 – Station de base et la pyramide, montrant les panneaux solaires, le boîtier de la batterie, les antennes et la station météo[6].

Sécurité des infrastructures : Les RCSFs de sécurité d'infrastructure peuvent être utilisés pour des applications de sécurité d'infrastructure et de lutte contre le terrorisme. Les bâtiments et les installations critiques, comme les centrales électriques, les aéroports et les bases militaires, doivent être protégés contre d'éventuelles invasions. Des réseaux de capteurs vidéo, acoustiques et autres peuvent être déployés autour de ces installations [3].

1.2.4 Les protocoles de communication :

Couche physique : La couche physique est responsable de la sélection des fréquences, de la génération des fréquences porteuses, de la détection des signaux, de la modulation et du cryptage des données. Comme dans le cas de la transmission radio conventionnelle, la question principale est de savoir comment transmettre le plus efficacement possible l'énergie, en tenant compte de tous les coûts connexes (frais généraux, retransmissions possibles, etc.) compte tenu de la diffusion, de l'ombrage, de la réflexion, diffraction, effet multicast et décoloration. Très peu de travail a été fait en ce qui concerne les protocoles bien adaptés aux besoins des RCSFs à la couche physique. [7] [8] discutent du travail de modulation énergétique avec l'architecture de modem à spectre étendu à séquence directe de faible puissance. Cette architecture de faible puissance peut être mappée à une technologie ASIC pour améliorer encore l'efficacité. Les schémas et stratégies de modulation pour surmonter les effets de propagation du signal, et la conception du matériel sont les principaux problèmes ouverts pour la conception des RCSFs et sont inexplorés.

Couche de liaison de données : La couche de liaison de données est responsable du multiplexage des flux de données, de la détection des images de données et du contrôle des erreurs. Il assure des connexions point à point et point à multipoint fiable dans un réseau de communication. [9] examine la question du choix de la taille des paquets avec l'efficacité énergétique. De nombreux chercheurs ont visé à prendre en compte le degré de redondance qu'un message agrégé porte sur la couche lien.

Couche de liaison de données (Couche MAC) : Comme des milliers de nœuds de capteurs sont dispersés dans un champ de capteurs, le schéma MAC (Medium Access Control) doit établir des liens de communication pour le transfert de données. Il forme l'infrastructure de base nécessaire pour la communication sans fil hop par hop et donne les RCSF auto-figuration capacité. Le partage équitable et efficace des ressources de communication entre les nœuds de capteurs doit être l'autre critère. Dans la plupart des travaux de recherche, la question est de savoir comment s'assurer que les nœuds des capteurs peuvent dormir le plus longtemps possible, sans pouvoir communiquer. La plupart des propositions montrent au moins certains aspects de la TDMA [10] [11] [12].

Couche réseau : La couche réseau est responsable du routage du paquet correctement et efficacement. De nombreux chercheurs actifs s'intéressent à la recherche de la couche réseau au de là du MAC et du contrôle topologique. Le routage réseau ad hoc peut être utilisé mais les critères plus stricts en matière d'efficacité énergétique et d'évolutivité nécessitent de nouvelles solutions. Les problèmes traditionnels de routage unicast, multicast et anycast existent dans RCSF. Le routage géographique et le routage axé sur les données peuvent être pris en compte dans les RCSFs [13].

Couche de transport : La couche de transport est responsable de la livraison de données fiables de bout en bout de la transmission. Très peu d'attention a été accordée jusqu'à présent pour trouver une solution de couche de transport appropriée pour RCSF. La reconnaissance (TCP) est très coûteuse car le nœud du capteur n'a pas assez de mémoire et de puissance. Le schéma de type UDP est nécessaire pour communiquer entre les capteurs et l'évier. TCP peut être utilisé entre l'évier et l'utilisateur final par internet ou par satellite [14].

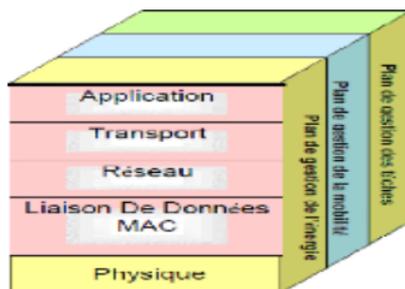


FIGURE 1.8 – protocole d'un réseau de capteurs.

1.3 Le nœud de capteur :

1.3.1 Définition :

Un nœud de capteur, également connu sous le nom de mote, est un nœud dans un réseau de capteurs qui est capable d'effectuer un traitement, de collecter des informations sensorielles et de communiquer avec d'autres nœuds connectés dans le réseau. La tâche principale d'un nœud de capteur dans un réseau de capteurs sans fil est le processus de détection et de transmission de données. Il peut participer à un RCSF en tant que nœud de détection ou en tant que nœud évier comme il est présenté ci-dessous[web1]. Les nœuds

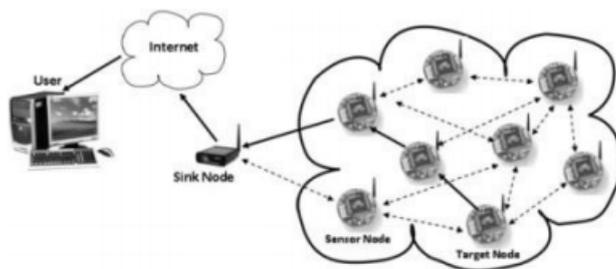


FIGURE 1.9 – Un nœud de capteur dans un réseau de capteurs sans fil.

de capteurs sont des dispositifs micro-embarqués qui nécessitent un prix bas et une faible consommation d'énergie, et ces limitations entraînent inévitablement une faible capacité de processeur et une faible capacité de mémoire. Pour accomplir une variété de tâches, les nœuds de capteurs doivent accomplir une variété de tâches telles que la surveillance de l'acquisition et de la conversion des données, la gestion et le traitement des données, répondre aux demandes de tâches des nœuds agrégés et le contrôle des nœuds. Comment

utiliser des ressources informatiques et de stockage limitées pour accomplir de nombreuses tâches collaboratives est l'un des défis de la conception de réseaux de capteurs [web 2]

1.3.2 Architecture d'un nœud capteur :

La structure de base d'un nœud capteur est constituée d'au moins quatre unités de base, à savoir : unité de capture ou d'acquisition, unité de traitement, unité de communication et unité de contrôle d'énergie. L'architecture peut également inclure d'autres modules, selon le domaine d'application, telle que des systèmes de positionnement (GPS) ou des systèmes générateurs d'énergie (cellules solaires), et peut également inclure des sites de puits de systèmes mobiles chargés de déplacer des micro-capteurs [15]. Un schéma

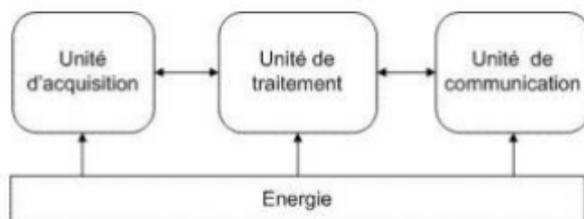


FIGURE 1.10 – Architecture de base d'un nœud capteur[15].

d'une architecture typique d'un nœud capteur est présenté dans la figure 1.11. Le but de cette section est de détailler le fonctionnement de chaque composant d'un nœud capteur.

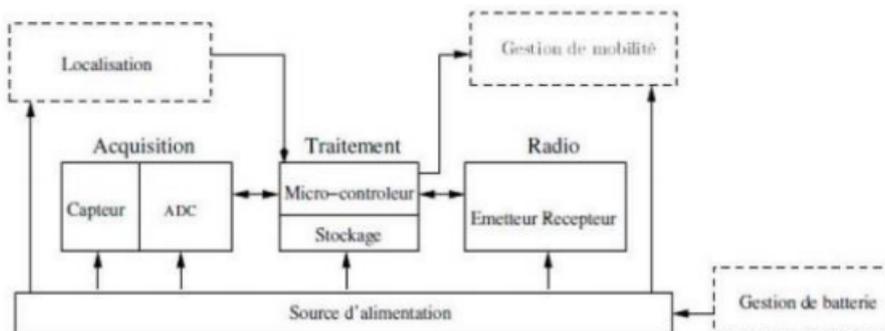


FIGURE 1.11 – Architecture matérielle d'un nœud capteur[15]

Micro-contrôleur : Le micro-contrôleurs représente le cœur du nœud. Il reçoit les données de l'unité de capture, traite les données, décide quand et où les envoyer, et gère le contrôle des actionneurs (s'ils existent). Le micro-contrôleurs reçoit également des paquets de données des nœuds voisins, les analyse et répond à ces messages si nécessaires. Micro-contrôleurs avec différentes architectures. Nous présenterons ci-après les micro-contrôleurs les plus employés par les constructeurs des RCSFs. Parmi les micro-contrôleurs les plus populaires (dédiés au RCSF), on retrouve le MSP430 du Texas Instrument. Il s'agit d'un micro-contrôleur 16 bits connu pour sa faible consommation d'énergie. Le MSP430 est intégré à de nombreuses plateformes de réseaux de capteurs, telles que Telos, BSN, Wavenis et eyeIFX. Il existe deux séries très basse consommation sur le marché : la série MSP430F1xx, qui a une consommation d'énergie dynamique plus faible mais fonctionnant à une fréquence inférieure (pas plus de 8 MHz), et la série MSP430F2xx, dont la tension de fonctionnement en fréquence peut atteindre 16 MHz[15].

Convertisseur Analogique/Numérique (CAN) :

Un convertisseur analogique-numérique (CAN) est nécessaire pour convertir le signal analogique de l'unité de capture en une valeur numérique utilisable. Grâce au micro-contrôleur. Le choix de l'CAN dépend des besoins de l'utilisateur et Limitations imposées par l'application (vitesse de conversion, coût du convertisseur, énergie Consommation de conversion, taille de l'CAN, etc.)[15].

Horloge temps réel : Il utilise généralement du quartz piézoélectrique pour conserver les informations de temps système. Le protocole de communication utilise une horloge en temps réel pour la synchronisation Terrain d'entente entre les nœuds (synchronisation des nœuds entre eux). L'horloge peut également être utilisé Le système logiciel agi comme Timer pour réveiller le microcontrôleur à une heure précise. Ce Timer peut également aider les nœuds à définir les intervalles de sommeil et d'action (Sleep/wake intervalle)[15].

Capteurs/actionneurs : Le rôle du capteur (unité de détection ou capteur) est de capter et Obtenir des données de l'environnement de surveillance. Ces capteurs ont changé Grandeurs physiques observées (pression, température, humidité, vitesse, mouvement, etc.) en grandeur électrique (tension électrique, intensité, train d'impulsions, etc.). Cer-

tains modèles le réseau de capteurs est constitué de nœuds équipés de plusieurs actionneurs. Actionneur Convertir l'énergie d'entrée en énergie de sortie (généralement un signal électrique de commande) peut être utilisé pour contrôler ou contrôler le processus [15].

Mémoires : Les nœuds capteurs sont équipés de plusieurs types de mémoires : RAM ,ROM , EEPROM ou mémoire flash. La mémoire de programme est utilisée pour enregistrer suivez les instructions du programme exécuté dans le système d'exploitation nœud. Le stockage des données permet le stockage des données traitées par les nœuds capteurs[15].

L'unité de contrôle d'énergie : L'unité de contrôle de l'énergie (Co-processeur DVS) est l'une des unités les plus importantes Dans le nœud du capteur. En fait, il est chargé de fournir de l'énergie à d'autres unités, et en même temps Minimiser la consommation d'énergie des nœuds de capteurs. Ainsi la machine peut entrer dans l'état de veille Les ingrédients inactifs, par exemple, réduit le gaspillage d'énergie [15].

Batterie / système de récupération d'énergie : Le nœud a une batterie d'alimentation comme source d'énergie principale. quelque Le modèle utilise le système de récupération d'énergie dans l'environnement. à présent, L'utilisation de l'énergie solaire est le moyen le plus approprié de récupération d'énergie nœud RCSF [15].

1.4 Les problématiques des RCSFs :

Il convient de noter que les RCSFs, même si elles présentent un grand potentiel, n'ont pas encore atteint leur efficacité optimale. Cela est en grande partie dû aux défis inhérents qu'ils présentent et à l'ampleur toujours croissante de la demande provenant des applications. Ces défis ont suscité beaucoup d'intérêt dans la recherche au cours de la dernière décennie. Certains des principaux défis sont énumérés ci-dessous.

L'énergie : La conservation de l'énergie est au cœur du développement des RCSFs. Étant donné que les nœuds de capteurs fonctionnent sur une batterie limitée [16], il est essentiel d'utiliser l'énergie judicieusement et efficacement pour prolonger considérablement la

durée de vie du réseau. Dans d'autres cas, la source d'énergie pourrait être alimentée par l'énergie solaire et d'autres moyens. Cependant, au fur et à mesure de la croissance des RCSFs, il pourrait devenir difficile de reconstituer la source d'alimentation, ce qui pourrait mener à la disposition complétement des nœuds de capteurs, comme prévu dans [17]. Cela dépendrait toutefois du terrain de déploiement et cela demeure une considération ouverte de recherche et de conception

Routage : Les topologies RCSF ne sont pas structurées et par conséquent de nombreux protocoles de routage traditionnels ne sont pas adaptés. En outre, le fait qu'ils ne sont pas basés sur IP rend le routage un aspect très difficile mais intéressant. Le routage est basé sur la couche réseau définie par IEEE 802.15.4. Les protocoles de routage de RCSF devraient être légers en raison des ressources limitées que ces réseaux présentent. Les protocoles de routage RCSF sont classés en redirection gourmande, centrée sur les données, en localisation d'orientation énergétique. Acheminement gourmand des paquets à des voisins proches de la destination [18]

Sécurité : Comme les autres réseaux sans fil, les réseaux sans fil sont vulnérables aux menaces à la sécurité. Certaines des mesures de sécurité et des algorithmes cryptographiques appropriés sont discutées dans [18]. De plus, [19], [20] et [21] ont défini les exigences de sécurité fondamentales auxquelles doivent satisfaire les RCSFs : authentification des données, confidentialité des données, intégrité des données, disponibilité et redondance.

Auto-configuration : La configuration manuelle de n'importe quel périphérique réseau est difficile et fastidieuse surtout lorsque le réseau se développe. Les nœuds capteurs doivent répondre rapidement à tout changement dans le réseau et nécessitent donc une gestion dynamique de la configuration. Affirment que le rôle des nœuds de capteurs pourrait s'étendre pour offrir des fonctions autonomes telles que l'auto-guérison, la découverte de soi, donc une approche plus subtile et plus consciente de l'énergie est nécessaire.

1.5 Conclusion

Les RCFs ont été identifiées comme l'une des technologies les plus prometteuses de ce siècle. Ce chapitre fournit des informations sur ses caractéristiques et l'architecture, les applications, ainsi que le protocole de ce réseau. Dans les réseaux de capture sans fil, l'énergie est l'un des plus grands défis auxquels nous sommes confrontés, et c'est pourquoi nous proposons l'idée de récolte d'énergie comme solution pour allonger la durée de vie de la batterie. Donc dans le chapitre suivant, nous allons parler sur ce qui concerne l'énergie renouvelable et la récolte d'énergie dans les réseaux de capture sans fil.

Récupération d'énergie

2.1 Introduction

Un réseau de capteurs se compose de dizaines à milliers de nœuds de capteurs intelligents travaillant avec des ressources très limitées en matière de calcul, de stockage, de communication et d'énergie. En particulier, l'obstacle principal des WLN alimentés par batterie existant est une durée de vie limitée pendant laquelle les nœuds de capteurs ou les réseaux fonctionnent de manière fonctionnelle. Le remplacement manuel ou la recharge des batteries sur chaque nœud est économiquement peu pratique et excessivement coûteux. De plus, un WSN peut être situé dans une zone où un tel remplacement ou recharge est impossible.

2.2 Les énergies renouvelables :

2.2.1 Définition :

L'énergie renouvelable (ou EnR) désigne une gamme de moyens de production d'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou réapprovisionnées à la vitesse à laquelle elles sont consommées. On parle généralement d'énergie renouvelable par rapport à l'énergie fossile avec des stocks limités et non renouvelables à l'échelle humaine : charbon, pétrole, gaz naturel. Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources telles que le soleil, ou le vent, qui est théoriquement illimité à l'échelle humaine. [Web 3] Les énergies renouvelables proviennent de deux sources naturelles principales : le soleil (origine du cycle de l'eau,

marées, vent et végétation) et la terre (qui émet de la chaleur). [Web 4]. Le caractère renouvelable de ces énergies, leur faible émission de déchets, de rejets contaminés et de gaz à effet de serre sont des avantages. Mais leur énergie, qui est relativement dispersée, est bien inférieure à leur forte concentration, énergie non renouvelable. Dans le cas de l'énergie solaire et éolienne, ils peuvent être "intermittents" et difficiles à stocker car ils sont immédiatement convertis en électricité, nécessitant une contribution occasionnelle d'autres énergies. Leur mise en œuvre implique également des investissements substantiels, même si au fil du temps ils sont devenus de plus en plus compétitifs avec les combustibles fossiles. [web 5].



FIGURE 2.1 – Les énergies renouvelables.

2.3 Récolte d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil :

La récolte d'énergie est un moyen d'obtenir de l'énergie de sources externes, comme le soleil, le vent et la chaleur. L'énergie combinée est convertie en électricité et peut-être stockée ou utilisée directement. L'idée de la collecte d'énergie est d'extraire l'énergie de l'environnement immédiat. L'assemblage énergies constitue une source d'énergie de remplacement pour les situations où la connexion de dispositifs à un réseau électrique est indésirable ou impossible en raison des coûts ou des contraintes pratiques. Selon la source, les composants des cultures énergétiques peuvent varier. La plupart des petits appareils à faible puissance sont alimentés par batterie. La récupération de puissance peut augmenter la durée de vie de la batterie et rendre les appareils à faible consommation d'énergie [22].

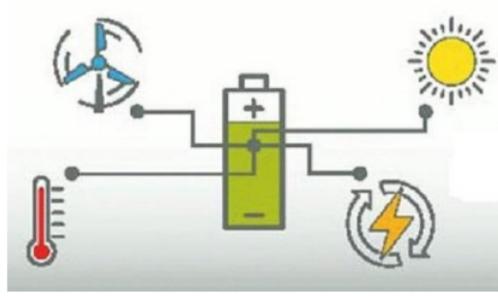


FIGURE 2.2 – Récolte d'énergie.

Le système d'assemblage énergétique de WSN représente une version simplifiée de la culture d'énergie générale à la figure 2.3, car il nécessite une source d'alimentation et certains composants électroniques clés pour former un système complet [23]. Celles-ci comprennent habituellement :

Sources d'alimentation (energy sources) ou convertisseur de puissance (transformateur) : Comme un composant électrique ou un panneau solaire qui peut convertir la source d'énergie sous forme électrique

Module de récupération d'énergie (EH module) ou dispositif d'interface électronique (convertisseur) : Tel qu'un convertisseur Buck-Boost basse tension, pour capter l'énergie d'une source basse tension et la convertir en tension utilisable régulée pour alimenter une charge et/ou charger une batterie.

Des capteurs, des microcontrôleurs et un émetteur-récepteur pour lire, enregistrer et transmettre les données dans le cadre du RCSF.

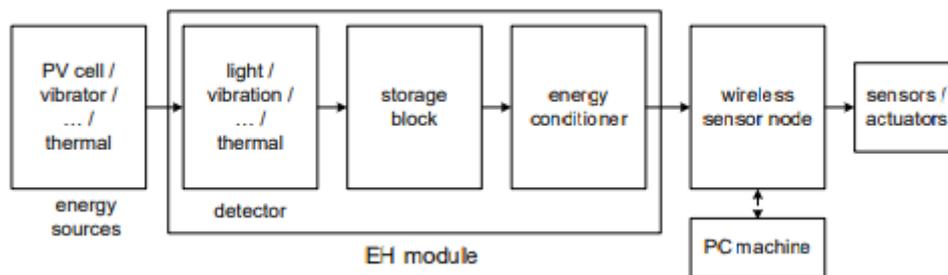


FIGURE 2.3 – Collecteur d'énergie à source unique pour NC[23]

2.4 Architecteur de Récolte

La structure générale de l'architecture Il se compose des quatre blocs de construction suivants : sources d'énergie, pré-conditionneur, moissonneuse et tampon d'énergie. Certains de ces blocs de construction peuvent ne pas exister dans tous les types de moissonneuses ; par exemple, le pré- conditionnement n'est pas nécessaire pour la plupart des moissonneuses solaires. Nous allons maintenant décrire brièvement le rôle de chaque élément de base [24].

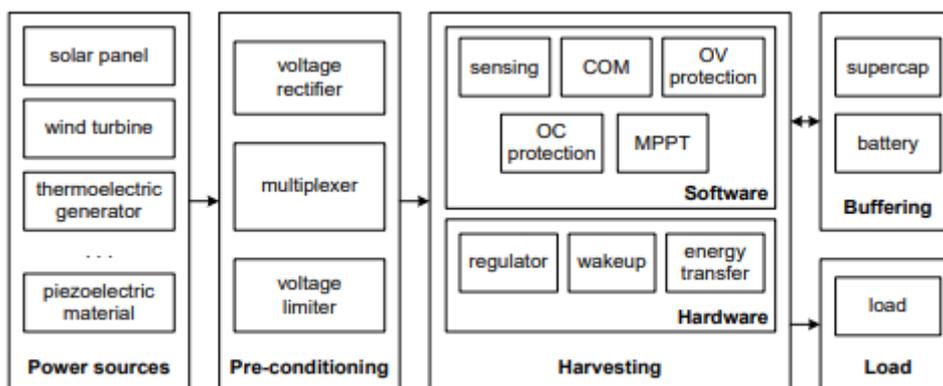


FIGURE 2.4 – Une récolteuse d'énergie générale[24]

Sources d'énergie (power sources) : Cet élément comprend une source récoltée et est converti en énergie électrique. Des panneaux solaires, des éoliennes, des générateurs thermoélectriques, etc., peuvent être utilisés.

Pré conditionneur (Pre-conditioning) : Le pré conditionnement sert trois objectifs principaux : un redresseur de tension fait tourner les entrées de courant alternatif en courant continu, un multiplexeur permet de sélectionner l'une des entrées de courant, un limiteur de tension empêche le composant de récolte d'être endommagée en raison de la surtension.

Moissonneuse (harvesting) : Cette composante est responsable de transformer la puissance d'entrée en énergie tampon (c.-à-d., la récolte). Il peut être mis en œuvre en utilisant des éléments matériels de base qui ne nécessitent pas de logiciel pour fonctionner, pour une plus grande efficacité, les configurations intelligentes sont généralement contrôlées par un micro logiciel fonctionnant sur un micro-contrôleur. Le composant de récolte intègre le micro logiciel pour exécuter les algorithmes. Les moissonneuses intelligentes logicielles offrent des fonctionnalités supplémentaires telles que la protection contre la surtension, la régulation de la tension et la communication sans fil avec les autres nœuds capture de réseau de capture.

Tampon d'énergie (Energy buffer) : Énergie récoltée de la fourrière. Les batteries et les supraconducteurs sont utilisés comme éléments isolants.

2.5 solaire Énergie récolte pour les nœuds de capteurs sans fil :

Dans les réseaux de capture sans fil la batterie a une capacité limitée et, par conséquent, doit être réapprovisionnée périodiquement ou doit être remplacée fréquemment. Pendant le temps de fonctionnement ou en cas d'urgence, il semble difficile d'exécuter ces tâches. Parfois, le réseau est dans une zone difficile d'accès et il n'est pas possible de remplacer ou de recharger la batterie. Une des solutions possibles à ce problème est d'utiliser l'énergie présente dans le milieu environnant. La récolte d'énergie est le processus d'accumulation et d'utilisation de l'énergie comme l'énergie solaire [25].

2.5.1 Définition d'Énergie Solaire :

L'énergie solaire est une énergie utilisable produite par le soleil sous forme d'énergie électrique ou thermique. L'énergie solaire est captée de diverses façons, la plus courante étant les panneaux solaires photovoltaïques qui convertissent les rayons solaires en électricité utilisable. Outre l'utilisation du photovoltaïque pour produire de l'électricité, l'énergie solaire est couramment utilisée dans les applications thermiques pour chauffer les espaces intérieurs ou les fluides [web 8]. Les avantages de l'utilisation de l'énergie solaire pour les nœuds WSN sont donnés comme[26] :

- L'énergie solaire est la source d'énergie éternelle.
- L'énergie solaire n'est pas polluée et ne nuit pas à l'atmosphère.
- La densité de puissance atteinte est de 15 mW/cm² par rapport à toutes les autres sources renouvelables.
- L'énergie solaire est flexible, c.-à-d. qu'elle peut être utilisée pour des applications à basse tension comme les calculatrices portatives, les montres, les dispositifs de microcontrôleur embarqués sans fil ainsi que les applications à haute puissance comme la traction motrice, le geysier à eau, les centrales électriques, les transpondeurs satellites, etc.
- L'énergie solaire est gratuite et ne cause pas de pollution.
- Les systèmes d'énergie solaire ont besoin d'une très faible conservation et durent plusieurs années.
- Le fonctionnement des nœuds WSN peut être maximisé.

2.5.2 Système de collecte de l'énergie solaire :

Un système de collecte d'énergie solaire de base se compose d'un panneau photovoltaïque, d'un convertisseur DC-DC, d'une batterie rechargeable, d'un circuit de protection de la batterie appelée système de gestion de la batterie (SGB) et d'une unité de commande de convertisseur DC-DC [27].

2.5.2.1 Panneau photovoltaïque :

Un panneau PV est composé de nombreuses cellules solaires connectées électriquement. Les cellules solaires sont connectées dans une configuration spécifique, où le nombre de

cellules solaires se compose du nombre de cellules connectées en parallèle dans le nombre de cellules connectées en série [28] [29].



FIGURE 2.5 – panneau photovoltaïque.

La cellule solaire est construite avec deux couches de matériau semi-conducteur. Les matériaux semi-conducteurs sont dopés différemment. La jonction p-n des deux matériaux semi-conducteurs est exposée à la lumière. La structure de la cellule solaire au silicium simplifiée est présentée sur la figure 2.6. La face supérieure de l'électrode est faite d'éléments métalliques incrustés de silicium pour éviter l'obstruction de l'irradiation solaire directe. La taille et la forme de la cellule solaire sont conçues pour maximiser la surface absorbante et réduire les pertes causées par la résistance de contact [29].

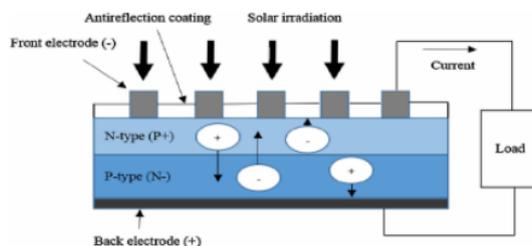


FIGURE 2.6 – structure de cellule solaire[29].

2.5.2.2 convertisseur DC-DC :

Il existe généralement trois types de convertisseurs DC-DC [30] utilisés dans la conception d'un système photovoltaïque : Buck Converter, Boost Converter et Buck-Boost Converter. Ici, nous avons utilisé un convertisseur DC-DC Buck parce que son efficacité est élevée par rapport aux convertisseurs Boost et Buck-Boost. Un convertisseur Buck DC-DC est un convertisseur électronique de puissance dans lequel la tension de sortie est toujours inférieure à la tension d'entrée. Le convertisseur Buck se compose d'une source de tension CC (V_{cc}), d'un inducteur (L), d'un interrupteur (MOSFET), d'une diode (D)

et d'un condensateur (C), comme le montre la figure 2.7. [27].

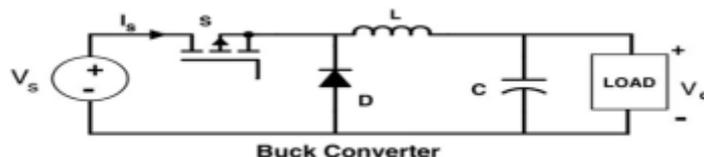


FIGURE 2.7 – Modèle de circuit d'un convertisseur Buck DC-DC[27].

- Généralement, il existe deux types de méthodes de commande de convertisseur DC-DC : le contrôle de la modulation de la largeur des impulsions (PWM : Pulse width modulation) et Le contrôle de suivi des points de puissance maximum (MPPT : Maximum power point tracking) [27].

2.5.2.2.1 Le contrôle de suivi des points de puissance maximum (MPPT) :

Le suivi de puissance maximale est la méthode de suivi de MPP pour obtenir la puissance maximale possible du photovoltaïque pendant la lumière du jour. Le but du MPPT est de faire correspondre la résistance équivalente au terminal de R_{eq} photovoltaïque à la résistance de sortie optimale R_{opt} qui est définie comme [31] [32] :

$$R_{opt} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}}$$

-Lorsque la condition $R_{eq} = R_{opt}$ est remplie, le MPP est obtenu ainsi la puissance maximale possible sera produite par des modules photovoltaïques.

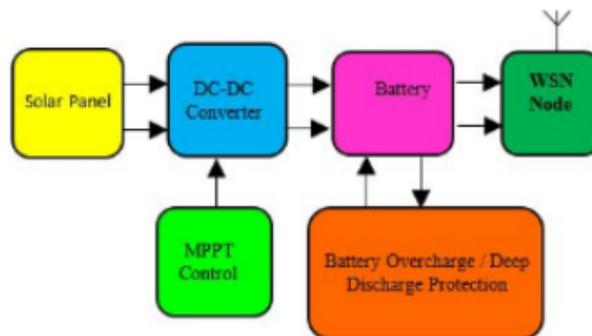


FIGURE 2.8 – un schéma fonctionnel d'un convertisseur Buck DC-DC le contrôle de suivi des points de puissance maximum (MPPT)[27].

2.5.2.2.2 Le contrôle de la modulation de la largeur des impulsions (PWM) :

La modulation de largeur d'impulsion (PWM) est une technique de modulation qui génère des impulsions de largeur variable pour représenter l'amplitude d'un signal d'entrée analogique. Le transistor de commutation de sortie est activé plus souvent pour un signal de grande amplitude et éteint plus souvent pour un signal de faible amplitude. Le caractère numérique (entièrement activé ou désactivé) du circuit PWM est moins coûteux à fabriquer qu'un circuit analogique qui ne dérive pas dans le temps. PWM est largement utilisé dans les applications de ROV pour contrôler la vitesse d'un moteur à courant continu et / ou la luminosité d'une ampoule [33].

La modulation de largeur d'impulsion (PWM) est utilisée pour contrôler l'amplitude des signaux numériques afin de contrôler les dispositifs et les applications nécessitant de l'énergie ou de l'électricité. Il contrôle essentiellement la quantité de puissance, dans la perspective du composant de tension, qui est donnée à un dispositif en faisant tourner rapidement les phases marche et arrêt d'un signal numérique et en faisant varier la largeur de la phase ou du cycle de service "marche". Pour le dispositif, cela apparaîtrait comme une entrée de puissance régulière avec une valeur de tension moyenne, qui est le résultat du pourcentage de la durée. Le cycle d'utilisation est exprimé en pourcentage d'utilisation complète (100%) [web 9].

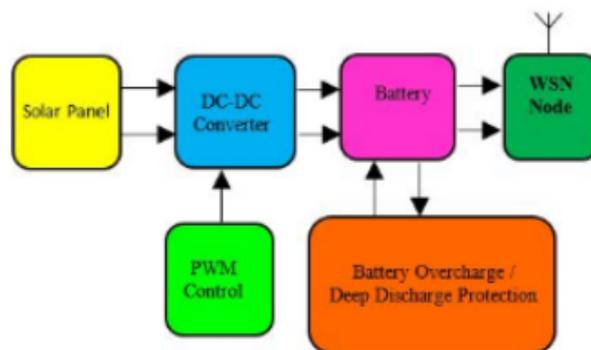


FIGURE 2.9 – un schéma fonctionnel d'un convertisseur Buck DC-DC à modulation de largeur d'impulsion (PWM)[27].

2.5.3 Méthodes de récolte de l'énergie solaire :

2.5.3.1 Panneaux solaires photovoltaïques :

Les panneaux solaires photovoltaïques (PV) utilisent l'énergie solaire pour créer un flux d'électricité. C'est la méthode la plus largement adoptée pour récolter l'énergie solaire aujourd'hui. Ces panneaux, dont la taille varie de quelques centimètres carrés à quelques mètres carrés, sont construits à partir de nombreuses cellules photovoltaïques disposées dans une matrice complexe. Intuitivement, plus la surface disponible pour la lumière du soleil pénètre dans les cellules PV, plus l'énergie solaire est récoltée[web 10].

2.5.3.2 Récolte d'énergie thermique : Énergie du rayonnement électromagnétique :

Le soleil produit un large spectre de rayonnement de différentes longueurs d'onde, y compris l'infrarouge. Ce spectre transfère efficacement l'énergie thermique aux corps qui peuvent l'absorber. Les éléments qui peuvent absorber efficacement cette énergie électromagnétique thermique sont appelés « corps noirs », car la couleur noire absorbe toutes les longueurs d'onde de rayonnement qui sont visibles à l'œil humain. Un corps noir idéal peut absorber et émettre correctement toutes les longueurs d'onde du spectre de rayonnement électromagnétique[web10].

2.5.3.3 Chauffe-eau solaires :

Le chauffe-eau solaire est un excellent exemple d'application de collecte d'énergie solaire thermique couramment utilisée dans les climats ensoleillés du monde entier. La version la plus simple d'un système de chauffe-eau solaire utilise une pompe pour faire circuler l'eau fraîche à travers un panneau de corps noir. Cela ressemble visuellement à un panneau solaire PV, où la surface noire absorbe efficacement l'énergie thermique, qui est ensuite refroidie par l'eau circulante, chauffant ainsi l'eau[web10].

2.5.3.4 Chauffe-eau solaire à tube à vide :

Les systèmes de chauffage solaire de l'eau plus avancée et plus efficace utilisent des tubes à vide et des caloducs autonomes pour transférer l'énergie thermique vers un réservoir secondaire. Le tube à vide assure que l'énergie radiante peut pénétrer dans le système, mais toute l'énergie qui est transformée en énergie thermique est contenue dans le tube. Le caloduc absorbe cette énergie et la transfère ensuite dans le grand réservoir d'eau. Ces systèmes sont beaucoup plus efficaces pour chauffer l'eau pendant les mois froids, car des quantités minimales d'énergie thermique s'échappent du tube à vide, ce qui permet de convertir presque toute l'énergie radiante en énergie thermique[web10].

2.5.3.5 Sel fondu énergie solaire :

Des percées relativement récentes dans les systèmes de sel fondu repoussent les limites de la production d'énergie solaire. Cependant, tout comme les systèmes de chauffage à eau solaire précédemment discutée, les centrales au sel fondu utilisent le rayonnement électromagnétique pour faire fondre le sel. Ce sel fondu est ensuite transféré dans un échangeur de chaleur, qui chauffe l'eau en vapeur qui est ensuite entraînée par une turbine à vapeur pour produire de l'électricité. Les centrales au sel fondu, comme la centrale solaire d'Ivanpah, s'appuient sur un vaste réseau de miroirs héliostatiques pour rediriger la lumière du soleil vers un point unique, le plus souvent appelé tour de puissance ou tour centrale[web10].

2.5.4 Exploitation d'un nœud de collecte d'énergie solaire :

Le système de récupération d'énergie solaire fournit une alimentation en courant continu au nœud WSN. Cette tension est récoltée à partir de la lumière du soleil ambiant en utilisant les panneaux solaires [26]. Le panneau solaire convertit l'énergie lumineuse directement en énergie électrique DC. Le convertisseur DC-DC régule cette tension DC pour charger la batterie. La batterie rechargeable alimente le nœud. Le nœud WSN mesure la quantité physique désirée (température, lumière, humidité et pression) en utilisant l'unité de mesure du capteur. Un microcontrôleur en unités de calcul traite ces données détectées. Les données mesurées ou détectées sont envoyées au nœud réseau voisin sans fil, sous forme de paquets de données à l'aide de l'émetteur. Les informations sont envoyées au nœud de passerelle USB via les nœuds cluster Head [27] à partir des nœuds d'extrémité.

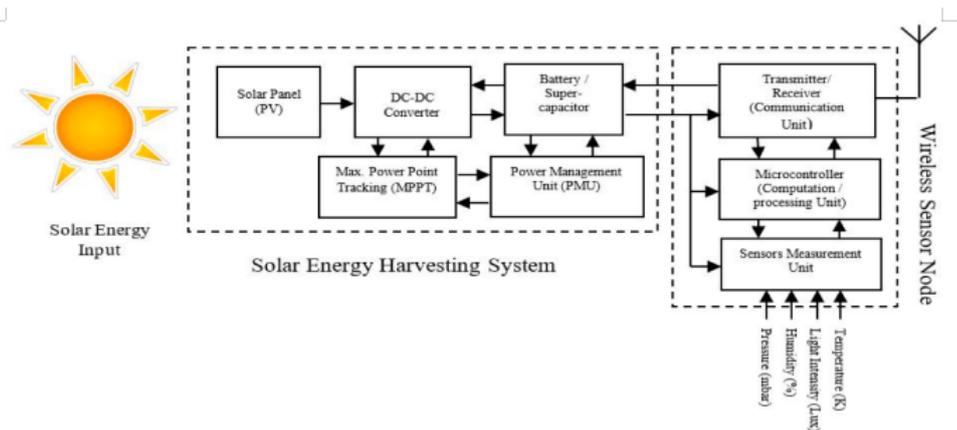


FIGURE 2.10 – Schéma fonctionnel du nœud de réseau de capteurs sans fil de collecte d'énergie solaire[27].

2.6 Conclusion

La récolte d'énergie à partir de sources non conventionnelles dans l'environnement a suscité un intérêt croissant au cours des dernières années, car les concepteurs recherchent des sources d'énergie de remplacement pour les applications de faible puissance. Même si l'énergie récoltée est petite et de l'ordre des milliwatts, elle peut fournir suffisamment d'énergie pour les capteurs sans fil, les systèmes embarqués et d'autres applications de faible puissance. À cette fin, nous avons présenté la technologie de la récupération de l'énergie comme une solution au problème énergétique dans RCSF.

Les Réseaux de Petri stochastiques Généralisés

3.1 Introduction

Un Réseau de Petri (RdP) est une représentation graphique comportant d'un graphe biparti orienté : les places et les transitions reliées par des arcs orientés, un arc est un lien entre place et transition ou entre transition et place exclusivement ne relie jamais deux sommets de la même famille. Les places sont représentées par des ronds et Les transitions sont représentées par des rectangles. À l'intérieur des places il a des billes noires s'appelle Les jetons. Les Réseaux de Petri ont été inventés par Carl Adam Pétri au début des années soixante Notre objectif dans ce chapitre est de présenter la modélisation par les Réseaux de Petri .

3.2 Définition des RdPs :

Le réseau de Petri (RdP) est une structure graphique constituée d'un ensemble de places et de transition reliées par des arcs orientés, qui peuvent avoir du poids. Ces arcs sont le seul lien entre place et transition ou entre transition et place. Dans cette structure, les jetons (ou marques) qui apparaissent dans les places sont déplacées, et la transition peut être franchie selon des critères spécifiques de passabilité et de croisement[34].

3.2.1 Définition 1 (Un réseau de Petri) :

Formellement un RdP est un quadruplet $R = (P, T, \epsilon, w)$, où :

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ est un ensemble fini de m places.
 - $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ est un ensemble fini de n transitions.
 - $\epsilon \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ est un ensemble fini d'arcs.
 - $w : \epsilon \rightarrow \mathbb{N}^+$ est la fonction de poids associée aux arcs. Quand les poids associés aux arcs sont unitaire le réseau de Petri est ordinaire.
- w_{ij} est associé au poids de l'arc qui relie la place p_i à la transition t_j .
 w_{ji} est associé au poids de l'arc qui relie la transition t_j à la place p_i .

Une place p_i est dite en amont (en entrée) d'une transition t_j s'il existe un arc orienté de la place p_i vers la transition t_j .

Une place p_i est dite en aval (en sortie) d'une transition t_j s'il existe un arc orienté de la transition t_j vers la place p_i . Dans tout ce travail, l'ensemble des places d'entrées (respectivement de sorties) d'une transition t_j est noté o_{t_j} (respectivement t_{o_j}). L'ensemble des transitions d'entrées (respectivement de sorties) d'une place p_i est noté o_{p_i} (respectivement p_{o_i}) Une transition (respectivement une place) sans places (respectivement transitions) d'entrées est appelée transition (respectivement place) source. Une transition (respectivement une place) sans places (respectivement transitions) de sorties est appelée transition (respectivement une place) puits[34].

3.2.2 Définition 2 (RdP marqué) :

Un réseau de Petri est dit marqué si chaque place contient un nombre positif ou nul de marque (jeton) représentée par un point noir dans cette place. D'une façon formelle, un RdP marqué est représenté par un couple (R, M) où [34] :

- R : est un réseau de Petri
- $M : P \rightarrow \mathbb{N}$
- $p_i \rightarrow M(p_i)$

$M(p_i)$ est la fonction de marquage associée au nombre de marques contenues dans la place p_i à un instant donné. Le nombre de marques contenues initialement dans la place p_i est noté $M_0(p_i)$

Le marquage initial est symbolisé : $M = m_1, m_2, m_3, \dots$

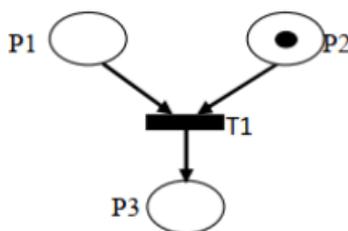


FIGURE 3.1 – Exemple d'un RDP.

- On dit que la place P1 et P2 sont des entrées de la transition T1.
- On dira que la place P3 est une sortie de la transition T1.

3.3 Règles d'activation :

- Un événement est réalisable si et seulement si toutes ses conditions en amont sont remplies et qu'aucune de ses conditions ne soit valide.
- Après qu'un événement se soit produit, toutes ses conditions dans les étapes finales et la première étape, respectivement, sont remplies et non remplies [35]

3.4 Réseau de Petri stochastique (RDPS) :

Outils de modélisation retenus dans Le cadre de cette recherche est le réseau de Petri Aléatoire généralisé avec loi exponentielle [36]. RdPS autorisé Modélisation, simulation et

évaluation Performances de systèmes complexes. Ces outils sont largement utilisés pour analyser plusieurs systèmes, en particulier les systèmes de production automatisés.

3.4.1 Définition informelle :

Les réseaux de Petri permettent des descriptions simples et efficaces de systèmes parallèles. Cependant, un simple RDP ne peut être utilisé que pour une évaluation qualitative et la modélisation temporelle n'est pas prise en compte. Cependant, l'évaluation quantitative nécessite une prévision du modèle de base. Par conséquent, le modèle de réseau de Petri stochastique est introduit. Le modèle associe un délai croisé aléatoire à chaque conversion [36].

3.4.2 Définition formelle :

Un réseau de Petri stochastique (RDPS) est un couple $S = (R, W)$ où : R est le réseau de Petri marqué défini par le cintuplé : $R = (P, T, Pré, Post, Mo)$ tel que [36] :

- $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ est un ensemble fini de places, pour lequel $n = p$;
- $T = (t_1, t_2, \dots, t_m)$ est un ensemble de transitions, pour lequel $m = T$;
- **Pré : $P \times T \rightarrow \mathbb{IN}$**

est une application d'incidence avant, telle que $Pré(p, t)$ contient la valeur entière associée à l'arc allant de la place p à la transition t ;

- **Post : $P \times T \rightarrow \mathbb{IN}$**

est une application d'incidence arrière, telle que $Post(p, t)$ contient la valeur entière associée à l'arc allant de la transition t à la place p ;

- $M_0 : P \rightarrow \mathbb{IN}$ est le marquage initial qui donne la valeur initiale du nombre de jetons dans chaque place.
- **$W = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_m)$**

est le vecteur des taux de franchissement associés aux transitions. ($m = T$).

Remarque :

La vitesse de tir ou de franchissement i peut dépendre du balisage. Soit M_j un marqueur, puis on écrit $i(M_j)$: l'émissivité associée à la transition t_i du marqueur M_j . Par conséquent, une transition donnée peut avoir un taux de croisement qui varie d'une étiquette à l'autre. Cela dépend de la sémantique de déclenchement de la conversion.

3.5 mesure de performance :

Recherche sur les performances du système RdPS Habituellement de son état permanent. Pour ça, RdPS doit vérifier les attributs suivants [37] :

- 1-Le graphe des marquages doit être borné.
- 2- Le graphe de marquage doit être vivant.
- 3-Les taux de franchissements ne doivent pas dépendre du temps.

3.6 Marquage et transitions :

L'évolution du RDPS est donnée par les concepts suivants marque.

3.6.1 Marquage d'un Réseau de Petri :

Chaque place d'un réseau de Petri peut contenir un nombre entier (positif ou zéro) de marques ou de jetons. la présence d'un jeton indique que cette condition est vraie, le cas contraire indiqué faux (condition logique). Le nombre de marque (jetons) d'une place P_i sera noté soit M_i soit $M(P_i)$. (M_0) est dit l'état initial du système modélisé (Le marquage initial).à l'instant i , M_i est défini par le vecteur de ces marquages M_i ($M_i = (M_1, M_2, \dots, M_n)$)[38].

Exemple :

Ce RdP possède 2 places, 2 transitions et 4 arcs orientés. Soit donc : $P = P_1, P_2$ et $T = T_1, T_2, \dots$. Le marquage initial est $M_0 = [M_0(p_1), M_0(p_2)] = [3, 0]$.

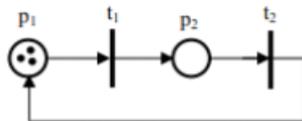


FIGURE 3.2 – Marquage d'un Réseau de Petri.

3.6.1.1. Réseau K-borné :

Considérons un réseau R et une marque \$M_0\$. La position \$P_j\$ du réseau marqué \$(R, M_0)\$ est k-bornée, si pour tout La marque \$M_i\$ est accessible depuis \$M_0\$, \$M_i(P_j) \leq k\$ [39].

$$P_j \text{ est k-borné} \Leftrightarrow \forall M_i \text{ accessible depuis } M_0, \text{ et } P_j \in P, M_i(P_j) \leq k$$

Si toutes les places d'un RdP marqué sont bornées alors le RdP est borné. Un RdP marqué peut ne pas être borné : Si toutes ses places sont non bornées.

3.6.1.2. Réseau vivant :

Définition :

Une transition est vivante pour un marquage initial \$M_0\$ si pour tout marquage accessible \$M_k\$, il existe une séquence de franchissements à partir de \$M_k\$ contenant \$T_j\$:

$$\forall M_k \in \text{Accessibles}(M_0), \exists S, M_k \xrightarrow{S} M' \text{ et } T_j \in S$$

Si une transition est vivante alors, à tout instant, on sait que peut être franchie dans le futur. Dans le cas d'un RdP modélisant un système fonctionnant en permanence, si une transition n'est pas vivante et si une fonction du système est associée au franchissement de cette transition, cela veut dire qu'à partir d'un certain instant, cette fonction ne sera

plus disponible dans le futur, ce qui peut traduire une erreur ou une panne.

Exemples :

Les transitions 1 et 2 du RdP marqué sont vivantes :

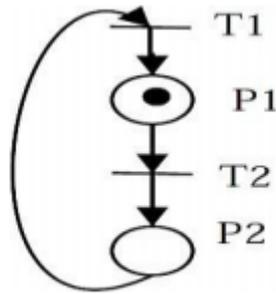


FIGURE 3.3 – Réseau vivant.

3.6.2 Franchissement de transitions :

Pour rendre compte de l'évolution du système modèle, les réseaux de Petri intègrent des formalismes qui permettent le passage d'un signe à un autre : ce sont des transitions croisées. Une transition peut être remplacée si chacun des emplacements d'entrée contient au moins un jeton. Pour les croisements, le croisement effectif est déterminé selon les règles suivantes :

- Le transit est un processus indivisible (atomique).
- Un jeton est consommé à chaque point d'entrée.
- Un jeton est produit dans chaque emplacement de sortie[40].

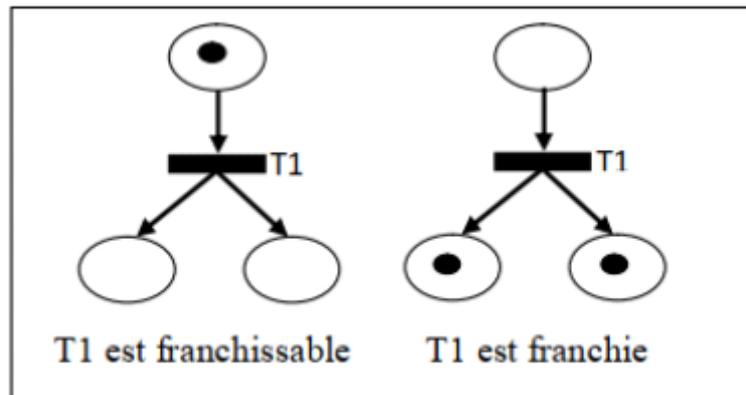


FIGURE 3.4 – Franchissement d’une transition.

3.7 Temps moyen de franchissement d’une transition

Le temps moyen de franchissement d’une transition t est une variable aléatoire de loi exponentielle, il est noté T_{mft} et est donné par la formule suivante [41,42] :

$$T_{mft} = 1/\lambda_i(M_j)$$

Lorsque le taux de croisement converti n’est pas lié à la note, la formule précédente devient :

$$T_{mft} = 1/\lambda_i.$$

Remarque :

Lorsque plusieurs transitions sont passables, la transition qui provoque le changement d’état du système est celle qui a le temps de traversée le plus court de l’ensemble des transitions passables.

3.8 Réseau de Petri à arcs inhibiteurs :

Un arc inhibiteur est un arc directionnel, qui se termine à la position P par une transition t . La fin d'un arc inhibiteur est marqué par un petit cercle. L'arc inhibiteur entre la position P et la transition t signifie que la transition t n'est valide que lorsque la position P ne contient aucune marque. Le croisement consiste à retirer une marque à chaque entrée de t sauf P , et à ajouter une marque à chaque sortie de t . Nous utilisons également des expressions (test zéro) et (RDP étendu)[41,42].

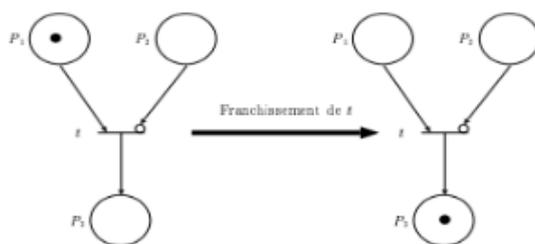


FIGURE 3.5 – arcs inhibiteurs.

3.9 Réseaux de Petri stochastiques généralisés (RDPSG) :

Les réseaux de Petri stochastiques généralisés sont une extension des réseaux de Petri stochastiques autorisant deux classes de transitions [37] :

- Des transitions momentanées sans aucun délai (transition immédiate) qui sont instantanément traversées dès qu'elles sont détectées.
- Des transitions temporelles qui correspondent aux variables aléatoires qui déterminent le temps de transit.

Les taux de transmission peuvent dépendre du marquage. S'il y a plusieurs transitions acceptables, les transitions de moment seront ignorées avant les autres (car elles ont priorité sur les transitions temporisées). Ils sont acceptables Immédiatement à partir du moment où ils sont sensibilisés. Lorsqu'il y a plusieurs téléportations qui peuvent être

traversées, une distribution de probabilité qui régit le choix de la téléportation à traverser doit être donnée. Représenter les transitions instantanées

Activités du système terminées en moins de temps par rapport aux périodes précédentes.

Les cas qui ne sont pas liés à la transmission instantanée sont appelés États concrets (qui ne connaissent que les transitions temporaires).

Sinon, s'il y a au moins une téléportation sensible, on parle d'un état éphémère, donc un réseau de Petri stochastique généralisé a deux états :

- Des états tangibles, pour lesquels toutes les transitions perceptibles sont temporaires.
- Les états évanescents, pour lesquels au moins une transmission sensible est considérée comme instantanée.

3.9.1 Représentation graphique d'un RDPSG :

Dans les RDPSG les transitions immédiates sont représentées par des barres noires et les transitions temporisées par des rectangles[37].



FIGURE 3.6 – Représentation des transitions immédiates et temporisées.

3.9.2 Définition :

Un RDPSG est un triplet (R_0, π, W) où :

R_0 Est un RdP simple.

π Est la fonction de priorité associant un entier à toute transition.

W Est une fonction qui associe à chaque transition temporisée un taux de franchissement et à chaque transition immédiate un poids[37].

3.10 Outils de modélisation des RDPSG :

Les développeurs ont développé plusieurs outils de simulation et de modélisation et de vérification des RdPs selon la technique de vérification de modèle. Le tableau ci-dessous classer ces outils par rapport aux points suivants [36] :

- Environnement d'édition graphique avec RDPs.
- Possibilité de Simulation du RDP.
- Possibilité d'analyse des propriétés génériques du RDP.
- Possibilité de vérification des contraintes CTL (logique temporelle arborescente).
- Logique temporelle linéaire.
- Possibilité de supporter le format d'échange XML.
- Possibilité de supporter les RDP hiérarchiques.

Outil	InterfaceGraphique	Simulation	Analyse	CTL	LTL	XML	RDPhierarchique	TOTAL(oui)
CPNTools	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	oui	6
CPNAMI	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	non	5
PROD	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non	non	3
JARP	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	non	3
Maria	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non	non	3
LoLa	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	non	2
Petri NetKernel	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui	non	2
Great SPN	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	2
INA	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	2
OPMSE	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	non	2
TimeNet	Oui	oui	oui	-	-	oui	-	4

FIGURE 3.7 – Les outils de modélisation des réseaux de Petri..

Dans le cadre de cette étude expérimentale, Les résultats numériques ont été calculés à l'aide du l'outil software TimeNet version, C'est un outil d'évaluation des performances très puissant. TimeNet met à disposition de l'utilisateur un environnement graphique simple qui lui permet de sélectionner tous les éléments du formulaire, ainsi que tous les paramètres de performances et de fiabilité requis.

3.11 Description du logiciel TimeNet

TimeNet est un progiciel et environnement graphique interactif qui permet de modéliser différents systèmes avec les méta-modèles de réseaux de Petri stochastiques généralisés et les réseaux de Petri stochastiques colorés (RDPSCs). Dans ce qui suit, nous allons présenter des fonctionnalités essentielles en se basant sur la documentation fournie avec le logiciel TimeNet.

3.11.1 Historique du logiciel TimeNet

TimeNET a été développé par l'équipe de systèmes temps réel et groupe de Robotics de l'université de Berlin en Allemagne. Le projet a été motivé par le besoin d'un logiciel puissant pour l'évaluation efficace des réseaux de Petri stochastiques.

La première version du TimeNet était une révision majeure de l'outil DSPNexpress à l'université de Berlin. Elle contenait toutes les composantes d'analyse existantes maintenant mais pour la classe eDSPNs (extended Deterministic Stochastic Petri Nets : RDPS déterministes) seulement.

3.11.2 Fonctionnalités du TimeNet

Différentes solutions algorithmiques peuvent être utilisées en fonction de la classe de RDPS. Le logiciel TimeNet 4.0 comporte une interface graphique spéciale pour la classe des RDPSC. Cette interface fournit différentes fonctionnalités liées à cette classe du réseau de Petri. TimeNet peut calculer la solution du modèle dans le régime stationnaire et fournit une technique d'analyse approximative pour la classe eDSPNs qui comporte les RDPSG et les RDPSD.

L'analyse, l'approximation et l'évaluation peuvent être effectuées pour une même classe du modèle. En plus de nouvelles fonctionnalités, les enrichissements du TimeNet 3.0 sont inclus dans TimeNet 4.0 parmi lesquels nous citons :

- Un algorithme permettant l'analyse transitoire pour la classe RDPSD.
- Un composant pour le régime stationnaire et l'analyse transitoire pour les RDPSG.
- Un composant spécial désigné aux systèmes de fabrication.
- Une interface graphique d'utilisateur complet qui intègre différentes classes de RDP et

permet d'utiliser facilement différents algorithmes d'analyse.

3.11.3 Interface graphique du TimeNet

La nouvelle version du TimeNet comporte une interface graphique interactive développée à l'aide du langage JAVA et fournit un support du système d'exploitation Windows. Le TimeNet support également maintenant la classe des RDPSC (RDPS Colorés).

L'interface graphique générique du TimeNet 4.0 permet la visualisation des résultats de l'évaluation et de l'analyse sous forme de graphes.

La fenêtre de l'interface graphique du TimeNet 4.0 est divisée en quatre parties comme le montre la figure 3.8 :

- Une barre de menu en haut.
- Une zone de dessin à gauche.
- Une zone des attributs à droite.
- Une barre d'outils spécifique à la classe du RDP en bas.

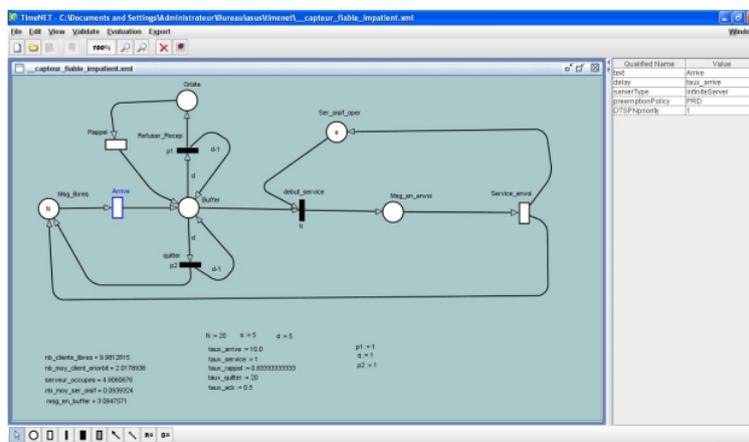


FIGURE 3.8 – Résultat de l'exécution de la fonction Check Structure.

3.11.4 Les méthodes d'analyse du TimeNet

Le menu Evaluation de l'interface graphique nous permet d'accéder aux fonctions d'évaluation de performance du modèle. Plusieurs méthodes d'évaluation sont disponibles, nous citons :

- L'analyse stationnaire.
- La simulation stationnaire.
- L'analyse transitoire.
- La simulation transitoire.

3.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous proposons quelques concepts de base sur le réseau Petri et nous avons également défini un réseau Petri stochastique (RDPS), dans lequel chaque transition est associée à un délai croisé aléatoire. Considérez ensuite le facteur temps. On a vu aussi que le modèle RDPSG a été introduit par la suite. En complément du RDPS, nous lui avons ajouté la conversion immédiate. Il prend en compte l'activité rapide du système et il n'y a pas de timeout à associer. On a vu aussi l'outil TimeNet qui utilisait pour étudier le modèle RDPSG dans les réseaux de capteurs sans fil. Et c'est ce que nous verrons dans le chapitre suivant .

Évaluation et Résultats Expérimentaux

4.1 Introduction

Les réseaux de Petri sont largement utilisés comme outils de modélisation dans le domaine des systèmes de réseaux afin d'évaluer leurs performances avant l'installation réelle.

4.2 État de l'art

Dans la littérature, nous trouvons des travaux qui ont utilisés les réseaux de Petri et considérés le mécanisme de veille tels que les travaux d'OUKAS et de BOULIF qui ont proposé un modèle basé sur les réseaux de Petri stochastiques généralisés pour traiter l'impact de la distance de transmission sur le temps de réponse moyen et la charge moyenne de la batterie d'un nœud de capteur dans une communication capteur-voisins. Les mêmes auteurs ont proposé une modélisation basée sur les RdPSGs colorés. La modélisation prend en considération la différence entre deux types de messages : les messages de contrôle et les messages de données.

Les auteurs de [44] ont introduit un modèle de réseau de Petri colorés aussi pour modéliser et évaluer le protocole EQMAC qui est un protocole d'économie d'énergie utilisé pour les réseaux de capteurs sans fil. Ils ont utilisé les outils GreatSPN et WNSIM pour l'analyse expérimentale.

Xiang et al. ont proposé un modèle de réseaux de Petri colorés [45] pour évaluer comment le protocole IEEE 802.15.4 peut satisfaire aux exigences de qualité de service. Une analyse expérimentale est effectuée sur le modèle proposé pour calculer certaines mesures de performance comme le débit, le ratio de livraison, la latence et la consommation d'énergie.

Dans [46], les auteurs ont tenté de modéliser les opérations du nœud de capture à l'aide des RDPSGs. Ils ont considéré un nœud de capture équipé d'un système de récupération d'énergie. Ils ont étudié la performance d'un nœud de capteur en variant les entrées pour obtenir le meilleur comportement du système. Ils ont modélisé la batterie par le principe de quantification [47]. En [48], les mêmes auteurs tentent d'améliorer leur modèle. Ils ont considéré les capteurs avec récupération d'énergie solaire dans les RCSF pour les longue durée de déploiement avec différents niveaux d'ensoleillement saisonniers.

Toutefois, la formulation améliorée suppose que la récupération d'énergie est constante toute la journée, ce qui contraste avec les circonstances réelles. Ils ont considéré les capteurs avec récupération d'énergie solaire dans un réseau de capteurs sans fil avec différents niveaux d'ensoleillement saisonnier. Ils ont négligé l'absence de la récolte d'énergie dans la nuit qui affecte les performances du réseau.

Nous considérons dans ce mémoire la lacune précédente en introduisant un mécanisme de double sommeil. L'idée est d'augmenter les performances du capteur en le gardant activé la plupart du temps en présence de récupération d'énergie. Alors que, dans la nuit, nous configurons le capteur de manière à préserver l'énergie emmagasinée en diminuant ses performances (le nœud de capture rejoint l'état de veille la plupart du temps).

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons quelques expériences sur les modèles proposés, qui nous permettront de souligner à nouveau l'importance du bon choix des paramètres appropriés pour avoir la meilleure performance possible.

Ainsi, sur la base de l'outil software TimeNet présenté dans le chapitre précédent, nous obtenons des résultats qui sont présentés sous forme de graphiques qui sont commentés et dont les conclusions seront tirées.

4.3 MODÉLISATION PROPOSÉE :

L'hypothèse que nous considérons dans notre formulation est la suivante :

- Tous les nœuds sont équipés de petites batteries ayant une énergie initiale égale à C quantum.
- Tous les nœuds sont équipés d'un système de collecte d'énergie solaire.
- Toutes les fonctions atomiques suivantes consomment un quantum d'énergie : réception et envoi d'un message, écoute et, travail en réseau (détection, traitement ou agrégation).
- Tous les nœuds sont équipés d'un système de détection de lumière qui permet au capteur de distinguer le jour et la nuit.

-La figure 4.1 représente la modélisation que nous proposons. Nous supposons que le nombre de messages servis en une journée est égal à N . La Place Msgs représente la source des messages. Le nœud de capteur écoute le réseau, rassemble les messages et les transmet en utilisant les transitions Controlling, Gathering et Transmit respectivement. Les fonctionnalités de détection et de traitement sont représentées par la transition Travail. La Place Battery modélise la batterie par niveau. Chaque niveau représente une quantité d'énergie nécessaire pour envoyer ou recevoir un message. Initialement, la batterie contient C quanta. En présence de la lumière du soleil, la transition :recharge ajoute un quantum à la batterie après un délai prédéfini. Dans le modèle, nous définissons trois drapeaux : nuit, jour et veille (représentés respectivement par les places Nuit, Jour et Couchage).

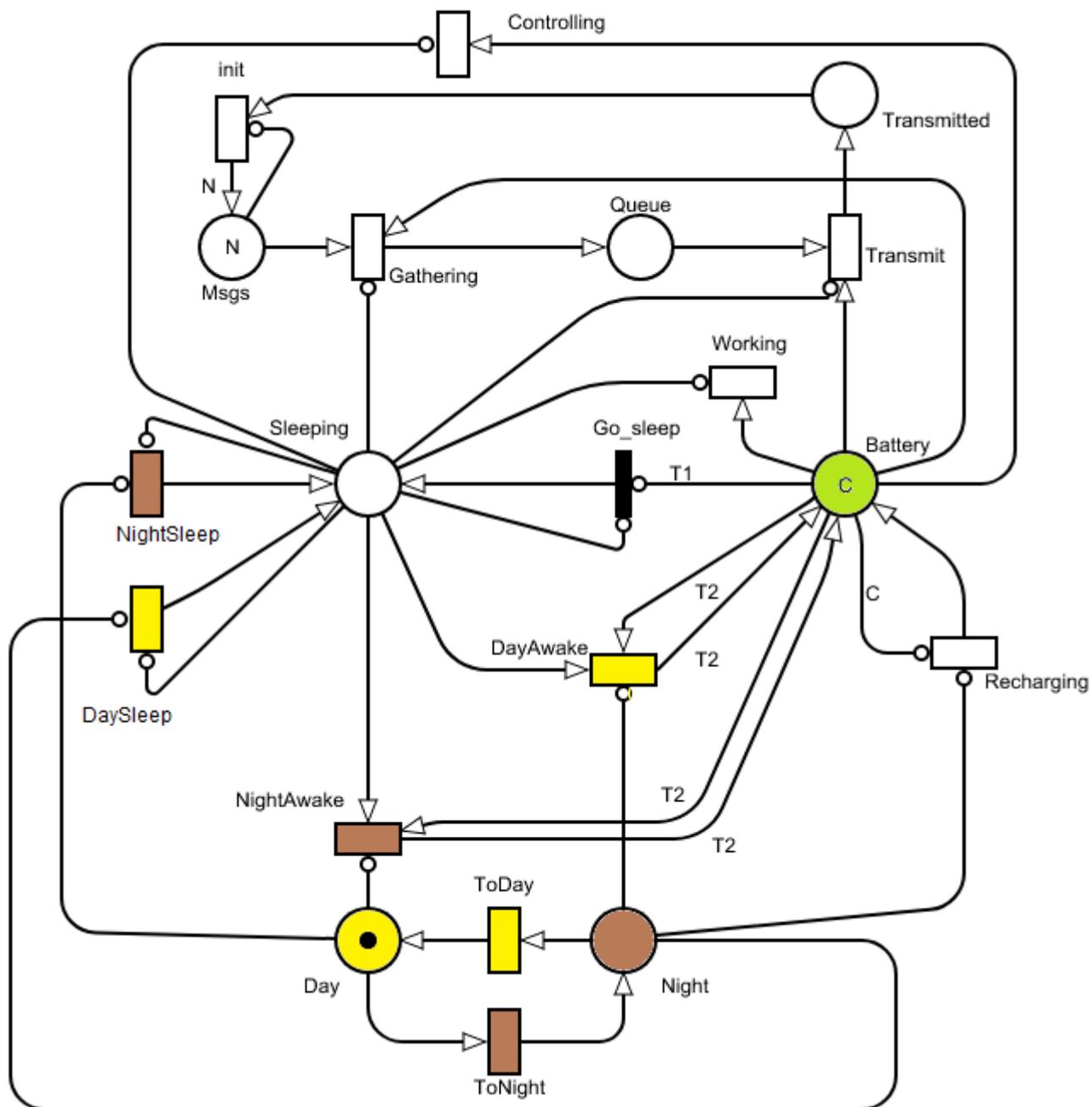


FIGURE 4.1 – Un modèle basé sur les RDPSGs pour un capteur avec une double Stratégie de Mise en Veille.

Un double mécanisme de sommeil est utilisé tel qu'il est illustré dans la figure 4.2 : Dans la journée, les transitions DaySleep et DayAwake sont activées. Alors que dans la nuit on active les transitions NightSleep et NightAwake. Les détails des places et des transitions sont donnés dans le tableau 4.1 et 4.2 respectivement.

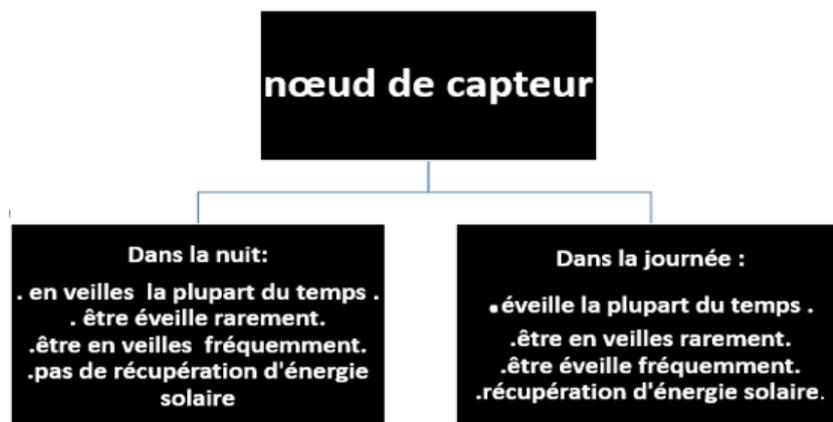


FIGURE 4.2 – Double Stratégies de Mise en Veille.

Autrement, nous définissons deux seuils : T1 et T2. T1 représente le niveau d'énergie minimum pour lequel le nœud de capteur puisse être actif (une transition immédiate appelée Gosleep met le nœud de capteur sur l'état de sommeil immédiatement). Si le nœud de capteur rejoint l'état de veille, il ne peut pas le laisser jusqu'à ce que le niveau d'énergie devient supérieur ou égal à T2, grâce à la récupération d'énergie solaire.

<i>Nom de la place</i>	<i>Description</i>	<i>valeur initiale</i>
Msgs	Contient les messages d'une journée	N
Queue	Messages en attente de transmission	0
Transmitted	Transmission réussite des messages à ses destinations	0
Sleeping	Capteur en veille	0
Battery	Représente la batterie du capteur	C
Day	On est en Jour	1
Night	On est on Nuit	0

TABLE 4.1 – Nomenclature et description des places.

<i>Nom</i>	<i>Description</i>	<i>durée d'activation</i>
Gathering	arrivée d'un message	arrive_d
Transmit	transmission d'un message	transmit_d
Recharging	récupération d'énergie	harvest_d
Controlling	écoute sur le réseau	control_d
Working	travail et détection	work_d
NightSleep	sommeil long dans la nuit	sleepNight_d
DaySleep	sommeil court dans la journée	sleepDay_d
NightAwake	réveil dans la nuit	NightAwake_d
DayAwake	réveil dans le jour	DayAwake_d
ToNight	l'arrivée de nuit	night_d
ToDay	l'arrivée du jour	day_d
init	Réinitialisation du modèle	Init_d

TABLE 4.2 – Nomenclature et description des transitions.

4.4 Analyse expérimentale :

Par l'utilisation de l'outil TimeNet, nous étudions quelques paramètres de performance intéressants du système en état stationnaire. Les résultats obtenus représentent des valeurs moyennes. Le tableau 4.3 montre les valeurs d'entrée pour l'analyse stationnaire.

<i>paramètre</i>	<i>valeur</i>	<i>description</i>
N	20	20 messages servis chaque jour
C	100	Initialement, la batterie contient 100 quanta
T1	20%	seuil min de mise en veille
T2	40%	seuil max de mise en veille
arrive_d	10 minute	Un message arrive chaque 10 minutes
transmit_d	5 seconds	Le temps nécessaire pour envoyer un message
harvest_d	30 seconds	Un quantum est récolté chaque 30 secondes
control_d	1 minutes	Consomme un quantum chaque 1 minute
work_d	100 seconds	Consomme un quantum chaque 100 secondes
N sleep_d	1 minutes	Le noud de capteur tente de se mettre en veille chaque 1 minute dans la nuit
D sleep_d	10 minutes	Le noud de capteur tente de se mettre en attente chaque 10 minutes dans la journée
N awake_d	5 minutes	Le noud de capteur tente de se réveiller chaque 5 minutes dans la nuit
D awake_d	1 minutes	Le noud de capteur tente de se réveiller chaque minute dans la journée
N come_d	12 heures	la Durée du jour
D come_d	12 heures	la Durée du nuit
Init_d	24 heures	Temps nécessaire pour lancer le modele

TABLE 4.3 – Les valeurs d’entrée pour l’analyse.

4.4.1 L’impact du délai de récolte :

-La figure 4.3 montre l’impact de la récupération d’énergie sur la charge moyenne de la batterie. Lorsque le temps nécessaire pour prélever un quantum d’énergie depuis l’environnement est inférieur à 10 secondes, la valeur moyenne d’énergie est presque stabilisée à la valeur de 73 %. Après cela, elle diminue lorsque le délai de récolte augmente. La batterie ne stocke que la moitié de sa capacité (51 %) lorsque le délai de récolte est égal à 40 secondes. Dans les zones à faible ensoleillement (besoin de plus de 50 secondes pour récolter un quantum), la charge moyenne de la batterie converge vers la valeur 30%.

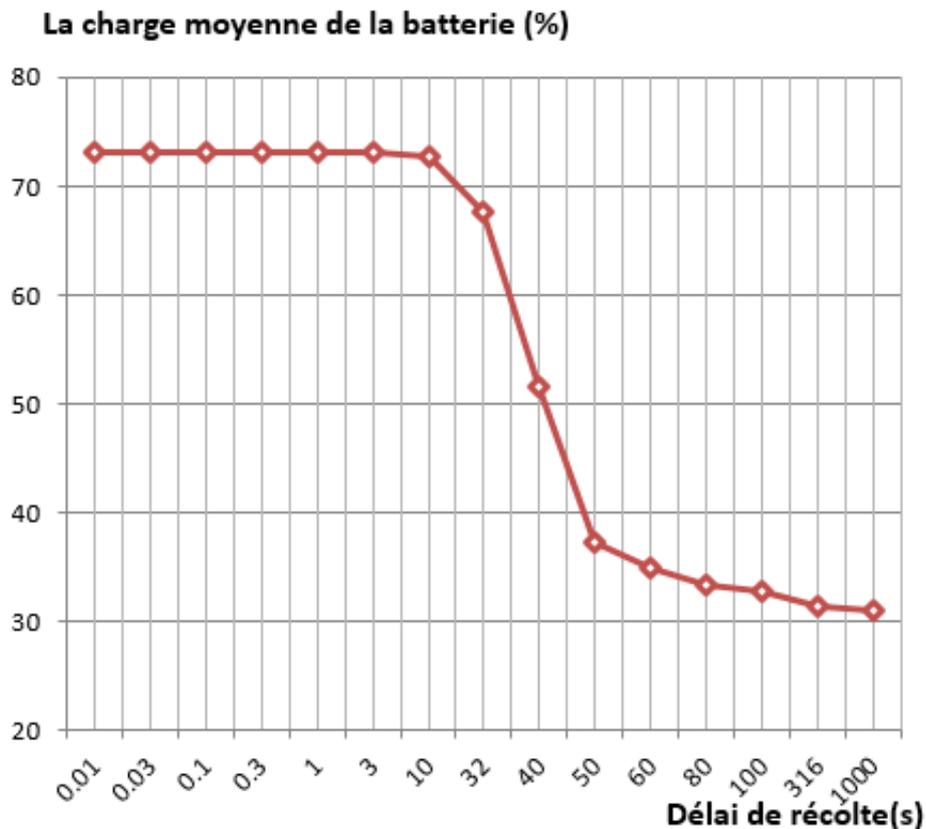


FIGURE 4.3 – Charge moyenne de la batterie par rapport au délai de récolte.

La figure 4.4 montre l'influence du temps de la récupération d'énergie sur le temps de réponse moyen du système. Lorsque le temps de récupération d'un quantum d'énergie augmente, le temps système moyen augmente aussi jusqu'à atteindre des valeurs inacceptables. Cela se produit lorsque le temps de récolte dépasse 100 secondes. En comparant la figure 4.3 à la figure 4.4, nous pouvons remarquer que la présence d'une quantité d'énergie suffisante influe positivement sur le temps de réponse moyen du système. Par conséquent, l'administrateur de réseau peut bénéficier de la présence d'énergie renouvelable pour accélérer le réseau.

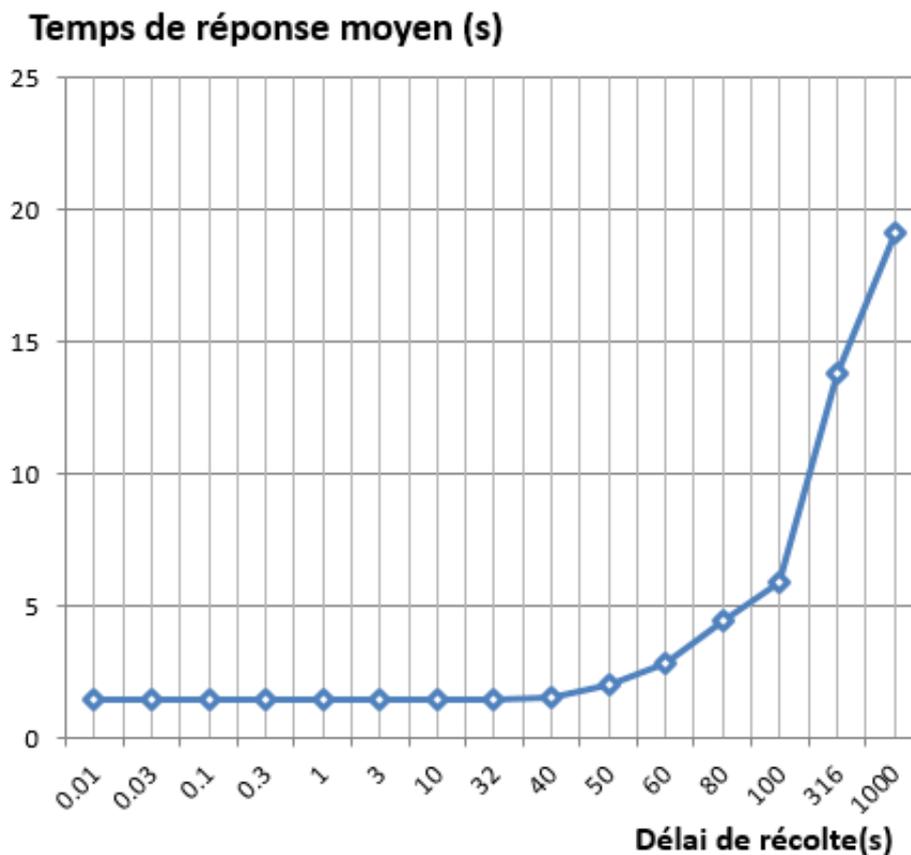


FIGURE 4.4 – Temps moyen du système par rapport au délai de récolte.

4.4.2 L'impact du rapport sommeil/veille :

L'expérience menée ici montre l'impact du rapport sommeil/veille sur la charge moyenne de la batterie et le temps de réponse moyen du système. Dans la nuit, le nœud de capteur tente de rejoindre l'état de sommeil chaque minute. Alors que, dans la journée, il le fait toutes les dix minutes. Pour la journée, nous prenons trois valeurs de rapport sommeil/veille : 0,1, 0,2 et 0,3 (c.-à-d. 01 minute/10 minutes, 01 minute/5 minutes et 01 minute/03 minutes). Après cela, nous modifions la durée de veille dans la nuit pour obtenir les résultats présentés dans les figures 4.5 et 4.6.

La figure 4.5 montre l'influence du rapport sommeil/ veille sur le temps de réponse moyen du système. Nous remarquons que cela augmente lorsque le rapport sommeil/veille augmente, c.-à-d. que le système devient plus lent lorsque le nœud de capteur reste endormi pendant une longue période. Les configurations de jour et de nuit affectent l'heure moyenne du système. Par exemple, si nous configurons le nœud de capture pour qu'il

fonctionne avec un rapport sommeil/veille égal à 5 (i.e. 05 minutes/01 minutes), nous obtenons ces valeurs : 1,46 seconde, 1,53 seconde et 1,62 seconde pour les valeurs du rapport sommeil/veille de jour : 0,1, 0,2 et 0,3 respectivement. En allant plus loin vers la droite, le temps moyen du système augmente jusqu'à ce que le système devienne très lent.

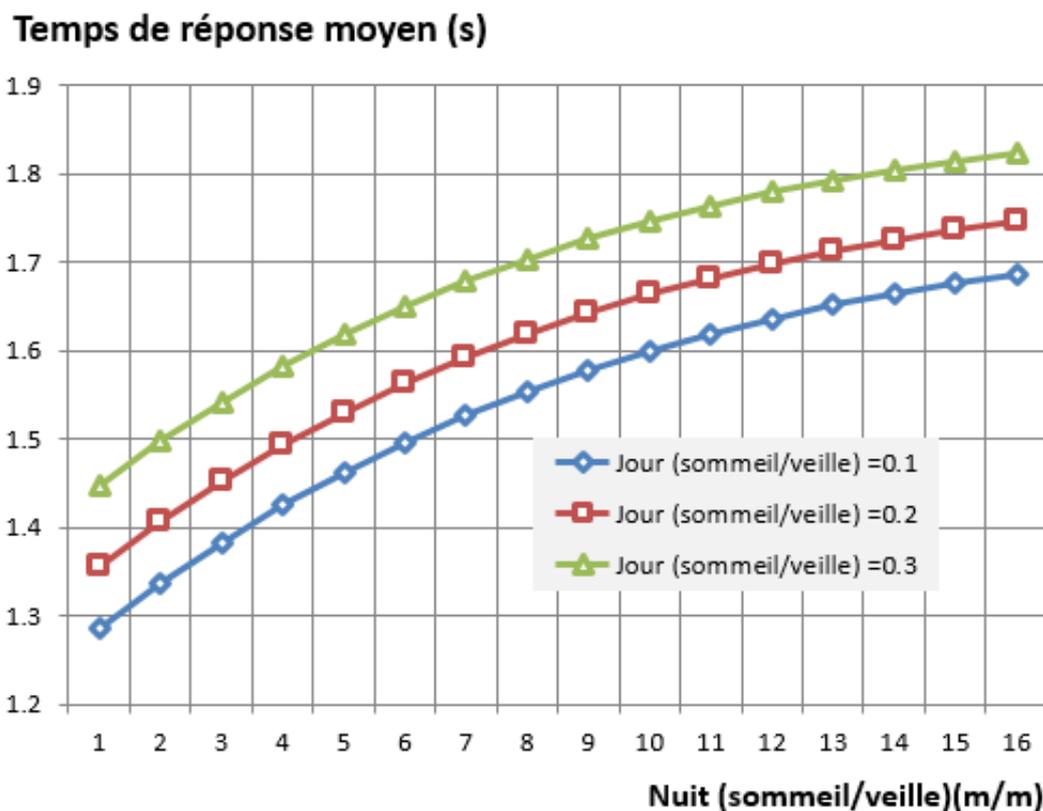


FIGURE 4.5 – Temps moyen du système par rapport au rapport (sommeil/éveil).

La figure 4.6 présente l'influence du rapport sommeil/éveil sur la charge moyenne de la batterie. Les nœuds de capteur conservent l'énergie lorsqu'ils rejoignent fréquemment l'état de sommeil et y restent pendant une longue période. Cette expérience aide les gestionnaires de réseaux à sélectionner la meilleure configuration adaptée à une application spécifique.

La figure 4.6 montre que pour toutes les valeurs étudiées du rapport sommeil/éveil, la

charge moyenne de la batterie reste supérieure à 66 % (en utilisant les entrées indiquées dans le tableau 4.3). Par exemple, si nous configurons le nœud de capteur pour qu'il fonctionne avec un rapport sommeil/veille égal à 5 (c.-à-d. 05 minutes/01 minutes), nous obtenons les valeurs 68,7 %, 69,6 % et 70,3 % pour les valeurs du rapport sommeil/veille de jour : 0,1, 0,2 et 0,3 respectivement.

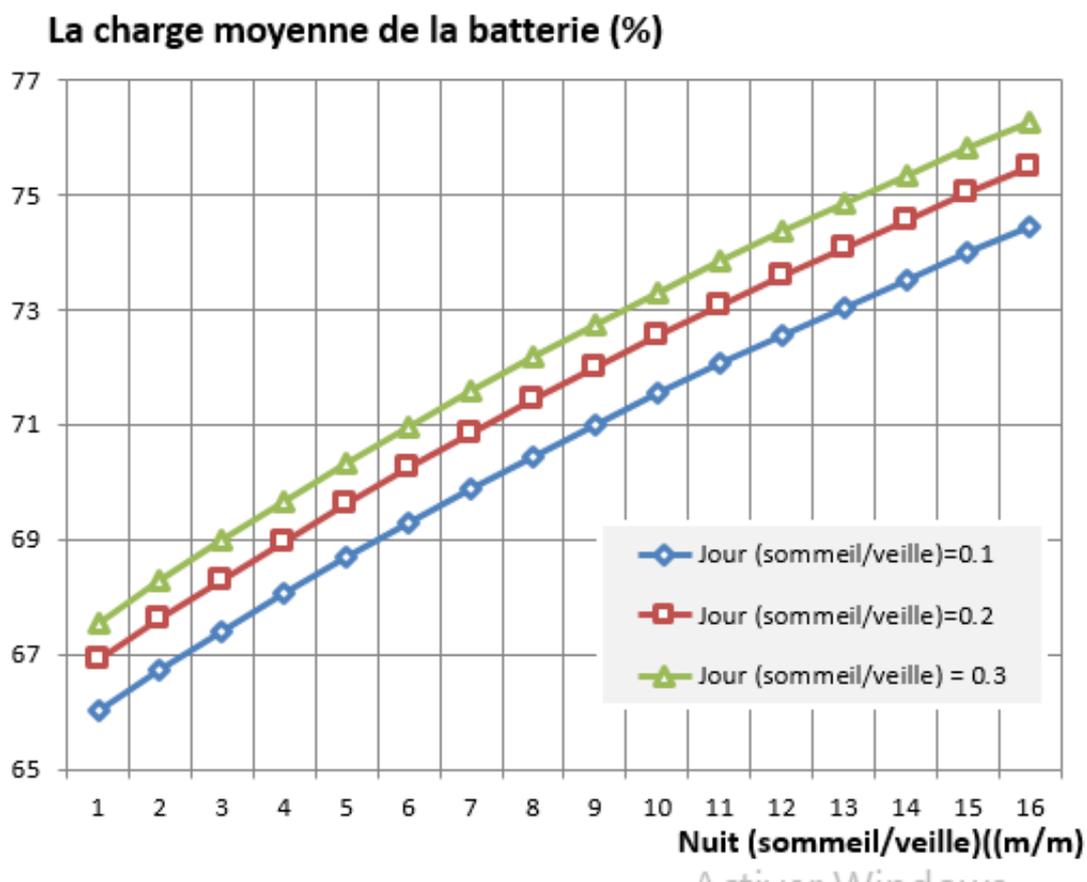


FIGURE 4.6 – Charge moyenne de la batterie par rapport au rapport (sommeil/éveil).

4.4.3 L'impact de la durée du jour sur le système :

-L'expérience menée ici montre l'impact de la durée du jour (en Heures) sur la charge moyenne de la batterie et le temps de réponse moyen du système. Dans la journée, où il y a de rayonnement solaire le nœud de capteur être éveillé la plupart du temps alors que, dans la nuit, où il n'y a pas de rayonnement solaire, nous configurons le nœud de capteur de manière à préserver l'énergie emmagasinée en diminuant son temps d'éveil (i.e. le nœud de capteur rejoint l'état de veille la plupart du temps). -La figure 4.7 montre l'impact de la durée du jour sur la charge moyenne de la batterie. Nous remarquons que l'énergie moyenne est presque 80% si la durée du jour est 7 heures et un demi heure, et puis nous remarquons que la valeur de l'énergie commence à diminuer progressivement jusqu'à la valeur 56%.

Pendant les longues jours, la batterie peut fonctionner toute la journée pour maintenir près de la moitié de sa capacité (56%) d'énergie.

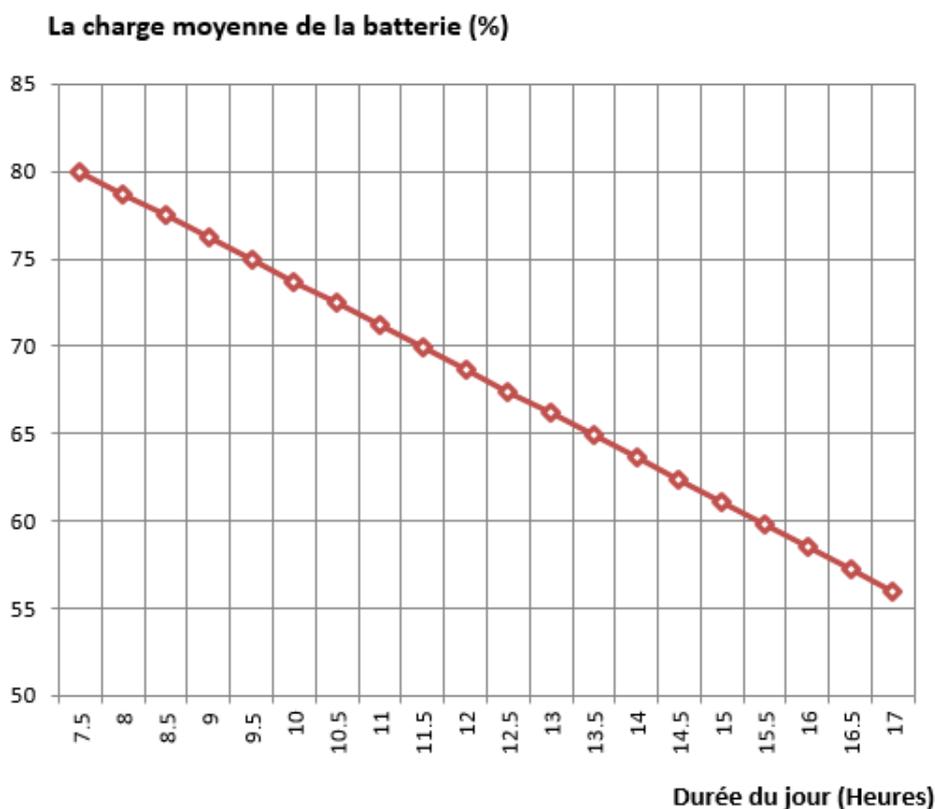


FIGURE 4.7 – Charge moyenne de la batterie par rapport à la durée du jour.

La figure 4.8 montre l'impact de la durée du jour sur le temps de réponse moyen du système. Lorsque le nombre d'heures par jour est dégressif, le temps moyen du système est également faible, et plus la durée du jour est élevée, plus le temps moyen du système est élevé.

En comparant la figure 4.7 à la figure 4.8, Nous pouvons remarquons que la grande durée du jour a un effet positif sur le temps de réponse moyen du système, car la lumière du soleil est disponible en longue période, de sorte que le responsable du réseau peut profiter de la présence d'énergies renouvelable dans les jours pour améliorer les performances du réseau.

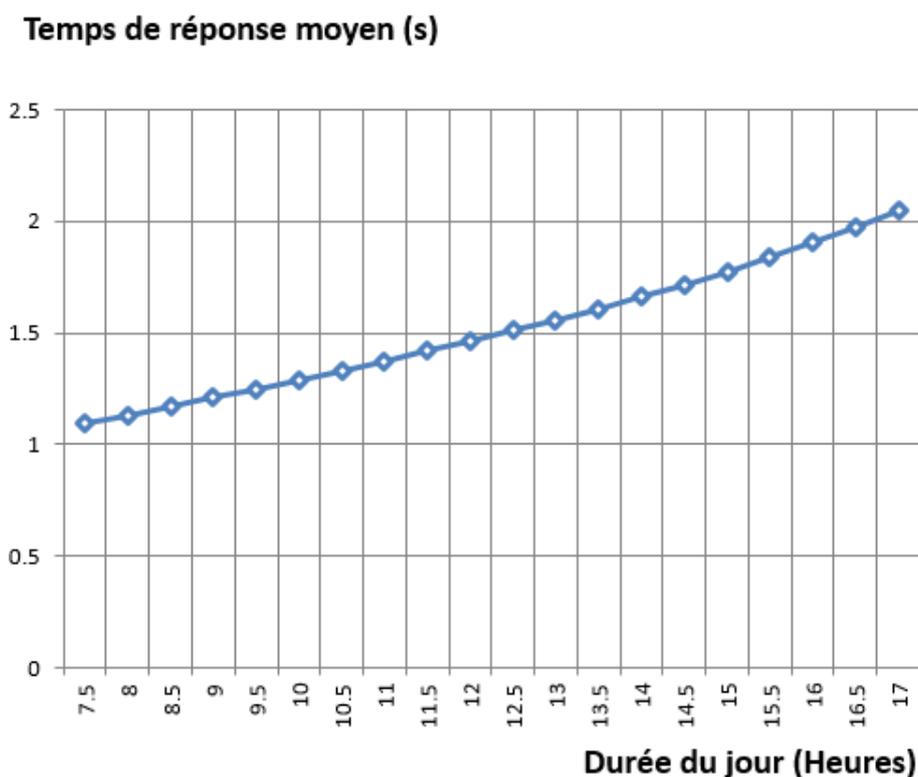


FIGURE 4.8 – Temps moyen du système par rapport a la durée du jour .

4.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un nouveau modèle basé sur les réseaux de Petri pour les capteurs dans les réseaux de capteurs sans fil avec récolte d'énergie solaire. Diverses contraintes réelles sont prises en compte, tel que la récolte d'énergie solaire, la consommation d'énergie et le mécanisme de sommeil. Pour le mécanisme de sommeil, nous avons proposé une nouvelle technique basée sur une double stratégies . Dans le jour, nous maintenons le nœud de capture actif la plupart du temps pour obtenir le meilleur comportement du réseau. Alors que, dans la nuit, nous configurons le capteur pour être en veille la plupart du temps afin d'économiser l'énergie.

L'analyse menée prouve que le modèle est capable de déterminer la configuration souhaitable qui permet d'obtenir la performance maximale du réseau qui aidera les décideurs à déterminer les entrées appropriés pour obtenir le comportement du réseau approprié.

Conclusion générale et perspectives

Durant les derniers trois mois, nous avons analysé et réalisé un projet de fin d'étude relatif à la récupération d'énergie dans un réseau de capteurs sans fil. Nous avons commencé par présenter les réseaux de capteurs sans fil, et fournissons des informations sur ses caractéristiques et ses applications.

Les nœuds de capteurs sont alimentés par des batteries, et ces batteries ne peuvent pas être changées, car les nœuds capteurs sont déployés dans des zones difficilement accessibles. Cela signifie que la durée de vie du nœud capteur est limitée. Il existe plusieurs solutions à ce problème, mais elles ne sont pas définitives.

Parmi les solutions les plus connues est l'utilisation des énergies renouvelables pour alimenter les capteurs. Il existe plusieurs sources d'énergie renouvelable, parmi les plus intéressantes nous avons considéré l'énergie solaire. D'autre coté, la présence de cette source n'est pas tout le temps. Pour cela, nous avons proposé de configurer les capteurs d'une manière intelligente pour augmenter leur durée de vie. Nous avons proposé une double Stratégies de mise en veille. Dans le jour, nous maintenons le nœud capteur actif la plupart du temps pour obtenir le meilleur comportement du réseau. Alors que, dans la nuit, nous configurons le nœud capteur d'être en veille la plupart du temps afin d'économiser l'énergie.

En plus, Nous avons choisi la méthode de modélisation pour évaluer les performances d'un nœud de capteur. Nous avons présenté l'outil des réseaux de Petri pour la modélisation. Ensuite, nous avons proposé un nouveau modèle basé sur les réseaux de Petri pour les capteurs dans les WSNs avec récolte d'énergie solaire. Pour faire l'évaluation et l'application

numérique du modèle proposé dans ce projet nous avons utilisé l'outil logiciel TimeNet.

L'analyse menée sur le modèle proposé permet aux décideurs du déploiement de bien déterminer les entrées pour obtenir le comportement du réseau approprié.

Enfin, comme perspectives, Il est évident que ce projet n'est pas une œuvre parfaite mais nous souhaitons et espérons présenter d'autres résultats que nous pouvons tirer de diverses analyses expérimentales. Aussi, à étendre la modélisation proposée à différentes méthodes de récupération d'énergie en nous basant sur le formalisme mathématique des réseaux de Petri et ces extensions.

Bibliographie

- [1] M.A. Matin and M.M. Islam,” Overview of Wireless Sensor Network”
- [2] Muhammad R ahmed, Xu huang, dharmandra sharma, and hongyan cui,” Wireless Sensor Network Characteristics and Architectures”, Vol :6, No :12, 2012
- [3] BSN Research in Imperial College London (n.d), <https://www.imperial.ac.uk/>.
- [4] Chong, C.-Y. Kumar, S. P. (2003). Sensor networks : Evolution, opportunities, and challenges, Proceedings of the IEEE 91(8) : 1247–1256
- [5] Steere, D., Baptista, A., McNamee, D., Pu, C. Walpole, J. (2000). Research challenges in environmental observation and forecasting systems, Proc. of 6th International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOMM’00), pp. 292–299.
- [6] Martinez, K., Padhy, P., Riddoch, A., Ong, H. L. R. Hart, J. K. (2005). Glacial environment monitoring using sensor networks, Proc. of Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN’05).
- [7] Chien, C., Elgorriaga, I., McConaghy, C. (2001). “Low-power direct-sequence spread-spectrum modem architecture for distributed wireless sensor networks”, Intl. Symp. on Low Power Electronics and Design (ISLPED’01), Huntington Beach, California.
- [8] Schurgers, C., Aberthorne, O., and Srivastava, M. (2001). “Modulation scaling for energy aware communication systems”. Intl. Symp. on Low Power Electronics and Design (ISLPED’01), pp 96-99
- [9] Sankarasubramaniam, Y., Akyildiz, I., and S. McLaughlin, (2003). “Energy Efficiency Based Packet Size Optimization in Wireless Sensor Networks”. Proc. 1st IEEE Intl. Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA), Anchorage, AK.

-
- [10] Zhong, L., Shah, R., Guo, C., and Rabaey, J. (2001). “An ultra-low power and distributed access protocol for broadband wireless sensor networks”. IEEE Broadband Wireless Summit, Las Vegas, NV.
- [11] Ye, W., Heidemann, J., and Estrin, D. (2002). “An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks”. Proceeding of IEEE Infocom, Vol.3, pp 1567-1576, New York, NY.
- [12] Schurgers, C., Tsiatsis, V., Ganeriwal, S., and Srivastava, M. (2002). “Optimizing Sensor Networks in the Energy-Latency-Density Design Space”. IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol.1, No. 1, pp 70-80
- [13] Shen, C. Srisathapornphat and C. Jaikaeo, (2001). “Sensor Information Networking Architecture and Applications”, IEEE Personal Communications, pp 52-59.
- [14] Hetal Jasani, Kia Makki, Niki Pissinou, “ On Wireless Sensor Networks”,2004.
- [15] MEKKAOUI Kheireddine, “ SENSOR TECHNOLOGY : Un clustering centralisé et dynamique basé sur les AGs pour une consommation d'énergie minimale dans les réseaux de capteurs sans fil,” Thèse pour obtenir le titre de Docteur en Sciences, de l'Université de Djillali Labès - Sidi Bel-Abbès ,Option : Informatique Artificielle.
- [16] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, “Wireless sensor network survey,” Comput. Netw., vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, Aug. 2008
- [17] P. Baronti, P. Pillai, V. W. C. Chook, S. Chessa, A. Gotta, and Y. F. Hu, “Wireless sensor networks : A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards,” Comput. Commun., vol. 30, no. 7, pp. 1655–1695, 2007.
- [18] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, “Wireless sensor network survey,” Comput. Netw., vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, Aug. 2008
- [19] Part 15.4 : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE Standard 802.15.4-2006, 2006, pp. 1–305
- [20] D. Christin, A. Reinhardt, P. S. Mogre, and R. Steinmetz, “Wireless sensor networks and the Internet of Things : Selected challenges,” in Proc. 8th GI/ITG KuVS Fachgespräch ‘Drahtlose Sensornetze’, Hamburg, Germany, 2009, pp. 31–34.

- [21] H. Modares, R. Salleh, and A. Moravejsharieh, "Overview of security issues in wireless sensor networks," in Proc. 3rd Int. Conf. Comput. Intell. Modelling Simulation, Sep. 2011, pp. 308–311.
- [22] Erik Person, "Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks", UPTEC E19 014, Examensarbete 30 hp Juni 2019.
- [23] V.Raghunathan, P. H. Chou, "Design and Power Management of Energy Harvesting Embedded Systems", International Symposium on Low Power Electronics and Design, 2006. ISLPED'06. Proceedings of the 2006, pp. 369-374.
- [24] M. Habibzadeh, M. Hassanaliereagh, A. Ishikawa, Tolga Soyata, Gaurav Sharma, "Hybrid Solar-Wind Energy Harvesting for Embedded Applications : Supercapacitor-Based System Architectures and Design Tradeoffs", IEEE Circuits and Systems Magazine, Volume 17, Issue 4, 2017, pp. 29-63.
- [25] Voigt, T., Ritter, H., Schiller, "J.Solar-aware routing in wireless sensor networks- Proceedings of the International Workshop on Personal Wireless Communications", 2003.
- [26] Ahteshamul Haque b , Zainul Abdin Jaffery b,Himanshu Sharmaa,"Maximization of wireless sensor network lifetime using solar energy harvesting for smart agriculture monitoring " .
- [27] Himanshu Sharma , Ahteshamul Haque ,Zainul Abdin Jaffery.," Modeling and Optimisation of a Solar Energy Harvesting System for Wireless Sensor Network Nodes", 7 September 2018.
- [28] Miozzo, M., Zordan, D., Dini, P., Rossi, M., "SolarStat : modeling photovoltaic sources through stochastic Markov processes", In : IEEE International Energy Conference (ENERGYCON) ,2014.
- [29] Fahad Rasool , Micheal Drieberg , Nasreen Badruddin , Balbir Singh Mahinder Singh , "PV panel modeling with improved parameter extraction technique" ,2017.
- [30] Texas Instruments Application Report on "Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage". Available online : www.ti.com (accessed on 28 June 2018).
- [31] S.Kolsi, H. Samet, M.B. Amar, J. "Power and Energy Engineering 2", 27–34 (2014).

-
- [32] Imam Abadi, Choirul Imron, Mardlijah , Ronny D. Noriyati,” Implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Technique on Solar Tracking System Based on Adaptive NeuroFuzzy Inference System (ANFIS)” ,2018.
- [33] Robert D. Christ, Robert L. WernliSr , “Power and Telemetry “,2014.
- [34] H. HAMRI, “ contribution à la commande des systèmes à événements discret soumis à des contraintes temporelle ‘’, thèse doctorat, Université mouloud Mammeri, 2017.
- [35] d’après :”Cours de réseau de Petri”, Yann Morere, Avril 2002.
- [36] Mr. OUKAS Nourredine,MÉMOIRE de MAGISTER,”Modélisation et évaluation de performances des wSNs Avec capteurs non-fiables”.
- [37] Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation,”Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels”, du 25 au 27 avril 2001 - Troyes (France).
- [38] SLIM BEN SAOUD,”CHAPITRE 4 LES RESEAUX DE PETRI”.
- [39] Marsan, M.A. ”Stochastic Petri nets : an elementary introduction. in European Workshop on Applications and Theory in Petri Nets”,1988, Springer.
- [40] VADE-MECUM DE L’ÉTUDIANT EN RÉSEAUX DE PETRI par Stéphane MARIEL.
- [41] G.Florin et S.Natkin, „Les réseaux de Petri stochastiques, TSI,Vol N1,pp 144 – 160 ,Paris 1985.
- [42] M. Diaz, ”les réseaux de petri- Modèles fondamentaux”, Hermès Science Publications, Paris 2001.
- [43] Zimmermann, Armin Zimmermann and Michael Knoke. TimeNET 4.0 User Manual, Real-Time Systems and Robotics Group Faculty of EE&CS Technical Report 2007-13, Technische University, Berlin, ISSN : 1436-9915, August 2007.
- [44] J. Ben-Othman, S. Diagne, L. Mokdad, and B. Yahia, “Performance evaluation of a medium access control protocol for wireless sensor networks using petri nets,” *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, vol. 242, pp. 335–354, 2010.
- [45] X. Hu and L. Jiao, “Efficient modeling and performance analysis for IEEE 802.15.4 with coloured petri nets,” in *2017 IEEE/ACM 25th International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.

- [46] N. Oukas and M. Boulif, “A petri net modeling for wsn sensors with renewable energy harvesting capability,” in *Smart Energy Empowerment in Smart and Resilient Cities*, M. Hatti, Ed. Cham : Springer International Publishing, 2020, pp. 524–534.
- [47] “A new generalised stochastic petri nets modelling for solar energy harvesting sensors in long lasting wsns, considering seasonal sunshine levels,” in *Proceedings of the International Conference on Advances in Communication Technology, Computing and Engineering (ICACTCE)*. Meknes, Morocco, 2021.
- [48] Y. Li and R. Shi, “An intelligent solar energy-harvesting system for wireless sensor networks,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2015, no. 1, pp. 1–12, 2015.

Webographie :

- [web 1] <https://baike.baidu.com> ,21 avril 2021.
- [web 2] <https://www.redcad.org> ,21 avril 2021.
- [web 3] <https://youmatter.world> ,2 mai 2021.
- [web 4] <https://www.edf.fr> ,2 mai 2021.
- [web 5] <https://www.planete-energies.com> ,2 mai 2021.
- [web 6] <https://www.edfenergy.com> ,5 mai 2021.
- [web 7] <http://www.energies-renouvelables.org> ,5 mai 2021.
- [web 8] <https://www.energysage.com> ,5 mai 2021.
- [web 9] <https://www.techopedia.com> ,5 mai 2021.
- [web 10] <https://www.arrow.com> ,5 mai 2021.