



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

Laboratoire de recherche LIMPAF

Mémoire de Master

en Informatique

Spécialité : GSI

Thème

Sensor-Neighbors Relationship Modelling Using
Continuous Stochastic Petri nets in EH-WSNs

Membres du jury

Encadré par

Réalisé par

Président

— BADIS Lyes.

— OUKAS Nourredine.

— ARAB Karima.

— HELAL Mira.

Examineurs

— DJOUABRI Abderrezak.

— ABBAS Akli.

2021/2022

Remerciements

En terminant notre projet de fin d'études de master, il nous est agréable d'adresser nos vifs remerciements à tous ceux qui nous ont aidés de près et de loin à élaborer cet ouvrage.

Nos premiers remerciements et notre grande gratitude s'expriment envers Mr OUKAS Nourredine, qui a fait preuve de disponibilité en toute circonstance. Ses conseils, ses encouragements et ses critiques ont été d'une précieuse aide pour l'accomplissement de ce projet.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos professeurs pour la richesse et la qualité de leurs enseignements et les grands efforts déployés pour assurer à leurs étudiants une formation de haut niveau .

On voudrait également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.

Un remerciement particulier à ceux qui ont été continuellement présents pour nous encourager a la réalisation de ce travail.

Dédicaces

A 15 ans ...

Au soleil de ma viema fille Aya naddine.

ARAB Karima.

Dédicaces

Je dédie ce travail en particulier à la mémoire de ma mère et ma sœur.

A ma petite et grande famille.

A tous ceux qui m'ont soutenu pour continuer mes études.

HELAL Mira.

Résumé

La gestion efficace de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil avec récolte d'énergie solaire est un défi dans plusieurs applications. Motivé par cette problématique nous avons utilisé le formalisme de réseau de petri hybride étendu afin de présenter une modélisation basée sur la stratégie de double mécanisme de veille qui permet à un nœud de capteur de rejoindre l'état de veille la plupart du temps dans la nuit, pour conserver l'énergie et se réveille la plupart du temps dans la journée grâce à la récolte d'énergie. Ensuite, nous avons proposé une approche de triple modes de veille qui permet de contrôler tous les composants consommateurs de l'énergie selon l'état de la batterie pour obtenir un compromis entre la conservation de l'énergie et une bonnes performances dans le but de prolonger la durée de vie de réseau.

Nous avons analysé les performances énergétiques des modèles proposés par simulation. Les résultats obtenus prouvent la capacité des modèles proposés de prévoir le comportement des nœuds avant le déploiement réel.

Mots clés : Réseaux de capteurs sans fil, réseau de Petri hybride étendu, récupération d'énergie solaire, mécanisme de mise en veille.

Abstract

Efficient management of energy consumption in wireless sensor networks with solar energy harvesting is a challenge in several applications. Motivated by this problem we used the extended hybrid petri network formalism to present a modeling based on the strategy of double standby mechanism that allows a sensor node to reach the waking state most of the time at night, to conserve energy and wakes up most of the time during the day thanks to the energy harvest. Next, we proposed a triple sleep mode approach that allows all energy-consuming components to be controlled according to the state of the battery to achieve a compromise between energy conservation and good performance in order to extend the network life.

We analyzed the energy performance of the models proposed by simulation. The results demonstrate the ability of the proposed models to predict node behavior before actual deployment.

Key words : Wireless sensor networks, extended hybrid petri network, solar energy harvesting, sleeping mechanism.

ملخص

الإدارة الفعالة لاستهلاك الطاقة في شبكات الاستشعار بدون الأسلاك مع حصاد الطاقة الشمسية يمثل تحدياً في العديد من التطبيقات. بدافع من هذا المشكلة التي استخدمناها لشكلية شبكة بتري الهجين الموسعة من أجل لتقديم نموذج قائم على استراتيجية آلية المراقبة المزدوجة يسمح لعقدة المستشعر بإعادة الانضمام إلى حالة السكون معظم الوقت في الليل، للحفاظ على الطاقة والاستيقاظ معظم اليوم بفضل حصاد الطاقة. بعد ذلك، اقترحنا نهج وضع السكون الثلاثي مما يجعل من الممكن التحكم في جميع المكونات المستهلكة للطاقة وفقاً لحالة البطارية لتحقيق حل وسط بين الحفاظ على الطاقة و الأداء الجيد من أجل إطالة عمر الشبكة.

قمنا بتحليل أداء الطاقة للنماذج المقترحة بواسطة المحاكاة. توضح النتائج قدرة النماذج المقترحة على التنبؤ بسلوك العقدة قبل النشر الفعلي.

الكلمات المفتاحية: شبكات الاستشعار اللاسلكية، شبكة بتري الموسعة الهجينة، الاسترجاع الطاقة الشمسية، آلية الاستعداد.

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 capteurs sans fil	3
1.1 Introduction	3
1.2 Le nœud de capteur sans fil	3
1.3 Architecture d'un nœud de capteur	4
1.3.1 Architecture matérielle	5
1.3.2 Architecture logicielles	6
1.4 Les réseaux de capteur sans fils	7
1.4.1 Architectures et topologies des RCSF	8
1.4.2 Caractéristique d'un RCSF	9
1.4.3 Classification des RCSF	11
1.5 Les technologies de transmission dans les RCSF	11
1.5.1 Les liaisons infrarouges (IEEE 802.11)	12
1.5.2 La technologie Bluetooth (IEEE 802.15.1)	12
1.5.3 La technologie Zig Bee (IEEE 802.15.4)	12
1.6 Domaines d'application des RCSFs	13

1.6.1	Application militaires	13
1.6.2	Applications environnementales	13
1.6.3	Application médicale	14
1.6.4	Applications domotiques	14
1.7	Problématique de l'énergie dans un RCSF	15
1.8	Le mécanisme de veille	16
1.9	La récolte d'énergie	18
1.10	Évaluation de performances de RCSFs	18
1.11	Conclusion	19
2	Les Réseaux de Petri Hybrides et Étendus	20
2.1	Introduction	20
2.2	Notions de base	21
2.3	Définitions informelles	21
2.3.1	Condition	21
2.3.2	Événement	22
2.3.3	Déclenchement, pré-condition, post-condition	22
2.3.4	Modélisation d'un système événement - condition	22
2.4	Définition formelle	22
2.4.1	Représentation graphique de RdP	22
2.4.2	Le marquage d'un réseau de Petri	23
2.4.3	Évolution d'états d'un réseau de Petri	23
2.5	Extensions des réseaux de Petri	24
2.5.1	Reseaux de Petri temporels	24
2.5.2	Réseaux de Petri à arcs inhibiteurs	24
2.5.3	Réseaux de Petri généralisés	25
2.5.4	Réseaux de Petri stochastiques	25
2.5.5	Reseau de petri Continus (RdPC)	26
2.5.6	Les Réseaux de Petri Hybrides (RdPH)	27
2.6	Réseaux de Petri hybrides étendus (xHPN)	28
2.6.1	Le formalisme de xHPN	29
2.7	Conclusion	30

3	Modélisation d'un RCSF avec récolte d'énergie solaire à l'aide de xHPN.	32
3.1	Introduction	32
3.2	Travaux connexes	32
3.2.1	Modèle en xRHDP avec un double mécanisme de veille	36
3.2.2	Description du modèle	37
3.2.3	Interprétation du modèle	40
3.2.4	Modèle en xRHDP avec un triple modes de veille	40
3.3	Conclusion	44
4	Évaluation des performances des RCSFs avec récolte d'énergie solaire.	45
4.1	Introduction	45
4.2	Présentation de l'outil Visual Object Net++	45
4.3	Les hypothèses de simulation	46
4.3.1	Valeurs des paramètres d'entrée pour la simulation	46
4.4	Étude comparative	47
4.4.1	Premier scénario : déploiement sur Boumerdes	48
4.4.2	Deuxième scénario : impact du nombre journalier des messages	49
4.4.3	Troisième scénario : impact de valeurs des seuils	50
4.5	Étude de cas	51
4.5.1	Impact du taux de récolte d'énergie sur la charge de la batterie	51
4.5.2	Impact du nombre de messages sur la charge de la batterie	51
4.6	Conclusion	52
	Conclusion générale	54
	Bibliographie	54
	Webographie	60

Table des figures

1.1	Des capteurs sans fils	4
1.2	Interface entre le monde physique et le monde électrique[Web1].	4
1.3	Architecture de base d'un nœud de capteur.	5
1.4	Architecture matérielle d'un capteur.	5
1.5	Architecture standard d'un RCSF.	7
1.6	Architecture de communication dans un réseau de capteurs.	9
1.7	Classification des RCSFs.	11
1.8	Consommation de l'énergie du capteur.	16
1.9	Transition entre les différents modes d'économie d'énergie.	17
2.1	Démarche générale de modélisation des RdP.	21
2.2	Exemple d'un réseau de Petri.	23
2.3	RdPs avant et après franchissement de T1.	24
2.4	RdP avec arc inhibiteur.	25
2.5	Les éléments graphique d'un RdPH.	27
2.6	Les icônes du formalisme xHPN.	29
3.1	Un modèle basé sur les xRDPH pour un capteur avec une double Stratégie de Mise en Veille et récupération d'énergie solaire.	39
3.2	xRdPH pour un capteur avec le mécanisme de Triple-modes de veille et récupération d'énergie solaire.	42
3.3	La transition entre les différents modes du modèle triple-mode de veille. . .	44
3.4	Performance énergétique.	44

4.1	La charge de la batterie durant 24 heures sur la région de Boumerdes . . .	49
4.2	Impact du nombre journalier des messages sur la charge de la batterie . . .	49
4.3	Impact de valeurs des seuils de veille sur la charge de la batterie	50
4.4	Impact du taux de récolte d'énergie sur la charge de la batterie	51
4.5	Impact du nombres de messages sur la charge de la batterie	52

Liste des tableaux

1.1	Différents modes de préservation d'énergie.	16
3.1	Comparaison des modèles	36
3.2	Nomenclature et description des places.	37
3.3	Nomenclature et description des transitions.	38
3.4	Description des nouvelles places du modèle à triple-mode de veille.	41
3.5	Description des transitions du modèle à triple-mode de veille.	41
4.1	Les paramètres techniques de la radio IEEE 802.15.4.	46
4.2	Les valeurs des taux de récolte d'énergie solaire	47
4.3	Les modèles de comparaison.	47
4.4	Valeurs des paramètres de simulation pour l'étude comparative	48

Liste des abréviations

WSN	Wireless Sensor Networks.
RCSF	Réseaux de Capteurs Sans Fil.
EH	Energy Harvesting.
xHPN	Extended Hybrid Petri Network.
RdP	Reseau de Petri.
xRdPH	Reseau de Petri Hybride étendu.
RdPH	Reseau de Petri Hybride.
SN	Sensor Nodes.
GPS	Global Positioning System.
ADC	Analog-to-digital Converter.
CH	Cluster-Head.
RdPC	Reseau de Petri Continus.
RdPG	Reseau de Petri Stochastiques généralale.
GSPN	Generalized Stochastic PetriNet.
RF	Radiofréquence.
FIFO	First In First Out.
SN	Sensor Networke.
CPU	Central Processing Unit.

Introduction générale

Au cours de son évolution, le paradigme sans fil a vu naître diverses architectures dérivées, telles que : les réseaux cellulaires, les réseaux locaux sans fils et les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), ou "Wireless Sensor Network" (WSN), qui sont composés d'un nombre souvent très important de capteurs. Le but général d'un WSN est la collecte d'un ensemble de paramètres de l'environnement, telles que la température ou la pression de l'atmosphère, afin de les acheminer vers des points de traitement.

Les RCSF ont su attirer un nombre croissant d'industriels, vu leur réalisme et leur apport concret. En effet, le besoin d'un suivi continu d'un environnement donné est assez courant dans diverses activités de la société. Les processus industriels, les applications militaires de tracking, le monitoring d'habitat, ainsi que l'agriculture de précision ne sont que quelques exemples d'une panoplie vaste et variée d'applications possibles du suivi continu offert par les RCSF.

En revanche, les réseaux de capteurs souffrent de leurs fragilités et de leurs énergies limitées. Les nœuds capteurs sont alimentés par des batteries limités en énergie. Par ailleurs, le remplacement des batteries n'est pas une solution envisageable, soit à cause du déploiement aléatoire des capteurs, ou à cause de l'hostilité de l'environnement où ils sont placés. Toutefois, la mort d'un ou plusieurs nœuds capteurs interrompt partiellement la communication dans le réseau. De ce fait, une partie des données collectées sera perdue ce qui en résulte à la mort partielle du réseau.

Dans ce contexte, les techniques de récolte d'énergie qui visent à recueillir l'énergie renouvelables peuvent agir en tant que source d'énergie alternative, cette nouvelle technique a récemment émergé comme une approche prometteuse et assurer une durée de vie

perpétuelle aux appareils sans fil sans avoir besoin de recharger manuellement la batterie ou la remplacer.

Maximiser la durée de vie du réseau qui dépend fortement de la durée de vie des nœuds constitue un des défis majeur. En fait, un nœud de capteur consomme de l'énergie pour accomplir son rôle de collecte, le traitement et la transmission d'un ensemble de grandeur physique sur l'environnement qui l'entour, ces trois opérations constituent les principaux facteurs de consommation d'énergie. A partir de la, réduire l'énergie consommée par un nœud capteur revient à optimiser ces trois tâches. Dans la littérature plusieurs techniques de conservation d'énergie ont été proposées.

D'autre part, l'évaluation de la consommation d'énergie des RCSF peut être effectuée en adoptant des modèles qui peuvent être évalués analytiquement ou par simulation. Parmi les formalismes existants dans le domaine de la modélisation des systèmes à événement discrets et dynamique, les réseaux de petri, grâce à leur capacité de modélisation et d'évaluation de performances des systèmes complexes. Le formalisme des réseaux de petri hybride et étendu est le plus adéquat pour modéliser des systèmes hybrides (discrets et continus).

Dans ce travail on présente une approche basé sur les réseaux de petri hybrides pour évaluer la durée de vie des WSN avec des nœuds équipés par des systèmes de récolte d'énergie solaire. La stratégie clé adoptée dans la solution proposée est le mécanisme de mise en veille avec triple modes.

Ce mémoire est organisé comme suite : une introduction générale, suivi de 04 chapitre, et enfin, une conclusion générale :

Dans le chapitre 1 : Nous présentons un état de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil.

Dans le chapitre 2 : Nous définissons les formalismes des réseaux de petri et ces extensions, et nous allons nous focaliser sur le réseau de petri hybride étendu.

Dans le chapitre 3 : Nous présentons une modélisation d'un RCSF avec récolte d'énergie solaire à l'aide de xHPN.

Dans le chapitre 4 : Nous allons faire une démonstration « simulation » pour montrer l'efficacité des solutions présentées en terme d'économie d'énergie et leurs impacte sur la durée de vie de réseau.

Les réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

La croissance phénoménale de la technologie des systèmes Micro-Electro-Mécaniques, les communications numériques mobiles et l'électronique digitale a ouvert la voie à de nombreuses applications et a des possibilités nouvelles. Le réseaux de capteurs sans fil parmi ces technologies prometteuses qui ont récemment fait leur apparition et favorise la réalisation de plusieurs applications.

Les RCSFs ou Wireless Sensor Networks (WSN) en anglais, sont des réseaux constitués de centaines ou de milliers de nœuds capteurs généralement matériellement petits, construits à partir des composants pas chers, utilise des ondes radio plutôt qu'une infrastructure câblée pour communiquer, capables de s'auto-organiser, de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome. Ce réseau à de nombreuses perspectives d'applications dans des domaines divers tel que la surveillance industrielle, la domotique, les opérations militaires et la gestion des phénomènes naturels.

Dans ce chapitre nous introduisant les réseaux de capteurs, leurs caractéristiques et les critères de classification, les technologies de transmission les domaines d'application.

1.2 Le nœud de capteur sans fil

Les capteurs sont des dispositifs électroniques de taille extrêmement réduite, peu coûteux, doté de ressources limitées en énergie (batterie), en puissance de calcul et en capacité de stockage.



FIGURE 1.1 – Des capteurs sans fils

Ces systèmes embarqués autonomes peuvent être vus comme une interface entre le monde physique et le monde électrique, ont pour fonction de capturer des données environnementales (physiques) à l'aide de capteurs électroniques, de traiter les données à l'aide d'un microcontrôleur puis de transférer les informations grâce à une liaison radio sans fil.

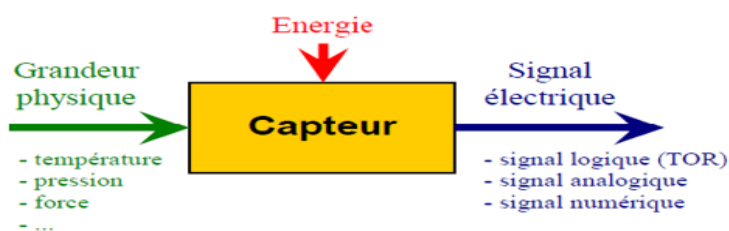


FIGURE 1.2 – Interface entre le monde physique et le monde électrique[Web1].

La figure 1.1 représente un exemple des nœuds de capteurs ou Sensor Nodes (SN) en anglais. La figure 1.2 représente les fonctionnalités d'un capteur électronique (qui est un composant d'un nœud de capteur).

1.3 Architecture d'un nœud de capteur

La figure 1.3 représente l'architecture de base d'un nœud de capteur [1], Il peut contenir également, suivant son domaine d'application, des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation (GPS ou un autre système de localisation qui donne au capteur sa position), un système générateur d'énergie (cellule solaire ou photovoltaïque), ou bien un système de mesure de distance.

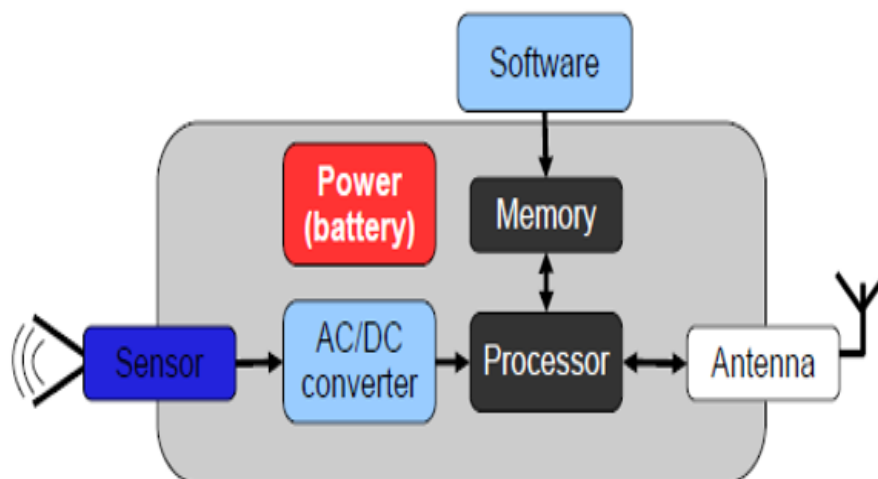


FIGURE 1.3 – Architecture de base d'un nœud de capteur.

1.3.1 Architecture matérielle

Un capteur est composé essentiellement de quatre unités de base [2] représentées dans la Figure 1.4

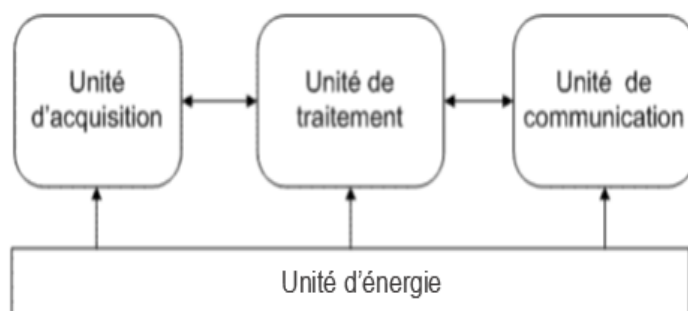


FIGURE 1.4 – Architecture matérielle d'un capteur.

Unité d'acquisition (ou de détection)

Elle est généralement composée de deux sous unités, un capteur et un convertisseur analogique-numérique ADC (Analog-to-Digital Converter). Les capteurs obtiennent des mesures sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques. Les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques. Ces derniers alimenteront l'unité de traitement.

Unité de traitement

Elle est généralement composée d'une petite unité de stockage pour stocker les données collectées, et d'un processeur pour traiter les données et contrôler les procédures permettant au nœud capteur de collaborer avec d'autres nœuds pour réaliser les tâches d'acquisition.

Unité de communication (émetteur-récepteur ou transceiver en anglais)

Elle est composée d'un émetteur/récepteur, c'est l'unité permettant aux nœuds du réseau de communiquer entre eux via un support de communication sans fil.

Unité de contrôle d'énergie

C'est l'un des composants importants d'un nœud capteur, elle sert à alimenter les autres unités pour fonctionner. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de la conception des protocoles pour les réseaux de capteurs. L'unité peut également gérer des systèmes de réapprovisionnement en énergie à partir de l'environnement observé, comme les cellules solaires, pour prolonger la durée de vie globale du réseau [3].

1.3.2 Architecture logicielles

L'architecture logicielle comprend principalement le système d'exploitation utilisé dans le nœud capteur, sa conception doit tenir compte de spécificité et les limitations des modules qui composent ce dernier : processeur avec une vitesse de traitement faible et une mémoire de capacité réduite, batterie comme source énergétique très limitée.

Plusieurs systèmes d'exploitation ont été conçus dans le but d'optimiser l'usage des ressources matérielles limitées des capteurs parmi lesquels [4] : ContikiOS, MantisOS, Nano-RK, LiteOS. Mais le plus célèbre est celui développé par l'université de Berkeley : TinyOS [WEB 2].

TinyOS est un système d'exploitation open-source, programmé en langage NesC (dialecte du C). Configurable à base de composants conçu pour des systèmes à contraintes très sévères de ressources tel que les nœuds capteurs dans un réseau sans fil ce qui fait sa particularité principale (taille extrêmement réduite en termes de mémoire (quelques kilo octets) et ainsi la taille réduite du code nécessaire à sa mise en place).



1.4 Les réseaux de capteur sans fils

Un réseau de capteurs sans fil est considéré comme un type particulier des réseaux Ad-hoc [5]. RCSF est fondé sur le déploiement d'un grand nombre de capteurs distribués sur une zone donnée appelée champ de captage, soit d'une manière aléatoire (avion, missile) ou déterministe (manuelle, robot), Les nœuds capteurs communiquent entre eux par des ondes radio pour le partage d'information et le traitement coopératif. Les données collectées sont acheminées vers une ou plusieurs stations de collecte appelées nœuds puits ou stations de base qui communique avec l'interface utilisateur [6]. afin de réaliser selon le domaine d'étude des traitements et des actions particulières. La figure 1.5 représente l'architecture standards d'un RCSF.

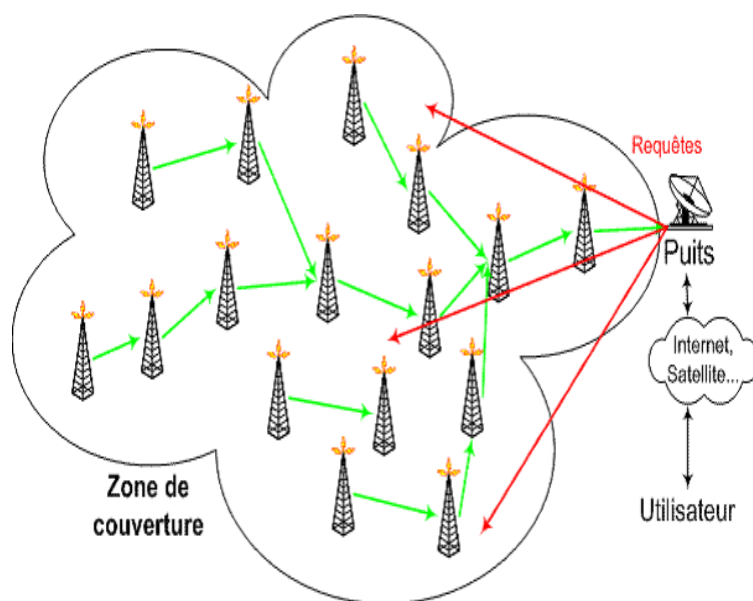


FIGURE 1.5 – Architecture standard d'un RCSF.

1.4.1 Architectures et topologies des RCSF

L'architecture des réseaux de capteurs dépendent des applications et des techniques utilisées pour faire acheminer l'information de capteurs à la station de base. On distingue principalement deux types d'architectures pour les RCSFs qui sont les architectures à plat et les architectures hiérarchiques [7].

Architecture à plat

Dans cette architecture, les nœuds de capteurs déployés ont le même niveau de responsabilité en réalisent des opérations de capture et/ou de traitement des données brutes collectées à partir de l'environnement physique pour les envoyer dans un premier temps au centre de collecte (Sink) via deux mode de communication :

- communication direct avec le centre de traitement (communication à un saut) (Figure 1.6 (a)).
- Ou par communication indirecte (communication multi –saut) (Figure 1.6 (b)).
C'est-à-dire que si un nœud veut envoyer un message vers la station de base et que celle-ci est en dehors de sa portée radio, il utilise un nœud intermédiaire (dans sa portée radio) comme relais (routeurs) pour passer le message et la même procédure se répète récursivement, jusqu'à ce que le message arrive à la station de base.

Ce dernier mode est le plus fréquent offre comme principaux avantages utilisation de faible puissances d'émission, la possibilité de passage à l'échelle, la gestion des redondances et des tolérances aux pannes.

Cependant, on peut noter comme inconvénients une consommation d'énergie plus importante dans l'ensemble du réseau à cause de participation d'autres nœuds au routage en dissipent leur énergie pour relayer des paquets, notons aussi une latence plus importante causée par les passages des messages par plusieurs relais multi-sauts avant d'arriver à la destination.

Architecture hiérarchique

Dans les architectures hiérarchiques, le réseau est organisé en clusters chaque cluster et constitue d'un ensemble de nœuds capteurs appelés nœuds membres et un nœud coordinateur élu appelé CH (Cluster-Head) a la responsabilité de collecter et gérer les informations à partir de ces nœuds membres, par la suite agréger ces données et les envoyer

à la station de base. Ainsi, tout nœud capteur doit être soit CH, soit membre d'un cluster.

Alors deux de cas de figures de communications peuvent se présenter. Une communication directe entre chaque coordinateur et le Sink, dans ce cas on parle de clustering mono-saut (Figure 1.6 (c)), et une communication multi-sauts entre coordinateurs jusqu'à ce que le trafic atteigne le Sink. Ce dernier cas caractérise le clustering multi-sauts (Figure 1.6 (d)).

Les avantages de ce mode hiérarchique sont la simplicité, la faible consommation énergétique surtout pour les nœuds capteurs non CH et une latence plus faible entre les CH et la station de base, puisqu'ils envoient directement les données à cette dernière. L'inconvénient majeur est que chaque CH constitue un point de défaillance unique. En plus, ce mode nécessite beaucoup de messages de signalisations pour l'élection et la maintenance des CH. Nous pouvons également noter comme inconvénient, des problèmes de passage à l'échelle.

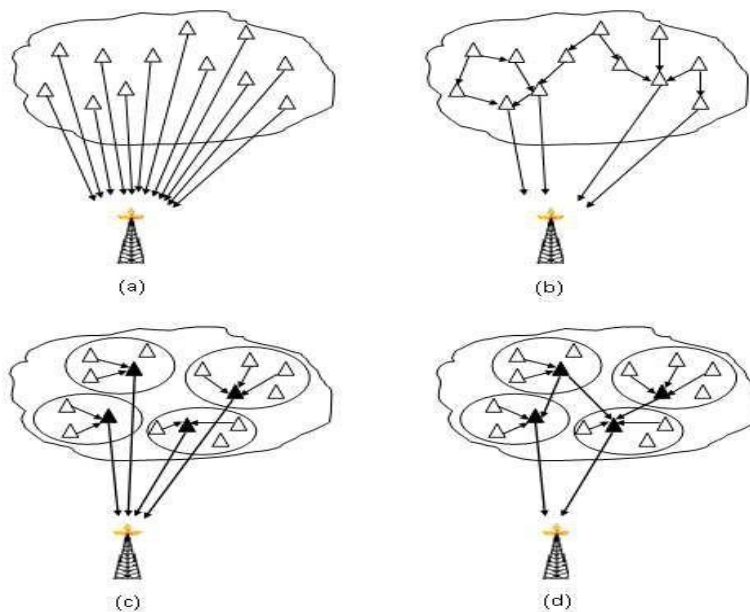


FIGURE 1.6 – Architecture de communication dans un réseau de capteurs.

1.4.2 Caractéristique d'un RCSF

Parmi les caractéristiques les plus importantes d'un réseau de capteurs, nous citons [8] :

- **Absence d'infrastructure** : Les réseaux de capteurs en particulier se distinguent des autres réseaux par la propriété d'absence d'infrastructure préexistante et de

tout genre d'administration centralisée.

- **Absence de schéma d'adressage** : Impossible de pouvoir attribuer des adresses différentes et uniques à chaque capteur à cause de nombre de capteurs déployé pour une application données qui varie de quelque centaines jusqu'à des milliers de nœuds.
- **La durée de vie limitée** : La durée de vie d'un réseau de capteurs diffère d'un type à un autre selon le domaine d'utilisation (de quelques heures à plusieurs années). Les nœuds capteurs sont très limités par la contrainte d'énergie, ils fonctionnent habituellement sans surveillance dans des régions géographiques éloignées. Par conséquent recharger ou remplacer leurs batteries devient quasiment impossible.
- **La tolérance aux pannes** : des interruptions peuvent se produire en raison de défaut de fabrication des nœuds capteurs, ou d'une déplétion d'énergie suite à des dégâts physiques causés par des facteurs externes ce qui conduira à la défaillance des capteurs. La tolérance aux pannes est la capacité du réseau à maintenir ses fonctionnalités sans être affecter par ces interruption [9].
- **Ressources limitées** : en plus de ressource énergétique très modeste, le facteur de forme (taille très petite) de nœud capteur limite sa capacité de traitement et de stockage.
- **Topologie dynamique** : La topologie des réseaux de capteurs change d'une manière fréquente et rapide car le nœud capteur peut devenir non opérationnel à cause de l'expiration de son énergie. De plus, dans certaines applications, les nœuds capteurs et les stations de base sont mobiles, ou bien les capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire.
- **Agrégation des données** : Dans les réseaux de capteurs, les données produites par les nœuds capteurs sont très reliées, ce qui implique l'existence de redondances de données. Une approche répandue consiste à agréger les données au niveau des nœuds intermédiaires afin de réduire la consommation d'énergie lors de la transmission de ces données.
- **La scalabilité** : les réseaux de capteurs engendrent un très grand nombre de capteurs, ils peuvent atteindre des milliers voire des millions de capteurs. Le défi à relever par les RCFSs est d'être capable de maintenir leurs performances et trouver

des mécanismes pour minimiser et réduire les risques d'interférences et collisions entre les paquets échangés dues à cette densité élevée et d'assurer l'acheminement des données entre ces différents capteurs sur de longues distances jusqu'à atteindre la station de base.

- **Bande passante limitée** : En raison de la puissance limitée, les nœuds capteurs ne peuvent pas supporter des débits élevés.

1.4.3 Classification des RCSF

Il existe plusieurs critères bien spécifiques pour classer les réseaux de capteurs. Ces critères se basent sur le cycle d'activité des capteurs ou selon des méthodes dirigées par les données, ou bien critères basées sur la mobilité [10].

La Figure 1.7 présente la classification des RCSFs.

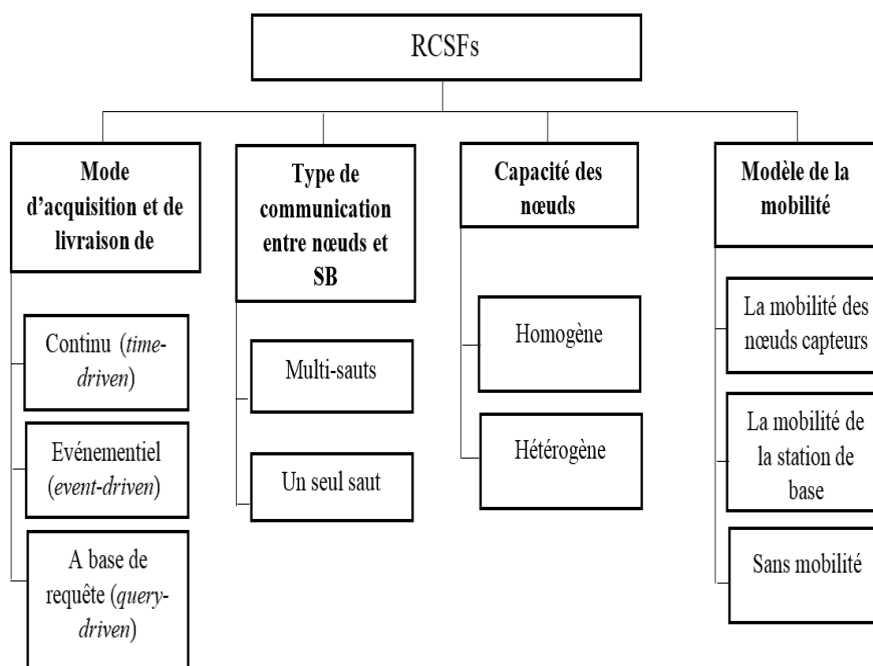


FIGURE 1.7 – Classification des RCSFs.

1.5 Les technologies de transmission dans les RCSF

Pour permettre des opérations sur des réseaux de capteurs dans le monde entier, le média de transmission doit être standardisé, parmi les technologies radio souvent utilisées

on trouve : l'infrarouge (IEEE 802.11) [11], le Bluetooth (IEEE 802.15.1) [12], et les communications radio Zig Bee(IEEE 802.15.4) [13] .

1.5.1 Les liaisons infrarouges (IEEE 802.11)

L'Infrarouge utilise une longueur d'onde de 850nm à 950nm pour le signal. Cette longueur d'onde est proche de la bande du visible par l'homme. C'est une lumière infrarouge diffusée. Les liaisons infrarouges permettent de créer des liaisons sans fil à courte distance avec des débits pouvant monter à quelques mégabits par seconde. Les ondes infrarouges sont préférées aux ondes radio, car elles n'interfèrent pas avec les autres signaux électromagnétiques.

1.5.2 La technologie Bluetooth (IEEE 802.15.1)

Une technologie initié par Ericsson en 1994, est un standard de communication permettant l'échange bidirectionnel de données à très courte distance en utilisant des ondes radio, son objectif est de simplifier les connexions entre les appareils électroniques en supprimant des liaisons filaires. Elle présente également l'avantage de fonctionner sur des appareils à faible puissance d'où une faible consommation d'énergie, mais elle représente un grand défaut pour des capteurs qui sont alimentés par une batterie, et qui devraient fonctionner durant plusieurs années.

1.5.3 La technologie Zig Bee (IEEE 802.15.4)

Zig Bee est un réseau de faible débit, faible consommation énergétique, de courte portée et d'une bonne souplesse d'installation [14], ce qui la rend particulièrement adaptée pour être directement intégrée dans de petits appareils électroniques (capteurs, appareils électroménagers...). Les réseaux ZigBee permettent d'offrir des petit débits (jusqu'à 250 Kbits/s) et ça n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas soutenues et conséquentes [15].

1.6 Domaines d'application des RCSFs

Les réseaux de capteurs sans fil ont trouvé leur place dans une grande variété d'applications et systèmes, avec des besoins et des caractéristiques nettement différents [16], grâce à leur faible cout d'acquisition et de déploiement et l'élargissement de la gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations ...) et l'évolution des supports de communication sans fil. Dans les paragraphes qui suivent nous présenterons quelque exemple des domaines d'applications des RCSFs :

1.6.1 Application militaires

Les réseaux de capteur sans fil sont très adaptés pour les applications militaires grâce à leur caractéristiques telles que la facilite de déploiement, l'auto-configuration, tolérance aux pannes, sont susceptibles d'être une partie intégrante de commandement militaire, les systèmes de contrôle, la communication, le calcul, les renseignements, la surveillance et le ciblage [17].

Bien que les réseaux de capteurs soient basés sur le déploiement dense des capteurs, caractérisés par leur faible coût, la destruction de certains nœuds n'affecte pas une opération militaire autant que la destruction d'un capteur traditionnel, ce qui dote les réseaux de capteurs d'une grande utilité dans le champ de bataille. Une partie des applications militaires des réseaux de capteurs sont : la surveillance des forces armées, des équipements et des munitions, la surveillance du champ de bataille, la reconnaissance des forces ennemies et le terrain, la détection de cible, l'évaluation des dommages de combat, et la détection des armes nucléaires, biologiques et chimiques.

1.6.2 Applications environnementales

Dans ce domaine, les capteurs peuvent être exploités pour détecter les catastrophes naturelles, par exemple :

- Le déploiement des thermo-capteurs dans une forêt peut aider à détecter un éventuel début de feu, et par la suite peut faciliter les moyens de lutte en temps réel.
- Les capteurs chimiques dans les milieux urbains peuvent aider à détecter la pollution et analyser la qualité d'air.
- Déploiement des systèmes de détection des inondations et mesurer le niveau de

l'eau nous citons comme exemple le système (ALERT) [Web3] déployé en Europe et aux États Unis.

- Détection des émanations de produits toxiques (gaz, produits chimiques, pétrole, etc) dans des sites industriels tels que les centrales nucléaires ou pétrolières.
- Des nœuds capteurs peuvent également être déployés dans l'espace ou au fond des océans à partir d'avions, de ballons ou dans des navires afin de mesurer des paramètres environnementaux sur ces champs de captages, et signaler d'éventuels problèmes environnementaux (par exemple des pollutions, des aléas météorologiques, etc).
- Prévision des catastrophes géologiques, telles que les tremblements de terre, les tsunamis, les éruptions volcaniques, et les glissements de terrains.

Les réseaux de capteurs sont utilisés dans certaines applications environnementales notamment pour localiser les mouvements d'oiseaux, de petits animaux et d'insectes, surveillance des conditions environnementales qui affectent les cultures et le bétail.

1.6.3 Application médicale

Les réseaux de capteurs sont également largement répandus dans le domaine médical. Cette classe inclut des applications comme : fournir une interface d'aide pour des personnes dépendantes, ces réseaux peuvent détecter des comportements anormaux (chute d'un lit, choc, cri, ...) chez handicapées ou âgées [18].

Surveiller en permanence les malades et les médecins à l'intérieur de l'hôpital, collecter des informations physiologiques humaines de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de certaines maladies, et cela grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés (sous forme de gélule) ou implantés sous la peau (surveillance de la glycémie, détection de cancers, la fréquence cardiaque, le niveau d'oxygène dans le sang, etc). En plus, les nœuds capteurs peuvent être utilisés pour recevoir des images en temps réel d'une partie du corps sans aucune chirurgie. Les données physiologiques collectées par les capteurs peuvent être stockées pendant une longue durée pour le suivi d'un patient.

1.6.4 Applications domotiques

Des RCSF peuvent être déployés pour le "monitoring" de l'habitat et les nœuds capteurs forment ainsi un environnement intelligent permettant de fournir toutes les infor-

mations nécessaires aux applications de confort, de sécurité et de maintenance de cet habitat.

Ils peuvent ainsi former une « maison intelligente », autonome et capable de comprendre les situations en fonction du comportement des occupants, et d'en déduire des actions qui peuvent aider à une prise de décision efficace et en temps réel.

Dans de telles applications, les capteurs sont généralement des capteurs de détection de présence, des capteurs de sons, des caméras de capteurs sans fil, etc [7].

Ces capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs, les magnétoscopes, ... ils interagissent entre eux et avec un réseau externe via Internet pour permettre à un utilisateur de contrôler les appareils domestiques localement ou à distance.

1.7 Problématique de l'énergie dans un RCSF

Les capteurs sans fils sont des éléments indépendants les uns des autres, comme leur nom l'indique. Par conséquent, ils doivent également disposer d'une alimentation autonome. Leur durée de vie est limitée par la durée de vie de leur batterie. Cette contrainte forte a une influence majeure sur l'ensemble des techniques, mises en place pour le déploiement de tels réseaux. Un effet majeur de cette limitation énergétique est la limitation maximale des transmissions par voie hertzienne, très coûteuses.

L'enjeu est donc d'étendre la durée de vie du système et sa robustesse, en cas de chute de certains nœuds seulement. Les problématiques sont donc très éloignées de celles des réseaux classiques, telle la maximisation du débit. Dans les réseaux de capteur sans fils, il faut assurer une consommation répartie de l'énergie au sein du réseau. Cet énergie est consommé par les diverses fonctionnalités de réseaux qui sont donc par ordre décroissant de consommation d'énergie : Radio (Communication), CPU (calcul, agrégation), Acquisition.

L'enjeu d'énergie est un capital dans les réseaux de capteur, pour augmenter l'autonomie de capteur il faut agir sur plusieurs paramètres [19] : Sur quels paramètres est-il possible d'agir ?

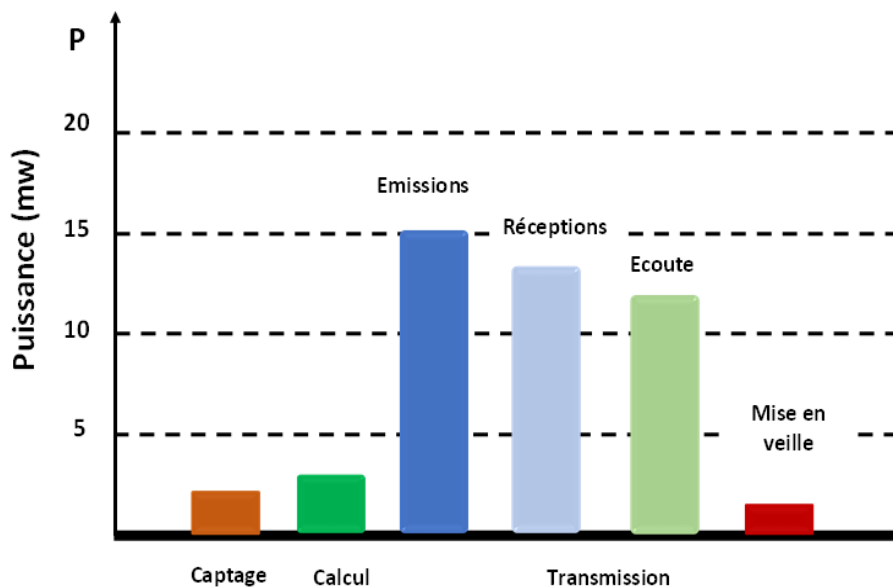


FIGURE 1.8 – Consommation de l'énergie du capteur.

1.8 Le mécanisme de veille

Pour résoudre le problème de l'énergie plusieurs auteurs ont proposé des approches basées sur le mécanisme de veille [20], [21], [22]. L'idée est de désactiver l'unité de communication de temps en temps. Le but est de conserver l'énergie de l'écoute permanente. Les autres composants du capteur peuvent être désactivés selon le besoin. Les auteurs de [23], ont proposé un mécanisme détaillé de veille.

Ils ont proposé quatre modes de préservation d'énergie conformément à la structure interne d'un nœud capteur [23] (voir la table 1.1) :

Etat/mode	Horloge	Processeur	Mémoire	Capteur/circuit ADC	Module radio
S0 : On-Duty	actif	actif	actif	actif	Tx/Rx/écoute
S1 : SU-On-Duty	actif	actif	actif	actif	veille
S2 : TR-On-Duty	actif	actif	actif	veille	Tx/Rx/écoute
S3 : Off-Duty	actif	veille	veille	veille	veille

TABLE 1.1 – Différents modes de préservation d'énergie.

Nœud capteur en activité (On-Duty) : tous les composants d'un nœud capteur sont en activité. Le nœud dans ce cas est capable de collecter les données, transmettre/recevoir des messages ou écouter la porteuse à vide (décoder le signal du canal,

même le bruit, pour vérifier si le nœud est destinataire ou non d'un message), traiter les données et les messages et effectuer d'autres types de traitements. Ce mode est appelé souvent mode actif et il n'est pas classé mode d'économie d'énergie.

Unité de capture en activité (sensing unit on-duty ou SU-On-Duty) : dans ce mode, il y a au moins l'unité de capture et le microcontrôleur en activité, mais le module radio est en mode veille. Le nœud dans ce cas est capable de capter et de traiter les données mais sans avoir la possibilité de transmettre, recevoir ou écouter la porteuse.

Module radio en activité (transceiver on-duty ou TR-On-Duty) : dans ce mode, le module radio et le microcontrôleur sont en activité, mais tous les circuits de capture sont désactivés. Dans ce cas, le nœud capteur est capable seulement de transmettre, réceptionner et traiter les messages, et écouter la porteuse.

Nœud capteur en mode veille (Off-Duty) : dans ce mode, seuls l'horloge ou d'autres mécanismes de déclenchement sont en activité pour réveiller le nœud capteur après une période de sommeil. Ce mode est appelé souvent mode veille (sleep), c'est le mode qui correspond à l'économie d'énergie.

La figure 1.9 illustre les transitions entre les différents modes de préservation d'énergie.

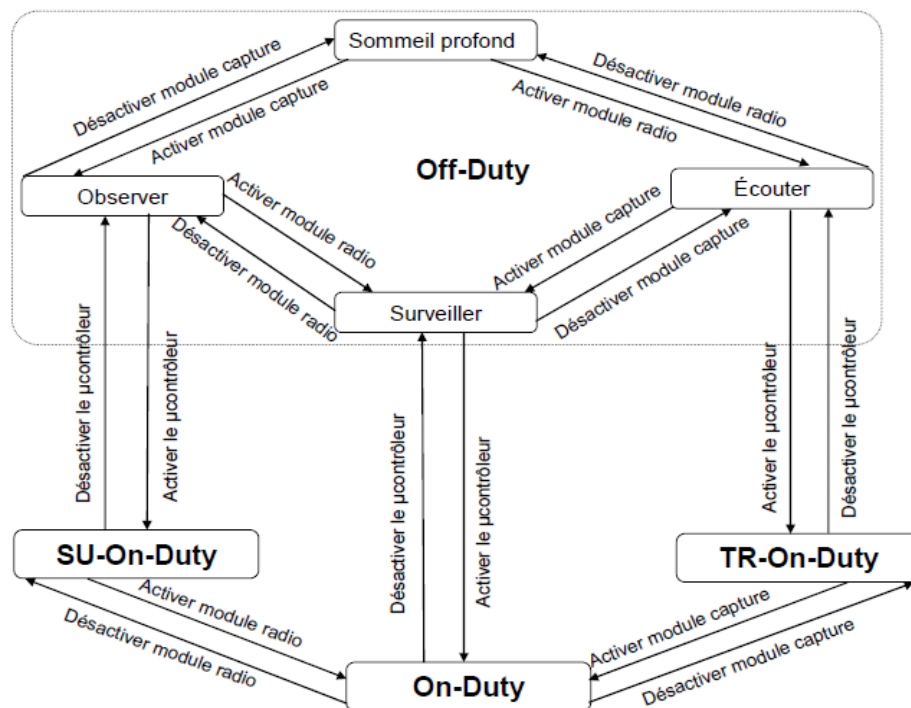


FIGURE 1.9 – Transition entre les différents modes d'économie d'énergie.

Le module radio opère en quatre modes distincts : transmission (Tx), réception (Rx),

écoute de la porteuse à vide (idle) et le mode veille. Bien que les modes émission et réception sont les plus consommateurs d'énergie, le mode écoute de la porteuse consomme aussi de l'énergie et il est presque équivalent à une réception. Il est donc souhaitable dans une stratégie d'économie d'énergie de désactiver complètement le module radio d'un nœud capteur au lieu de le laisser dans ce mode. Cependant, basculer fréquemment entre les modes veille et réveil peut parfois mener à une consommation de plus d'énergie que de laisser le module radio en activité, à cause de la puissance consommée à chaque démarrage. En plus, si on admet que la taille des paquets transmis est relativement faible, l'énergie de transition reste dominante aux énergies consommées durant la transmission et la réception des paquets [24].

1.9 La récolte d'énergie

La récolte d'énergie (en anglais "energy harvesting") désignent l'ensemble des techniques qui peuvent être utilisées pour extraire de l'environnement immédiat l'énergie qui est nécessaire à la satisfaction de certains besoins.

La récupération d'énergie est une technologie émergente qui vise à réduire la dépendance à la batterie grâce à une meilleure conversion de l'énergie à partir de sources auparavant inexploitées et à un meilleur stockage de l'énergie convertie. Les réseaux de capteurs sans fil se composent de nombreux petits appareils qui interagissent tous pour observer un environnement et rassembler des données utiles sur cet environnement. Selon les situations dans lesquelles ces capteurs sont placés, fournir de l'énergie peut être une tâche incroyablement difficile.

La récupération d'énergie englobe de nombreuses solutions potentiellement peu coûteuses et très efficaces à ces problèmes, permettant aux minuscules machines impliquées dans les réseaux de capteurs de collecter de l'énergie renouvelables à partir de sources issues de phénomènes naturels(vent, soleil, L'eau,...) [25].

1.10 Évaluation de performances de RCSFs

L'évaluation des performances d'un réseau de capteurs sans fil se fait de deux façons différentes : par simulation et par modélisation.

Lors de la conception des réseaux, l'analyse se fait habituellement par simulateurs conçus spécialement pour étudier le comportement d'un réseau d'une manière virtuelle avant l'installation réelle, parmi eux on trouve le plus utilisé le NS (Network Simulator) et ses extensions NS2 et NS3, conçus pour modéliser et simuler les réseaux classiques : des réseaux filaires, des réseaux sans fil voir des réseaux ad hoc. Pour ces réseaux, la consommation d'énergie n'était pas encore la préoccupation majeure [26].

Cependant, la modélisation utilise des formalismes mathématiques pour évaluer les performances d'un tel system. Les réseaux de Petri, les chaînes de Markov, les files d'attente, les graphes, les automates, et autres sont utilisés pour concevoir des modèles aux systèmes dans lesquels on peut évaluer ses performances par des formules mathématiques.

1.11 Conclusion

Contrairement aux réseaux traditionnels qui se préoccupent de garantir une bonne qualité de service, les réseaux de capteurs sans fil doivent, en plus, prendre en compte la conservation d'énergie. Ils doivent intégrer des mécanismes qui permettent aux utilisateurs de prolonger la durée de vie du réseau en entier, car chaque nœud est alimenté par une source d'énergie limitée et généralement irremplaçable. Dans un nœud de capteur, l'énergie est consommée en assurant les fonctions suivantes : la détection, le calcul (traitement) et la communication. Cette dernière représente une grande portion de l'énergie totale consommée.

Pour étudier les paramètres de performances et d'optimisation de la durée de vie des nœuds de capteur, nous allons proposer un modèle basé sur les réseaux de Petri pour modéliser la consommation d'énergie des capteurs. Pour cela, nous allons présenter dans le chapitre suivant le formalisme des réseaux de Petri comme un outil de modélisation.

Les Réseaux de Petri Hybrides et Étendus

2.1 Introduction

Les réseaux de Petri (RdP) sont apparus en 1962 en Allemagne à Bonn, par Carl Adam Petri dans sa thèse de doctorat "Communication avec des Automates". Ce travail a continué à être développé par Anatol W. Holt, F. Commoner, M. Hack et leurs collègues dans le groupe de recherche de Massachusetts Institute Of Technology (MIT) dans des années 70s. En 1975 la première conférence de réseau de pétri et des méthodes relationnels ont été organisés à MIT. En 1981 le premier livre du réseau de pétri a été publié en Anglais par J. Peterson. Aujourd'hui, chaque année il y a des 600 aux 800 d'œuvres des réseaux de pétri sont publiés [27].

Les Réseaux de Petri est un outil graphique et mathématiques de modélisation et d'évaluation des performances des systèmes à événements discrets. Les réseaux de pétri sont largement utilisés dans différents domaines comme les systèmes manufacturiers, les systèmes de télécommunications et les réseaux de transport.

Sa puissance d'expression permet d'étudier des systèmes composés de sous-systèmes fonctionnant en parallèle, communiquant et partageant des ressources. Un point crucial qui est inhérent dans les RdP est qu'ils peuvent être étendus selon les besoins. En plus de ses caractéristiques analytiques, ils offrent une possibilité d'une analyse qualitative. Les réseaux de Petri proposent une modélisation à deux visages :

- Une modélisation statique, qui décrit l'architecture du système, les dépendances existant entre les différentes parties, les actions possibles, les conditions requises pour qu'elles soient effectuables et leurs effets sur différents composants du système.

- Une modélisation dynamique, qui décrit les comportements possibles du système (via un principe de modélisation).

La figure 2.1 représente la démarche générale de la modélisation avec des RdP [28].

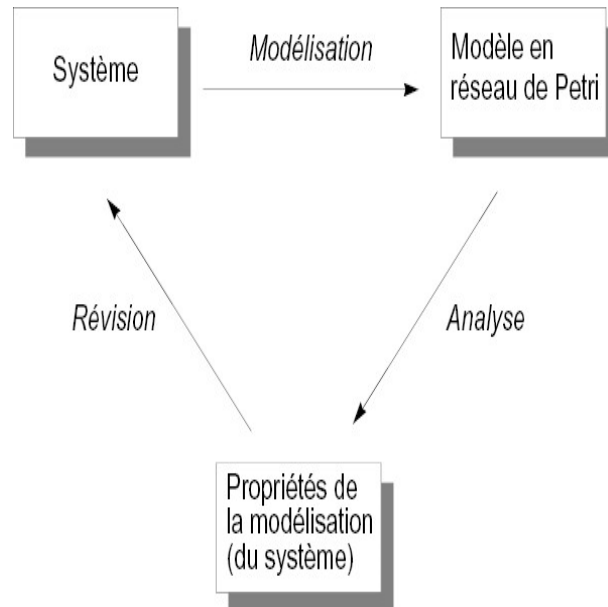


FIGURE 2.1 – Démarche générale de modélisation des RdP.

2.2 Notions de base

Un réseau de petri est un graphe biparti orienté qui a deux types de nœud : un ensemble de places représentant les ressources et un ensemble de transitions symbolisant les événements ou les opérations. L'état d'un système d'écrit par un RdP est représenté par le marquage de ce graphe.

2.3 Définitions informelles

2.3.1 Condition

Une condition est un prédicat logique d'un état du système. Elle est soit vraie, soit fausse.

2.3.2 Événement

Les événements sont des actions se déroulant dans le système. Le déclenchement d'un événement dépend de l'état du système. Un état du système peut être décrit comme un ensemble de conditions.

2.3.3 Déclenchement, pré-condition, post-condition

Les conditions nécessaires au déclenchement d'un événement sont les pré-conditions de l'événement. Lorsqu'un événement se produit, certaines de ses pré-conditions peuvent cesser d'être vraies alors que d'autres conditions, appelées post conditions de l'événement, deviennent vraies.

2.3.4 Modélisation d'un système événement - condition

- **Condition** : modélisée à l'aide d'une place.
- **Événement** : modélisé à l'aide d'une transition.
- **Satisfaction d'une condition** : modélisée à l'aide d'un jeton.

2.4 Définition formelle

Un réseau de Petri non marqué est un quadruplet :

$R = (P, T, \text{Pré}, \text{Post})$, où :

P est un ensemble fini de places,

T est un ensemble fini de transitions,

$\text{Pré} : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$; est l'application places précédentes,

$\text{Post} : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$; est l'application places suivantes.

2.4.1 Représentation graphique de RdP

Le réseau de pétri est représenté par deux type de sommets alternés, les places P_i et les transitions T_i . Ces sommets sont reliés par des arcs orientés. Tout arc doit relier une place à une transition ou bien une transition à une place [29].

2.4.2 Le marquage d'un réseau de Petri

Un réseau de Petri marqué est caractérisé par le couple : $N = (R, M_0)$; où

- R est un réseau de Petri ordinaire.
- M_0 est le marquage initial qui est une application définie par :
- $M_0 : P \rightarrow \mathbb{N}$;

avec $M_0(p)$ est le nombre de marques (jetons) contenus dans la place p .

Exemple d'un RDP marqué :

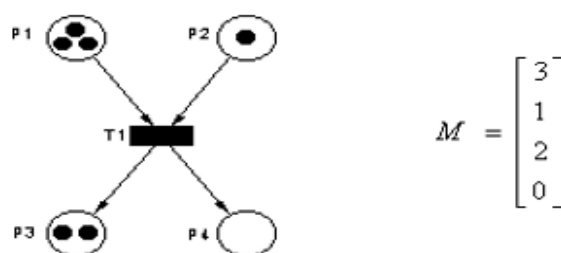


FIGURE 2.2 – Exemple d'un réseau de Petri.

La figure 2.2 représente un réseau de Petri marqué. Les places p_1 , p_2 , p_3 et p_4 contiennent des nombres entiers (positifs ou nuls) de marques dites aussi jetons.

Le nombre de jetons dans P_1 est $M_0(p_1) = 3$,

Le nombre de jetons dans P_2 est noté par $M_0(P_2) = 1$,

Le nombre de jetons dans P_3 est noté par $M_0(P_3) = 2$,

le nombre de jetons dans P_4 est noté par $M_0(P_4) = 0$,

Le marquage M du réseau entier est défini par le vecteur de ces marquages

$M = (M(P_1), M(P_2), M(P_3), M(P_4)) = (3, 1, 2, 0)$.

L'évolution du marquage par franchissement des transitions dans un réseau de Petri traduit l'évolution du système modélisé dans ces différents états après l'occurrence de certains évènements.

2.4.3 Évolution d'états d'un réseau de Petri

L'évolution d'un RdP correspond à l'évolution de son marquage au cours du temps (évolution de l'état du système) : il se traduit par un déplacement de marques ce qui s'interprète comme la consommation/ production de ressources déclenchée par des évènements

ou des actions. Déterminer l'évolution d'un RdP correspond en fait à le simuler, terme plus généralement utilisé en modélisation.

Pour rendre compte de l'évolution du système modélisé, les réseaux de Petri intègrent un formalisme permettant de passer d'un marquage à un autre : c'est le franchissement des transitions (Voir la figure 2.3).

Le franchissement (ou le tir) d'une transition ne peut s'effectuer que si chacune des places en amont (en entrée) de cette transition contient suffisamment de jetons (\geq au poids de l'arc correspondant). On dit alors que la transition est franchissable ou validée.

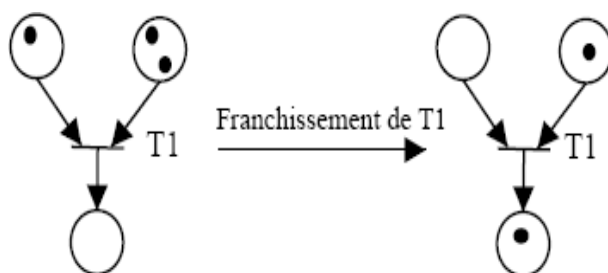


FIGURE 2.3 – RdPs avant et après franchissement de T1.

2.5 Extensions des réseaux de Petri

2.5.1 Réseaux de Petri temporels

Les réseaux de Petri temporels introduisent la notion de temps dans le parcours du réseau qui permettent de décrire un système à événements discrets dont le fonctionnement dépend du temps [30].

Dans les réseaux de Petri temporisés, le temps est représenté par un délai minimal permettant l'occurrence d'un événement. Les temporisations ont d'abord été associées aux transitions (T- temporisés) qui représente la durée minimale de franchissement, puis aux places (P-temporisés) qui est la durée minimale de séjour d'un jeton dans une place.

2.5.2 Réseaux de Petri à arcs inhibiteurs

Un arc inhibiteur est un arc orienté relie une place à une transition (et jamais une transition à une place). Son extrémité est marquée par un petit cercle au lieu d'une flèche.

Cette extension des RdP permet de tester l'absence de marques dans une place, alors que lors d'un franchissement classique, on vérifie au contraire la présence d'une marque qui est consommée. Dans le cas de réseau de pétri généralisé, lorsque'une place en entrée est reliée à une transition par un arc inhibiteur, cette transition n'est valide que si son poids est inférieur au marquage de la place en amont.

La figure 2.4 représente un exemple d'un RdP à arc inhibiteur.

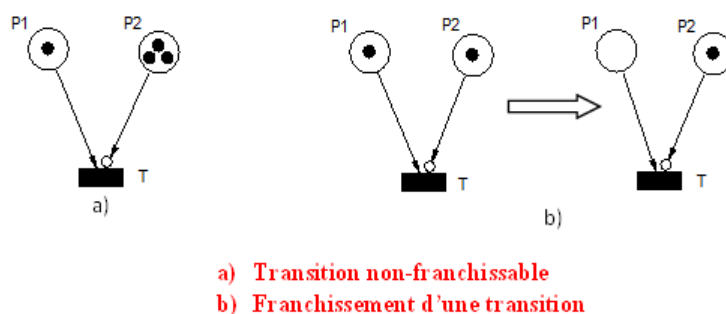


FIGURE 2.4 – RdP avec arc inhibiteur.

2.5.3 Réseaux de Petri généralisés

Un RdP généralisé est un RdP dans lequel des poids (nombre entier strictement positif) sont associés aux arcs. Si un arc (P_i, T_j) a un poids k : la transition T_j n'est franchie que si la place P_i possède au moins K jetons .

Le franchissement consiste à retirer K jetons de la place P_i . Si un arc (T_j, P_i) a un poids K : le franchissement de la transition ajoute K jetons à la place P_i . Lorsque le poids n'est pas signalé, il est égale à un par défaut. Cette extension des RdP permet la réduction de la taille du RdP ordinaire [31].

2.5.4 Réseaux de Petri stochastiques

Les réseaux de Petri stochastiques (RdPS) représentent un modèle d'analyse qui permet une validation, à la fois qualitative et quantitative du système.

Dans un RdP temporisé, une durée fixe est associée à chaque place ou transition du réseau. On obtient des modèles qui sont bien adaptés pour étudier des systèmes où les durées opératoires sont fixes. En revanche, certains phénomènes sont imprévisibles et ne

peuvent plus être traités avec ce type de modèles. Dans ces cas, chaque durée est modélisée par une variable aléatoire [32].

Définition formelle

Un RdPS est un couple (N, W) , tel que :

- $N = (P, T, \text{Pré}, \text{Post}, M_0)$ est un RdP marqué, avec M_0 comme marquage initial ;
- W est une fonction qui à chaque transition t associe un taux de tir :

$$\lambda t = W(t) \tag{2.1}$$

Les RdPS sont considérés comme une extension temporelle des RdP, une durée de tir aléatoire est associée à chaque transition, cette durée est donnée par une variable aléatoire distribués par une loi exponentielle. Cette distribution exponentielle permet d'exploiter les propriétés mathématiques d'un processus de Markov.

Analyse d'un RdP stochastique

L'analyse d'un RdPS permet de mettre en exergue les deux aspects du système, à savoir, l'aspect qualitatif et l'aspect quantitatif.

L'aspect qualitatif : ce dernier définit les propriétés qualitatives du système à analyser : blocage, bornitude, ... etc.

L'aspect quantitatif : cet aspect définit des analyses de performances qui sont basées sur le graphe des marquages. Ce dernier est isomorphe à une chaîne de Markov. Les différents types d'évaluations de performances utilisées avec les chaînes de Markov (calcul du vecteur des probabilités stationnaires, la matrice génératrice, ...etc.) sont donc applicable sur les RdPS si la propriété d'ergodicité est vérifiée.

2.5.5 Réseau de petri Continus (RdPC)

Les RdP sont de nature essentiellement discrète. En effet, ils permettent de modéliser des états discrets d'un système tel que la marche ou l'arrêt d'une machine. Cependant, ces modèles discrets se sont rapidement vus limités car ils explosent rapidement lorsque le nombre d'états croît. Cette réalité a engendré l'apparition des RdP continus [33].

Les RdPs continus ont été définis, par David et Alla [34] comme une limite des RdPs discrets, obtenus à partir de ces derniers en fluidifiant « approxime un espace discret par

un espace continu \gg les marques et on associant des **quantités réelles** aux places et des **vitesse**s de franchissements aux transitions.

Une place d'un RdP continu est dite place continue ou C-place représentée par double cercle, contrairement aux RdPs ordinaires, temporisés, le nombre de marques est un nombre réel positif ou nul. De même, une transition dans un RdP continu est dite transition continue, ou C-transition, représentée par un rectangle validée si toutes ses places d'entrée sont marquées alors que, pour les RdPs discrets, le franchissement d'une transition est un événement instantané. Il s'effectue comme un flot continu en introduisant la notion de vitesse, correspondante au nombre de marques franchies, pendant une unité de temps. Les RdPs continus sont des outils de modélisation des systèmes dynamiques pour lesquels toutes les variables d'état sont continues et positives.

2.5.6 Les Réseaux de Petri Hybrides (RdPH)

Les RdPH contenant des nœuds discrets (des D-places et des D-transitions) et des nœuds continus (des C-places et des C-transitions) permettent de représenter au sein d'un même formalisme ce couplage entre un fonctionnement continu et un fonctionnement logique (représentation graphique unifiée des variables continues et des variables discrètes). Un RdPH est un modèle combinant un RdP discret et un autre continu.

Dans le but de fournir une modélisation homogène des systèmes physiques réunissant à la fois une partie continue et une partie discrète, la modélisation du temps dans les RdP hybrides consiste à considérer des vitesses de franchissement sur les transitions continues (C-transitions) et des délais de franchissement sur les transitions discrètes (D-transitions)[35].

La figure 2.5 présente les éléments graphique d'un RdPH.

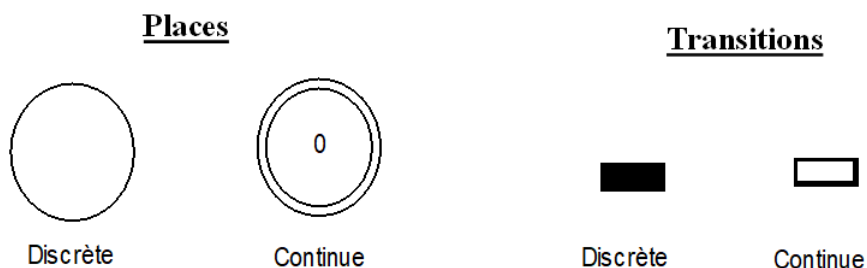


FIGURE 2.5 – Les éléments graphique d'un RdPH.

Définitions et notions :

Un RdP hybride temporisé, appelé simplement RdP hybride, est un septuplet $R = (P, T, h, \text{Pré}, \text{Post}, \text{tempo}, \text{Mo})$ tel que [36] :

- P et T : sont respectivement, les ensembles finis des places et des transitions.
- $h : P \cup T, C, D$: appelé fonction hybride, indique pour chacun des noeud s'il s'agit d'un noeud discret (D) ou continu (C).
- Pré et Post : sont respectivement ; l'application d'incidence avant et d'incidence arrière, telle que :

$$\text{Si : } h(P) = D$$

$$\text{Pré : } P \times T \longrightarrow N$$

$$\text{Post : } P \times T \longrightarrow N$$

$$\text{Si : } h(P) = C$$

$$\text{Pré : } P \times T \longrightarrow R^+$$

$$\text{Post : } P \times T \longrightarrow R^+$$

- Tempo : c'est l'application qui associe à chaque transition T_j un nombre réel positif ;
- La temporisation associée à une D-transition T_j vaut d_j ;
- La vitesse maximale de franchissement associée à une C transition

$$v_j = \frac{1}{d_j} \tag{2.2}$$

- Mo : est le marquage initial.

On définit la matrice d'incidence associée à un RdP hybride de la manière suivante :

$$W = [W_{ij}], \text{ telque : } W_{ij} = \text{post}(P_i, T_j) - \text{Pre}(P_i, T_j) \tag{2.3}$$

2.6 Réseaux de Petri hybrides étendus (xHPN)

Le formalisme de réseau de Petri hybride étendu ou (xHPN : extended Hybrid Petri Net) combine plusieurs concepts de réseau de Petri. Par définition, xHPN est une extension de HPN qui propose une modélisation hybride avec des arcs inhibiteurs et de test.

De plus, xHPN prend en charge des fonctions pour la valeur de vitesse maximale dans les transitions continues et fonctionne comme des poids d'arc. Il définit un délai pour les transitions discrètes ainsi que des capacités inférieures et supérieures pour les places. xHPN prend en charge les transitions stochastiques avec une fonction de risque variable. Toutes les transitions ont une condition d'activation supplémentaire [37].

2.6.1 Le formalisme de xHPN

Le formalisme xHPN comprend [37](voir la figure 2.6) :

- Trois processus différents, appelés transitions : transition discrète, stochastique et continue ;
- Deux états différents, appelés places : places discrètes et places continues ;
- Différents arcs : arc normal, d'inhibition et de test.

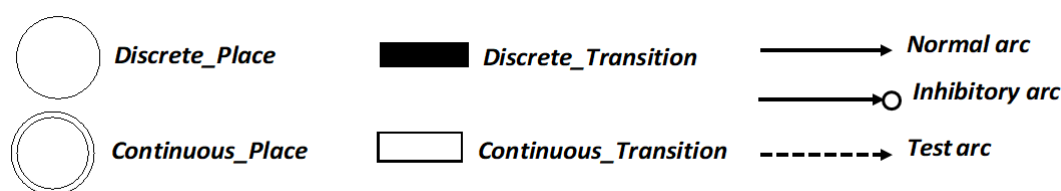


FIGURE 2.6 – Les icônes du formalisme xHPN.

Les places discrètes contiennent une quantité entière, appelée jetons ou marques tandis que les places continues contiennent une quantité réelle non négative.

Ces repères initient des transitions franchissables selon des conditions particulières. Ces tirs entraînent des changements des repères dans les places reliées.

Des transitions discrètes sont fournies avec des délais et des conditions de déclenchement et se déclenchent en premier lorsque le délais associé est dépassé et que les conditions sont satisfaisantes. Ces délais fixes peuvent être remplacés par des valeurs aléatoires réparties exponentiellement, alors, la transition correspondante est appelée transition stochastique

Ainsi, le paramètre caractéristique λ de la distribution exponentielle peut dépendre fonctionnellement des marquages de plusieurs places et est recalculé à chaque instant où la transition respective devient active ou lorsque'un ou plusieurs marquages des places concernés changent.

Sur la base du paramètre caractéristique, le temps de déclenchement suivant $\tau = \text{temps} + \text{Exp}(\lambda)$ de la transition peut être évalué et il se déclenche lorsque ce point dans le temps est atteint.

Les deux - transitions discrètes et stochastiques - se déclenchent en supprimant le poids de l'arc de tous les emplacements d'entrée et en ajoutant le poids de l'arc à tous

les emplacements de sortie. Au contraire, le tir des transitions continues se fait comme un flux continu déterminé par la vitesse de tir qui peut dépendre fonctionnellement des marquages et/ou du temps.

Les places et les transitions sont reliées par des arcs normaux qui sont respectivement pondérés par des nombres réels entiers et non négatifs. Mais aussi des fonctions peuvent être écrites aux arcs en fonction des marquages actuels des places et/ou du temps. Les places peuvent également être reliées aux transitions par des arcs de test, d'inhibition. Ensuite, leurs marques ne changent pas pendant le processus.

Remarque

- Si une place est reliée à une transition par un arc de test appelé aussi arc de lecture, ces arcs permettent de tester le nombre de jetons d'une place sans retirer les jetons lors du tir de la transition, donc le marquage de la place doit être supérieur au poids de l'arc pour permettre le tir.
- Si une place est reliée à une transition par un arc inhibiteur, le marquage de la place doit être inférieur au poids de l'arc pour permettre le tir. Dans les deux cas le marquage des places n'est pas modifié par le tir.
- La conversion d'un marquage discret en un marquage continu est réalisée en connectant une transition discrète à une place continue et la conversion d'un marquage continu en un marquage discret est réalisée en connectant une place continue à une transition discrète. Cependant, la conversion est toujours effectuée par des transitions discrètes, les places discrets ne peuvent influencer que le moment où les transitions continues se déclenchent, mais leur marquage ne peut pas être modifié pendant le processus de tir.

2.7 Conclusion

Les réseaux de Petri (RdPs), qu'ils soient ordinaires, généralisés, colorés, temporisés, temporels ou stochastiques, continus sont des outils graphiques à support mathématique permettant de modéliser, de visualiser et d'analyser des évolutions comportant du parallélisme, de la synchronisation et du partage de ressources.

Dans la classification des processus il est usuel de distinguer les comportements discrets de ceux qui sont continus. La représentation de ces grandeurs et l'état du système sont

habituellement représentés par des variables logiques ou des nombres entiers naturels. A l'opposé, une représentation continue suppose que l'état du système appartient à un domaine continu, et que les grandeurs caractéristiques évoluent de manière continue à l'intérieur de ce domaine. Enfin, certains systèmes présentent à la fois des aspects continus et discrets : il s'agit des systèmes hybrides. On peut donc constater que pour un même système, les aspects continus et discrets coexistent et sont complémentaires.

Le nœud capteur est un système dynamique hybride tel que l'évolution des variables continues (état de la batterie) et les séquences de commutations : détection, envoi, réception(événements discrets dynamique avec une incertitude probabiliste). Un tels systèmes peuvent être modélisés par des RdPs Hybrides.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la modélisation d'un nœud de capteur en interaction avec ses voisins à l'aide des xHPN.

Modélisation d'un RCSF avec récolte d'énergie solaire à l'aide de xHPN.

3.1 Introduction

La gestion de l'énergie dans les RCSFs présente un problème complexe a plusieurs contraintes, les capteurs peuvent fonctionner uniquement sur des petites batteries qui ont une source d'énergie limitée, qui a un impact sur la durée de vie du capteur et par la suite sur la totalité du réseau.

Plusieurs stratégies ont été proposées pour améliorer le mécanisme de conservation de l'énergie des RCSFs, en se basant sur des méthodes de modélisation en simulant la consommation électrique d'un nœud capteur, afin de mieux gérer le processus d'économie d'énergie et évaluer la durée de vie du réseau.

Dans ce chapitre, nous proposons une modélisation d'un système d'économie d'énergie en utilisant le formalisme de xHPN qui combine des aspects discrets et continus. La stratégie clé adoptée dans la solution proposée est de définir les mécanismes de mise en veille dans un nœud de capteur avec récolte d'énergie solaire. Le but est de prolonger la durée de vie des nœuds le plus possible.

3.2 Travaux connexes

Les réseaux de Petri sont largement utilisés comme support de modélisation dans le domaine des RCSFs afin d'évaluer leur comportement avant une installation réelle.

Bachira BOUTOUMI et Nawel GHARBI dans [38] ont proposé une technique d'économie d'énergie et d'efficacité de la latence pour les nœuds de capteurs sans fil full-duplex avec tampon fini, on se basant sur une combinaison de vacances normales et une politique de vacances-travail à deux seuils ($N1, N2$) différents pour basculer le serveur de l'état inactif (état vacances ordinaire) à l'état semi-occupé (état vacances de travail), si sa taille de tampon a atteint le seuil $N2$ pour démarrer la transmission des paquets en file d'attente à un taux inférieur, et passer à l'état occupé (état de service), si sa taille de tampon a atteint le seuil $N1$ à un taux de transmission normal, ou revenir à l'état inactif lorsque le tampon est vide. Les résultats obtenus suite à l'utilisation du formalisme des réseaux de Pétri stochastiques généralisés pour une analyse des performances du modèle, démontre bien que le nœud de capteur avec la politique de vacances de travail à deux seuils est une technique efficace pour prolonger la durée de vie d'un capteur et a également un effet significatif sur la minimisation du délai de latence et de la probabilité de blocage.

Sedda HAKMI et al dans [39] visent à modéliser et à étudier les performances de la transmission radiofréquence (RF) dans les réseaux de capteurs sans fil en utilisant des réseaux de Petri stochastiques généralisés (RdPG ou GSPN).

Le modèle proposé s'appuie principalement sur la théorie de la file d'attente, en particulier les files d'attente prioritaires, dont la particularité est que les demandes arrivantes, qui trouvent un serveur occupé, vont à un endroit virtuel appelé orbite et essayent leur demande après un certain temps aléatoire.

L'étude a été faite sur deux modèles : le premier, les demandes de priorité élevée qui ont une priorité non préventive, sont mises en file d'attente conformément à la discipline FIFO, tandis que dans le second modèle (cas de blocage), on appliquant la discipline préventive aux demandes hautement prioritaires, les requêtes de faible priorité rejoignent l'orbite avant de réessayer la requête jusqu'à ce qu'elles trouvent le serveur libre. L'avantage de l'approche proposée réside dans la puissance expressive qu'offre le formalisme GSPN afin de construire un modèle simple pour la transmission RF dans les réseaux de capteurs. Les résultats de performance obtenus ont montré que le modèle basé sur la priorité préventive améliore les performances du réseau avec une meilleure probabilité de blocage par rapport à une probabilité non préventive, et souligne via le formalisme GSPN l'impact de la

présence de demandes prioritaires sur les performances du réseau. Le modèle proposé peut être mis en œuvre dans des situations de réseaux de capteurs où certaines demandes sont considérées comme plus importantes que d'autres comme : incendie, explosions sonores dans le domaine militaire.

Les auteurs dans [40] présentant une nouvelle modélisation par des réseaux de Petri hybrides chronométrés (THPN) d'agents identiques réactifs et multirôles en réseau de capteurs en rassemblant l'état de l'agent en un ensemble de variables qui caractérisent le statut de chaque processus ; ces variables peuvent être à valeur entière ou à valeur réelle.

OUKAS NOURREDINE et BOULIF MENOVAR dans [20] adoptent une approche relativement peu étudiée dans la littérature en présentant, une modélisation basée sur les réseaux de Petri stochastiques généralisés du processus de charge/décharge de la batterie pour les capteurs dans un RCSF avec capacité de récupération d'énergie renouvelable. Les auteurs utilisent le mécanisme de sommeil et le principe de quantification pour réduire la consommation d'énergie qui est manipulée avec des quantités discrètes afin de permettre au capteur de passer de mode actif ou écoute en mode veille lorsque le niveau quantique de la batterie diminue en dessous d'un seuil prédéfinie pour économiser son énergie et l'augmenter par sa capacité de récolte. Le modèle proposé s'avère capable de prédire le niveau moyen d'énergie de la batterie et le temps de réponse moyen, afin de garantir la continuité du service de l'ensemble du RCSF.

Dans [21] les auteurs proposant une amélioration du modèle [20], par une nouvelle modélisation GSPN qui prend en compte différents taux de récolte d'énergie saisonniers en raison de la disparité des niveaux d'ensoleillement.

Cependant, l'approche améliorée suppose que le taux de récolte est constant pendant toute la journée, ce qui contraste avec les circonstances réelles. Afin d'atténuer ces lacunes, les auteurs dans [22] propose d'améliorer le modèle en adoptant une nouvelle technique pour le mécanisme de sommeil, basé sur des stratégies doubles pour maintenir le nœud de capteur actif la plupart du temps dans le jour, pour obtenir le meilleur comportement du réseau, et configurer le capteur pour qu'il soit en veille dans la nuit la plupart du temps

afin d'économiser de l'énergie.

Les auteurs dans [41] proposent une modélisation de l'interaction d'un nœud de capteur (SN) dans les réseaux de capteurs sans fil avec récupération d'énergie solaire à l'aide de réseau de Petri stochastique généralisé (GSPN). L'approche présentée modélise l'énergie stockée dans la batterie SN en utilisant le principe de quantification. on considérons que le territoire de déploiement des capteurs est soumis à des niveaux d'ensoleillement différents de plus, chaque SN adopte la stratégie du double sommeil pour faire face à la pénurie d'énergie solaire pendant la nuit.

la qualification d'un courant électrique est fréquemment comparée à celui d'un fluide (la tension correspond à la pression d'eau présente dans le tuyau, tandis que l'intensité correspond au débit).

Une batterie électrique produit une différence de tension entre ses deux extrémités, et agit comme une pompe pour produire le courant électrique. Les valeurs de ces unités de mesure est représentée avec des quantités continues donc manipulées avec des variables réelles.

Contrairement au GSPN qui traite l'énergie consommé par un nœud de capteur avec des quantifications discrètes, RdPH combine entre le comportement continu et discret des systèmes et présente l'avantage d'être un modèle puissant pour la description des systèmes hybrides.

Un effort particulier a été apporté à l'étude de cette classe des réseaux de petri pour deux raisons principales. D'abord, elle est suffisamment riche pour permettre une modélisation réaliste de nombreux problèmes. Ensuite, sa simplicité qui permet une conception facile des modèles.

Le table 3.1 représente une synthèse de travaux connexes ainsi qu'une comparaison des modèles.

Notre étude étend les travaux dans [22] car elle fournit une description plus réaliste du système, les auteurs adoptent une nouvelle technique pour le mécanisme de sommeil, basé sur des stratégies doubles dans un capteur avec récolte d'énergie solaire et une modélisation conforme au principe de quantification de l'énergie avec des quantités discrètes.

Référence	Type de RdP	Capteur voisin	Contraintes			Paramètres de performances
			Energy Harvesting	Mécanisme de veille	Perte de packet	
[38]	GSPN	oui			X	latence , énergie
[39]	GSPN	oui			X	énergie
[40]	THRDP	oui			x	latence
[20]	GSPN	oui	X	X		énergie
[21]	GSPN	oui	X	X		énergie
[22]	GSPN	oui	X	X		énergie
[41]	GSPN	oui	X	X		énergie
notre modele	xHRDP	oui	X	X		énergie

TABLE 3.1 – Comparaison des modèles

Notre approche proposé tente d'améliorer le modèle dans [22] en se basent sur l'utilisation des réseaux de Petri hybride étendu (RdPH), car de notre point de vue, xHRDP est le plus approprié pour évaluer la consommation d'énergie des RCSF, on se basent sur son concept de combinaison de comportement continu et discret des systèmes.

3.2.1 Modèle en xRHDP avec un double mécanisme de veille

Nous commençons par donner en premier lieu quelque supposition et définitions adoptées dans ce mémoire avant de passer à la présentation du modèle proposé :

- La durée de vie des nœuds de capteurs dépend de la durée de vie da la batterie.
- L'énergie de la batterie est représenté par une place continue et manipulée par des quantités réels.
- Un double mécanisme de sommeil consiste a mettre durant la journée le nœud de capteur rarement en veille et la plupart du temps éveillé grâce au processus de récupération d'énergie solaire, et fréquemment en veille et rarement éveillé dans la nuit.
- Le nombre des paquets échangés dans les RCSFs peut influencer sur la consommation énergétique des nœuds, et par conséquent sur la durée de vie du réseau.

Le module radio peut être dans trois états différents :

- 1- Ecoute** : le module radio est allumé mais n'est pas utilisé. Ainsi, dans cet état, le noeud capteur n'est ni entrain de transmettre des données ni entrain de recevoir des données. Dans cet état, le capteur consomme néanmoins de l'énergie due à l'écoute continue du canal de transmission.
- 2- Actif** : Respectivement, dans les états RX (l'état de réception) et TX (l'état de transmission), le module radio reçoit et transmet des données.
- 3- Veille** : état sleep ou radio OFF, le noeud capteur entre dans cet état de sommeil pour économiser son énergie et d'augmenter par sa capacité de récolte.

Notre modélisation proposée est illustrée dans la figure 3.1, dans laquelle nous représentons l'interaction entre les parties continues et discrètes qui formant ainsi un modèle hybride.

3.2.2 Description du modèle

Nom de la place	Description	Type	Marquage initiale
Batterie	Représente la batterie du capteur	Continue	C
Sleep	Le capteur est en veille	Discrète	0
Msgs	Contient les messages d'une journée	Discrète	N
Buffer	Messages en attente d'envoi	Discrète	0
SentMsgs	Message transmis au capteurs voisins	Discrète	0
Day	On est en Jour	Discrète	1
Night	On est en Nuit	Discrète	0
Work_OFF	(Work) est en veille	Discrète	0
Not_Full	Contrôle la charge de la batterie	Discrète	0

TABLE 3.2 – Nomenclature et description des places.

Nom de la transition	Description	Type	Délai de tir /Vitesse
Recharging	récolte d'énergie solaire	continue	VR
BeSleep	Mettre le capteur en veille	discrete immédiate	0
Listen	Écoute de réseau	continue	VL
Work	Travail et détection	continue	VW
Init	Réinitialisation du modèle	discrète chronométrée	Init_d
Receive	Recevoire des messages	discrète chronométrée	Receive_d
Send	Envoi des messages	discrète chronométrée	Send_d
T_Night	l'arrivée de nuit	discrète chronométrée	Night_d
T_Day	l'arrivée du jour	discrète chronométrée	Day_d
BeSleepJ	Mettre en veille dans la journée	discrète chronométrée	TSJ
BeSleepN	Mettre en veille dans la nuit	discrète chronométrée	TSN
BeAwake_N	Réveil dans la nuit	discrète chronométrée	TRN
BeAwake_J	Réveil dans le jour	discrète chronométrée	TRJ
BeSleep_Work	Mettre en veille (Work)	discrète immédiate	0
Work_ON	Réveil (Work)	discrète immédiate	0
Is_Full	La batterie est chargée	discrète immédiate	0
Is_Not_Full	La batterie est non rechargée	discrète immédiate	0

TABLE 3.3 – Nomenclature et description des transitions.

L'énergie est une variable continue du système, elle est modélisée par une place continue manipulée par des valeurs réelles positives, la table 3.2 représente une description détaillée des places.

Les transitions décrites dans le tableau 3.3 peuvent être continues ou discrètes immédiates pour les transitions qui n'ont pas besoin de temps pour le tir ou discrètes chronométrées avec une période de temps pour le déclenchement.

Les arcs de test sont associés aux deux types de transitions immédiates et temporelle et les variables sont seulement lues sans être consommées.

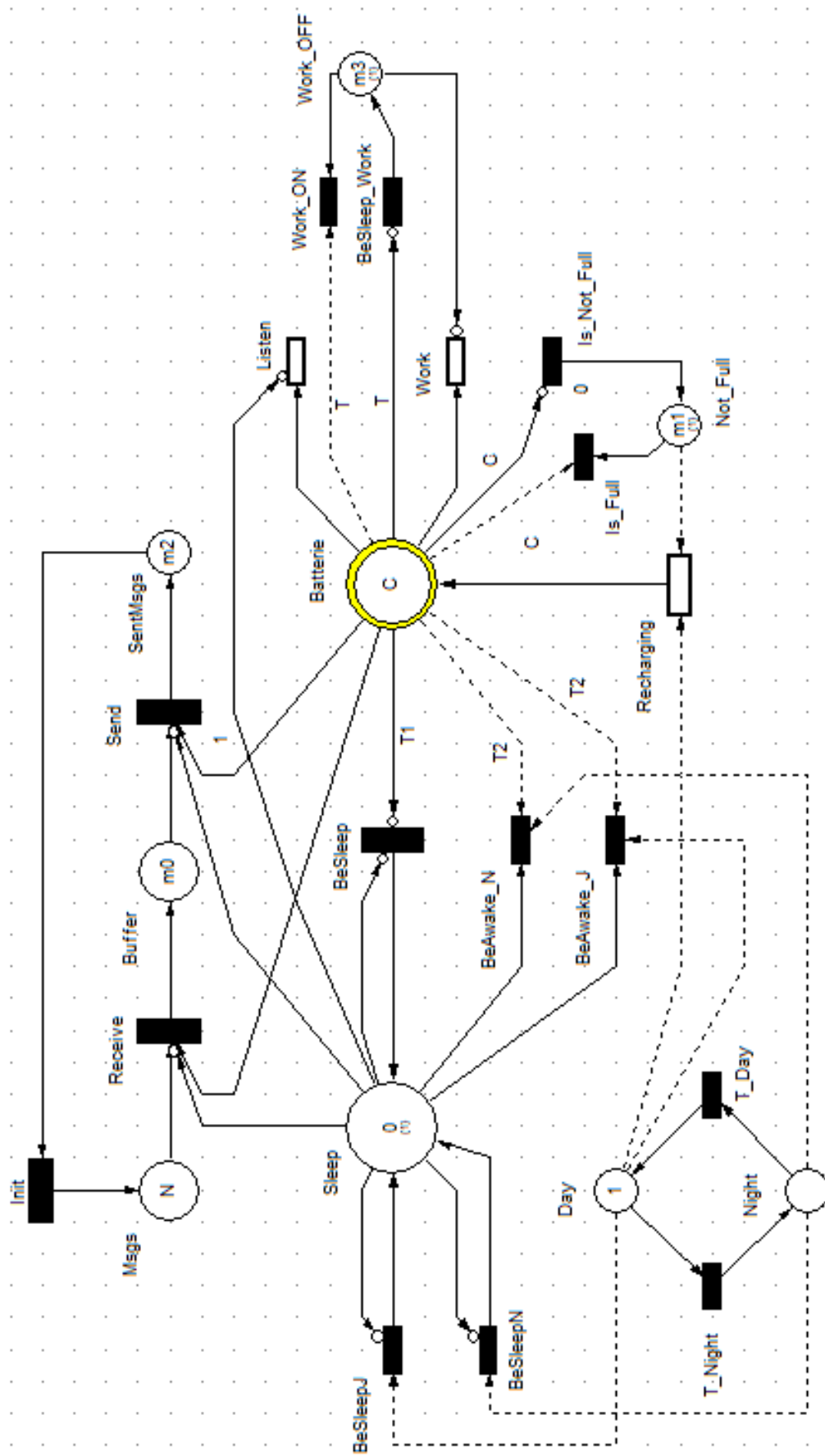


FIGURE 3.1 – Un modèle basé sur les xRDPH pour un capteur avec une double Stratégie de Mise en Veille et récupération d'énergie solaire.

3.2.3 Interprétation du modèle

Lorsque le capteur est activé, il active l'unité de communication pour recevoir des messages, envoie des messages à ses voisins avec la transition d'envoi (SendMsgs), écoute le réseau par la transition d'écoute(Listen) et réalise ses opérations de base par la transition de travail (Work). Les transitions BeSleepJ et BeAwarke_J sont activées uniquement pendant la journée. Alors que dans la nuit, on active les transitions BeSleepN et BeAwarke_N.

Pour conserver l'énergie, le nœud de capteur rejoint périodiquement l'état de sommeil par le déclenchement de la transition BeSleepJ et BeSleepN.

Le seuil T1 représente le niveau d'énergie minimum pour lequel le nœud de capteur puisse être actif (une transition immédiate appelé BeSleep met le nœud de capteur dans 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 égale à T2, grâce à la récupération d'énergie solaire. De plus, dans ce modèle, nous représentons l'énergie stockée dans la batterie par une quantité fluide égale à C manipulée par des valeurs réelles.

3.2.4 Modèle en xRHDP avec un triple modes de veille

Un nœud capteur actif passe la plupart de son temps à attendre un événement, cela signifie que le module radio (écoute active) reste actif sans recevoir, ou même recevoir des données inutiles (sur-écoute), ce la engendre la CPU a dissiper de l'énergie par des applications et des algorithmes de traitement de ces données acquises, les capteurs sont des dispositifs sensibles à des phénomènes naturels qu'ils transforment en signaux analogiques puis valeurs numériques pour pouvoir les traiter, le capteur reste actif sans capter un événement, ce qui gaspille beaucoup d'énergie.

Mécanisme de veille à triple-modes

La solution consiste a établir a chaque composant du nœud de capteur un seuil qui permet sa mise en veille, nous présentant un modèle en xHRDP qui adopte une stratégie de triple modes de veille (voir la figure 3.2 et la figure 3.3).

Mode 03 : Le nœud de capteur dans ce mode, est capable de transmettre/recevoir des messages et écouter la porteuse, collecter les données, et effectuer ces traitements.

Mode 02 : Le nœud dans ce mode désactive le module radio seulement.

Mode 01 : Le nœud dans ce mode désactive en plus la radio, l'unité de captage.

Mode 00 : Dans ce mode, la radio, l'unité de captage et le CPU sont mis en veille.

Description du modèle à triple-modes de veille

Dans la table 3.4 nous décrivons les nouvelles places par apport au modèle à double veilles.

Nom de la place	Description	Type	Marquage initiale
TransceiverSleep	Le module radio en veille	Discrète	0
CPU_OFF	CPU en veille	Discrète	0
Sensor_OFF	Unité de captage en veille	Discrète	0

TABLE 3.4 – Description des nouvelles places du modèle à triple-mode de veille.

La table 3.5, décrit les nouvelles transitions.

Nom de la transition	Description	Type	Délai de tir /Vitesse
BeSleep_TR	Mettre le module radio en veille	discrète immédiate	0
CPU	L'unité de traitement	Continue	VCPU
BeSleep_CPU	Mettre le CPU en veille	discrète immédiate	0
CPU_ON	Réveille le CPU	discrète immédiate	0
Sensing	L'unité de captage	Continue	VS
Sensor_ON	Réveille L'unité de captage	discrète immédiate	0
BeSleep_S	Mettre l'unité de captage en veille	discrète immédiate	0

TABLE 3.5 – Description des transitions du modèle à triple-mode de veille.

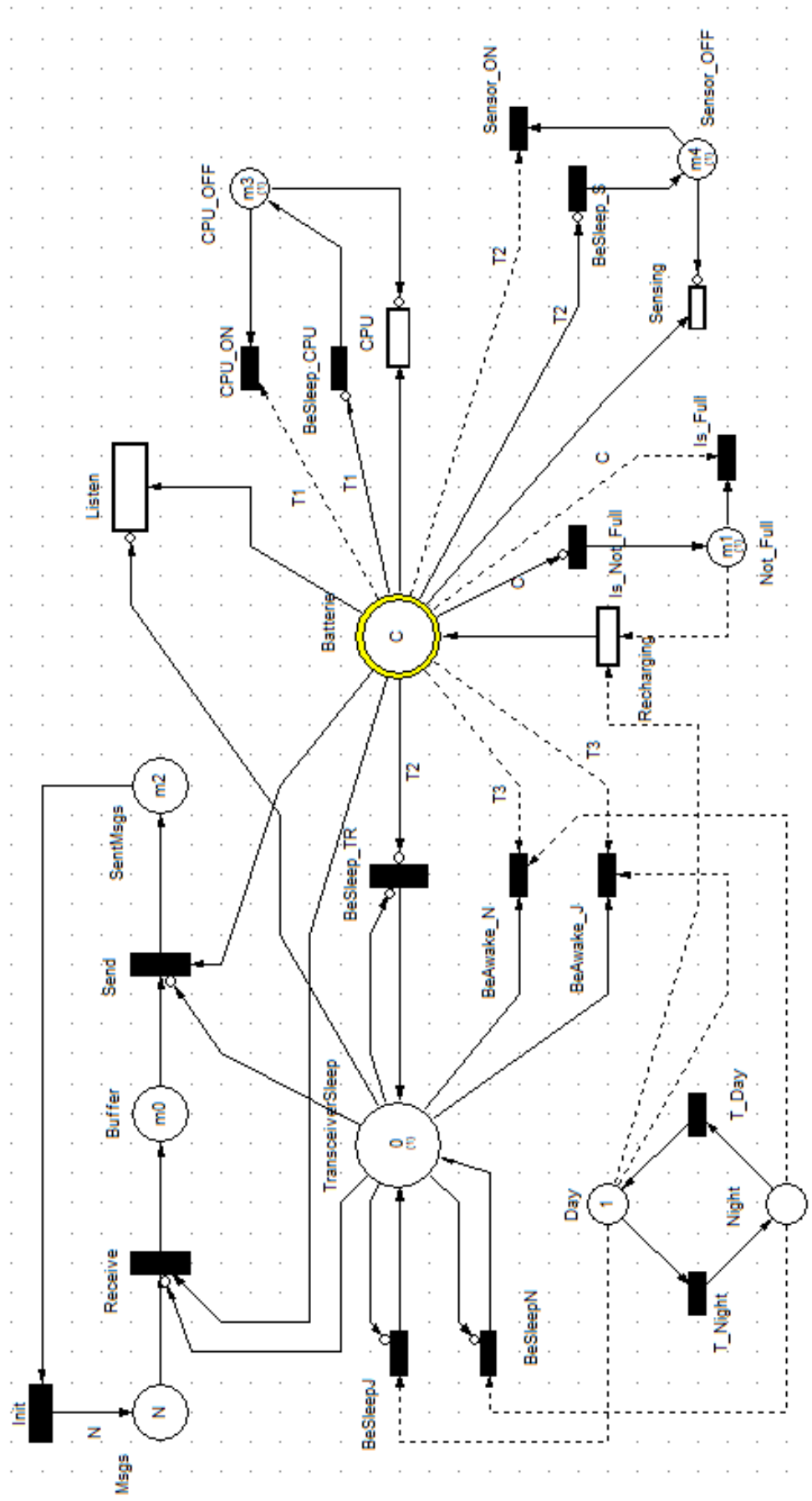


FIGURE 3.2 – xRdPH pour un capteur avec le mécanisme de Triple-modes de veille et récupération d'énergie solaire.

Fonctionnement du modèle proposé

Nous avons défini 3 seuils d'énergie : T3, T2 et T1 ordonnés de plus grand au plus petit. Nous avons défini aussi pour un nœud de capteur, trois modes de veilles (mode 0, mode 1 et mode 2) plus un mode normal de travail (mode 3).

- Si l'énergie est supérieur à T3, alors le nœud de capteur bascule entre mode 3 et mode 2 selon la configuration des transitions : BeAwake_J et BeSleepJ dans le jour et les transitions : BeAwake_N et BeSleepN dans la nuit. Ce premier point représente le mécanisme de veille appelé : Double mécanisme de veille introduit dans [22].
- Si l'énergie devient inférieur à T2 et le capteur est en mode 3, alors nous forçons le capteur d'aller en mode 2 (voir la transition immédiate appelée BeSleep_TR). Le capteur ne peut quitter le mode 2 au mode normal seulement si l'énergie devient supérieure à T3 grâce à la récolte de l'énergie solaire.
- Si l'énergie devient inférieur à T2, alors le capteur joint le mode 1 et ne le quitte pas jusqu'à l'énergie devient supérieure à T2 (voir les transitions : BeSleep_S et Sensor_ON).
- Si l'énergie est inférieur à T1, le nœud de capteur joint le mode 0 et ne le quitte pas jusqu'à l'énergie devient supérieure à T1 (voir les transitions : BeSleep_CPU et CPU_ON).
- Le nœud de capteur ne peut aller au mode normal (mode 3) seulement si l'énergie devient supérieure à T3.

La figure 3.3 résume et illustre la transition entre les différents modes.

La figure 3.4 Présente la performance en termes d'économie d'énergie par rapport au chargement de la batterie.

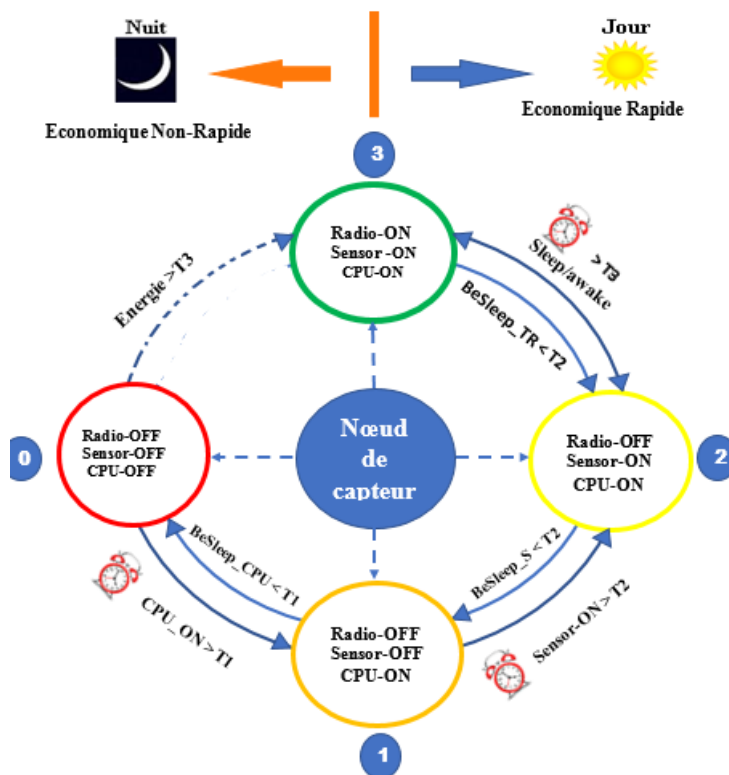


FIGURE 3.3 – La transition entre les différents modes du modèle triple-mode de veille.

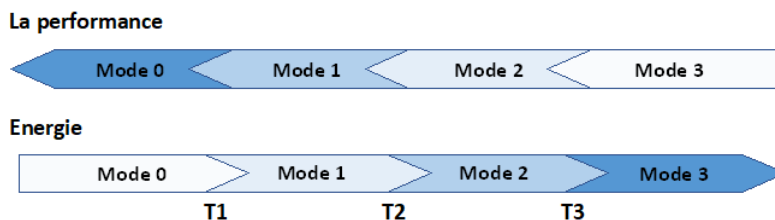


FIGURE 3.4 – Performance énergétique.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté en premier temps, une modélisation avec xRdPH d'un nœud de capteur avec énergie renouvelable on adoptant le double mécanisme de sommeil afin de prolonger la durée de vie de réseau. Ensuite, nous avons présenté une nouvelle approche de mise en veille appelée : mécanisme à triple-modes de veille. Nous avons donné une modélisation avec le xRdPH pour ce dernier.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter une étude expérimentale pour les modèles proposés.

Évaluation des performances des RCSFs avec récolte d'énergie solaire.

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une évaluation des performances par simulation des solutions proposées dans le chapitre 03 afin de prouver la capacité des modèles proposés de prévoir le comportement d'un RCSFs avant le déploiement réel et de prouver l'efficacité de nos approches de fournir une gestion efficace de l'énergie.

À cet effet, nous alimentons les modèles par des valeurs réelles de différents paramètres d'entrée (c.-à-d. le taux de récolte d'énergie, le nombre quotidien de messages servis par un nœud, les valeurs de différents seuils de la mise en veille et autres) et nous analysons les résultats obtenus. Nous considérons le niveau de la batterie (c.-à-d. le pourcentage de l'énergie résiduelle par rapport à l'énergie initiale) comme critère de performance. La simulation est faite sous l'environnement *Visual Object Net++*. L'utilisation de cet outil permet l'évaluation des performances d'un modèle hybride.

4.2 Présentation de l'outil Visual Object Net++

VisObjNet (Visual Object Net ++) est un logiciel de simulation des réseaux de Petri (Discrets et continus) développé par l'Université de technologie Ilmenau, Allemagne. Une attention particulière a été portée à son utilisation pour sa conception facile, simula-

tion rapide et documentation simple et puissante. *VisObjNet* prend en charge différentes classes de réseaux de Petri telles que les RdPs à événements mixtes (continus et discrets), les réseaux standard, les réseaux chronométrés, concept de réservation, priorités, capacités des places et bien d'autres.

L'interface graphique de *VisObjNet* permet la construction, la configuration, la validation et l'exportation des RdPs. En plus, il fournit un outil de présentation des résultats de simulations sous forme des graphes et autres fonctionnalités [42].

4.3 Les hypothèses de simulation

Nous considérons les hypothèses suivantes lors pour la simulation :

- nous choisissons les nœuds de capteur de type MicaZ.
- chaque capteur est équipé d'un panneau photovoltaïque de 10 Cm^2 .
- chaque capteur est dédié d'une batterie rechargeable de capacité égale à 5 Wh.
- tous les messages échangés sont supposés de taille fixe.
- le nombre journalier des messages servis par un capteur est égale à N.
- les capteurs sont déployés sur diverses régions avec diverses orientations des panneaux solaires

4.3.1 Valeurs des paramètres d'entrée pour la simulation

Le tableau 4.1 présente les paramètres techniques de consommation d'énergie pour les fonctions de la radio (IEEE 802.15.4) d'un nœud de capteur MicaZ [43].

Fonction	MicaZ
Transmission d'un message	52.2 mW
Réception d'un message	56.4 mW
Écouter le canal	56.4 mW
En veille	3 μ W

TABLE 4.1 – Les paramètres techniques de la radio IEEE 802.15.4.

La Table 4.2 présente les valeurs des taux de récolte d'énergie dans diverses wilayas de

l'Algérie avec divers types d'orientations des panneaux solaires. Ces taux varient selon la durée journalière moyenne d'ensoleillement dans chaque région et selon l'orientation du panneau photovoltaïque [44].

Wilaya	Orientation du panneau solaire	Taux moyen de récolte
Boumerdes	Horizontal	0.172 mWH/s
In-Salah	Horizontal	0.182 mWH/s
Annaba	Horizontal	0.172 mWH/s
Oran	Horizontal	0.167 mWH/s
Media	Horizontal	0.180 mWH/s
Boumerdes	Incliné verticalement	0.102 mWH/s
In-Salah	Incliné verticalement	0.099 mWH/s
Annaba	Incliné verticalement	0.102 mWH/s
Oran	Incliné verticalement	0.099 mWH/s
Media	Incliné verticalement	0.110 mWH/s

TABLE 4.2 – Les valeurs des taux de récolte d'énergie solaire

4.4 Étude comparative

Dans cette étude, nous allons faire une comparaison analytique entre les trois modèles cités dans la Table 4.3.

Modèle	Description
GSPN [22]	Un modèle de type RdPSGs pour un capteur avec une double stratégie de mise en veille
xRdPH-Double	Un modèle basé sur les xRdPH pour un capteur avec une double stratégie de mise en Veille.
xRdPH-Triple	Un modèle basé sur les xRdPH pour un capteur avec un triple modes de veille.

TABLE 4.3 – Les modèles de comparaison.

Nous alimentons les modèles considérés pour l'étude comparative par les valeurs des paramètres d'entrée présentées dans la Table 4.4.

Paramètre	Valeur	Description
Capacité de la batterie	5 WH	Capacité de la batterie
N	40	Nombre journalier de messages
T3	40 %	Barrière de sommeil pour la radio
T2	20 %	Barrière de sommeil pour le captage
T1	10 %	Barrière de sommeil pour le CPU
Énergie de transmission	52.2 mWH/msg	—
Énergie de réception	56.4 mWH/msg	—
Énergie d'écoute	0.015 mWH/s	—
Work	0.0056 mWH/s	—
TSJ	1 minute	Temps de sommeil dans le jour
TSN	2 minute	Temps de sommeil dans la nuit
TRJ	2 minute	Temps de réveil dans le jour
TRN	1 minute	Temps de réveil dans la nuit

TABLE 4.4 – Valeurs des paramètres de simulation pour l'étude comparative

4.4.1 Premier scénario : déploiement sur Boumerdes

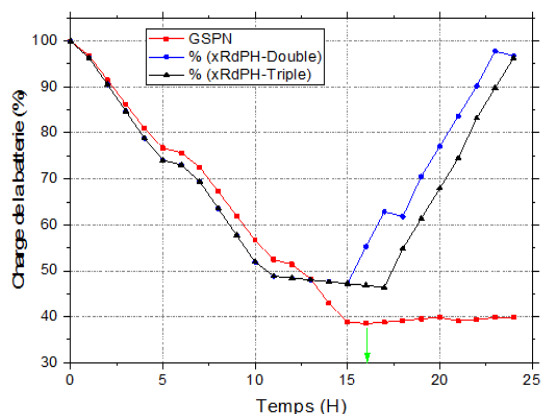
La Figure 4.1 présente la charge de la batterie en fonction de temps pour une durée de 24 heures pour des capteurs déployés dans la région de Boumerdes avec un panneau horizontal (Figure 4.1 (a)) et incliné verticalement ((Figure 4.1 (b))).

Le nombre d'heures moyen d'ensoleillement dans la région de Boumerdes est 7,75 heures.

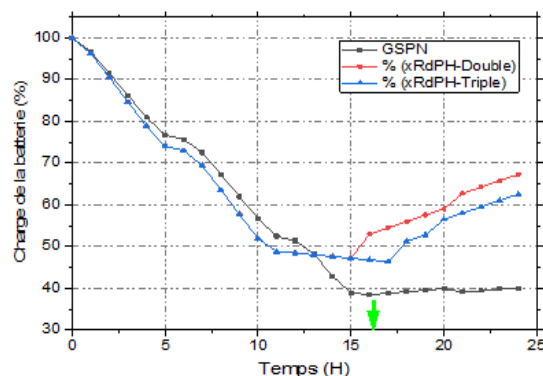
Nous remarquons que la charge de la batterie diminue dans la nuit et augmente dans la partie allons de 16 à 24 heures qui correspondent à la durée moyenne d'ensoleillement dans la région de Boumerdes.

La récolte de l'énergie est plus haute avec les panneaux horizontaux.

On déduit que la position de panneau et le nombre d'heures d'ensoleillement a un impacte sur la durée de vie de capteur.



(a) Panneau horizontal

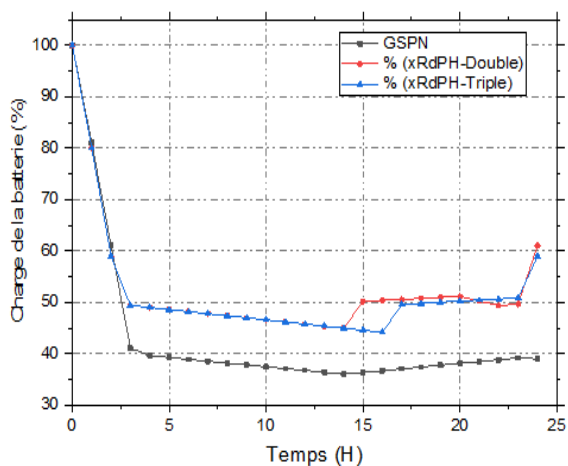


(b) Panneau vertical

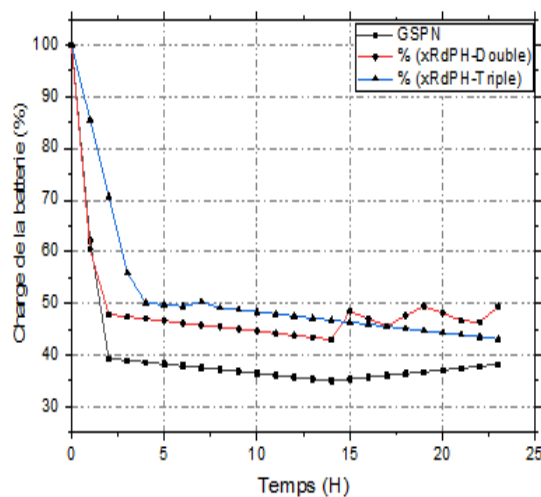
FIGURE 4.1 – La charge de la batterie durant 24 heures sur la région de Boumerdes

4.4.2 Deuxième scénario : impact du nombre journalier des messages

Les graphes dans la figure 4.2 présentent le comportement de la batterie dans une durée de 24 heures pour des capteurs installés dans la région de Boumerdes avec un panneau horizontal et une variation du nombre journalier des messages servis, afin d'étudier l'influence de ces derniers sur la durée de vie d'un capteur.



(a) Nombre de messages =200 Mgs



(b) Nombre de messages =300 Mgs

FIGURE 4.2 – Impact du nombre journalier des messages sur la charge de la batterie

Par l'analyse des graphes, on déduit que le nombre quotidien des messages, a une influence importante sur le niveau de la batterie. Plus le nombre de messages augmente, la charge de la batterie diminue.

4.4.3 Troisième scénario : impact de valeurs des seuils

Nous voulons étudier le comportement d'un capteur dans les trois modèles et dans une durée de temps de 10 jours soit 240 heures. Dans cette étude, nous considérons que chaque capteur est équipé par un panneau photovoltaïque horizontale, les capteurs sont déployés dans la région de Boumerdes, le nombre de messages servis par jour égale à 40 messages. Les valeurs des seuils utilisés sont comme suit : $T_3= 40\%$, $T_2=30\%$, $T_1=10\%$

Les résultats sont présentés dans la Figure 4.3.

Le nœud de capteur dans le modèle xRdPH-Double et xRdPH-Triple, alterne entre le T_2 et T_3 , et quitte souvent l'état veille et récupère la charge qui est consommé en effectuant ces Fonctions. Par contre dans le modèle GSPN la charge diminue en fonction de temps jusqu'à attendre un seuil de mise en veille et un niveau de charge stable.

Le choix de seuils joue un rôle important pour permettre à un nœud de capteur de se mettre en veille et conserver de l'énergie pendant la nuit, afin de la récupérer par récolte de l'énergie dans la journée.

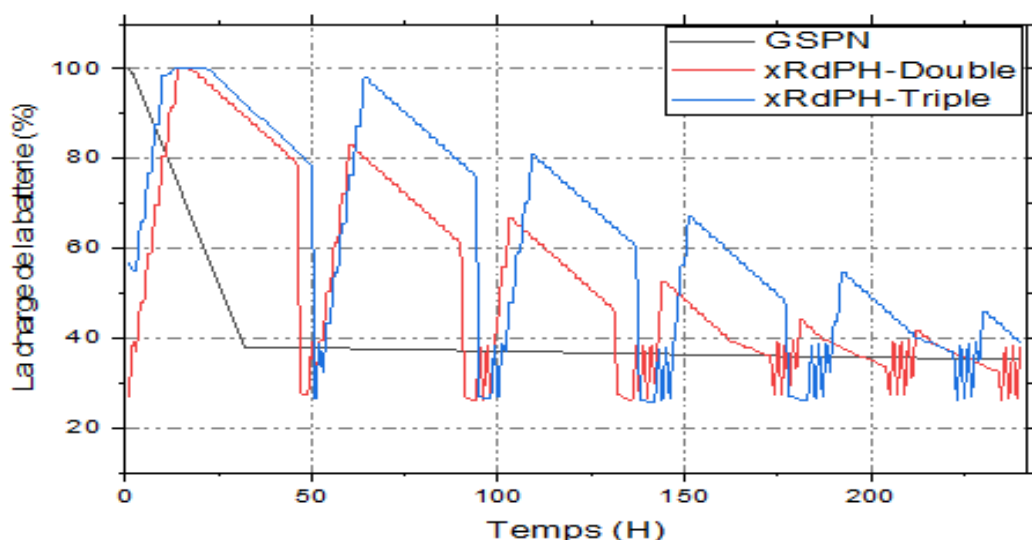


FIGURE 4.3 – Impact de valeurs des seuils de veille sur la charge de la batterie

4.5 Étude de cas

4.5.1 Impact du taux de récolte d'énergie sur la charge de la batterie

Le taux de récolte de l'énergie varie selon plusieurs raisons. Parmi elles, nous pouvons citer : la durée d'ensoleillement dans la région où les nœuds de capteurs sont installés, l'orientation des panneaux solaires et bien d'autres.

La Figure 4.4 représente les variations de la charge de la batterie dans diverses régions avec diverses orientations des panneaux solaires en utilisant l'approche à trois modes de veille.

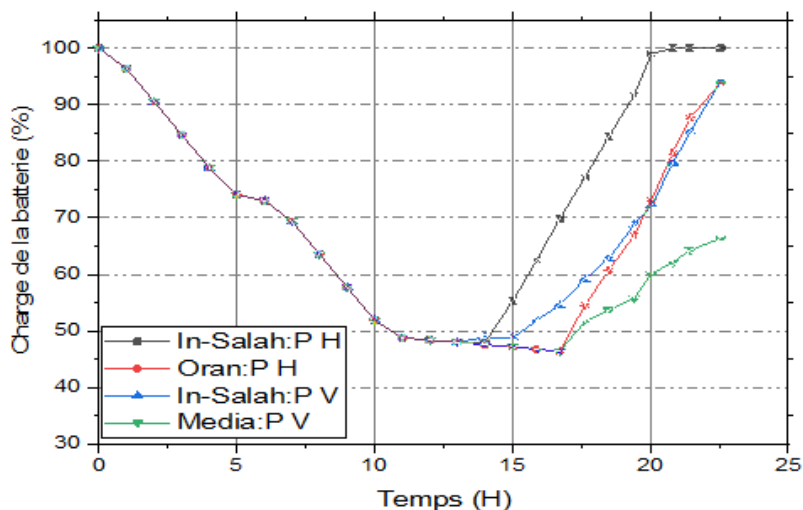


FIGURE 4.4 – Impact du taux de récolte d'énergie sur la charge de la batterie

La Figure 4.4 montre que la batterie est rechargée dans une courte durée, pour les capteurs dans les conditions où le nombre d'heures d'ensoleillement est élevée et avec des panneaux solaires horizontaux.

4.5.2 Impact du nombre de messages sur la charge de la batterie

Dans ce cas nous étudions le taux moyen de charge de la batterie en fonction de nombre de message envoyer par jour.

la Figure 4.5 montre que le taux moyen de charge de la batterie d'un capteur dans les trois modèles diminue avec l'augmentation de nombre de message jusqu'à atteindre un nombre limite sa capacité d'envoi a cause de sa mise en veille.

Le taux moyen de charge de batterie reste stable pour ce qui suit à cause de l'alternation de capteur entre d'état de réveil et reprend ces fonctionnalités et l'état de sommeil qui économise son énergie.

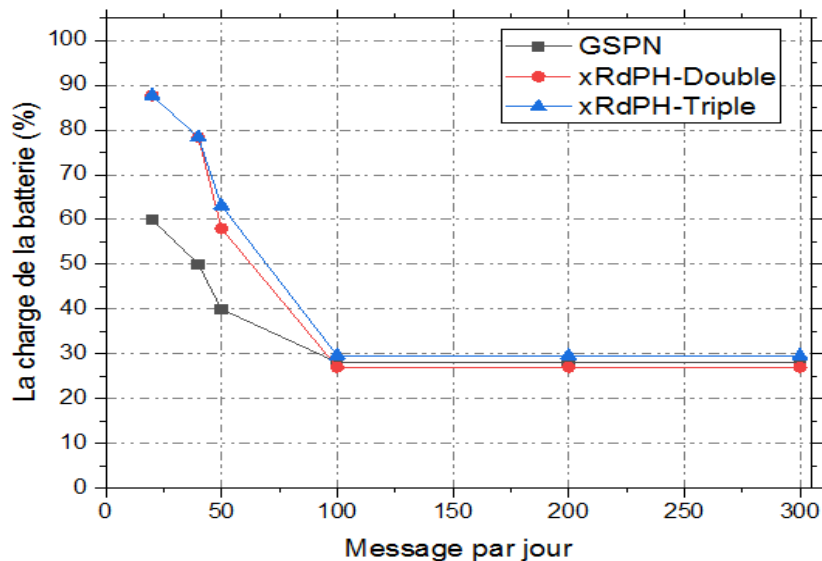


FIGURE 4.5 – Impact du nombres de messages sur la charge de la batterie

4.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude comparative entre nos propositions et autre approche récemment publiée. L'étude a validé et prouvé la capacité de l'approche proposée de prévoir le comportement d'un RCSF avant le déploiement réel. Nous avons étudié l'influence de différentes contraintes réelles sur la charge de la batterie. Une étude de cas de divers scénarios de déploiement dans différentes wilayas de l'Algérie est présentée et discutée.

En revanche, la mise en veille du module radio est obligatoire pour une gestion efficace de l'énergie dans les réseaux de capteurs, même avec la présence de la récolte d'énergie solaire, à cause de la non-disponibilité de la source d'énergie renouvelable pendant la nuit

et le grand nombre de paquets servis dans certains RCSFs. L'approche proposée donne la meilleure gestion grâce à la capacité de configurer les paramètres de performances selon les contraintes de déploiement.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons défini les principaux termes et concepts propres au domaine des réseaux de capteurs sans fil, nous avons mis en avant la principale problématique à résoudre qui est une gestion performante de l'énergie d'un nœud de capteur sans fil capable de collecter de l'énergie provenant d'une source d'énergie renouvelable solaire.

En suit, nous avons présenté le formalisme de réseaux de petri hybrides étendus (xRdPH) qui nous a permis de proposer des solutions de modélisation des approches basées sur le principe de mise en veille d'une stratégie double et triple modes de veille pour prolonger la durée de vie des RCSF. Les xRdPH parviennent à remplir l'ensemble des caractéristiques fondamentales des modèles formels et à répondre aux besoins de notre problématique qui consiste à estimer la durée de vie du réseau en raison de leur représentation graphique qui aide à l'analyse et l'évaluation des performances et une estimation de la consommation d'énergie au sien d'un capteur.

Comme résultat, nous avons constaté que la mise en veille des composants de capteur par un choix des seuils est l'une des solutions qui peuvent assurer une gestion performante de la consommation d'énergie pour les capteurs et pour prolonger la durée de vie de réseau.

Enfin, la porte est ouverte à toute amélioration des modèles proposés. La considération d'autres types d'énergie renouvelables est un autre axe pour la modélisation et l'évaluation.

Bibliographie

- [1] SU Weilian et al A AKYILDIZ Ian F. Survey on sensor networks. *Communications magazine,IEEE*, 40(8) :102–114, 2002.
- [2] Sarra MESSAI. Gestion de la mobilité dans les réseaux de capteurs sans fil. *Thèse de Doctorat,Préparée dans le cadre d'une cotutelle entre l'Université Ferhat Abbas Sétif 1 et l'Université Claude Bernard Lyon 1*, 2019.
- [3] MADJDOB Ismail ROUAM Rania. Optimisation de déploiement et de localisation de cible dans un réseau de capteur sans fil. *Mémoire Master,AMOUBouira*, 2016.
- [4] M. Marot A. Delye, V. Gauthier and M. Becker. Etat de l'art sur les réseaux de capteurs. *Rapport de Recherche INT N-05001RST GET-INT, UMR5157 SAMOVAR,Institut National des Télécommunications, Evry, France,,* 2005.
- [5] Doumi Abdelmoumain. La sécurité des communications dans les réseaux de capteurs sans fils. *Mémoire Master,UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA*, 2018.
- [6] LEBIB Lynda ANKI Drifa. Routage avec conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. *Mémoire Master,UNIVERSITE Abderrahmane Mira de Béjaia*, 2016.
- [7] Diery Ngom. Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau. *Thèse de Doctorat,UNIVERSITE UNIVERSITE DAKAR*, 2016.
- [8] Kaci BADER. Détection d'intrusions dans les réseaux de capteurs sans fil. *Thèse de Master,UNIVERSITE IFSIC-Rennes 1*, 2010.

-
- [9] Feriel OUADI LydiaDJOUMI. Modélisation et évaluation de performances des protocoles mac de ieee802.15.4 des réseaux de capteurs sans fil. *Thèse de Master, UNIVERSITE Abderrahmane Mira de Béjaia*, 2021.
- [10] Naidja Miloud. Auto-adaptation dans les rcsf hétérogènes pour des e-applications. *Thèse de Doctorat, UNIVERSITE de Batna*, 2018.
- [11] Alcherio PUGH, Jim et MARTINOLI. Local range and bearing sensing using infrared transceivers in mobile robotics. *Swarm-Intelligent Systems Research Group Doi*, page 10.1.1.147.6376, 2004.
- [12] LAN-MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society – 802.15.1 IEEE Standard for Information technology. Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for wireless personal area networks (wpans). *IEEE Std 802.15.1*, 2002.
- [13] BENTAMA Adnan RACHIDI Abdelhafid et KHATORY Abdellah BAKKARI, Mohammed. Implémentation du wireless personal area network (wpan) dans les pme marocaines : cas du protocole zigbee. *Colloque international sur le monitoring des systèmes industriels ,marrakech – Maroc, CIMSI 2014*.
- [14] Manuel CAMUS. Architecture de réception rf très faible coût et très faible puissance. *Application aux réseaux de capteurs et au standard ZigBee, Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III*, 2008.
- [15] Jianliang et LEE ZHENG. Myung j. will ieee 802.15. 4 make ubiquitous networking a reality? : a discussion on a potential low power, low bit rate standard. *IEEE Communications magazine*, 42(6) :140–146, 2004.
- [16] Friedemann ROMER, Kay et MATTERN. The design space of wireless sensor networks. *Wireless Communications, IEEE*, 11(6) :54–61, 2004.
- [17] Une enquête sur les réseaux de capteurs. *magazine des communications IEEE*, 40 :102–114.
- [18] Les impacts de la technique de mise en veille sur la consommation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil. *Memoir de Master, Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou*.
- [19] Application de la redondance pour la surveillance par réseau de capteur sans fil :cas du réseau de capteur image sans fil. *Thèse de Doctorat, Université d’Oran*.

-
- [20] Oukas Nourredine and Boulif Menouar. A petri net modeling for wsn sensors with renewable energy harvesting capability. In *International Conference in Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems*, pages 524–534, 2019.
- [21] BADIS Lyes OUKAS Nourredine, BOULIF Menouar. A new gspns-model for sensors in solar ehwsns, considering seasonal sunshine levels and sleeping mechanism based on channel polling schedul.
- [22] Nourredine Oukas, Menouar Boulif, Hadda Hadiouche, and Chaima Bengharabi. A new petri nets for wsns to model the behaviour of solar-energy harvesting sensors with double sleeping strategy. In *2022 2nd International Conference on Computing and Information Technology (ICCIT)*, pages 237–242. IEEE, 2022.
- [23] Mécanismes d'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs. In *2e Conférence internationale sur les réseaux à large bande, 2005.*, pages 724–732.
- [24] Broblimatique de la consommation d'énergie dans le reseau de capteur sans fil. *Thèse de Doctorat, Université d'Oran.*
- [25] GROS PLAN SUR. Le piégeage et la récolte de l'énergie.
- [26] Thierry Antoine-Santoni. Vers une application d'un réseau de capteurs sans fil dans la problématique des feux de forêt : Modélisation, simulation et plate-forme expérimentale. 2007.
- [27] De m-uml vers les réseaux de petri nested nets : Une approche basée transformation de graphes. *Thèse de doctorat, Université de Mentouri, Constantine.*
- [28] Outils de modélisation et d'évaluation de performances. <http://mural.uv.es/abelfa/SlidesRdP.pdf>.
- [29] Une approche intégrée mobile-uml/réseaux de petri pour l'analyse des systèmes distribués à base d'agents mobiles. *Thèse de doctorat, Université de Mentouri, Constantine.*
- [30] Timed petri nets : Theory and application. *Kluwer Academic Publishers.*
- [31] Une approche de transformation de diagrammes d'activités oriente aspects vers les réseaux de pétri colores basée sur la transformation de graphes. *Mémoire de master, Université de constantine2.*
- [32] Les réseaux de petri stochastiques colorés : Application à l'analyse des systèmes répartis en temps réel. *Technical report, Université P. M. Curie.*

-
- [33] A modeling and analysis tool for discrete events systems : continuous petri net. *Performance Evaluation*, 33 :175–199.
- [34] Du grafctet aux réseaux de petri. *Paris, Edition Hermés*.
- [35] L’outil réseaux de petri hybrides dans les réseaux de communication : dynamique des transmissions et étude de comportement. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, Lavoisier, pages 73–94.
- [36] Kamel Fedaoui. *Automatisation de la détermination de l’ordre d’usinage des pièces mécaniques*. PhD thesis, Université de Batna 2, 2007.
- [37] Pnlib an advanced petri net library for hybrid process modeling. *University of Applied Sciences, Department of Engineering and Mathematics Am Stadtholz ,Bielefeld*.
- [38] Politique de vacances-travail à deux seuils pour améliorer la consommation d’énergie et la latence dans les wsn. In *Conférence internationale sur la théorie des files d’attente et les applications réseau*, pages 168–181.
- [39] Ouiza et Aïssani Djamil Hakmi, Sedda et Lekadir. Application des réseaux de petri stochastiques généralisés à la modélisation des performances de la communication rf dans les réseaux de capteurs. In *Conférence internationale sur la vérification et l’évaluation des systèmes informatiques et de communication*, pages 33–47.
- [40] Mécanisme de sommeil intelligent pour les réseaux de capteurs sans fil. *Journal informatique égyptien*, 14 :109–115.
- [41] Nourredine Oukas and Menouar Boulif. Sensor performance evaluation for long-lasting eh-wsns by gspn formulation, considering seasonal sunshine levels and dual standby strategy. *Arabian Journal for Science and Engineering*, pages 1–15, 2022.
- [42] Newton maruyama,paulo eigi miyagi. *Curso de Visual Objetc Net++*.
- [43] Wei Ye, Fabio Silva, and John Heidemann. Ultra-low duty cycle mac with scheduled channel polling. In *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 321–334, 2006.
- [44] MR Yaiche, A Bouhanik, SMA Bekkouche, A Malek, and T Benouaz. Revised solar maps of algeria based on sunshine duration. *Energy Conversion and Management*, 82 :114–123, 2014.

-
- [45] BESSAOUD Karim MALKI Meriem. Algorithme distribué pour l'économie d'énergie dans un réseau de capteurs sans fil. *Mémoire Master, UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS - MOSTAGANEM*, 2017.
- [46] energyefficient communication protocol for wireless sensor networks. *In the Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences, Hawaii*.
- [47] Analysis of asynchronous concurrent systems by timed petri nets. *Technical Report n120, Laboratory for Computer Science, MIT Cambridge, MA*.
- [48] L'utilisation conjointe des réseaux de petri stochastiques et des processus de markov pour la modélisation, l'analyse et l'évaluation des performances d'un système de production : Ligne d'emboutissage de l'entreprise b.a.g batna. *These de Magister, UNIVERSITE de BATNA*.
- [49] Properties of continuous models of transfer lines with unreliable machines and finite buffers. *IMA Journal of Mathematics Applied Business Industry*, (6) :281–308.
- [50] Etude et analyse des systèmes dynamiques et hybrides :approche par les réseaux de petri et automates hybrides linéaires. *Thèse de Magister, Université d'Oran*.
- [51] Hassane David, René et Alla. Sur les réseaux de petri hybrides. *Discrete Event Dynamic Systems*, 11 :9–40.
- [52] Hassane David, René et Alla. *Réseaux de Petri discrets, continus et hybrides*, volume 1.
- [53] Nesrine Smata, Cherif Tolba, Dalila Boudebous, Senouci Benmansour, and Jaouad Boukachour. Modélisation de la chaîne logistique en utilisant les réseaux de pétri continus. In *9e Congres International de Genie Industriel*, 2011.
- [54] Lennart et Hofestädt Ralf Brinkrolf, Christoph et Ochel. Vanesa : un environnement de modélisation et de simulation de réseau de petri fonctionnel hybride open-source en biologie des systèmes. *Biosystèmes*, 210.

Webographie

[Web1] <http://www.mytopschool.net>, Date de la dernière visite 13/04/2022.

[Web2] <http://www.tinyos.net>, Date de la dernière visite 10/05/2022.

[Web3] <http://www.alertsystems.org>, dernière visite 14/03/2022.