

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA BOUMERDÈS



FACULTÉ DES SCIENCES  
THÈSE DE DOCTORAT

Présentée par :

M<sup>r</sup> NOURREDINE OUKAS

Filière : Informatique

Option : Informatique

---

MODÉLISATION DES EH-WSNs À  
CAPTEURS NON FIABLES

---

Devant le jury :

M. BERRICHI ALI	Prof. UMBB	Président du jury
M. BOULIF MENOVAR	Prof. UMBB	Directeur de thèse
M. AMAD MOURAD	Prof. UAMOB	Examineur
M. RIAHLA MOHAMED AMINE	Prof. UMBB	Examineur
M. ABBAS AKLI	MCA UAMOB	Examineur
M. ATIF KARIM	MCA USTHB	Examineur

Année Universitaire : 2022 - 2023

*A toute ma famille  
A mes chers camarades  
A mes professeurs*

...

*Je dédie cette thèse  
Nourredine*

## RÉSUMÉ

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) présentent un inconvénient majeur lié à la non fiabilité des capteurs. Ceci est dû à l'épuisement de l'énergie stockée dans leurs petites batteries qui est la cause principale de la majorité des pannes de ces réseaux. A cet effet, l'objectif principal de notre investigation est la détermination de solutions permettant aux RCSFs d'économiser de l'énergie. L'utilisation des énergies renouvelables de l'environnement pour alimenter les capteurs représente une des solutions efficaces pour remédier à ce problème. Néanmoins, les RCSFs ont besoin d'utiliser d'autres stratégies de conservation d'énergie pour assurer la continuité et la qualité de service, surtout, dans le cas de déploiements à long-terme. En vue de cela, implanter un mécanisme de veille intelligent permet d'augmenter la durée de vie des batteries ; ce qui engendrera des effets positifs sur tout le réseau.

L'évaluation des performances des RCSFs par des outils de simulations et/ou de modélisation est nécessaire pour prévoir le comportement du réseau avant son installation réelle. Ceci évitera de transgresser la contrainte du budget alloué. Parmi les outils de modélisation les plus performants, les Réseaux de Petri (RdP) avec leurs différentes extensions permettent à la fois de modéliser et d'évaluer les performances des RCSFs.

Dans ce manuscrit, nous proposons une modélisation basée sur les RdPs Stochastiques Généralisés (RdPSGs) et RdPSGs Colorés, en tenant compte diverses circonstances et contraintes de déploiement réel. Ensuite, par une analyse expérimentale et une étude de cas, nous montrons comment utiliser les modèles proposés afin de trouver le paramétrage qui permet au RCSF d'assurer les performances escomptées.

**Mots clés :** Réseaux de capteurs sans fil, Récupération d'énergie renouvelable, Réseau de Petri, Pannes des capteurs, Mécanisme de veille, Évaluation de performances.

## المخلص

تعاني شبكات اللواقط اللاسلكية من عدم موثوقية مستشعراتها. إن نفاذ الطاقة المخزنة في البطاريات الصغيرة يعتبر السبب الرئيس لغالبية الأعطال. يركز الباحثون جهدهم للوصول إلى حلول ناجعة لتوفير الطاقة. يعد استخدام الطاقات المتجددة من البيئة لتشغيل المستشعرات من بين الحلول الفعالة لمعالجة هذه المشكلة. ومع ذلك، تحتاج شبكات الاستشعار اللاسلكية إلى استخدام تقنيات أخرى للحفاظ على الطاقة على الرغم من استخدام الطاقة المتجددة للبقاء على قيد الحياة في مجالات الاستغلال طويلة الأمد. لذلك يستخدم المصممون آلية النوم الذكية لأجل التمديد في عمر هذا النوع من الشبكات. من ناحية أخرى، يتطلب تقييم أداء شبكات اللواقط اللاسلكية أدوات محاكاة أو نمذجة للتنبؤ بسلوك الشبكة قبل التطبيق الفعلي لها. إن نمذجة شبكات اللواقط اللاسلكية بواسطة النماذج الرياضية تجعل من الممكن تقييم أدائها بقم دقيقة. من بين أقوى الأدوات، نجد شبكات بيترى بشتى أنواعها كالمعممة والملونة التي تسمح بنمذجة وتقييم أداء شبكات اللواقط اللاسلكية.

في هذه الأطروحة نقدم نماذج متعددة مصممة بواسطة شبكات بيترى بعد دراسة شاملة لمجال بحثنا وإجراء مقارنات بين النماذج المتوفرة، وذلك مع مراعاة الظروف والقيود المختلفة للنشر الحقيقي كالأعطال وإمكانية إعادة شحن البطاريات بتجميع الطاقة من المحيط. بعد ذلك، من خلال تحليل تجريبي ودراسة حالة، نوضح كيفية استخدام النماذج المقترحة من أجل العثور على الإعداد الذي يسمح لشبكات اللواقط اللاسلكية بضمان الأداء المرجو من نشرها.

## الكلمات المفتاحية

شبكات اللواقط اللاسلكية، تجميع الطاقة المتجددة، شبكات بيترى، أعطال اللواقط، آلية النوم، تقييم الأداء

## ABSTRACT

Wireless sensor networks (WSNs) have a major drawback related to the unreliability of the sensors. This is due to the depletion of the energy stored in their small batteries, which is the main cause of the majority of failures of these networks. To this end, the main objective of our investigation is the determination of solutions allowing RCSFs to save energy. Harvesting renewable energies from the environment to power the sensors represents one of the effective solutions to remedy this problem. Nevertheless, RCSFs need to use other energy conservation strategies to ensure continuity and quality of service, especially in the case of long-term deployments. In view of this, implementing an intelligent standby mechanism makes it possible to increase the lifespan of the batteries; which will have positive effects on the entire network.

The performance evaluation of RCSFs by simulation and/or modeling tools is necessary to predict the behavior of the network before its actual installation. This will avoid violating the budget constraint. Among the most powerful modeling tools, Petri nets (PNs) with their different extensions allow both to model and to evaluate the performance of WSNs.

In this manuscript, we propose a modeling based on Generalized Stochastic PNs (GSPN) and Colored GSPN, taking into account various circumstances and constraints of actual deployments. Then, through an experimental analysis and a case study, we show how to use the proposed models in order to find the setting that allows the WSN to ensure the expected performance.

**Keywords :** Wireless sensor networks, Renewable energy harvesting, Petri nets, Breakdowns of sensors, Sleeping mechanism, Performance evaluation.

# REMERCIEMENTS

**A**u Nom d'Allah, Le Tout Miséricordieux, Le Très Miséricordieux, et prières et paix sur Le Plus Noble des prophètes et sur Sa famille et Ses compagnons. Après un travail de longue haleine, grâce à Allah Le Tout Puissant, nous sommes arrivés au terme de ce travail de recherche qui s'inscrit dans le cadre de ma thèse de doctorat, louange à Allah.

Mes plus sincères remerciements s'adressent à mon directeur de thèse, Professeur BOULIF Menouar, pour ses précieux conseils. Merci pour votre confiance, votre disponibilité et vos encouragements.

J'adresse également mes vifs remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail. A Monsieur le Professeur BERRICHI Ali, pour avoir accepté de présider le jury, et à Messieurs Pr. AMAD Mourad, Dr. ATIF Karim, Dr. ABBAS Akly et Pr. RIAHLA Mohamed Amine pour avoir accepté d'examiner mon travail.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres du laboratoire LIMOSE de l'université de Boumerdès et notamment à son directeur, Monsieur le Professeur MEZGHICHE Mohamed.

Finalement, je remercie ma famille et tous ceux qui m'ont encouragé et supporté avec les hauts et les bas tout au long de ce travail. Merci à tous et à toutes.

# CONTRIBUTIONS

- Proposition d'un modèle de base par les Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés pour un nœud de capteur avec un système de récupération d'énergie renouvelable (page 77).
- Proposition d'un modèle de base par les Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés Colorés pour un nœud de capteur avec un système de récupération d'énergie renouvelable et différentes tailles de messages (page 80).
- Proposition d'un modèle par les Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés pour un nœud de capteur avec récolte d'énergie solaire et différents niveaux d'ensoleillements saisonniers (page 84).
- Proposition d'un mécanisme de veille intelligent que nous appelons : mécanisme de veille double (page 85).
- Proposition d'un modèle par les Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés pour un nœud de capteur avec récolte d'énergie solaire et double mécanisme de veille (page 87).
- Proposition d'un modèle par les Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés pour un nœud de capteur avec récolte d'énergie solaire, mécanisme de veille double et différents niveaux d'ensoleillements saisonniers (page 89).
- Proposition d'un modèle par les Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés pour l'abstraction capteur-voisins avec récolte d'énergie ambiante, mécanisme de veille intelligent, appels répétés et pannes dépendantes (page 104).
- Présentation d'une étude de cas pour évaluer les performances d'un EH-WSN déployé dans différents territoires algériens (page 118).

# TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES TABLEAUX	xv
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL	5
1.1 ARCHITECTURE D'UN CAPTEUR . . . . .	5
1.2 ARCHITECTURE D'UN RCSF . . . . .	7
1.3 SYSTÈMES D'EXPLOITATION POUR CAPTEURS . . . . .	8
1.3.1 Contiki . . . . .	9
1.3.2 TinyOS . . . . .	9
1.3.3 MantisOS . . . . .	10
1.3.4 RETOS . . . . .	10
1.3.5 LiteOS . . . . .	10
1.3.6 RIOT . . . . .	11
1.3.7 Nano-RK . . . . .	11
1.3.8 SOS . . . . .	11
1.3.9 Sensos . . . . .	11
1.3.10 Comparaison . . . . .	12
1.4 TECHNOLOGIES SANS FIL UTILISÉES DANS LES RCSFs . . . . .	12
1.4.1 Bluetooth . . . . .	12
1.4.2 Wibree ou BLE . . . . .	12
1.4.3 Zigbee . . . . .	13
1.4.4 UWB . . . . .	13
1.4.5 Infrarouge . . . . .	14
1.4.6 WiFi . . . . .	14
1.4.7 IEEE 802.15.6 . . . . .	14
1.4.8 Comparaison entre les différentes technologies sans fil . . . . .	16
1.5 DOMAINES D'APPLICATION DES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL . . . . .	16
1.5.1 Applications militaires . . . . .	16

1.5.2	Applications environnementales et d'agriculture . . . . .	18
1.5.3	Applications médicales . . . . .	18
1.5.4	Applications de transport intelligent . . . . .	19
1.5.5	Applications commerciales . . . . .	19
1.6	<b>TYPES DES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL . . . . .</b>	<b>20</b>
1.6.1	RCSFs terrestres . . . . .	20
1.6.2	RCSFs souterrains . . . . .	21
1.6.3	RCSFs sous-marins . . . . .	21
1.6.4	RCSFs multimédia . . . . .	22
1.6.5	RCSFs mobiles . . . . .	23
1.7	<b>CARACTÉRISTIQUES DES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL ET CONTRAINTES DE CONCEPTION . . . . .</b>	<b>23</b>
1.7.1	Caractéristiques des RCSFs . . . . .	23
1.7.2	Contraintes et facteurs de conception des RCSFs . . . . .	25
1.7.3	Sources de consommation d'énergie dans un RCSF . . . . .	26
1.7.4	Solutions d'économie d'énergie dans les RCSFs . . . . .	27
1.8	<b>CONCLUSION . . . . .</b>	<b>28</b>
2	<b>FIABILITÉ DES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL . . . . .</b>	<b>29</b>
2.1	<b>DURÉE DE VIE D'UN RÉSEAU DE CAPTEURS . . . . .</b>	<b>29</b>
2.1.1	Définition selon l'épuisement de l'énergie des nœuds . . . . .	30
2.1.2	Définition selon la connectivité du réseau . . . . .	30
2.1.3	Définition selon la couverture du réseau . . . . .	31
2.1.4	Définition selon la couverture et connectivité du réseau en en- semble . . . . .	31
2.1.5	Définition selon les objectifs du réseau . . . . .	31
2.2	<b>SOURCES DES PANNES DANS LES RCSFs . . . . .</b>	<b>32</b>
2.2.1	Pannes matérielles . . . . .	32
2.2.2	Pannes logicielles . . . . .	33
2.3	<b>DISCIPLINES DE PANNES . . . . .</b>	<b>34</b>
2.4	<b>TOLÉRANCE AUX PANNES . . . . .</b>	<b>34</b>
2.4.1	Définition de la tolérance aux pannes . . . . .	35
2.4.2	Stratégie de conception des protocoles pour la tolérance aux pannes . . . . .	35
2.5	<b>CLASSIFICATION DES TECHNIQUES DE TOLÉRANCE AUX PANNES . . . . .</b>	<b>36</b>
2.5.1	Classification selon le temps . . . . .	36
2.5.2	Classification selon la taille du réseau . . . . .	37
2.5.3	Classification selon l'architecture . . . . .	38
2.6	<b>RCSFs AVEC MÉCANISME DE VEILLE . . . . .</b>	<b>39</b>
2.7	<b>RCSFs AVEC RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE . . . . .</b>	<b>41</b>
2.7.1	Définition de l'énergie renouvelable . . . . .	41
2.7.2	Sources d'énergie renouvelable . . . . .	42

2.7.3	Récupération d'énergie solaire . . . . .	43
2.8	CONCLUSION . . . . .	45
<b>3</b>	<b>RÉSEAUX DE PETRI STOCHASTIQUES GÉNÉRALISÉS</b>	<b>47</b>
3.1	LES MODÈLES FORMELS POUR LA MODÉLISATION DES SYSTÈMES . . . . .	47
3.1.1	Avantages des modèles formels . . . . .	47
3.1.2	Avantages des RdPs . . . . .	48
3.2	RÉSEAUX DE PETRI (RdP) . . . . .	48
3.2.1	Règle de franchissement des RdP . . . . .	49
3.2.2	Marquage d'un RdP . . . . .	50
3.2.3	Graphe de marquage d'un RdP . . . . .	50
3.2.4	Propriétés d'un RdP . . . . .	50
3.2.5	Présentation formelle d'un RdP . . . . .	54
3.3	RÉSEAUX DE PETRI GÉNÉRALISÉS . . . . .	55
3.3.1	Représentation formelle d'un RdPG . . . . .	55
3.3.2	Règle de franchissement des RdPGs . . . . .	55
3.4	RÉSEAUX DE PETRI COLORÉS . . . . .	56
3.4.1	Règle de franchissement des RdP Colorés . . . . .	56
3.5	RÉSEAUX DE PETRI STOCHASTIQUES . . . . .	57
3.5.1	Présentation formelle d'un RdPS . . . . .	57
3.5.2	Analyse qualitative des RdPS . . . . .	57
3.5.3	Analyse quantitative des RdPS . . . . .	57
3.6	RÉSEAUX DE PETRI STOCHASTIQUES GÉNÉRALISÉS (RdPSG) . . . . .	60
3.6.1	Présentation formelle d'un RdPSG . . . . .	62
3.6.2	Evolution d'un RdPSG . . . . .	62
3.6.3	Graphe des marquages accessibles réduit . . . . .	62
3.6.4	Évaluation de performances des RdPSGs . . . . .	63
3.7	RdPSGs À ARC INHIBITEUR . . . . .	63
3.7.1	Définition d'un arc inhibiteur . . . . .	63
3.7.2	Présentation formelle d'un RdPSG à arc inhibiteur . . . . .	64
3.7.3	Règle de franchissement RdPSG à arc inhibiteur . . . . .	64
3.8	CONCLUSION . . . . .	64
<b>4</b>	<b>ÉTAT DE L'ART DE MODÉLISATION DES RCSFs AVEC LES RdPs</b>	<b>65</b>
4.1	CONSTRAINTES DES RCSFs . . . . .	65
4.1.1	Appels répétés . . . . .	66
4.1.2	Capacité de la mémoire tampon (buffer) . . . . .	66
4.1.3	Nombre et types des messages . . . . .	67
4.1.4	Nombre et distances des voisins . . . . .	67
4.1.5	Récupération d'énergie ou Energy-Harvesting . . . . .	67
4.1.6	Consommation d'énergie . . . . .	67
4.1.7	Mécanisme de veille . . . . .	68

4.1.8	Perte des messages . . . . .	68
4.1.9	Pannes et réparations . . . . .	68
4.1.10	Autres contraintes . . . . .	68
4.2	ÉTAT DE L'ART . . . . .	69
4.2.1	Modélisation des RCSFs par les RdPSGs . . . . .	69
4.2.2	Modélisation par les RdPSGs colorés . . . . .	71
4.3	CONCLUSION . . . . .	73
<b>5</b>	<b>MODÈLES AVEC CONTRAINTES ET CONFIGURATIONS LIÉES À L'ÉNERGIE</b>	<b>74</b>
5.1	MODÉLISATION AVEC RÉCOLTE D'ÉNERGIE . . . . .	74
5.2	MODÉLISATION AVEC DIFFÉRENTIATION ENTRE MESSAGES . . . . .	77
5.3	MODÉLISATION AVEC DIFFÉRENTS NIVEAUX D'ENSOLEILLEMENT . . . . .	80
5.4	MODÉLISATION AVEC MÉCANISME DE VEILLE INTELLIGENT . . . . .	83
5.5	MODÉLISATION AVEC MÉCANISME DE VEILLE INTELLIGENT ET DIFFÉRENTS NIVEAUX D'ENSOLEILLEMENT . . . . .	85
5.5.1	Description du modèle . . . . .	89
5.5.2	Analyse des modèles . . . . .	91
5.5.3	Mesures de performances . . . . .	94
5.6	CONCLUSION . . . . .	96
<b>6</b>	<b>MODÉLISATION DES RCSFs AVEC DES CONSIDÉRATIONS DE DISPONIBILITÉ</b>	<b>97</b>
6.1	ABSTRACTION DU RCSF PAR UNE RELATION CAPTEUR-VOISINS . . . . .	97
6.2	MODÉLISATION AVEC APPELS RÉPÉTÉS ET PANNES DES VOISINS . . . . .	98
6.3	MODÉLISATION DES RCSFs AVEC APPELS RÉPÉTÉS, PANNES DÉPENDANTES ET MÉCANISME DE VEILLE INTELLIGENT . . . . .	101
6.4	FORMULES DE PERFORMANCES . . . . .	104
6.5	CONCLUSION . . . . .	106
<b>7</b>	<b>ANALYSE EXPÉRIMENTALE</b>	<b>107</b>
7.1	OUTIL LOGICIEL . . . . .	107
7.2	ANALYSE DES RCSFs AVEC RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE SOLAIRE . . . . .	108
7.2.1	Influence du taux de récolte d'énergie sur les paramètres de performance . . . . .	109
7.2.2	Influence du nombre quotidien de messages sur les paramètres de performance . . . . .	112
7.2.3	Influence du cycle de service sur les paramètres de performance . . . . .	114
7.2.4	Étude de cas . . . . .	116
7.3	ANALYSE DES RCSFs AVEC PANNES FRÉQUENTES . . . . .	123
7.3.1	Influence du taux de rappel sur les performances du réseau . . . . .	123
7.3.2	Influence du taux de pannes sur les performances du réseau . . . . .	126

7.4 CONCLUSION . . . . .	129
CONCLUSION GÉNÉRALE	131
BIBLIOGRAPHIE	134

# LISTE DES FIGURES

1	Utilisation des RdPSGs pour évaluer les performances des RCSFs .	3
1.1	L'architecture standard d'un nœud de capteur . . . . .	7
1.2	L'architecture standard d'un RCSF . . . . .	8
1.3	Classification des mécanismes d'économie d'énergie dans les RCSFs	28
2.1	Disciplines des pannes . . . . .	35
2.2	Énergies renouvelables appropriées pour la récupération d'énergie Tan and Panda [2010] . . . . .	42
2.3	Sources appropriées pour la récupération d'énergie au sein des RCSFs Basagni et al. [2013], Tan and Panda [2010] . . . . .	43
2.4	Système de base pour collecter l'énergie solaire Basagni et al. [2013], Sharma et al. [2018] . . . . .	44
3.1	Exemple d'un RdP . . . . .	49
3.2	Un exemple d'un RdPSG David and Alla [2010] . . . . .	61
3.3	Graphe des marquages accessibles et la chaîne du Markov associée	61
4.1	Les différentes contraintes des RCSFs modélisées avec les RdPs . .	66
5.1	Un RdPSGs pour un nœud de capteur avec récolte d'énergie am- biente et un mécanisme de veille simple . . . . .	75
5.2	Modélisation basée sur les RdP colorés pour les RCSFs . . . . .	78
5.3	Modélisation d'un nœud de capteur avec différents niveaux d'en- soleillement . . . . .	81
5.4	La stratégie du mécanisme de veille intelligent . . . . .	84
5.5	Modélisation d'un nœud de capteur avec un mécanismes de veille intelligent . . . . .	85
5.6	Modélisation d'un nœud de capteur avec un mécanismes de veille intelligent et différents niveaux d'ensoleillement . . . . .	87
5.7	La durée moyenne d'ensoleillement dans l'Algérie . . . . .	89
5.8	Le graphe réduit du RdPSG de la Figure 5.6 . . . . .	93
6.1	Un nœud capteur et ses voisins dans un RCSF . . . . .	98
6.2	Les états d'un capteur . . . . .	99

6.3	Modèle basé sur les RdPSGs pour les RCSFs avec appels répétés et pannes . . . . .	100
6.4	RdPSG modélisant la répétition d'appels, pannes dépendantes et la mise en veille intelligente . . . . .	102
7.1	Charge moyenne de la batterie vs taux de récolte . . . . .	110
7.2	Latence vs taux de récolte d'énergie . . . . .	111
7.3	Charge moyenne de la batterie vs nombre de messages . . . . .	113
7.4	Latence vs nombre de messages . . . . .	114
7.5	Charge moyenne de la batterie vs cycle de service . . . . .	115
7.6	Temps de réponse moyen vs cycle de service . . . . .	116
7.7	Un capteur équipé d'un panneau solaire . . . . .	117
7.8	Énergie résiduelle dans différents territoires algériens en utilisant GSPN_DS_SL avec un panneau horizontal . . . . .	118
7.9	Énergie résiduelle dans différents territoires algériens en utilisant GSPN_DS_SL avec panneau incliné verticalement est/ouest . . . . .	119
7.10	Energie résiduelle dans des différents territoires algériens vs temps en utilisant GSPN_SS avec panneau incliné verticalement est/ouest . . . . .	121
7.11	Pourcentage de sommeil dans les provinces d'Alger et de Djajnet en utilisant GSPN_SS avec panneau incliné verticalement est/ouest . . . . .	121
7.12	Énergie résiduelle des capteurs dans la wilaya d'In-Salah avec panneau incliné verticalement est/ouest vs nombres de messages quotidiens . . . . .	122
7.13	Énergie résiduelle des capteurs dans la wilaya de Boumerdès avec panneau incliné verticalement est/ouest vs nombre de messages quotidiens . . . . .	123
7.14	Charge moyenne de la batterie vs taux de rappel . . . . .	124
7.15	Temps de réponse vs taux de rappel . . . . .	125
7.16	Utilisation de l'unité de transmission vs taux de rappel . . . . .	126
7.17	Charge moyenne de la batterie vs taux de pannes . . . . .	127
7.18	Temps de réponse moyen vs taux de pannes . . . . .	128
7.19	Utilisation du réparateur et de l'émetteur-récepteur vs taux de pannes . . . . .	129

# LISTE DES TABLEAUX

1.1	Comparaison entre les systèmes d'exploitation usuels des RCSFs .	15
1.2	Comparaison entre les différentes technologies sans fil . . . . .	15
2.1	Consommation d'énergie par le radio pour les capteurs Mica2 et MicaZ . . . . .	40
5.1	Description des transitions du modèle de la Figure 5.1 . . . . .	76
5.2	Description des types de jetons . . . . .	78
5.3	Description des transitions temporisées . . . . .	80
5.4	Description des transitions immédiates . . . . .	80
5.5	Description des places . . . . .	80
5.6	Comparaison entre les modèles précédents (MS : mécanisme de sommeil, DNE : différents niveaux d'ensoleillement) . . . . .	88
5.7	Description des places du RdPSG de la Figure 5.6 . . . . .	90
5.8	Description des transitions du RdPSG de la Figure 5.6 . . . . .	91
6.1	Description des transitions du modèle de la Figure 6.3 . . . . .	100
6.2	Description des transitions immédiates du modèle de la Figure 6.3	100
6.3	Description des places du modèle de la Figure 6.3 . . . . .	101
6.4	Description des transitions temporelles . . . . .	103
7.1	Modèles de l'étude comparative (SS : Seasonal Sunshine, DS :Double Sleeping, SS : Simple Sleeping) . . . . .	108
7.2	Valeurs des paramètres d'entrés . . . . .	109
7.3	Paramètres d'entrée pour l'étude de cas (panneau horizontal) . . .	117
7.4	Valeurs du taux de récolte pour l'étude de cas (panneau horizontal)	118
7.5	Valeurs du taux de récolte pour l'étude de cas (panneau incliné verticalement est/ouest) . . . . .	118
7.6	Paramètres d'entrés pour l'analyse expérimentale . . . . .	124

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF ou WSN : Wireless Sensor Network) est un ensemble de nœuds de capteurs déployés sur une zone géographique pour effectuer une variété de tâches telles que la détection d'évènements, le traitement de données et l'envoi de ces données à d'autres nœuds, ou à une station de base. Les RCSFs ont de nombreuses applications telles que : la surveillance de champs de bataille, le suivi de véhicules, la surveillance de l'environnement, la surveillance des frontières, la surveillance météorologique et bien d'autres. Généralement, l'architecture d'un RCSF se compose d'un grand nombre de nœuds de capteurs et d'une station de base (ou puits). Le besoin d'une station de base dans les RCSFs est essentiellement dû à l'énergie et à la capacité de calcul limitées des nœuds de capteurs.

Dans la plupart des cas, les RCSFs sont déployés dans des régions éloignées à accès difficile. Par conséquent, les nœuds doivent être autonomes quant à l'aspect approvisionnement en énergie, et ils ne doivent pas avoir besoin de renouveler leurs batteries, même s'ils fonctionnent pour une opération à long terme. Pour répondre à ces exigences, la récupération d'énergie (ou EH : Energy Harvesting) fait partie des solutions largement utilisées. Les capteurs équipés d'une unité de récolte d'énergie renouvelable sont capables de recharger leurs batteries en récupérant de l'énergie depuis leur environnement ambiant. Les RCSFs dont les nœuds sont équipés par des systèmes de récolte d'énergie ambiante s'appellent EH-WSNs (Energy Harvesting Wireless Sensors Networks). Les sources d'énergie renouvelable doivent être omniprésentes, bien qu'elles dépendent de la zone de déploiement. Parmi ces sources, l'énergie solaire est la plus adaptée aux RCSFs. En effet, l'énergie solaire est simple à utiliser et relativement plus prévisible. De plus, elle a une densité d'énergie plus élevée par rapport aux autres sources.

D'autre part, en pratique, certains composants des capteurs (la batterie, par exemple) pourraient être sujets à des pannes aléatoires. Il est donc primordial de prendre en considération la non-fiabilité de ces composants lors de la modélisation des RCSFs.

Dans de nombreux scénarios d'application, la durée de vie des nœuds de

capteurs varie entre deux et dix ans. Prenons par exemple le cas d'une zone de déploiement dans des glaciers de montagnes pour déterminer l'impact du changement climatique sur l'épaisseur de la glace. Il faudra plusieurs années pour que le processus de fusion soit mesuré de manière fiable. Par conséquent, les capteurs doivent être en mesure de rester en vie pendant plusieurs années. Parce que, selon la taille du RCSF, si quelques nœuds de capteurs, voire un seul, tombent en panne, les performances de l'ensemble du réseau peuvent être dangereusement affectées. Cependant, déployer un EH-WSN pérenne doit considérer les contraintes spécifiques à la source de récolte d'énergie. Par exemple, lorsque le réseau utilise l'énergie solaire, on doit prendre en compte la différence entre les niveaux d'ensoleillement par saison et l'absence de lumière du soleil pendant la nuit. Par conséquent, afin de garantir la continuité de service, des mécanismes de veille sont implémentés dans les capteurs pour mieux exploiter l'énergie disponible. En résumé, pour réussir une approche de modélisation, on doit considérer les contraintes réelles et les solutions implémentées pour les prendre en charge.

## PROBLÉMATIQUE

Avant le déploiement d'un RCSF, il faut évaluer sa faisabilité en essayant de prédire les performances du réseau en prenant en compte simultanément diverses contraintes de déploiement réelles telles que : les limitations énergétiques, les pannes de capteurs et la diversité des technologies de communication. Ces contraintes doivent être considérées en parallèle avec les solutions proposées telles que : la récolte d'énergie, le mécanisme de veille et la réparation des capteurs dans un seul modèle pour fournir des mesures de performance proches de la réalité.

## SOLUTION PROPOSÉE

Nous utilisons la capacité de modélisation de formalismes mathématiques pour imiter le comportement d'un réseau de capteurs. Nous avons choisi les Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés (RdPSG ou GSPN : Generalized Stochastic Petri Nets) et les RdPSG Colorés comme outils de modélisation et d'évaluation des performances des RCSFs.

En effet, pour évaluer les RCSFs sur une base solide, au lieu d'utiliser des simulateurs, de nombreux chercheurs ont recours à la modélisation avec des formalismes mathématiques tels que les chaînes de Markov, les systèmes de files d'attente et les réseaux de Petri. Ces derniers sont en particulier beaucoup utilisés en raison de leur puissance d'expression et leur adéquation pour la

représentation des systèmes dynamiques.

La solution proposée est une abstraction des fonctionnalités d'un nœud de capteur se concentrant sur les tâches qui ont un impact direct sur son énergie. Cette abstraction couvre la relation du nœud avec ses voisins et la quantité d'énergie qu'il stocke dans sa batterie. En alimentant le modèle avec des paramètres d'entrée tels que le taux de récolte d'énergie, la capacité de batterie, le nombre de messages quotidiens et bien d'autres, nous pouvons dériver des mesures de performance telles que le temps de réponse moyen et la charge moyenne de la batterie. Si les performances obtenues ne répondent pas aux exigences du service, et donc on doit les améliorer, on peut faire des allers-retours sur ce schéma d'évaluation jusqu'à atteindre le comportement souhaité (voir la Figure 1).

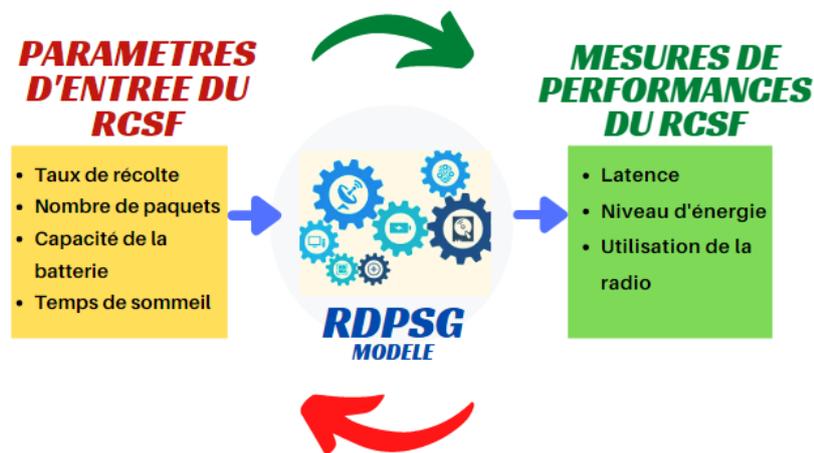


FIGURE 1 – Utilisation des RdPSGs pour évaluer les performances des RCSFs

Cela va sans dire que les valeurs des paramètres d'entrée doivent être choisies en fonction de considérations réalistes. Par exemple, l'augmentation de la capacité de batterie peut amener le décideur à acquérir un nouveau type de capteurs que le plan budgétaire du projet peut se permettre.

## PLAN DE LA THÈSE

Notre thèse est organisée en sept chapitres :

Dans le *chapitre 1*, nous présentons les principaux concepts liés aux réseaux de capteurs. En premier lieu, nous définissons les composants de base des

RCSFs. Puis, nous donnons une description des RCSFs en présentant leurs caractéristiques et contraintes de conception associées. Nous présentons aussi les différents domaines d'applications des RCSFs. Nous terminons ce chapitre par la présentation des problématiques et solutions d'économie d'énergie des RCSFs. .

Dans le *chapitre 2*, nous définissons la durée de vie d'un RCSF, les sources de pannes et les disciplines associées. Ensuite, nous présentons les classifications des techniques de tolérance aux pannes. A la fin de ce chapitre, nous présentons le mécanisme de veille et la récupération de l'énergie renouvelable comme solutions des problèmes des RCSFs.

Le *chapitre 3* présente les Réseaux de Petri (RdP ou PN : Petri Nets) utilisés pour la modélisation et l'évaluation de systèmes à événements discrets. Nous commençons par présenter les RdPs ordinaires. Dans une deuxième étape, nous présentons les Réseaux de Petri Stochastiques (RdPS ou SPN : Stochastic Petri Nets) et Stochastique Généralisés (RdPSG) qui représentent des extensions des RdPs pour la modélisation des systèmes avec contrainte de temps.

Dans le *chapitre 4*, nous présentons un état de l'art sur les travaux en relation avec notre champ d'étude. Nous nous concentrons sur les modèles utilisant les RdPSGs simples et colorés.

Dans les *chapitre 5 et 6*, nous proposons des modèles basés sur les RdPSGs qui permettent d'évaluer les performances des RCSFs en considérant une abstraction de la relation capteur-voisins. Les modèles proposés prennent en compte plusieurs contraintes réelles telles que la consommation d'énergie et l'indisponibilité des voisins.

Dans le *chapitre 7*, nous présentons une analyse expérimentale de quelques modèles présentés dans les deux chapitres précédents. Nous présentons une étude de cas qui montre une application pratique des modèles choisis. Cette étude illustre comment un tel modèle peut évaluer les performances d'un RCSF lorsqu'il est déployé sur différents territoires algériens, en considérant les différents taux de récupération d'énergie que les zones géographiques peuvent fournir.

Enfin, nous concluons notre travail avec un résumé des résultats clés présentés dans cette thèse avec quelques perspectives pour des travaux de futurs.

# RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL



Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF, ou WSN : Wireless sensor Networks) sont considérés parmi les technologies les plus importantes durant les deux derniers décennies. Ils sont constitués par un ensemble de petits appareils autonomes inter-connectés par des liaisons de communication sans fil. Ces appareils coopèrent pour acquérir et transmettre des mesures prises dans un terrain de déploiement.

Dans ce chapitre, nous présentons les principaux concepts liés aux réseaux de capteurs. En premier lieu, nous définissons l'élément de base dans les RCSFs qui est le nœud de capteur et nous détaillons son architecture interne. Puis, nous donnons une description des RCSFs en présentant leurs caractéristiques et leurs contraintes de conception. Nous présentons aussi les différents domaines d'applications des RCSFs. Nous terminons ce chapitre par la présentation des problématiques et solutions d'économie d'énergie des RCSFs.

## 1.1 ARCHITECTURE D'UN CAPTEUR

Un nœud de capteur sans fil est un dispositif physique, de taille miniature, qui a pour but essentiel d'accomplir trois tâches complémentaires : le relevé d'une grandeur physique, le traitement éventuel de cette information et la communication avec d'autres capteurs afin de transmettre cette information. Pour pouvoir accomplir ces tâches, le capteur est composé principalement de quatre unités de base : l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de transmission et l'unité de contrôle d'énergie [Basagni et al. \[2013\]](#). Selon le domaine d'application, il peut aussi contenir des modules supplémentaires tels qu'un système

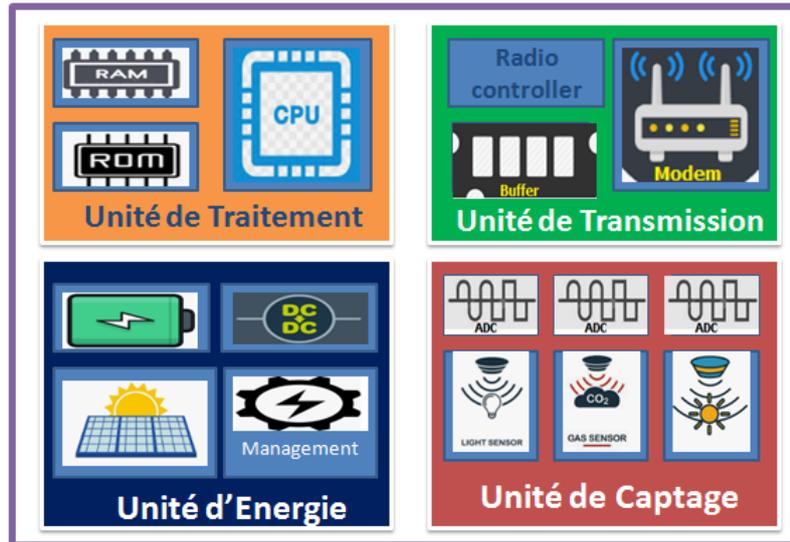
de localisation (GPS) ou un système de récupération d'énergie. Quelques micro-capteurs, plus volumineux, sont dotés d'un système mobilisateur chargé de les déplacer en cas de nécessité.

Nous donnons ci-dessous les rôles des unités de base d'un capteur [Tan and Panda \[2010\]](#) :

- L'unité de captage : généralement composée de deux sous-unités : le récepteur et le transducteur (convertissant le signal du récepteur en signal électrique). Le capteur fournit des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement. Cette unité peut être composée de différents types de capteurs : sismiques, magnétiques, thermiques, visuels, infrarouges, acoustiques, et beaucoup d'autres types qui sont capables de surveiller une large variété de conditions ambiantes telle que : la température, l'humidité, le mouvement, la pression, la présence de certains objets, etc.
- L'unité de traitement : elle comprend un processeur généralement associé à une petite unité de stockage. Elle fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les nœuds de capteurs. Elle exécute les protocoles de communications qui permettent de faire collaborer le nœud avec les autres nœuds du réseau. Elle fait aussi l'analyse et l'agrégation des données captées pour alléger la tâche du nœud collecteur.
- L'unité de transmission : elle effectue toutes les émissions et réceptions des données dans un milieu sans-fil. Elle peut être de type optique, ou de type radio-fréquence. Les communications de type optique sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, ne pouvant pas établir des liaisons à travers des obstacles, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes. Les unités de transmission de type radio comprennent des circuits de modulation, démodulation, filtrage et multiplexage ; ceci implique une augmentation de la complexité et du coût de production du capteur. Concevoir des unités de transmission de type radio-fréquence avec une faible consommation d'énergie est un défi, car pour qu'un nœud ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant et donc une énergie consommée importante.

- L'unité de contrôle d'énergie : l'unité de contrôle d'énergie est un composant essentiel. Elle doit répartir l'énergie disponible aux autres unités de manière optimale (par exemple en réduisant les dépenses inutiles et en mettant en veille les composants inactifs). Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement via des cellules photovoltaïques par exemple.

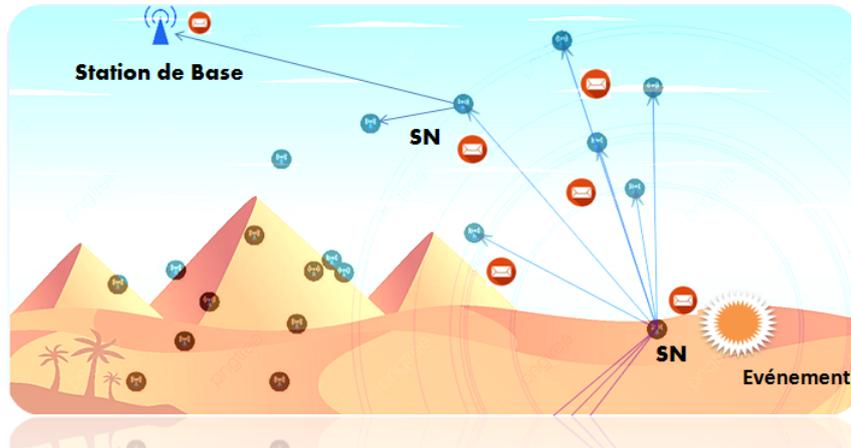
FIGURE 1.1 – L'architecture standard d'un nœud de capteur



## 1.2 ARCHITECTURE D'UN RCSF

Un réseau de capteurs est composé d'un ensemble de nœuds de capteur (NC, ou SN : Sensor Node) déployés dans une zone géographique pour répondre à un besoin spécifique tel que, la surveillance d'une bataille. Ces SNs communiquent entre eux pour envoyer les informations récoltées à la station de base (SB, ou BS : Base Station) à travers l'utilisation d'une communication sans fil. La SB est considérée comme une passerelle à l'Internet. La Figure 1.2 représente l'architecture standard d'un RCSF [Pottie and Kaiser \[2000\]](#).

FIGURE 1.2 – L'architecture standard d'un RCSF



### 1.3 SYSTÈMES D'EXPLOITATION POUR CAPTEURS

Un RCSF consiste en un grand nombre de nœuds de petite taille alimentés par une batterie. Ils sont limités par la capacité de la batterie, la puissance du processeur et la capacité de communication. Les systèmes d'exploitation des nœuds de capteurs sont des systèmes d'exploitation embarqués. Le rôle de ce type de système d'exploitation est d'être l'interface entre des ressources matérielles limitées et des applications distribuées. Il doit fournir une variété de services systèmes basiques comme la gestion de l'allocation de ressource, la gestion et la planification de tâches, gérer le support réseau. Le but est de faciliter la programmation des applications, mais aussi d'optimiser les utilisations de ressources. Les systèmes d'exploitation des RCSFs sont conçus pour répondre à ces contraintes.

Malgré les limites matérielles, les capteurs doivent intégrer les fonctionnalités de base d'un système d'exploitation telles que : l'allocation de mémoire, la gestion du système de fichiers, le contrôle d'exécution de code, le chargement, le lancement et la gestion des applications, la transmission de données et la gestion de l'énergie. Ils doivent en plus gérer les spécificités propres aux nœuds de capteurs telles que : la gestion efficace de l'énergie, la fiabilité du système d'exploitation, la reconfiguration du système d'exploitation, le support de protocole de routage optimisé, et le support temps-réel. De nombreux systèmes d'exploitation spécialisés sont conçus, parmi lesquels : Contiki, Nano-RK, TinyOS, Manti-

sOS, RETOS, LiteOS, SOS, RIOT, Sensos et autres [Farooq and Kunz \[2011\]](#), [Javed et al. \[2018\]](#), [Kasmi et al. \[2017\]](#).

### 1.3.1 Contiki

Contiki était un des premiers systèmes d'exploitation développés pour les RCSFs. Contiki est également un système d'exploitation open source. C'est un système configurable et modulaire pour les réseaux de capteurs. L'architecture hybride du noyau Contiki autorise deux modes de fonctionnement : soit multi-tâche, soit basé sur les événements. Contiki est un système d'exploitation conçu pour prendre le moins de place possible, avec une faible empreinte mémoire. Pour cela, le code est écrit en langage C. Un système utilisant Contiki contient des processus, qui peuvent être des applications ou des services. La communication entre processus se fait par l'envoi d'événements [Dunkels et al. \[2004\]](#).

### 1.3.2 TinyOS

TinyOS est parmi les systèmes d'exploitation open-source utilisé dans les réseaux de capteurs, développé par l'université américaine de BERKELEY. Le caractère open-source permet à ce système d'être régulièrement enrichie par une multitude d'utilisateurs. Sa conception a été entièrement réalisée en NesC, qui est un langage orienté composant syntaxiquement proche du C. Il respecte une architecture basée sur une association de composants, réduisant ainsi la taille du code nécessaire à sa mise en place. Cela s'inscrit dans le respect des contraintes de mémoires qu'observent les capteurs pourvus de ressources très limitées dues à leur miniaturisation. En plus, la bibliothèque de composants de TinyOS est particulièrement complète puisqu'on y retrouve des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données.

Un programme s'exécutant sur TinyOS est constitué d'une sélection de composants systèmes et de composants développés spécifiquement pour l'application à laquelle il sera destiné (mesure de température, du taux d'humidité etc.). TinyOS s'appuie sur un fonctionnement évènementiel, c'est-à-dire qu'il ne devient actif qu'à l'apparition de certains évènements, par exemple l'arrivée d'un message radio [Levis et al. \[2005\]](#).

### 1.3.3 MantisOS

MantisOS apparu en 2005, a été conçu par l'université du Colorado. C'est un système d'exploitation léger et multi-tâche. Il dispose d'un environnement de développement Linux et Windows. La programmation d'application sur MantisOS se fait en langage C. Son empreinte mémoire est faible : 500 octets en mémoire RAM et 14 kilo-octets en mémoire flash. C'est un système modulaire dont le noyau supporte également des entrées/sorties synchrones et un ensemble de primitives de concurrence. L'économie d'énergie est réalisée par MantisOS à l'aide d'une fonction de veille appelée sleep qui désactive le capteur lorsque toutes les tâches actives sont terminées. MantisOS est un système dynamique ; les modifications applicatives peuvent être réalisées pendant le fonctionnement. MantisOS apporte une compatibilité avec le modèle événementiel de TinyOS [Bhatti et al. \[2005\]](#).

### 1.3.4 RETOS

RETOS a été développé en 2007. C'est un système d'exploitation open source. Il a une architecture modulaire et implémente l'ordonnancement multi-tâches comme modèle de programmation. Il prend en charge le temps réel dans une certaine mesure avec ses processus d'interface de système d'exploitation portable. Il a une pile réseau qui peut être statique ou dynamique. Avec un fonctionnement dynamique, RETOS attire beaucoup l'attention en raison de sa structure de pile de réseau [Cha et al. \[2007\]](#).

### 1.3.5 LiteOS

LiteOS fournit un environnement comparable à UNIX, adapté aux capteurs sans fil. LiteOS possède un système de gestion des fichiers et des commandes en mode terminal à distance semblable aux commandes unix pour gérer les capteurs. LiteOS a été développé en 2008 et depuis son occurrence, il se bat pour sa popularité dans ce domaine car il possède une architecture modulaire et un noyau uniques et utilise un langage de programmation appelé LiteC++. Il implémente à la fois les événements et les threads dans son modèle de programmation. Cependant, la planification des tâches est exécutée jusqu'à la fin. LiteOS possède

une faible empreinte mémoire : il peut fonctionner avec 128 Ko de mémoire flash et 4ko de mémoire vive, [Cao and Abdelzaher \[2006\]](#).

### 1.3.6 RIOT

RIOT s'adresse aux RCSFS et IoTs. RIOT possède de multiples fonctionnalités, telles que sa prise en charge de 6LoWPAN et l'ordonnancement à temps réel, qui le rendent adapté aux IoT. RIOT a été sorti en 2013 sous licence LGPLv2 (less general public license). RIOT a une architecture de micro-noyau et prend en charge l'ordonnancement à temps réel en raison de son modèle multi-processus et de sa prise en charge de la mise en réseau. Il a été développé par les langages de programmation C et C++ [Baccelli et al. \[2012\]](#).

### 1.3.7 Nano-RK

Nano-RK est un système d'exploitation temps réel multi-tâche préemptif pour un nœud de capteur. Il supporte la communication en multi-saut sur le réseau. Il possède une faible empreinte mémoire, Nano-RK utilise 2 kb de RAM et 18 kb de ROM. Nano-RK fournit des APIs pour la gestion d'énergie des capteurs [Eswaran et al. \[2005\]](#).

### 1.3.8 SOS

SOS est un système d'exploitation fournissant des fonctionnalités telles que la re-programmation, et implémente divers protocoles à cette fin. SOS a été développé en 2005. Il utilise une technique de transmission de messages entre les modules en interaction. Il a une architecture modulaire et son modèle de programmation événementielle est écrit en langage C. Il s'agit également d'un système d'exploitation dynamique, ce qui signifie que des modifications d'exécution peuvent être apportées à une application.

### 1.3.9 Sensos

Sensos est un système d'exploitation de nœud de capteur avec le schéma de gestion de dispositif pour des nœuds de capteur avec de multiples capteurs

[Yang et al. \[2007\]](#). Sensos a été développé en 2007. Le concept de base du schéma de gestion des dispositifs intégré dans ce système d'exploitation de nœud de capteur proposé, Sensos, est basé sur la norme IEEE 1451. Le Sensos fournit une gestion des processus basée sur les threads et une planification non préemptive pour s'adapter à la restriction de la mémoire.

### 1.3.10 Comparaison

La Table 1.1 présente une récapitulation des caractéristiques des systèmes d'exploitation utilisés dans les RCSFs.

## 1.4 TECHNOLOGIES SANS FIL UTILISÉES DANS LES RCSFs

Parmi les technologies utilisées pour permettre les communications entre capteurs, nous allons présenter dans ce qui suit : Bluetooth (norme IEEE 802.15.1), Wibree, Zigbee (norme IEEE 802.15.4), UWB (norme IEEE 802.15.3), infrarouge et la norme IEEE 802.15.6 [Radmand et al. \[2010\]](#).

### 1.4.1 Bluetooth

La technologie Bluetooth, dont Ericsson a initié le projet en 1994, a pour but principal de remplacer les câbles sur les petites distances. Elle est utilisée dans la plupart des téléphones portables comme interface de connexion pour accéder à un PC. Malheureusement, le grand défaut de cette technologie est sa trop grande consommation d'énergie. Donc elle ne peut pas être utilisée par des capteurs qui sont alimentés par une batterie et qui, idéalement devraient fonctionner durant plusieurs années [Bisdikian \[2001\]](#), [Radmand et al. \[2010\]](#).

### 1.4.2 Wibree ou BLE

La norme Wibree (Ultra Low Power Bluetooth) ou BLE (Bluetooth Low Energy). Elle est considérée comme une version allégée de la norme Bluetooth fonctionnant dans la bande de fréquence des 2,4 GHz. Wibree n'utilise pas de sauts de fréquences. Cette norme prend en charge une topologie en étoile avec un

maître et sept esclaves. Afin de réduire la consommation d'énergie de Bluetooth, Wibree utilise une puissance de transmission et un débit faibles. La consommation d'énergie de Wibree est l'équivalent de 10% de celle d'une connexion par Bluetooth. Sa limite principale est la faible portée de communication : 5 à 10 m. [Bisdikian \[2001\]](#)

### 1.4.3 Zigbee

Le standard Zigbee, combiné avec la norme IEEE 802.15.4, offre des caractéristiques qui répondent encore mieux aux besoins des réseaux de capteurs. Zigbee offre des débits de données moindres, mais il consomme également nettement moins que Bluetooth. Le protocole Zigbee est basé sur le standard déploiement de réseau dense à plus de 65000 nœuds avec une portée de l'ordre de 100 mètres pour un débit de 250 Kbits/s. Ces caractéristiques en font aujourd'hui le principal protocole utilisé dans les réseaux de capteurs [Gislason \[2008\]](#).

### 1.4.4 UWB

L'UWB (Ultra Wide Band) ou la norme IEEE 802.15.3 peut être utilisé en tant que technique de communication sans fil, qui fournit des taux de transfert réseaux très élevés sur des distances relativement courtes et à faible puissance. De plus, l'atténuation du signal engendré par des obstacles est moindre qu'avec les systèmes radio à bande étroite conventionnels. Elle opère dans la bande de fréquence de 3,1 GHz à 10,6 GHz. UWB est conçue pour remplacer la norme Bluetooth afin d'offrir plus de bande passante, moins d'interférences avec les autres technologies et un délai plus court. Cette technique est utilisée pour les transmissions à haut débit avec une consommation électrique (proche de 400 mW). Cette technologie offre des avantages par rapport à Bluetooth. Elle consomme 50 fois moins d'énergie pour transmettre un bit par rapport à Bluetooth. L'inconvénient majeur de la technologie UWB est sa faible portée de communication (environ 10 m) [Wang et al. \[2004\]](#).

### 1.4.5 Infrarouge

Les ondes infrarouges sont utilisées pour la communication à courte distance, ainsi elles s'adaptent au mode de communication entre les nœuds d'un réseau de capteurs. Les ondes infrarouges sont préférées aux ondes radio, car elles n'interfèrent pas avec les autres signaux électromagnétiques. Les émetteurs-récepteurs utilisant la technologie infrarouge ne sont pas chers, et ils sont faciles à fabriquer. Les composants matériels utilisant ce type de communication sont généralement conformes aux standards publiés par l'Infrared Data Association [Megowan et al. \[1996\]](#).

### 1.4.6 WiFi

Le protocole de communication WiFi (la norme IEEE 802.11x) est le protocole le plus utilisé pour toutes les applications sans fil. Il offre une large bande passante (de 11 à 320 Mbits/s) ce qui a permis de démocratiser l'utilisation de la technologie sans-fil dans les réseaux classiques WLANs. Les premiers capteurs sans-fil ont eu recours à ce protocole pour permettre la communication entre nœuds. Cependant, le standard de communication WiFi a besoin d'une quantité importante d'énergie. C'est pourquoi, les applications de capteurs à base de communication sans fil WiFi sont très peu répandues [Oraskari \[2000\]](#).

### 1.4.7 IEEE 802.15.6

IEEE 802.15.6 est une norme de courte portée utilisée par des objets ou dispositifs à ultra basse consommation, placés sur ou à proximité d'un corps humain. Elle permet un débit maximal de 10 Mbits/s. Cette norme combine des caractéristiques de sécurité, de fiabilité, de qualité de service, de basse consommation d'énergie et de protection contre les interférences, ce qui la rend adaptées de multiples applications de réseaux radio corporels (WBAN, Wireless Body Area Networks) [Kwak et al. \[2010\]](#).

TABLE 1.1 – Comparaison entre les systèmes d'exploitation usuels des RCSFs

N	Système	Type de prog.	Langage	Parallélisme	Gestion mémoire	Ref.
1	Contiki	Hybride	C	OUI	Statique	Dunkels et al. [2004]
2	TinyOS	Orienté composant	NesC	OUI	Statique	Levis et al. [2005]
3	MantisOS	Orienté évènement	C	OUI	Dynamique	Bhatti et al. [2005]
4	RETOS	Multi-threads	C	OUI	Dynamique	Cha et al. [2007]
5	LiteOS	Multi-threads	C++	NON	Dynamique	Cao and Abdelzaher [2006]
6	RIOT	Hybride	LiteC++	OUI	Dynamique	Bacelli et al. [2012]
7	Nano-RK	Multi-threads	C	OUI	Statique	Eswaran et al. [2005]
8	SOS	Multi-threads	C	NON	Dynamique	Han et al. [2005]
9	Sensos	Multi-threads	C	OUI	Dynamique	Yang et al. [2007]

TABLE 1.2 – Comparaison entre les différentes technologies sans fil

Protocole	Norme	Nb nœuds	Débit Max	Bande	Portée	Energie	Temps démarrage	Mémoire
Bluetooth	15.1	8-255	1-3 Mb/s	2,4-2,5 GHz	10 m	100-200 mW	Moyen	250 ko
ZigBee	15.4	65 000	20-250 kb/s		10 m	30 mW	Court	4-32 ko
WiFi	11x	256	11-1000 Mb/s	2,4 et 5 GHz	10-300 m	750-2000 mW	Long	1 Mo
UWB	15.3	128	110-480 Mb/s	3,1 - 10,6 GHz	10 m	400 mW	Moyen	/
BLE		illimité	1 Mb/s	2,4-2,5 GHz	5-10 m	10-20 mW	Moyen	/
IEEE 15.6	15.6	256	10 Mb/s	0.4-2,4 GHz	5-10 m	50 mW	Court	

### 1.4.8 Comparaison entre les différentes technologies sans fil

Le choix d'une technologie de communication sans fil dépend des services proposés, ainsi que des besoins du concepteur du réseau. Certains paramètres comme la consommation d'énergie, le débit, la durée de vie de la batterie, la portée et le nombre de nœuds supportés doivent être pris en compte. Enfin, la Table 1.2 récapitule la différence entre les technologies de communication sans fil citées précédemment [Radmand et al. \[2010\]](#).

## 1.5 DOMAINES D'APPLICATION DES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

Les RCSF sont utilisés dans beaucoup d'applications [Ammari et al. \[2015\]](#). Ces applications peuvent être classées en deux catégories : surveillance et suivi [Yick et al. \[2008\]](#). Les applications de surveillance incluent la surveillance de l'environnement interne et externe, surveillance de la santé et du bien-être, surveillance des sources d'énergie, surveillance des stocks, automatisation des usines et des chaîne de production, et la surveillance sismique. Tandis que les applications de suivi incluent le suivi d'objets, d'animaux, d'humains et de véhicules. Bien qu'il existe de nombreuses applications différentes, ci-dessous nous citons quelques exemples d'applications qui ont été déployées et testées dans le cas réel.

### 1.5.1 Applications militaires

La mise en œuvre des RCSF dans les applications militaires a fait l'objet de diverses études. Le déploiement rapide, l'auto-organisation et la tolérance aux fautes, et d'autre caractéristiques des RCSF, en font une technique de surveillance et de suivi très prometteuse pour les militaires. 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 [Durišić et al. \[2012\]](#).

- Surveillance du champ de bataille : les terrains critiques, les parcours, les chemins et les ponts peuvent être rapidement couverts par des réseaux de capteurs, ce qui permet de surveiller de près les activités des forces ennemies. A tout moment, de nouveaux réseaux de capteurs peuvent être déployés pour assurer la surveillance de l'évolution des opérations militaires [Ahmad et al. \[2016\]](#).
- Reconnaissance des forces ennemies et de terrain : les réseaux de capteurs peuvent être déployés dans des zones critiques, ce qui permet d'intercepter certains renseignements précieux détaillés et en temps opportun, sur les forces ennemies.
- Suivi des forces amies, l'équipement et la munition : tous les soldats, véhicules, matériels et munitions peuvent être attachés avec de petits capteurs qui établissent des rapports de leur statut. Ces rapports sont rassemblés et envoyés aux chefs de troupes. Les données peuvent également être transmises aux niveaux supérieurs de la hiérarchie de commandement, tout en étant regroupées avec les données provenant d'autres unités à chaque niveau. En effet, les dirigeants et les commandants peuvent constamment surveiller l'état des troupes amies, l'état de la disponibilité de l'équipement et des munitions dans un champ de bataille par l'utilisation de réseaux de capteurs [Yick et al. \[2008\]](#).
- Construction d'un système de défense antimissile balistique : un tel système devrait être capable de fournir une défense contre multiples menaces balistiques de toutes portées et dans toutes les phases de vol [Katopodis et al. \[2007\]](#), [Shahkaram \[2019\]](#). Par conséquent, un réseau hybride de capteurs sans fil à grande échelle pour la défense antimissile composé de nœuds terrestres et satellites est introduit dans [Katopodis et al. \[2007\]](#). Le réseau proposé a été considéré comme un grand système avec l'objectif de suivre en temps réel de multiples menaces de missiles balistiques.
- Les réseaux de capteurs peuvent être utilisés dans autres applications militaires tels que la détection d'intrusion, la classification des cibles, l'évaluation des dommages sur le champ de bataille, la détection des attaques nucléaires, biologiques ou chimiques, la détection des mines marines et autres [Sohraby et al. \[2007\]](#), [Ahmad et al. \[2016\]](#).

### 1.5.2 Applications environnementales et d'agriculture

Les RCSFs sont utilisés dans certaines applications environnementales notamment pour la découverte de catastrophes naturelles tel que les séismes, les volcans et les inondations. Des SNs peuvent être exploités pour signaler des événements tel que les feux de forêts, et les tempêtes dans le Sahara. Dans ce cas, un tel réseau permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours. En plus, les RCSFs peuvent être employés pour le contrôle de la pollution. Les SNs sont placés au-dessus d'un emplacement industriel pour détecter et contrôler des fuites de gaz ou de produits chimiques. Ces applications permettraient de donner l'alerte en un temps record et de pouvoir suivre l'évolution de la catastrophe [Akyildiz et al. \[2002a\]](#).

- Détection d'incendie dans les forêts : les nœuds capteurs sont déployés de manière stratégique, ou aléatoire, et d'une façon dense dans une forêt où ils peuvent détecter l'origine exacte de l'incendie et alerter l'utilisateur final avant que le feu se propage et devient incontrôlable.
- Détection des inondations : un exemple d'une détection d'inondation est le système ALERT déployé aux États-Unis. Plusieurs types de capteurs sont déployés dans le système ALERT, tels que les capteurs de niveau d'eau et les capteurs météorologiques. Les informations capturées alimentent une base centrale de données [Logan et al. \[2015\]](#).
- Agriculture de précision : les réseaux de capteurs offrent la possibilité de contrôler le niveau de pesticides dans l'eau potable, le niveau d'érosion des sols, et le niveau de pollution de l'air en temps réel.
- Arrosage agricole : Des capteurs peuvent être incorporés dans la terre. Le réseau de capteurs peut récolter des données sur l'état du champ. Les capteurs peuvent déterminer les secteurs les plus secs afin de les arroser en priorité.

### 1.5.3 Applications médicales

Les RCSFs peuvent être utilisés pour [Akyildiz et al. \[2002a\]](#) :

- Fournir des interfaces pour les handicapés ; elles intègrent la surveillance des patients, les diagnostics, l'administration de médicaments dans les hôpitaux, la télésurveillance des données physiologiques de l'homme ainsi

que le suivi et la surveillance des médecins et des patients dans un hôpital.

- Le suivi et la surveillance des médecins et des patients dans un hôpital : un ensemble de capteurs minuscules pourraient être attachés au patient. Chaque nœud capteur a une tâche spécifique (la détection du rythme cardiaque ou la pression artérielle).
- Localiser les médecins au sein de l'hôpital : les médecins peuvent également être équipés de capteurs afin de savoir leurs positions.
- L'administration de médicaments dans les hôpitaux : pour réduire le taux d'une mauvaise prescription des médicaments aux patients, il est possible grâce aux nœuds capteurs attachés aux patients d'identifier leurs allergies et les médicaments nécessaires.

#### 1.5.4 Applications de transport intelligent

Avec la croissance du nombre de véhicules, les infrastructures sont saturées et on assiste à une augmentation des bouchons, accidents, temps passé dans les transports et une augmentation de la pollution due aux émissions de polluants par les véhicules.

Afin de répondre à ces problématiques, les Systèmes de transport intelligent ont émergé comme une application des RCSFs au domaine du transport [An et al. \[2011\]](#), [Dimitrakopoulos and Demestichas \[2010\]](#). D'une manière générale, les RCSFs sont utilisés pour collecter des informations des infrastructures et des véhicules, les transmettre à un système central pour l'analyse et le traitement. Ensuite informer les usagers de la situation et d'éventuelles mesures à prendre.

#### 1.5.5 Applications commerciales

Il est possible d'intégrer des capteurs au processus de stockage et de livraison dans le domaine commercial. Le réseau ainsi formé pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un fournisseur. Il devient alors possible pour un client qui attend la réception d'une marchandise, d'avoir un avis de livraison en temps réel et de connaître la localisation actuelle du fournisseur [Yick et al. \[2008\]](#).

Pour les entreprises, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré [Akyildiz et al. \[2002a\]](#).

## 1.6 TYPES DES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

Les RCSFs actuels sont déployés sur terre, sous terre et sous-marin. Selon l'environnement, un réseau de capteurs fait face à différents défis et contraintes. Il existe cinq types de RCSFs : RCSF terrestre, RCSF souterrain, RCSF sous-marin, RCSF multimédia et RCSF mobile [Yick et al. \[2008\]](#).

### 1.6.1 RCSFs terrestres

Les RCSFs terrestres [Yick et al. \[2008\]](#) se composent généralement de centaines à des milliers de nœuds de capteurs sans fil peu coûteux déployés dans une zone donnée, soit de manière ad-hoc, soit de manière pré-planifiée. Dans le cadre d'un déploiement ad-hoc, les capteurs peuvent être largués d'un avion et placés au hasard dans la zone cible. Dans le déploiement pré-planifié, il existe des modèles de placement de grille, de placement optimal, de placement 2D et 3D.

Dans un RCSF terrestre, une communication fiable dans un environnement dense est très importante. Les nœuds de capteurs terrestres doivent être capables de communiquer efficacement les données à la station de base. Alors que l'énergie de la batterie est limitée et peut ne pas être rechargeable, les nœuds de capteurs terrestres peuvent cependant être équipés d'une source d'alimentation secondaire telle que des cellules solaires [Akbari \[2014\]](#). Dans tous les cas, il est important que les nœuds capteurs conservent l'énergie. Pour un RCSF terrestre, l'énergie peut être conservée avec un routage optimal multi-sauts, une transmission à courte distance, une agrégation de données éliminant la redondance des données et utilisant des mécanisme de sommeil.

### 1.6.2 RCSFs souterrains

Dans les RCSFs souterrains, les nœuds de capteurs sont insérés sous la terre ou dans une grotte ou une mine utilisées pour surveiller les conditions souterraines. Des nœuds puits (stations de base) supplémentaires sont situés au-dessus du sol pour relayer les informations des capteurs vers la station de base centrale. Un RCSF souterrain est plus cher qu'un RCSF terrestre en termes d'équipement, de déploiement et de maintenance. Les capteurs coûtent cher car les pièces d'équipement appropriées doivent être sélectionnées pour assurer une communication fiable à travers le sol, les roches, l'eau et d'autres contenus minéraux [Malik et al. \[2022\]](#).

L'environnement souterrain rend la communication sans fil difficile en raison des pertes de signal et des niveaux élevés d'atténuation. Contrairement aux RCSFs terrestres, le déploiement d'un RCSF souterrain nécessite une planification minutieuse et des considérations d'énergie et de coût. L'énergie est une préoccupation importante dans les RCSFs souterrains. Comme les RCSFs terrestres, les nœuds de capteurs souterrains sont équipés d'une quantité d'énergie limitée et une fois déployé dans le sol, il est difficile de recharger ou de remplacer la batterie d'un capteur. Comme précédemment, un objectif clé est de conserver l'énergie afin d'augmenter la durée de vie du réseau qui peut être atteint en mettant en œuvre un protocole de communication efficace [Yick et al. \[2008\]](#), [Singh et al. \[2022\]](#).

### 1.6.3 RCSFs sous-marins

Les RCSFs sous-marins [Islam et al. \[2022\]](#) consistent en un certain nombre de nœuds de capteurs et de dispositifs déployés sous l'eau. Contrairement aux RCSFs terrestres, les nœuds de capteurs sous-marins sont plus chers et le nombre de nœuds déployés est moins. Des véhicules sous-marins autonomes sont utilisés pour l'exploration ou la collecte de données à partir de nœuds de capteurs. Par rapport à un déploiement dense de nœuds capteurs dans un RCSF terrestre, un déploiement clairsemé de nœuds capteurs est placé sous l'eau.

Les communications sans fil sous-marines typiques sont établies par transmission d'ondes acoustiques. Un défi dans la communication acoustique sous-marine est la bande passante limitée, le long délai de propagation et le problème

d'affaiblissement du signal [Gussen et al. \[2016\]](#). Un autre défi est la défaillance des nœuds en raison des conditions environnementales. Les nœuds de capteurs sous-marins doivent pouvoir s'auto-configurer et s'adapter à un environnement océanique hostile. Les capteurs sous-marins sont équipés d'une batterie limitée qui ne peut pas être remplacée ou rechargée. La question de la conservation de l'énergie pour les RCSFs sous-marins implique de développer des techniques de communication et de mise en réseau sous-marines efficaces.

#### 1.6.4 RCSFs multimédia

Des RCSFs multimédias ont été proposés pour permettre la surveillance et le suivi d'événements sous forme de multimédia tels que la vidéo, l'audio et l'imagerie [Akyildiz et al. \[2007\]](#). Les RCSFs multimédias se composent d'un certain nombre de nœuds de capteurs équipés de caméras et de microphones. Ces nœuds de capteurs s'inter-connectent via une connexion sans fil pour la récupération, le traitement, la corrélation et la compression des données. Les nœuds de capteurs multimédias sont déployés de manière pré-planifiée dans l'environnement pour garantir la couverture. Les défis du réseau RCSF multimédia incluent une forte demande de bande passante, une consommation d'énergie élevée, la qualité de service (QoS), les techniques de traitement et de compression des données et la conception multi-couche. Un contenu multimédia tel qu'un flux vidéo nécessite une bande passante élevée pour que le contenu soit diffusé. En conséquence, un débit de données élevé entraîne une consommation d'énergie élevée [Yick et al. \[2008\]](#).

Des techniques de transmission prenant en charge une bande passante élevée et une faible consommation d'énergie doivent être développées [Han et al. \[2016\]](#). L'approvisionnement QoS est une tâche difficile dans un RCSF multimédia en raison du délai variable et de la capacité de canal variable. Il est important qu'un certain niveau de QoS doit être atteint pour une livraison fiable de contenu. Dans un réseau, le traitement, le filtrage et la compression peuvent améliorer considérablement les performances du réseau en termes de filtrage et d'extraction des informations redondantes et d'agrégation des données [Al-Ariki and Swamy \[2017\]](#), [Yick et al. \[2008\]](#).

### 1.6.5 RCSFs mobiles

Les RCSFs mobiles sont composés d'un ensemble de nœuds de capteurs qui peuvent se déplacer par eux-mêmes et interagir avec l'environnement physique. Les nœuds mobiles ont la capacité de détecter, de calculer et de communiquer comme des nœuds statiques. Un RCSF mobile peut commencer par un déploiement initial et les nœuds peuvent ensuite se déployer pour rassembler information. Une autre différence est la distribution des données. Dans un RCSF statique, les données peuvent être distribuées à l'aide d'un routage fixe, tandis que le routage dynamique est nécessaire dans un RCSF mobile. Les défis du RCSF mobile incluent le déploiement, la localisation, l'auto-organisation, la navigation et le contrôle, la couverture, l'énergie, la maintenance et le traitement des données [Yick et al. \[2008\]](#).

Les applications des RCSFs mobiles incluent la surveillance de l'environnement, le suivi des cibles, la recherche et le sauvetage et la surveillance en temps réel des matières dangereuses. Pour la surveillance environnementale dans les zones sinistrées, le déploiement manuel peut ne pas être possible. Avec capteur mobile nœuds, ils peuvent se déplacer vers des zones d'événements après le déploiement pour fournir la couverture requise. Dans la surveillance et le suivi militaires, les nœuds de capteurs mobiles peuvent collaborer et prendre des décisions en fonction de la cible [Ahmad et al. \[2016\]](#). Les nœuds de capteurs mobiles peuvent atteindre un degré de couverture et de connectivité plus élevé que les nœuds de capteurs statiques. En présence d'obstacles sur le terrain, les nœuds mobiles peuvent planifier à l'avance et se déplacer de manière appropriée vers les régions obstruées pour augmenter l'exposition de la cible.

## 1.7 CARACTÉRISTIQUES DES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL ET CONTRAINTES DE CONCEPTION

### 1.7.1 Caractéristiques des RCSFs

Un réseau de capteurs présente les caractéristiques suivantes :

- L'absence d'infrastructure : les réseaux Ad-hoc en général, et les RCSFs

en particulier se distinguent des autres réseaux par la propriété d'absence d'infrastructure.

- La taille importante : un réseau de capteurs peut contenir des milliers de nœuds.
- Les interférences : les liens radio ne sont pas isolés, deux transmissions simultanées sur une même fréquence, ou utilisant des fréquences proches, peuvent causer des interférences.
- La topologie dynamique : les capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire rendant ainsi la topologie du réseau fréquemment changeante. D'autre part, les nœuds peuvent être équipés par un système de déplacement.
- La sécurité physique limitée : les RCSFs sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées en terme de communication seulement.
- La bande passante limitée : une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé. Ce partage fait que la bande passante réservée à un nœud est limitée.
- La contrainte d'énergie, de stockage et de calcul : la caractéristique la plus critique dans les réseaux de capteurs est la limitation de ses ressources énergétiques car chaque capteur possède une petite batterie qui stocke une faible quantité d'énergie. Afin de prolonger la durée de vie du réseau, une minimisation des dépenses énergétiques est exigée chez chaque nœud. Ainsi, la capacité de stockage et la puissance de calcul sont limitées dans un capteur.
- Les nœuds font les tâches de surveillance et de suivi d'un part, et d'autre part, ils doivent accomplir la fonction de routage dans la plupart des cas.
- Le flux de données suit le schéma Plusieurs à un (Many to One) ; c'est-à-dire depuis les nœuds vers la base et non pas Plusieurs à plusieurs comme dans les réseaux adhoc.
- La station de base peut être mobile, et donc, il faut gérer ce type de configuration.

### 1.7.2 Contraintes et facteurs de conception des RCSFs

Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit [Tan and Panda \[2010\]](#), [Akyildiz et al. \[2002a\]](#) :

- L'environnement : les capteurs sont souvent déployés en masse dans des endroits tels que des champs de bataille au-delà des lignes ennemies, à l'intérieur de grandes machines, au fond d'un océan, dans des champs biologiquement ou chimiquement souillés, etc. Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiques éloignées.
- Les ressources limitées : généralement les nœuds de capteurs ont une taille très petite. La miniature des capteurs limite la quantité de ressources qu'il peut contenir. D'où des capacités de traitement et de mémoire très limitées.
- La scalabilité : Le nombre de nœuds déployés pour un projet peut atteindre un grand nombre. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter-capteurs et nécessite que la station de base soit équipée de beaucoup de mémoire pour stocker les informations reçues.
- La tolérance aux pannes : certains nœuds peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner à cause d'un manque d'énergie, un problème physique ou une interférence. Ces problèmes ne doivent pas affecter le fonctionnement de tout le réseau, c'est le principe de la tolérance aux fautes ou pannes. La tolérance aux pannes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruptions si une erreur intervenue sur un ou plusieurs nœuds.
- Les coûts de production : souvent, les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre de nœuds. Le prix d'un nœud est critique afin de pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel.
- Les médias de transmission : il faut s'assurer de la disponibilité du moyen de transmission choisi dans l'environnement de déploiement et de permettre au réseau d'accomplir la totalité de ses tâches.
- Agrégation de données : dans les RCSFs, les données produites par les

noeuds capteurs voisins sont très corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer la réception par la station de base d'informations redondantes. Réduire la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau et ainsi de prolonger sa durée de vie.

- La gestion de l'énergie : comme les noeuds capteurs sont des composants micro-électroniques, ils ne peuvent être équipés que par des sources limitées d'énergie. De plus, dans certaines applications, ces noeuds ne peuvent pas être dotés de mécanismes de rechargement d'énergie, par conséquent, la durée de vie d'un noeud capteur dépend fortement de la durée de vie de la batterie associée.

### 1.7.3 Sources de consommation d'énergie dans un RCSF

La majorité des travaux de recherche menés actuellement se concentrent sur ce problème afin de concevoir des algorithmes et protocoles spécifiques à ce genre de réseau pour consommer le minimum d'énergie. Dans les réseaux de capteurs, l'efficacité en consommation d'énergie représente une métrique de performance significative, qui influe directement sur la durée de vie du réseau en entier. A cause de cela, lors du développement des protocoles, les concepteurs recourent généralement à la négligence des autres métriques de performances telles que la durée de transmission et le débit, au profit du facteur de consommation d'énergie [Tan and Panda \[2010\]](#).

L'énergie emmagasinée dans un noeud capteur est consommée par trois fonctions principales : le captage, les traitements et la communication.

- Énergie de captage : la tâche de détection est effectuée par le composant de capture qui traduit les phénomènes physiques en signal électrique qui peut être digital ou analogique. Il existe plusieurs types de composants qui mesurent les paramètres de l'environnement comme la température, le son, l'image, la pression, etc. Les sources de consommation d'énergie dans ces composants peuvent être : l'échantillonnage des signaux, la conversion des signaux physiques en signaux électriques, le traitement des signaux et la conversion analogique/ numérique. La consommation

d'énergie par ces composants est dépendante de leurs tâches. A titre d'exemple, les capteurs de température ou de tremblement de terre sont moins consommateurs d'énergie comparés à ceux d'imagerie ou de vidéo [Raghunathan et al. \[2002\]](#).

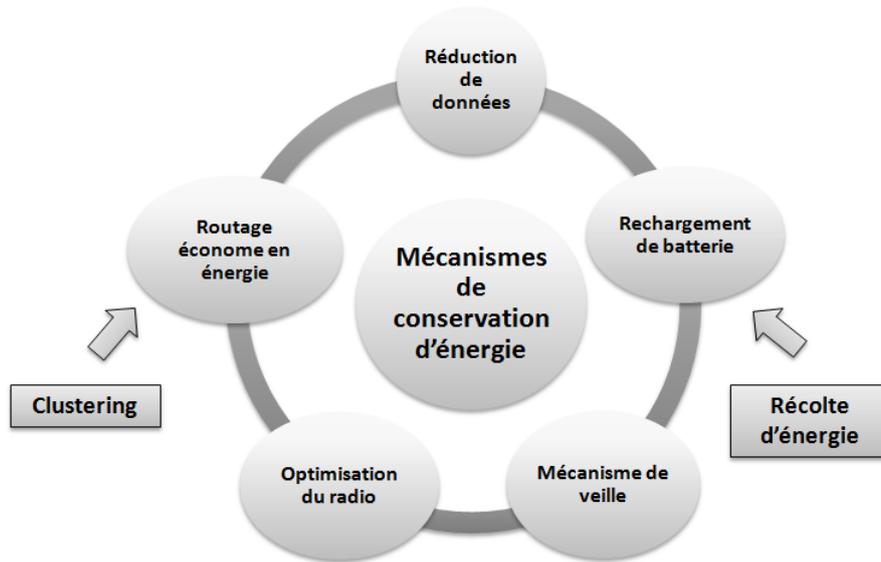
- Énergie de traitements : la tâche de traitement inclut le contrôle des composants de capture et l'exécution des protocoles de communication et des algorithmes de traitement de signaux sur les données collectées. Elle est effectuée par les microprocesseurs. Le choix de ces derniers est en fonction du scénario de l'application, et il fait en général un compromis entre le niveau de performance et la consommation d'énergie [Raghunathan et al. \[2002\]](#).
- Énergie de communication : l'énergie de communication représente la plus grande proportion de l'énergie totale consommée au niveau d'un nœud [Pottie and Kaiser \[2000\]](#). Cette communication est assurée dans la plus part des RCSFs par le support de transmission radio. La consommation d'énergie de ce dernier est affectée par plusieurs facteurs : le type du système de modulation, quantité des données à communiquer, la puissance de transmission (déterminée par la distance de transmission), etc [Abinaya and Asha \[2015\]](#).

#### 1.7.4 Solutions d'économie d'énergie dans les RCSFs

La période de temps mesurée depuis le début du fonctionnement du réseau jusqu'à ce que le réseau soit incapable de répondre aux besoins planifiés est appelée durée de vie du réseau. Chaque capteur a une capacité énergétique limitée qui est stockée dans la plupart des cas dans une petite batterie inéchangeable. La capacité limitée d'énergie dans chaque nœud influe sa durée de vie qui influe la durée de vie du réseau en entier.

Plusieurs solutions au problème d'économie d'énergie sont proposées telles que la récupération d'énergie renouvelable [Akbari \[2014\]](#), les mécanismes de veille [Afsar and Tayarani-N \[2014\]](#), le clustering [Prabhu and Sophia \[2013\]](#), [Afsar and Tayarani-N \[2014\]](#) et bien d'autres ([Rault et al. \[2014\]](#)). La Figure 1.3 présente une classification des mécanismes d'économie d'énergie.

FIGURE 1.3 – Classification des mécanismes d'économie d'énergie dans les RCSFs



## 1.8 CONCLUSION

A travers ce chapitre, nous avons défini et présenté l'architecture d'un nœud de capteur. Nous avons décrit aussi l'architecture d'un réseau de capteur sans fil, les domaines d'application des RCSFs, leurs types et leurs caractéristiques. Nous avons aussi montré du doigt les contraintes de ces environnements dont la limitation énergétique, la limitation du mémoire et une déficience en environnements hostiles présentant des obstacles divers ainsi que les difficultés de déploiement.

En plus, nous avons présenté les sources de consommation d'énergie ainsi les solutions proposer pour remédier à ces problématiques. Dans la suite du manuscrit, nous allons décrire les notions nécessaires sur la fiabilité des capteurs ainsi les solutions proposées.

# FIABILITÉ DES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

# 2

En pratique, certains composants de capteur (batterie par exemple) pourraient subir des pannes aléatoires qui entravent la continuité de service. Il est donc impératif de prendre en considération l'aspect fiabilité dans toute modélisation qui se veut réaliste.

Dans le domaine des RCSFs, une panne peut être une situation d'économie d'énergie, ou bien un mauvais fonctionnement dans les composants du capteur lui même.

Dans ce chapitre, nous présentons un ensemble de facteurs liés à l'aspect fiabilité des RCSFs tels que la durée de vie du réseau, les sources de pannes et les disciplines associées. Ensuite, nous donnons des classifications des techniques de tolérance aux pannes. Enfin, nous décrivons le mécanisme de veille et la récupération de l'énergie renouvelable comme solutions à adopter.

## 2.1 DURÉE DE VIE D'UN RÉSEAU DE CAPTEURS

La vie d'un réseau de capteurs correspond à la période de temps durant laquelle le réseau peut, selon le cas : maintenir assez de connectivité, couvrir le domaine d'intérêt, ou garder le taux de perte d'information en-dessous d'un certain seuil. La vie du système est donc liée à la vie des nœuds de capteurs. La vie d'un nœud de capteur dépend essentiellement au facteur de l'énergie qu'il consomme en fonction du temps et la quantité d'énergie dont il dispose [Kacimi \[2009\]](#).

Il existe plusieurs définitions pour la durée de vie d'un réseau de capteurs dans ce domaine. Elle peut être définie par la durée jusqu'au moment où un certain nombre de nœuds meurent. Elle peut être définie par la durée jusqu'au moment où la couverture ou la connectivité, ou bien les deux atteignent un certain seuil. Un autre critère est de calculer la durée jusqu'au moment où le réseau devient incapable de répondre aux besoins souhaités par l'application.

Néanmoins, nous remarquons que les critères précédents sont liés. Si le nombre de nœuds morts dépasse un certain seuil, cela va influencer sur la couverture et la connectivité du réseau, et va l'empêcher de répondre aux besoins planifiés par le déploiement.

Dans la littérature, parce que les chercheurs considèrent des critères différents, plusieurs définitions sont proposées. Dans ce qui suit, nous présentons quelques unes :

### 2.1.1 Définition selon l'épuisement de l'énergie des nœuds

- La durée jusqu'à ce que le premier nœud consomme toute son énergie [Chang and Tassiulas \[2000\]](#), [Karl and Willig \[2007a\]](#), [Kacimi \[2009\]](#).
- La durée jusqu'à ce que le premier cluster-head épuise toute son énergie dans une configuration hiérarchique en groupes [Soro and Heinzelman \[2005\]](#);
- La durée jusqu'à ce qu'il reste au plus une certaine fraction de nœuds survivants dans le réseau [Cerpa and Estrin \[2004\]](#);
- Demi-vie du réseau : la durée jusqu'à ce que 50% des nœuds épuisent leurs batteries et se murent [Karl and Willig \[2007b\]](#);
- La durée jusqu'à ce que tous les capteurs épuisent leur énergie [Tian and Georganas \[2002\]](#);

### 2.1.2 Définition selon la connectivité du réseau

- La durée jusqu'à ce que le réseau soit partitionné : apparition de la première division du réseau en deux (ou plus) [Karl and Willig \[2007b\]](#);

- La durée jusqu'à ce que le réseau ne fournisse plus un taux acceptable de détection d'événements
- La durée pendant laquelle un pourcentage donné de nœuds possèdent un chemin vers la Station de Base [Cărbunar et al. \[2006\]](#).

### 2.1.3 Définition selon la couverture du réseau

- k-couverture : le temps durant laquelle la zone d'intérêt est couverte par au moins k nœuds [Mo et al. \[2005\]](#);
- 100%-couverture : La durée pendant laquelle chaque cible est couverte par au moins un nœud [Liu et al. \[2005\]](#);
- La durée pendant laquelle l'ensemble de la zone est couverte par au moins un nœud [Bhardwaj and Chandrakasan \[2002\]](#);
- $\alpha$ -couverture : la durée cumulée, au bout de laquelle au moins une portion  $\alpha$  de la région est couverte par au moins un nœud [Zhang et al. \[2005\]](#);
- La durée pendant laquelle la couverture tombe en-dessous d'un seuil prédéfini  $\alpha$  [Wu et al. \[2005\]](#);
- La durée de fonctionnement continu du système avant que la couverture ou la proportion de paquets reçus (PDR pour Packet Delivery Ratio) tombent en-dessous d'un seuil prédéfini [Cărbunar et al. \[2006\]](#);

### 2.1.4 Définition selon la couverture et connectivité du réseau en ensemble

- L'espérance de l'intervalle complet pendant lequel la probabilité de garantir simultanément une connectivité et une k-couverture est au moins  $\alpha$  [Mo et al. \[2005\]](#);
- La durée jusqu'à la perte de la connectivité ou de la couverture [Cardei and Wu \[2004\]](#);

### 2.1.5 Définition selon les objectifs du réseau

- La durée pendant laquelle le réseau satisfait continuellement les besoins de l'application [Tilak et al. \[2002\]](#).

## 2.2 SOURCES DES PANNES DANS LES RCSFS

Les RCSFS sont déployés dans des zones géographiques à des contraintes difficiles. L'environnement de déploiement influence les composants du réseau. La tâche essentielle des capteurs est de récolter l'information et la transmettre à la station de base en utilisant une communication sans fil. Tout échec dans le matériel ou le logiciel empêchera l'exploitation du réseau. Une panne peut être alors une faute ou une erreur survenue dans le nœud lui-même ou dans le réseau [Chouikhi \[2016\]](#). Dans ce qui suit, nous allons présenter les sources des pannes selon les composants du réseau qui lui causent, ainsi que l'impact de ces pannes sur le fonctionnement du réseau.

### 2.2.1 Pannes matérielles

#### A. Pannes du nœud de capteur

La panne d'un nœud peut survenir en raison de la défaillance d'un composant de capteur lui-même, soit l'unité de capture, ou l'unité de traitement, ou la mémoire, ou l'unité de communication, ou la batterie, ou un autre composant. Généralement, la plupart des pannes matérielles survenues à cause de l'épuisement de l'énergie stockée dans une petite batterie. Si l'énergie d'un nœud est totalement consommée, alors le nœud est considéré mort. D'autre part, une faible quantité d'énergie résiduelle va causer des erreurs au niveau de communication. Il est observé que l'énergie limitée peut causer des lectures incorrectes quand elle chute en dessous d'un certain seuil [Chouikhi \[2016\]](#).

Cependant, un échec empêche le nœud de capteur à communiquer avec le voisinage va isoler le nœud et le nœud sera compté comme un nœud mort. Par ailleurs, la défaillance au niveau de l'unité de capture n'empêche pas le nœud d'accomplir d'autres tâches comme le routage et l'envoi des paquets reçus.

#### B. Pannes du réseau

Un RCSF est constitué de plusieurs nœuds de capteurs et, en général, d'une seule station de base. Ces composants utilisent une communication sans fil qui

est intrinsèquement non fiable. En effet, plusieurs facteurs peuvent influencer sur la qualité de communication comme les interférences entre les nœuds du même réseau, ou avec ceux d'un autre. Nous pouvons aussi citer les collisions entre messages qui sont des sources non négligeables d'erreurs dans ce cas-là.

Pour résoudre les problèmes de fiabilité des liens de communication, les concepteurs peuvent améliorer la performance de la communication par l'utilisation des méthodes de correction d'erreurs, des mécanismes de retransmission et d'utiliser des algorithmes pour traiter les collisions.

### **C. Pannes de la station de base**

Tous les nœuds de capteurs envoient leurs messages à la station de base de façon directe ou indirecte. Une panne au niveau de celle-ci (de communication ou de traitement) va bloquer la totalité du réseau. Généralement, de par la qualité de ses composants et les politiques de maintenance adoptées, la station de base est un composant qui tombe rarement en panne.

### **D. Pannes du chef de cluster**

Dans une configuration en clusters, l'échec du leader de groupe (souvent appelé cluster-head) conduit à un échec de communication sur l'ensemble du cluster. Une solution de tolérance à ce genre d'échec consiste à choisir deux nœuds comme leader ou à utiliser des solutions logicielles au niveau du protocole de communication. Par exemple, sélectionner un autre chef de groupe après un certain nombre de tentatives de communication avec l'ancien cluster-head.

## **2.2.2 Pannes logicielles**

### **A. Panne du système d'exploitation**

Le système d'exploitation des nœuds de capteurs peut contenir des bugs. Ces derniers peuvent empêcher le nœud d'accomplir ses tâches essentielles.

## B. Panne du protocole du routage

Le protocole de routage (ou middleware de communication) peut être défaillant à cause d'erreurs de programmation ou suite à des échecs de matériels (processeur ou mémoire).

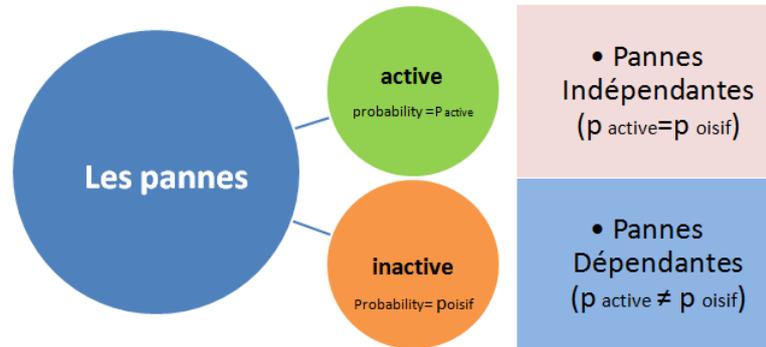
## 2.3 DISCIPLINES DE PANNES

Habituellement, lorsqu'un nœud de capteur détecte un événement, il crée rapport sous forme d'un message et l'envoie à un voisin pour atteindre la station de base. Un voisin peut être considéré comme une station de service (un serveur). Cependant, dans la vie réelle, le serveur peut tomber en panne et doit être réparée. Ce phénomène de panne peut être rencontré dans plusieurs domaines tels que les réseaux informatiques, les réseaux de capteurs (notre cas), les systèmes de fabrication flexibles et bien d'autres [Jain and Jain \[2010\]](#). Il existe deux types de pannes : les pannes actives et les pannes inactives. Le premier signifie que la panne se produit lorsque le serveur est fonctionnel. Alors que la panne d'inactivité se produit lorsque le serveur (un voisin dans notre cas) est inactif. Soient  $p_{active}$  et  $p_{oisif}$  deux valeurs de probabilité associées aux pannes actives et inactives respectivement. Si  $p_{active} = p_{oisif}$  la discipline est dite avec pannes indépendantes. Par contre, si on peut avoir  $p_{active} \neq p_{oisif}$ , alors la stratégie est dite avec pannes dépendantes (voir Fig. 2.1). Par conséquent, la discipline de pannes indépendantes est un cas particulier de l'approche des pannes dépendantes. Dans cette dernière, la probabilité de défaillance dépend de l'état du serveur. Ainsi, les valeurs  $p_{active}$  et  $p_{oisif}$  ne sont pas nécessairement égales [Gharbi and Ioualalen \[2006\]](#).

## 2.4 TOLÉRANCE AUX PANNES

La défaillance ou le blocage des nœuds dans un réseau de capteurs peut être engendrés par plusieurs causes, notamment l'épuisement d'énergie, l'endommagement physique, ou les interférences liées à l'environnement.

FIGURE 2.1 – Disciplines des pannes



### 2.4.1 Définition de la tolérance aux pannes

La propriété de tolérance aux pannes est définie par l'habilité du réseau à maintenir ses fonctionnalités sans interruptions provoquées par la panne des capteurs. Elle vise donc à minimiser l'influence de ces pannes sur la tâche globale du réseau [Akyildiz et al. \[2002b\]](#), [Khelladi and Badache \[2004\]](#).

### 2.4.2 Stratégie de conception des protocoles pour la tolérance aux pannes

Les protocoles conçus pour les réseaux de capteurs doivent atteindre le niveau de tolérance aux pannes requis par le réseau. Cela dépend essentiellement de l'environnement de déploiement du réseau, des caractéristiques des micro-capteurs, etc. En effet, nous distinguons deux types d'environnements dans lesquels les RSCFs seront installés [Khelladi and Badache \[2004\]](#) :

#### A. Environnements avec un faible degré d'interférence

Dans ce cas, le réseau de capteurs est destiné aux environnements avec un faible degré d'interférences et de collisions, tel que ceux utilisés dans les bâtiments pour surveiller le taux d'humidité et le degré de température. Les protocoles utilisés ne doivent pas cibler une grande tolérance aux pannes, car dans ce type de réseau, il n'existe pas une grande interférence avec l'environnement, et les nœuds ne sont pas exposés au risque d'endommagement.

## B. Environnements avec des conditions difficiles

Contrairement au cas précédent, ici, le réseau est destiné aux applications où les conditions de déploiement sont très difficiles telles que les applications militaires, sous-marins, le contrôle des volcans, sous-terrestre, etc. Dans ces situations, les nœuds sont exposés à un grand risque d'endommagement par des actions hostiles. Par exemple, dans les applications militaires, si le réseau est destiné à la surveillance et le contrôle d'un champs de bataille, les nœuds de capteurs peuvent être écrasés par les véhicules militaires ou par un bombardement à distance. Donc, le niveau de tolérance aux pannes visé par les protocoles employés doit être très élevé, et les informations captées sont très critiques.

Par conséquent, le niveau de tolérance aux pannes requis dépend de l'application du réseau de capteurs conçu, et les schémas de conception doivent prendre en charge ce paramètre [Khelladi and Badache \[2004\]](#).

## 2.5 CLASSIFICATION DES TECHNIQUES DE TOLÉRANCE AUX PANNES

Les mécanismes de tolérance aux pannes peuvent être classés selon plusieurs critères. Parmi lesquels nous avons le temps d'intervention, l'architecture et la taille du réseau [Chouikhi \[2016\]](#).

### 2.5.1 Classification selon le temps

Dans cette classification, les procédures de tolérance aux pannes sont classées selon le moment d'intervention. Nous présentons deux classes : les mécanismes de tolérance aux pannes préventifs et réactifs.

#### A. Les mécanismes de tolérance aux pannes préventifs

Ces mécanismes servent à éviter l'occurrence des pannes dans le réseau en les prévoyant pour préparer des solutions avant leurs occurrences. Pour cela, les nœuds de capteurs doivent utiliser des techniques de conservation de l'énergie

pour prolonger leur durée de vie. Au niveau du réseau, il faut configurer les protocoles pour continuer à travailler même si certains nœuds tombent en panne.

### **B. Les mécanismes de tolérance aux pannes réactifs**

Dans cette catégorie, le mécanisme de tolérance aux pannes est exécuté après l'occurrence de la panne. Le mécanisme doit rétablir le bon fonctionnement du réseau. Pour cela, la maintenance se fait par l'ajout de nouveaux capteurs ou bien par l'activation de nœuds mis en réserve.

## **2.5.2 Classification selon la taille du réseau**

La taille du réseau influe considérablement sur le choix de la technique de tolérance aux pannes à appliquer (solution centralisée ou distribuée). Par conséquent, les mécanismes adoptés se démarquent selon la taille du réseau. Nous distinguons deux classes : les mécanismes pour RCSFs à petite échelle et pour ceux à grande échelle.

### **A. Mécanismes pour RCSFs à petite échelle**

Les réseaux à petite échelle ou de petite taille sont composés d'un petit nombre de nœuds capteurs. Chaque nœud a un rôle important dans la capture et la transmission des données. Cependant, l'échec de n'importe quel nœud entrave considérablement la fiabilité du réseau. En effet, une solution centralisée est privilégiée pour les RCSFs de petite taille où le nœud puits prend en charge le déroulement de l'algorithme de restauration et alerte les nœuds capteurs si de nouveaux paramètres de réseau doivent être adoptés [Chouikhi \[2016\]](#).

### **B. Mécanismes pour RCSFs à grande échelle**

Dans les réseaux à grande échelle ou de grande taille, un grand nombre de nœuds est déployé sur la zone de couverture. Les RCSFs à grande échelle sont essentiellement conçus pour les applications de collecte de données, pour lesquelles l'intérêt est d'obtenir des informations sur la région contrôlée. Comme la densité de déploiement est grande et la corrélation spatiale est très forte dans

ce genre de RCSFs, la panne d'un nœud devient négligeable tant que les nœuds voisins continuent à fonctionner correctement.

Dans un réseau à grande échelle, une solution centralisée serait très peu avantageuse compte tenue du grand nombre de packets envoyés afin de reconfigurer le réseau. Par conséquent, une solution distribuée serait privilégiée [Chouikhi \[2016\]](#).

### 2.5.3 Classification selon l'architecture

Cette classification regroupe les mécanismes de tolérance aux pannes selon le sous-système responsable de leur application. Nous distinguons les mécanismes associés aux aspects suivants [Chouikhi \[2016\]](#) :

#### A. Gestion de l'énergie

Les mécanismes de cette catégorie servent à utiliser des techniques de conservation de l'énergie pour éviter l'épuisement prématuré des batteries des capteurs afin de maximiser la durée de vie du réseau. Les mécanismes de veille et les mécanismes d'équilibrage de charge font partie à cette catégorie.

#### B. Gestion de routage

Les mécanismes de ce groupe sont les techniques utilisées pour l'établissement de nouvelles routes en cas de défaillance de certains chemins. Les protocoles de routage réactifs comme le protocole AODV (Ad-hoc On demand Distance Vector) [Perkins et al. \[2003\]](#) et ses différentes améliorations [Singh and Kumar \[2017\]](#). Les protocoles de routage hybrides sont applicables aussi, comme le protocole ZRP (Zone Routing Protocol) [Beijar \[2002\]](#).

#### C. Gestion de données

Toutes les techniques de réduction de la taille de données dans les RCSFs soit par agrégation ou compression appartiennent à cette catégorie. Généralement, l'agrégation est combinée avec la configuration en groupes ou clustering pour réduire la quantité de données communiquées dans le réseau. Le clustering organise les nœuds dans des groupes (clusters) et sélectionne un nœud chef

(ou cluster head) en tant que responsable du traitement, de l'agrégation et de la transmission des données. Plusieurs protocoles de clustering ont été proposés, à savoir LEACH [Alvarado et al. \[2017\]](#) et ses extensions PEGASIS [Lindsey and Raghavendra \[2002\]](#), HEED [Younis and Fahmy \[2004\]](#), etc. ([Afsar and Tayarani-N \[2014\]](#), [Khedr et al. \[2021\]](#)).

#### D. Gestion de couverture et de connectivité

Les mécanismes de cette classe servent à régler les problèmes d'échecs liés à la capture et à la connectivité. Plusieurs algorithmes sont proposés pour garantir la couverture et la connectivité dans un réseau de capteurs [Cărbunar et al. \[2006\]](#), [Karl and Willig \[2007b\]](#). Le protocole CCP (Coverage Configuration Protocol) est implémente un algorithme de configuration de couverture [Wang et al. \[2003\]](#). CCP est proposé pour maintenir la couverture et la connectivité en utilisant le minimum possible de nœuds. Ce mécanisme active un ensemble restreint de nœuds de sorte que le champ de captage entier soit couvert et que le réseau reste connecté. Les reste des nœuds entrent en veille afin de prolonger la durée de vie du réseau. D'autres mécanismes utilisent des noeuds de relais comme dans [Khelifa et al. \[2009\]](#) et [Liu et al. \[2006\]](#).

## 2.6 RCSFs AVEC MÉCANISME DE VEILLE

En général, une radio peut fonctionner dans quatre modes opératoires différents : transmission, réception, actif et sommeil. Bien que la radio consomme beaucoup plus d'énergie dans les modes transmission et réception, le mode actif est également coûteux en énergie. Dans la plupart des cas, la consommation d'énergie est relativement élevée dans le mode actif, puisque ce dernier oblige de mettre le module radio sous tension afin de décoder les signaux radios et détecter l'arrivée des paquets qui lui sont destinés.

Pendant l'utilisation de l'unité de transmission, de nombreuses pertes d'énergie se produisent dues à l'écoute oisive, aux collisions (apparaissant lorsque plusieurs noeuds tentent d'envoyer des données en même temps) et à la surchauffe (survenant lorsque le capteur reçoit des paquets destinés à d'autres noeuds) [Polastre et al. \[2004\]](#).

Rester actif sans recevoir de paquets depuis les voisins est appelé écoute oisive (ou à vide). Étant donné que la transmission de paquets dépend généralement de l'arrivée d'événements imprévisibles, un capteur doit garder sa radio allumée. Une telle écoute à vide consomme une grande quantité d'énergie. Pour remédier à ce problème, de nombreuses solutions ont été proposées. Elles sont basées sur l'utilisation d'une approche de sommeil dans laquelle les capteurs alternent régulièrement entre les états actif et endormi. C'est pourquoi nous l'appelons cycle de service. Formellement, le cycle de service est le rapport de la durée d'écoute sur la somme des durées d'écoute et de sommeil [Ye et al. \[2006\]](#).

La Table 2.1 montre la quantité d'énergie consommée par deux capteurs différents lorsque leur radio est utilisée [Ye et al. \[2006\]](#). Par exemple, sur les capteurs Mica2, la radio consomme 22 mWatt au repos ou en réception, et 31,2 mWatt en émission. Sur les capteurs MicaZ, la radio consomme 56 mWatt en réception et en écoute, alors qu'en émission elle de 52,2 mWatt.

TABLE 2.1 – Consommation d'énergie par le radio pour les capteurs Mica2 et MicaZ

Fonction radio	Mica2	MicaZ
transmission	31,2 mW	52,2 mW
réception	22,2 mW	56,4 mW
écoute	22,2 mW	56,4 mW
sommeil	3 $\mu$ W	3 $\mu$ W

Trois techniques sont généralement utilisées pour réduire la dissipation d'énergie :

- TDMA (Time division multiple access ou accès multiple par répartition dans le temps) : utilisée dans le contrôle centralisé ou basé sur une topologie en groupes avec des cycles de service très faibles. La planification TDMA dépend du nombre de nœuds dans les clusters. Chaque nœud envoie ses paquets au cluster-head uniquement pendant le slot de temps qui lui est alloué [Sony et al. \[2015\]](#).
- Transmission coordonnée et planifiée : Cette technique est adoptée par T-MAC [Ye et al. \[2002\]](#) et S-MAC [Ye et al. \[2004\]](#). La planification de transmission permet d'économiser de l'énergie en faisant que les récepteurs et les émetteurs aient un rendez-vous qui est une période régulière et courte pour se rencontrer, et peuvent dormir dans le reste du temps. Pour plus de

détails sur cette technique, voir [Hao et al. \[2012\]](#), [Nithya and Mahendran \[2015\]](#).

- LPL (low-power listening ou écoute à basse consommation) : Adoptée par B-MAC [Polastre et al. \[2004\]](#), dans cette technique les nœuds se réveillent pour vérifier l'activité du canal (cette action est appelée interrogation de canal). Si celui-ci est oisif, le nœud éteint immédiatement la radio ; sinon, il reste éveillé pour recevoir les données. Les nœuds interrogent régulièrement le canal avec une période de temps prédéfinie [Alfayez et al. \[2015\]](#).

Récemment, certaines approches ont utilisé des algorithmes intelligents pour déterminer le temps de sommeil optimal. En effet, ce temps affecte les performances des protocoles lors de la sélection du chemin. L'apprentissage automatique est introduit dans ce contexte pour l'agrégation de données dans les RCSF à cycle de service. Nous renvoyons les lecteurs intéressés à [Donta et al. \[2022\]](#) pour plus d'informations.

## 2.7 RCSFS AVEC RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

La récupération d'énergie (EH : Energy Harvesting) [Onishi and Ogose \[2018\]](#), [Akbari \[2014\]](#) fait référence à la collecte d'énergie renouvelable de l'environnement, comme le soleil, le vent, la chaleur corporelle, les coups de doigts, les coups de pied ou d'autres sources d'énergie et à les convertir en énergie électrique utilisée pour alimenter les nœuds de capteurs et augmenter leur durée de vie. Cette énergie récupérée peut être une source d'énergie alternative pour s'ajouter à une source d'alimentation principale (batterie) [Basagni et al. \[2013\]](#). EH a considérablement amélioré la durée de vie de l'ensemble du RCSF et a permis de fabriquer des nouveaux dispositifs de manière beaucoup plus fiable en évitant la perturbation de l'alimentation en énergie.

### 2.7.1 Définition de l'énergie renouvelable

Une énergie renouvelable fait référence à une énergie dont la source n'est pas épuisée lorsqu'elle est utilisée [Tan and Panda \[2010\]](#). Dans ce qui suit, nous

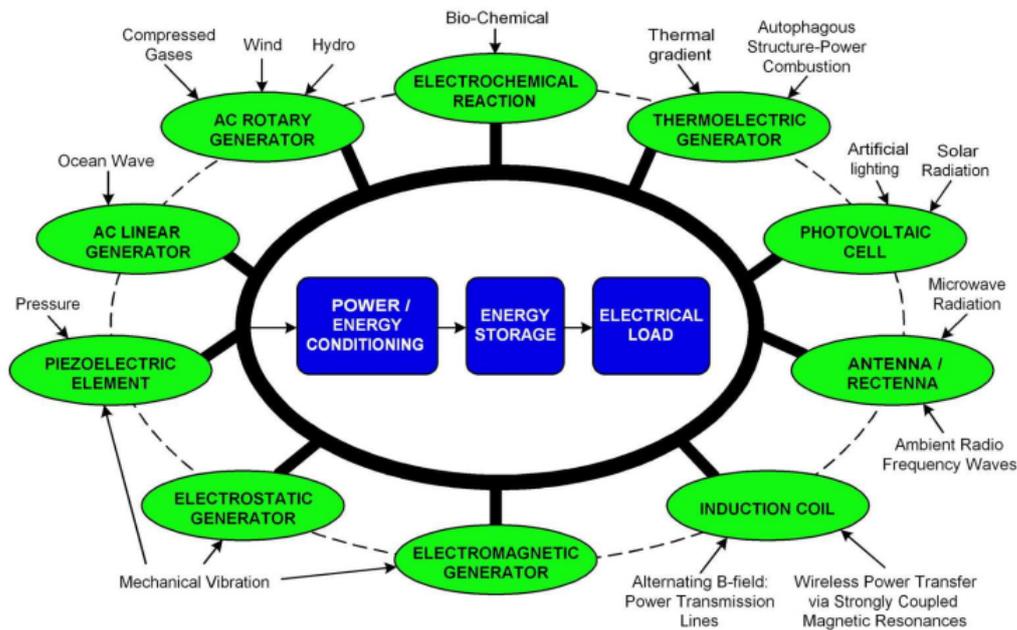
présentons les différentes sources d'énergie renouvelable, puis nous donnons plus de détails pour l'énergie solaire.

### 2.7.2 Sources d'énergie renouvelable

Il existe de nombreuses formes d'énergies renouvelables disponibles dans notre univers telles que : l'énergie thermique, l'énergie photovoltaïque (solaire, lumière), la bioénergie, l'énergie hydraulique, l'énergie marémotrice, l'énergie éolienne, l'énergie houlomotrice et géothermique Boyle [2004].

L'utilisation d'énergie renouvelable pour alimenter un capteur est appelée récupération d'énergie. La récolte d'énergie apporte beaucoup d'avantages au mode de fonctionnement d'un noeud de capteur. Nous pouvons citer par exemple : réduire la dépendance à l'énergie de la batterie, réduire les coûts d'installation et de maintenance, augmenter la durée de vie du noeud de capteur tant que l'énergie renouvelable est disponible, éliminer les coûts de remplacement de la batterie et rendre l'installation du RCSF très facile Tan and Panda [2010].

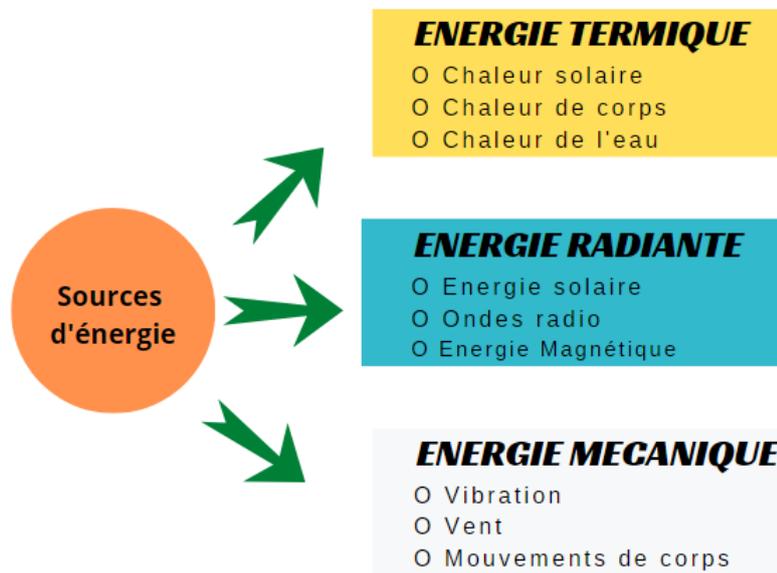
FIGURE 2.2 – Énergies renouvelables appropriées pour la récupération d'énergie Tan and Panda [2010]



Pour des raisons techniques, pas tout type d'énergies renouvelables est

adapté aux nœuds de capteurs. La Figure 2.3 présente les sources d'énergie communes pour la récolte d'énergie pour générer de l'énergie pour les capteur. Les énergies renouvelables peuvent être globalement classées en trois types essentiels : l'énergie thermique, l'énergie rayonnante (ou radiante) et l'énergie mécanique (voir Figure 2.2) [Vijayaraghavan and Rajamani \[2007\]](#), [Thakur et al. \[2017\]](#). D'autres classifications existent dans la littérature pour lesquelles nous renvoyons les lecteurs intéressés à [Kausar et al. \[2014\]](#).

FIGURE 2.3 – Sources appropriées pour la récupération d'énergie au sein des RCSFs [Basagni et al. \[2013\]](#), [Tan and Panda \[2010\]](#)



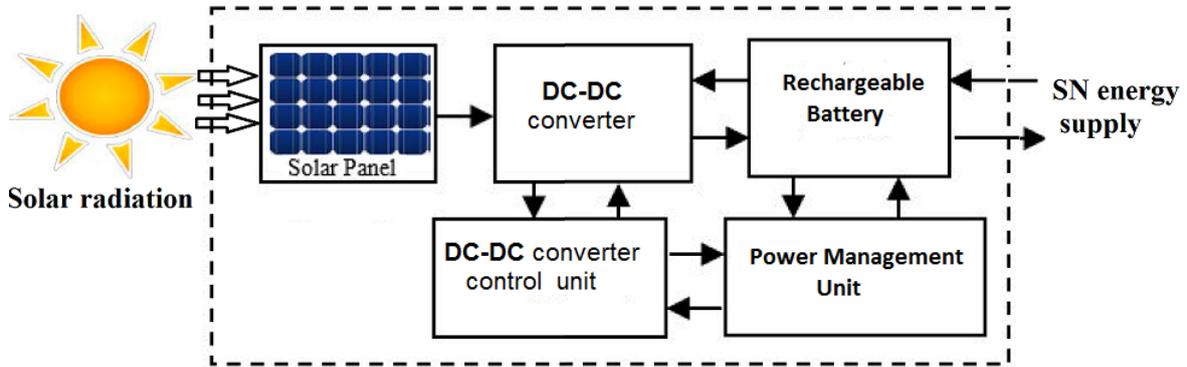
### 2.7.3 Récupération d'énergie solaire

Parmi les sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire est la plus attrayante pour les RCSFs, car elle est relativement plus prévisible et a une densité de puissance plus élevée par rapport aux autres sources d'énergie renouvelables. La quantité d'énergie solaire est d'environ  $15mW/cm^3$  en plein soleil,  $150 \mu w/cm^3$  à l'extérieur avec ciel nuageux et  $6 \mu w/cm^3$  à l'intérieur [Kang et al. \[2019\]](#), [Onishi and Ogose \[2018\]](#).

La figure 2.4 représente un système basique de collecte d'énergie solaire qui se compose d'un panneau solaire, d'un convertisseur DC-DC, d'une batterie

rechargeable, d'un circuit de protection de charge de batterie appelé unité de gestion de l'alimentation et d'une unité de commande de convertisseur DC-DC [Sharma et al. \[2018\]](#).

FIGURE 2.4 – Système de base pour collecter l'énergie solaire [Basagni et al. \[2013\]](#), [Sharma et al. \[2018\]](#)



La récupération de l'énergie renouvelable permet de libérer ou de réduire l'utilisation de la batterie afin d'économiser leur énergie jusqu'au moment où il y aura une pénurie d'énergie. La récolte à base d'énergie solaire (SEH : Solar Energy Harvesting) est un type de récolte d'énergie largement utilisé dans les RCSFs parce qu'il est relativement abondant par rapport à d'autres ressources ambiantes. L'un des matériaux les plus utilisés dans SEH sont des cellules photovoltaïques qui peuvent convertir l'énergie solaire en énergie électrique [Sharma et al. \[2018\]](#). La lumière du soleil se compose de particules d'énergie minuscules appelées photons. Le nombre de photons définit l'intensité du rayonnement solaire [Sah and Amgoth \[2020\]](#).

Les étapes de conversion de l'énergie photovoltaïque sont résumées dans ce qui suit [Würfel \[2007\]](#) :

- Transformation de la chaleur solaire en énergie chimique : les cellules solaires sont chauffées par le soleil pour atteindre des températures élevées. La température atteinte est en fonction de l'intensité du rayonnement solaire par angle solide et par intervalle d'énergie photonique. Quand une partie ou la totalité de ce rayonnement est absorbée par un matériau, les excitations sont produites à une densité élevée et avec le même spectre

d'énergie. En fin de compte, cette chaleur sera convertie en énergie chimique.

- Conversion de l'énergie chimique en énergie électrique : pour l'énergie électrique, nous avons besoin d'un courant de particules chargées.
- Utilisation de l'excitation primaire qui produit un ensemble d'excitons et d'électrons mobiles pour générer un courant électrique ou courant de charge.
- Stockage de l'énergie électrique dans une batterie à utiliser en temps utile (architecture d'utilisation après stockage); ou utilisation directe de l'énergie collectée pour alimenter les composants du noeud de capteur (architectures d'utilisation directe) [Basagni et al. \[2013\]](#).

En outre, une autre raison qui explique pourquoi le SEH est la solution de récolte la plus attrayante pour les capteurs tient au fait qu'il est relativement plus prévisible et à sa densité de puissance plus élevée par rapport aux autres sources d'énergie renouvelable. En effet, SEH fournit une quantité d'énergie égale à 100 mW pour chaque  $cm^3$  en lumière directe du soleil [Tan and Panda \[2010\]](#). Le panneau solaire qui porte les cellules photovoltaïques doit être mis à l'extérieur dans une position qui a une exposition directe au soleil. En fait, lorsque le panneau solaire est installé à l'intérieur, comme dans un bâtiment éclairé, l'intensité lumineuse est largement réduite et la source d'énergie solaire chute à près de  $100 \mu W/cm^3$ . Pour les capteurs intégrés qui doivent être déployés à l'intérieur, comme dans les maisons, ou dans des zones moins ensoleillées, comme les forêts, l'utilisation de la source de SEH peut ne pas être une solution de récolte appropriée [Tan and Panda \[2010\]](#), [Oukas and Boulif \[2020c\]](#).

## 2.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les sources des pannes, les disciplines de pannes et les stratégies de conception des protocoles pour la tolérance aux pannes. En suite, nous allons présenter les classifications des techniques de tolérance aux pannes. Nous avons donné aussi une description pour le mécanisme de veille comme une approche de conservation d'énergie. En suite, nous

avons présenté les sources d'énergie renouvelable appropriées aux RCSFs. Nous avons terminé ce chapitre par une brève présentation de l'utilisation de l'énergie solaire pour alimenter les nœuds de capteurs.

Dans la suite du manuscrit, nous allons présenter le formalisme des Réseaux de Petri dans un chapitre à part. En se basant sur ce formalisme, nous allons présenter des modélisations du trafic de communication dans un réseau de capteur sans fil dont le cas des nœuds fiables et non-fiables.

# RÉSEAUX DE PETRI STOCHASTIQUES GÉNÉRALISÉS

# 3

Ce chapitre présente les Réseaux de Petri (RdP ou PN : Petri Nets) utilisés pour la modélisation et l'évaluation de systèmes à événements discrets avec des activités simultanées, synchronisées, conflictuelles et non déterministes. Nous commençons par présenter les avantages des RdPs ordinaires. Ensuite, nous présentons la méthode de modélisation et d'analyse de ce formalisme. Dans une deuxième étape, nous présentons les Réseaux de Petri Stochastiques (RdPS ou SPN : Stochastic Petri Nets) qui représentent une méthode graphique et mathématique pour la modélisation des systèmes avec contrainte de temps.

Par la suite, nous présentons aussi les Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés (RdPSG ou GSPN : Generalized Stochastic Petri Nets) qui sont une extension des RdPS. Durant ce chapitre, nous présentons l'évaluation de performance des systèmes modélisés par les RdPs.

## 3.1 LES MODÈLES FORMELS POUR LA MODÉLISATION DES SYSTÈMES

### 3.1.1 Avantages des modèles formels

L'application des modèles mathématiques formels s'avère indispensable lors de la conception des réseaux de capteurs. Ce type de modélisation vise à avoir

des résultats exacts en appliquant des formules analytiques, ce qui rend le modèle facilement analysable, ou bien en appliquant des méthodes numériques ou algorithmiques pour des modèles plus complexes.

Une analyse par modèles formels peut aborder les problèmes de taille moyenne, comme pour les approches par simulation, mais, à la différence de celles-ci, elle permet aussi d'exhiber le pire des cas par rapport à la propriété à valider. Les modèles formels permettent ainsi une meilleure compréhension du système.

Dans la modélisation des RCSFs, plusieurs formalismes sont utilisés tels que la théorie des graphes [Majeed and Rauf \[2020\]](#), les files d'attente [Jayarajan et al. \[2019\]](#), les chaînes de Markov [Kalnoor and Subrahmanyam \[2020\]](#), les automates [Zimmermann \[2007b\]](#) et les réseaux de Petri [Gharbi and Ioualalen \[2006\]](#).

### 3.1.2 Avantages des RdPs

Pour modéliser des RCSFs, les RdPs présentent de nombreux avantages. Nous pouvons citer les suivants :

- Les RdPs de par leurs extensions combinent des avantages de la théorie des graphes, des chaînes de Markov et des files d'attente.
- Ils offrent deux types d'analyse : qualitative et quantitative. L'analyse qualitative se base sur la théorie des graphes, tandis que l'analyse quantitative est fondée sur le background mathématique des chaînes de Markov.
- Ils permettent de résoudre les problèmes de synchronisation, de blocage et de parallélisme.
- Ils permettent facilement de modéliser les fonctionnalités des systèmes avec ou sans la notion de temps.

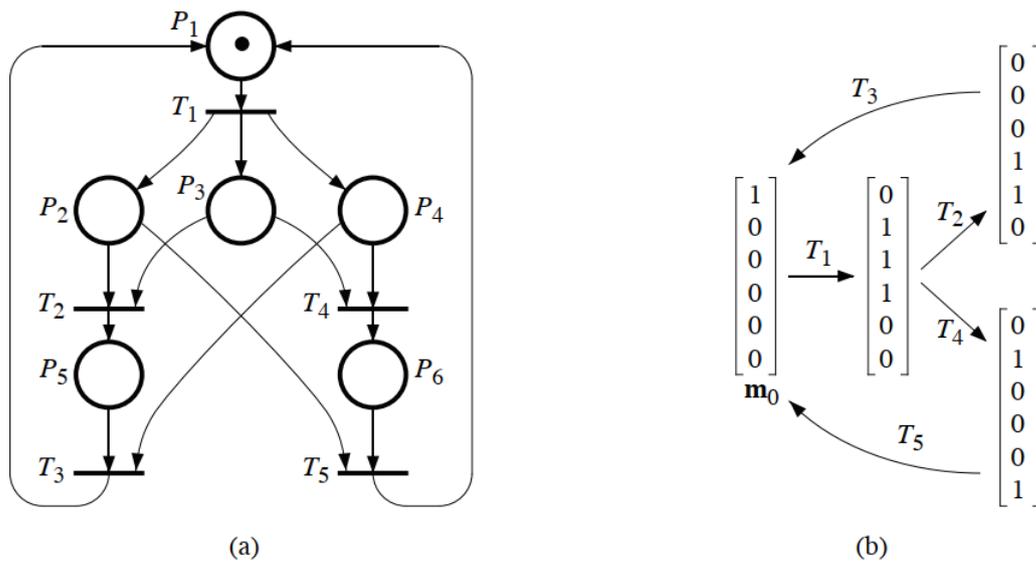
## 3.2 RÉSEAUX DE PETRI (RdP)

Les RdPs sont un outil mathématique et graphique pour la modélisation de systèmes dynamiques afin d'analyser et d'évaluer leur comportement [David and Alla \[2010\]](#), [Peterson \[1981\]](#). Plus précisément, un RdP est un graphe orienté biparti avec deux types de sommets : les places et les transitions. Les places

sont représentées par des cercles et peuvent contenir des jetons (ou marques) représentés par de gros points. Les places et les transitions sont reliées par des arcs. Le nombre de places est fini et non nul. Le nombre de transitions l'est aussi. Les arcs d'un RdP ne peuvent pas relier deux sommets de même type i.e, un arc relie soit une place avec une transition ou une transition avec une place. Tous les arcs ont un poids unitaire.

La Figure 3.1 représente un RdP avec 6 places, 5 transitions et 15 arcs. Soient  $P$  l'ensemble des places d'un RdP et  $T$  son ensemble de transitions. Pour l'exemple de la figure 3.1, nous avons  $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6\}$  et  $T = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5\}$ . La place  $P_1$  est dite une entrée de la transition  $T_1$  car il existe un arc orienté de  $P_1$  vers  $T_1$ . Nous disons que la place  $P_1$  est une sortie de la transition  $T_5$  parce qu'il y a un arc orienté de  $T_5$  vers  $P_1$ .

FIGURE 3.1 – Exemple d'un RdP



### 3.2.1 Règle de franchissement des RdP

La règle de franchissement ou le jeu de jetons (ou encore : Token Game) d'un RdP est définie comme suit : une transition peut être déclenchée (ou franchie) si et seulement si chacune de ses places d'entrée ont au moins un jeton. Le

franchissement d'une transition consomme pour chacune des places d'entrée un jeton. Comme résultat, pour chacune des places de sortie, un jeton sera ajouté [Peterson \[1981\]](#).

### 3.2.2 Marquage d'un RdP

Le marquage d'un RdP à un instant donné est un vecteur dont la  $i$ -ème composante est le marquage de la place  $P_i$  à cet instant. Le marquage initial du RdP de la Figure 3.1 (a) est :  $m_0 = (1, 0, 0, 0, 0, 0)$ . A partir de  $m_0$ ,  $T_1$  est franchissable. Si  $T_1$  se franchit, un nouveau marquage  $m_1$  est produit tel que  $m_1 = (0, 1, 1, 1, 0, 0)$ . Pour le marquage  $m_1$ , il y a deux transitions qui peuvent se déclencher :  $T_2$  et  $T_4$ . Si nous appelons les marquages obtenus par le franchissement de ces transitions  $m_2$  et  $m_3$  respectivement, nous aurons donc :  $m_2 = (0, 0, 0, 1, 1, 0)$  et  $m_3 = (0, 1, 0, 0, 0, 1)$ . Enfin, à partir de  $m_2$  nous aurons  $m_0$  si  $T_3$  ou  $T_5$  sont franchies. Pour aller de  $m_0$  à  $m_2$  les transitions  $T_1, T_2$  se franchissent successivement. L'écriture :  $T_1 T_2$  est dite séquence de franchissement [Peterson \[1981\]](#).

### 3.2.3 Graphe de marquage d'un RdP

Le graphe de marquage (ou d'accessibilité) est composé d'un ensemble de sommets formé du marquage initial et des marquages atteignables depuis celui-ci. L'ensemble des arcs correspond à des passages directs d'un marquage à un autre par franchissement d'une transition. La Figure 3.1 (b) représente le graphe de marquage du RdP de la Figure 3.1 (a). Le graphe de marquage tire son importance du fait qu'il permet de vérifier des propriétés du RdP utiles à l'analyse [Peterson \[1981\]](#).

### 3.2.4 Propriétés d'un RdP

La modélisation des systèmes avec les RdP permet une analyse qualitative. Nous présentons dans ce qui suit les différents aspects de cette analyse [Peterson \[1981\]](#), [Florin et al. \[1991\]](#), [David and Alla \[2010\]](#).

### A. Bornitude

Dans un RdP, une place  $p$  est dite  $k$ -bornée (où  $k$  est un entier positif) si pour tout marquage accessible à partir du marquage initial  $m_0$ , on a  $M(p) \leq k$ . Dans le cas contraire, cette place est dite non bornée.

Un réseau est borné, si pour toute place  $p$  de celui-ci, il existe un entier  $k$  tel que  $p$  soit  $k$ -bornée [Diaz \[2001\]](#). La notion de bornitude d'un RdP s'applique à ses extensions (les RdP stochastiques, stochastiques généralisés, et colorés) [David and Alla \[2010\]](#).

### B. RdP sauf

Un RdP est dit sauf (ou binaire) pour un marquage initial  $m_0$  si pour tout marquage accessible, chaque place contient soit zéro ou un jeton [David and Alla \[2010\]](#). Un RdP sauf est un cas particulier de RdP borné pour lequel toutes les places sont 1-bornées. Un RdP borné peut ne pas être sauf. Le concept de RdP sauf peut s'appliquer à ses extensions.

### C. Quasi-vivacité d'un RdP

Cette propriété désigne la possibilité de franchir au moins une fois toute transition du réseau.

- Quasi-vivacité d'une transition : Une transition  $t$  d'un RdP marqué  $R$  avec un marquage initial  $m_0$  est dite quasi-vivante si il existe un marquage accessible  $M(R, m_0)$  tel que  $t$  est franchissable.
- Quasi-vivacité d'un réseau : Un RdP est quasi-vivant si :  $\forall t \in T$ , il existe un marquage accessible  $M(R, m_0)$  tel que  $t$  est franchissable. On écrit  $M[t >$ .  $T$  représente l'ensemble de toutes les transitions du réseau.

Si un RdP n'est pas quasi-vivant, alors il existe une transition  $t$  qui n'est jamais franchissable et donc inutile au fonctionnement du système modélisé.

### D. Pseudo-vivacité

Cette propriété caractérise le fait qu'à partir de tout marquage accessible, au moins une transition peut être déclenché.

Un RdP est pseudo-vivant si :  $\exists t \in T$  tel que  $M[t >$  [Diaz \[2001\]](#).

### E. Vivacité

Cette propriété est étroitement liée à la situation de blocage. Un RdP modélisant un système sans blocage doit être vivant. Ce qui implique que pour tous les marquages accessibles à partir de  $m_0$ , il est possible de tirer n'importe quelle transition en progressant le long d'une séquence de franchissement.

- Une transition  $t$  d'un réseau marqué  $(R, m_0)$  est vivante, si pour tout marquage accessible  $M$  dérivé à partir de  $m_0$ ,  $t$  est quasi-vivante pour ce réseau.
- Un RdP marqué est vivant si toutes ses transitions sont vivantes.

Autrement dit :  $\forall t \in T, \forall M, \exists S \in T^*$ , tel que :  $M[S.t\rangle$ .  $S$  est une séquence de transitions.

### F. Blocage

Cette propriété caractérise le fait qu'un RdP soit dans un état où toutes ses transitions ne peuvent pas se déclencher. Elle est à éviter lors d'une modélisation d'un système. Le blocage repose sur l'existence de marquage **puits**.

- Un marquage  $M$  d'un réseau  $(R, m_0)$  est appelé marquage puits si aucune transition n'est franchissable depuis  $M$ .
- Un RdP est dit sans blocage si tout marquage accessible depuis  $m_0$  n'est pas un marquage **puits**.

Les propriétés de vivacité et d'absence de blocage ne sont pas indépendantes : un RdP vivant est sans blocage, c'est-à-dire qu'un RdP avec un blocage ne peut pas être vivant. En fait, un RdP contient au moins une transition qui ne peut pas être déclenchée si un puits est atteint [David and Alla \[2010\]](#).

### G. État d'accueil

Un RdP a un état d'accueil (ou état de ré-initialisation)  $m_h$  pour un marquage initial  $m_0$  si pour tout marquage atteignable  $m_i$ , il existe une séquence de franchissement  $S_i$  telle que :  $m_h = M[S_i \rangle$ .

Un RdP est réversible pour un marquage initial  $m_0$  si  $m_0$  est un état d'accueil.

## H. Ergodicité

Un RdP est ergodique, s'il est borné et s'il admet l'état initial comme état d'accueil.

L'ergodicité est une propriété très intéressante car elle assure l'existence d'un état stationnaire du système modélisé permettant le calcul d'une solution stationnaire [Diaz \[2001\]](#). Cette dernière permet de tirer des conclusions riches en informations dans l'étape d'analyse.

## I. Invariants

A partir d'un marquage initial, le marquage d'un RdP peut évoluer par le franchissement des transitions et, s'il n'y a pas de blocage, le nombre de franchissements est illimité. Cependant, tous les marquages atteignables peuvent avoir des propriétés communes. Une propriété qui ne varie pas lors des franchissements des transitions est dite un invariant. [Peterson \[1981\]](#), [Florin et al. \[1991\]](#), [David and Alla \[2010\]](#).

Si  $R$  est un RdP et  $P$  l'ensemble de ses places. Un invariant (ou invariant de marquage) est obtenu s'il existe un sous-ensemble de places  $P' = P_1, P_2, \dots, P_r$  inclus dans  $P$  et un vecteur de pondérations  $(q_1, q_2, \dots, q_r)$  d'entiers positifs tels que :  $q_1 * m(P_1) + q_2 * m(P_2) + \dots + q_r * m(P_r)$  est égale à une constante, pour tout  $m \in M(m_0)$ .

- L'ensemble des places  $P'$  est dite **composante conservatrice**.
- Un RdP est dit **conservatif** si l'ensemble des ses places est une composante conservatrice.
- Une séquence de franchissements de transitions est dite **répétitive** si elle provoque un retour à l'état initial en démarrant de celui-ci.
- Une séquence répétitive de franchissements qui contient toutes les transitions (chacune au moins une fois) est dite **séquence répétitive complète**.

## J. Siphons et trappes

Soit  $P' = P_1, P_2, \dots, P_r$  un sous-ensemble de places d'un RdP. L'ensemble des transitions d'entrée des places de  $P'$  et l'ensemble des transitions de sortie des places de  $P'$ , sont respectivement notés  ${}^oP'$  et  $P'^o$ . C'est-à-dire  ${}^oP' = {}^oP_1 \cup {}^oP_2 \cup \dots \cup {}^oP_r$  et  $P'^o = P_1^o \cup P_2^o \cup \dots \cup P_r^o$ .

—  $P'$  est dit un **siphon** si et seulement si  ${}^oP' \subseteq P'^o$ .

—  $P'$  est dit une **trappe** (ou piège) si et seulement si  $P'^o \subseteq {}^oP'$ .

Un siphon  $P'$  ne peut que "perdre" des jetons (en déclenchant des transitions de  $P'^o$  qui ne sont pas dans  ${}^oP'$ ), alors qu'une trappe  $P'$  ne peut que "gagner" des jetons (en déclenchant des transitions de  ${}^oP'$  qui ne sont pas dans  $P'^o$ ) [David and Alla \[2010\]](#).

### 3.2.5 Présentation formelle d'un RdP

Un RdP est un quadruplet  $Q = (P, T, I, O)$  tel que :

$P$  : est un ensemble fini et non vide de places ;

$T$  : est un ensemble fini et non vide de transitions ;

$P \cap T = \emptyset$ , c'est-à-dire que les ensembles  $P$  et  $T$  sont disjoints ;

$I : P \times T \longrightarrow \{0, 1\}$  est la fonction d'incidence d'entrée (ou avant) ;

$O : P \times T \longrightarrow \{0, 1\}$  est la fonction d'incidence de sortie (ou arrière) ; tel que :

$I(P_i, T_j)$  est le poids de l'arc reliant  $P_i$  à  $T_j$  ;

$O(P_i, T_j)$  est le poids de l'arc reliant  $T_j$  à  $P_i$  ;

$m_0$  : est le marquage initial ; voir : [David and Alla \[2010\]](#).

#### A. Matrice d'incidence d'un RdP

On peut associer à un RdP est associé trois matrices  $M^-$ ,  $M^+$  et  $M$  telles que :

$M^- = [M_{i,j}^-] = I(P_i, T_j)$  est la matrice d'entrée ;

$M^+ = [M_{i,j}^+] = O(P_i, T_j)$  est la matrice de sortie ;

$M = [M_{i,j}] = M^+ - M^-$  est la matrice d'incidence ;

Une colonne de la matrice d'incidence correspond à la modification de marquage apportée par le franchissement de la transition correspondante. Par

exemple, les matrices suivantes correspondent aux matrices d'incidence du RdP de la figure 3.1 (a). La première colonne de la matrice  $M$  indique que le déclenchement de la transition  $T_1$  consiste à retirer un jeton de la place  $P_1$  et à ajouter un jeton aux places  $P_2, P_3$  et  $P_4$ .

$$M^- = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, M^+ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} -1 & -1 & +1 & 0 & +1 \\ +1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ +1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 & -1 \end{bmatrix}$$

### 3.3 RÉSEAUX DE PETRI GÉNÉRALISÉS

Un Réseau de Petri Généralisé (RdPG ou GPN pour Generalized Petri Nets) est un RdP dans lequel des poids (entiers positifs) sont associés aux arcs [David and Alla \[2010\]](#). Si le poids n'est pas indiqué sur un arc, alors sa valeur par défaut est égale à un.

#### 3.3.1 Représentation formelle d'un RdPG

Un RdPG est un quintuplet  $Q = (P, T, I, O, m_0)$  tel que :

- $P, T$  et  $m_0$  sont définis comme dans le cas des RdP ordinaires.
- $I$  est défini comme suit :  $P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ ;
- $O$  est défini comme suit :  $P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ ;

#### 3.3.2 Règle de franchissement des RdPGs

Une transition est franchissable dans un RdPG si et seulement si ses places d'entrée ont au moins un nombre de jetons supérieur ou égal aux poids des arcs les reliant avec la transition. Le franchissement d'une transition consomme pour chaque place d'entrée un nombre de jetons égal au poids de l'arc la reliant avec cette transition. Comme résultat, chaque place de sortie recevra un nombre de jetons égal au poids de l'arc la reliant à la transition.

## 3.4 RÉSEAUX DE PETRI COLORÉS

Ce formalisme est une extension des réseaux de Petri ordinaires. La principale différence entre les réseaux de Petri ordinaires et colorés est que les jetons peuvent avoir des attributs [Jensen and Kristensen \[2009\]](#), [Ballman \[1998\]](#), [Jensen \[2013\]](#). Chaque jeton est associé à une valeur de données appelée couleur du jeton. Les couleurs des jetons peuvent être sélectionnées et modifiées par le déclenchement des transitions.

Chaque place dans un RdP coloré est considérée comme un conteneur de jetons. Il est assimilé à un ensemble d'objets issus d'une même classe (type du jeton). Si deux objets ont des valeurs d'attributs différentes, ils sont considérés comme deux jetons de couleurs différentes.

Une autre extension utile pour modéliser de nombreuses applications réelles, est la spécification d'une capacité pour les places (c'est-à-dire le nombre maximum de jetons dans une place). Dans la présentation graphique, la capacité est indiquée devant la place associée entre crochets.

### 3.4.1 Règle de franchissement des RdP Colorés

Les arcs d'entrée et leurs inscriptions décrivent le nombre de jetons consommés par le déclenchement de transitions. Pour chacune de celles-ci, une fonction de garde peut être définie pour cibler les types de jetons pour lesquelles la transition peut être activée. Les arcs de sortie des transitions déterminent quels jetons seront ajoutés à la place de sortie après leur franchissement. De nouveaux jetons du type de la place de sortie seront créés si aucune indication n'est spécifiée sur l'arc de sortie. Les attributs d'un nouveau jeton sont initialement définis avec leurs valeurs par défaut.

Les transitions peuvent être déclenchées lorsque tous les jetons d'entrée nécessaires sont disponibles et que la fonction de garde est satisfaite [Zimmermann \[2007a\]](#).

## 3.5 RÉSEAUX DE PETRI STOCHASTIQUES

Un réseau de Petri stochastique (RdPS ou SPN pour Stochastic Petri Nets) est un RdP dans lequel les transitions ne se déclenchent qu'après expiration d'un délai de temps. A toute transition (appelée transition temporisée), un délai de franchissement est associé. Celui-ci représente, en général, le temps d'une tâche devant être réalisée et dont l'achèvement est associé au franchissement de la transition. Les délais de transitions sont des variables aléatoires suivant la loi exponentielle. Les transitions sont représentées graphiquement par des rectangles blancs. Les RdPS sont des formalismes couramment utilisés pour la modélisation parce qu'ils permettent d'évaluer les performances grâce à des méthodes analytiques [Peterson \[1981\]](#), [Florin et al. \[1991\]](#), [David and Alla \[2010\]](#).

### 3.5.1 Présentation formelle d'un RdPS

Un RdP stochastique est une couple  $(R, \Pi)$  tel que :

- R : est le RdP ordinaire associé ;
- $\Pi$  : est une fonction de l'ensemble T des transitions vers un sous-ensemble fini de nombres réels positifs.  $\Pi(T_j)$  représente le taux de franchissement de la transition  $T_j$ .

### 3.5.2 Analyse qualitative des RdPS

Les procédures décrites pour les RdPs sont aussi applicables aux RdPS.

### 3.5.3 Analyse quantitative des RdPS

L'intérêt des RdPS réside particulièrement dans la nature du graphe des marquages, dans la mesure où il est isomorphe à une chaîne de Markov homogène [David and Alla \[2010\]](#). De ce fait, les méthodes de calcul des processus Markoviens sont applicables au calcul des paramètres de performances qui sont la brique élémentaire de l'analyse quantitative.

L'évaluation des performances d'un système modélisé par les RdPS admettant un état stationnaire est faite selon les étapes suivantes [Peterson \[1981\]](#), [Florin et al. \[1991\]](#), [David and Alla \[2010\]](#) :

1. Vérification de la condition d'ergodicité.
2. Construction du graphe des marquages accessibles.
3. Construction de la matrice des taux de transitions (dite générateur infinitésimal).
4. Calcul du vecteur de probabilités stationnaire.
5. Calcul des paramètres de performances à l'aide du vecteur des probabilités stationnaires qui sont les suivants :
  - Fréquence moyenne de franchissement d'une transition.
  - Nombre moyen de jetons dans une place.
  - Le nombre moyen de jetons dans une place sur une durée de temps, le nombre moyen en état stationnaire ou le nombre attendu à un certain moment.
  - Temps moyen de séjour des jetons dans une place.
  - Probabilité d'un événement A défini à travers une condition.
  - Nombre moyen de déclenchements d'une transition.
  - Débit d'une transition.

#### A. Générateur infinitésimal

Soit  $Q$  la matrice des taux de franchissement. Les éléments de la matrice  $Q$  sont calculés à l'aide du graphe des marquages accessibles. Ils correspondent aux taux de transition entre états (marquages). La matrice est carrée, d'ordre égal au nombre de marquages dans le graphe des marquages accessibles. Les taux de transition sont définis comme suit [Diaz \[2001\]](#), [David and Alla \[2010\]](#) :

$$Q[i, j] = \begin{cases} \mu_{ij} & \text{si } i \neq j \\ -\sum_{k=1, k \neq i}^n \mu_{ik} & \text{si } i = j \end{cases} \quad (3.1)$$

Où :  $n$  correspond au nombre de marquages, et  $\mu_{ij}$  désigne le taux de la transition ayant permis le passage du marquage  $M_i$  à  $M_j$ . S'il n'y a pas un arc entre  $M_i$  et  $M_j$ , alors  $Q[i, j] = 0$ .

### B. Vecteur de probabilités stationnaires

Le vecteur  $\pi$  des probabilités stationnaires, de dimension égale au nombre de marquages du système modélisé, peut être calculé en résolvant le système d'équations suivant [Diaz \[2001\]](#), [David and Alla \[2010\]](#) :

$$\begin{cases} \pi \cdot Q = 0 \\ \sum_{i=1}^n \pi_i = 1 \end{cases} \quad (3.2)$$

### C. Vecteur des fréquences moyennes

Soit  $G$  le graphe des marquages accessibles d'un RdPS et  $M_i \in M$  un nœud de  $G$ . La fréquence moyenne de franchissement d'une transition  $T_i$  est donnée par la formule suivante [Gharbi and Ioualalen \[2006\]](#), [Florin et al. \[1991\]](#) :

$$\overline{F(T_i)} = \sum_{M_j \in M; } \mu_i(M_j) \cdot \pi_j \quad (3.3)$$

Où :  $\mu_i(M_j)$  est le taux de franchissement de la transition  $T_i$  dans le marquage  $M_j$ .

### D. Vecteur des nombres moyens de jetons dans chaque place

Soit  $\overline{N(p)}$  le nombre moyen de jetons dans une place  $p$ , alors [Gharbi and Ioualalen \[2006\]](#), [Florin et al. \[1991\]](#) :

$$\overline{N(p)} = \sum_{M_j \in M; } M_j(p) \cdot \pi_j \quad (3.4)$$

Où :  $M_j(p)$  est le nombre de jetons de la place  $p$  pour le marquage  $M_j$ .

### E. Vecteur des temps moyens de séjour des jetons dans chaque place

Soit  $\overline{T(p)}$  le temps moyen de séjour des jetons dans une place  $p$ , alors [Gharbi and Ioualalen \[2006\]](#), [Florin et al. \[1991\]](#) :

$$\overline{T(p)} = \frac{\overline{N(p)}}{O(p, \cdot) * \overline{F}} \quad (3.5)$$

Où :

$\overline{N}(p)$  est le nombre moyen de jetons dans la place  $p$ .

$\overline{F}$  est le vecteur des fréquences moyennes de franchissement des transitions.

$O(p,.)$  : est la ligne de la matrice d'incidence de sortie  $O$  correspondant à la place  $p$ .

#### F. Probabilité d'un événement

Probabilité d'un événement  $A$  défini à travers une condition  $P(A)$  est donnée par la formule suivante [Gharbi and Ioualalen \[2006\]](#), [Florin et al. \[1991\]](#) :

$$P(A) = \sum_{A=true;} \pi_i \quad (3.6)$$

Tel que la somme est effectuée sur les indices des marquages où la condition est satisfaite.

### 3.6 RÉSEAUX DE PETRI STOCHASTIQUES GÉNÉRALISÉS (RDPSG)

Dans un RdPSG (ou GSPN : Generalized Stochastic Petri Net), en plus des transitions temporisées, il existe des transitions immédiates [David and Alla \[2010\]](#). Une transition immédiate est déclenchée dès qu'elle est activée (équivalent à un délai égale à zero i.e, taux de déclenchement infinie).

Par conséquent, un RdPSG est un RdPS dont les transitions peuvent être de deux types :

- **Transitions temporisées** : auxquels correspondent les variables aléatoires déterminant la durée de franchissement.
- **Transitions immédiates (instantanées)** : qui se caractérisent par une période de franchissement supérieure à celle des transitions temporisées, et par leur franchissement immédiat, car le taux de franchissement associé est infini et le délai de franchissement correspondant est nul.

La Figure 3.2 représente un exemple d'un RdPSG. La transition  $T_1$  est une

transition immédiate. Le reste des transitions sont temporisées.  $m_0$  représente le marquage initial. A tout ensemble de marquages d'un RdPS est associée une chaîne de Markov homogène. La figure 3.3 représente le graphe des marquages accessibles du RdPSG de la Figure 3.2 avec la chaîne du Markov associée.

FIGURE 3.2 – Un exemple d'un RdPSG *David and Alla [2010]*

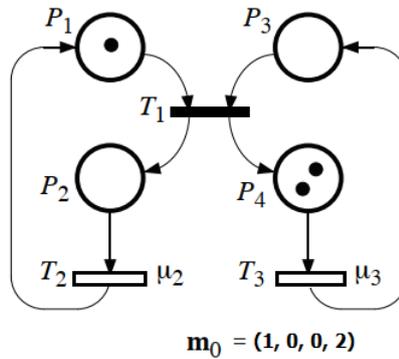
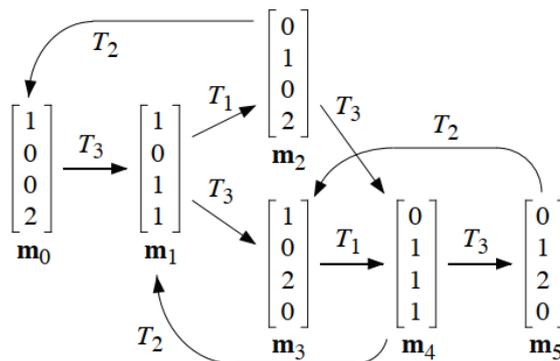
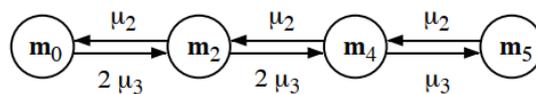


FIGURE 3.3 – Graphe des marquages accessibles et la chaîne de Markov associée

(a) Le graphe des marquages



(b) La chaîne de Markov associée



### 3.6.1 Présentation formelle d'un RdPSG

Un RdPG est un triplet  $(R, \Pi, W)$  tel que [David and Alla \[2010\]](#) :

$R$  : est un RdP ordinaire ;

$\Pi$  : est une fonction de l'ensemble  $T$  des transitions vers l'ensemble des nombres réels positifs.

$\Pi(T_j) = \mu_j$  = taux de franchissement associée à  $T_j$  (si  $T_j$  est une transition temporisée).

$W$  : la fonction de priorité associant un entier à toute transition immédiate pour éviter les conflits.

### 3.6.2 Evolution d'un RdPSG

Les marquages accessibles dans un RdPSG se décomposent en deux catégories [David and Alla \[2010\]](#) :

- **Marquages tangibles** : dans lesquels, aucune transition immédiate n'est franchissable. Si tous les marquages sont tangibles, alors le processus stochastique engendré par un RdPSG est identique au RdPS.
- **Marquages évanescents** : dans lesquels, il y a au moins une transition immédiate parmi les transitions franchissables.

Dans le deuxième cas, la priorité est donnée aux transitions immédiates car leur franchissement se fait en un temps nul. D'autre part, si un marquage évanescent sensibilise plusieurs transitions immédiates à la fois, le choix de celle qui sera franchissable ne peut se baser sur des considérations temporelles, puisque la durée de leur franchissement est nulle, mais il se fait par une post-sélection. Cette post-sélection, de nature probabiliste, est basée sur les priorités des transitions.

### 3.6.3 Graphe des marquages accessibles réduit

Par ce que l'évolution d'un marquage  $M$  vers un marquage évanescent se fait immédiatement, il faut fusionner les marquages évanescents avec les marquages tangibles qui les succèdent. Le graphe obtenu est donc le graphe d'accessibilité réduit constitué des marquages tangibles uniquement qui sera utilisé pour l'analyse quantitative comme dans le cas de RdPS. Ainsi, le générateur infinitésimal

est calculé de la même manière.

**Note** : l'utilisation du graphe des marquages accessibles réduit est valide juste pour l'analyse quantitative. Pour l'analyse qualitative, il faut considérer le graphe des marquages accessibles tel qu'il est pour ne pas falsifier l'analyse.

### 3.6.4 Évaluation de performances des RdPSGs

Un RdPSGs est isomorphe à une chaîne de Markov à temps continu. Pour évaluer les paramètres de performances d'un RdPSGs, il faut suivre les étapes suivantes [Zimmermann \[2007a\]](#), [David and Alla \[2010\]](#) :

1. Construire le graphe des marquages accessibles comme dans le cas d'un RdPS.
2. Etiqueter ce graphe par des taux de franchissement exponentiels lorsqu'il s'agit de transitions temporisées et par des taux infinis dans le cas de transitions immédiates.
3. Fusionner les marquages évanescents avec les marquages tangibles qui les succèdent. On obtient ainsi un nouveau graphe dit réduit qui reste isomorphe à une chaîne de Markov à temps continu : C'est la chaîne de Markov réduite. Ceci n'influe pas sur les paramètres quantitatifs à évaluer, car le système modélisé par ce RdPSG passe un temps nul dans les marquages évanescents.
4. A partir de cette chaîne réduite ainsi obtenue, on construit la matrice des taux de transitions entre marquages tangibles qui sert de base pour le calcul des paramètres de performances du système à analyser.
5. Calculer les paramètres de performances comme dans le cas de RdPS.

## 3.7 RDPSGS À ARC INHIBITEUR

### 3.7.1 Définition d'un arc inhibiteur

Un arc inhibiteur est arc reliant une place à une transition pour interdire leur franchissement si le nombre de jetons dans la place est supérieur ou égale au

pois de l'arc (le nombre de jetons doit être strictement inférieur pour autoriser le franchissement de la transition). Graphiquement, l'arc inhibiteur est représenté un arc dans lequel l'extrémité incidente à la transition est représentée par un petit cercle [Zimmermann \[2007a\]](#).

### 3.7.2 Présentation formelle d'un RdPSG à arc inhibiteur

Un RdPG à arc inhibiteur est une couple  $(R, I_h)$  tel que :

- $R$  : est RdPSG ;
- $I_h : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  ;
- $I_h(P_i, T_j)$  est la fonction d'inhibition ; représente le poids de l'arc inhibiteur allant de la place  $P_i$  à la transition  $T_j$ .

### 3.7.3 Règle de franchissement RdPSG à arc inhibiteur

Soient  $M$  un marquage d'un RdPSG à arc inhibiteur et  $t$  une transition,  $t$  est franchissable dans  $M$  si et seulement si [Diaz \[2001\]](#) :

$$\forall p \in P, M(p) \geq I(p, t) \text{ et } M(p) \leq O(p, t).$$

Soit  $M'$  le nouveau marquage tel que :

$$\forall p \in P, M'(p) = M(p) - I(p, t) + O(p, t).$$

Où :  $I$  et  $O$  sont respectivement les matrices d'entrée et de sortie.

## 3.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté un outil performant de modélisation des systèmes en général. Nous avons commencé par présenter les propriétés d'un RdP ordinaire, ses présentation formelle et informelle. En suite, nous avons présenté les RdPs colorés, stochastiques et stochastique généralisé. Dans ce stade, nous avons présenté les deux différents types d'analyse pour l'évaluation de performance : l'analyse qualitative et l'analyse quantitative.

Dans les chapitres suivants, nous proposons des modélisations des RCSFs en utilisant les différentes extensions des RdPs présentées dans ce chapitre.

# ÉTAT DE L'ART DE MODÉLISATION DES RCSFs AVEC LES RdPs

# 4

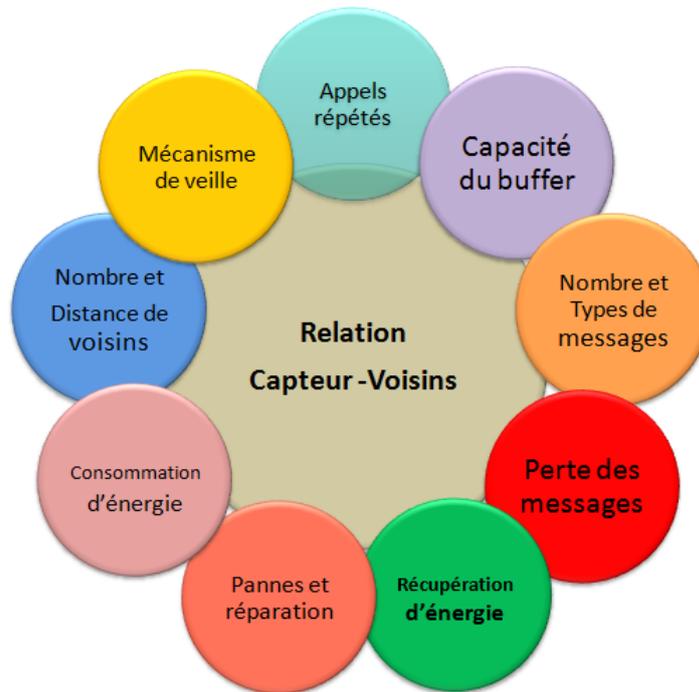
Avant le déploiement sur terrain du réseau de capteurs, les concepteurs évaluent sa faisabilité en essayant de prédire ses performances. Pour construire cette évaluation sur une base solide, au lieu d'utiliser des simulateurs qui peuvent souffrir d'hypothèses biaisées, de nombreux chercheurs utilisent la modélisation avec des formalismes mathématiques. Du fait de sa puissance de modélisation, plusieurs chercheurs ont utilisé le formalisme des RdPs pour évaluer les performances des RCSFs.

Dans le présent chapitre, nous survolons les différentes contraintes à ne pas négliger pour que le modèle ne soit pas très éloigné de la réalité. Ensuite nous présentons un état de l'art sur la modélisation des RCSFs par les RdPs.

## 4.1 CONTRAINTES DES RCSFs

Lors de la modélisation des RCSFs, différentes circonstances réelles sont considérées par les concepteurs de modèles. Ces circonstances que nous appelons contraintes influent sur les paramètres de performance des nœuds de capteurs. La négligence de ces contraintes conduit à des modèles qui requièrent des précautions de paramétrage sans lesquelles des résultats erronés sont produits. Nous citons dans ce qui suit les principales contraintes (voir Figure 4.1 qui les résume) :

FIGURE 4.1 – Les différentes contraintes des RCSFs modélisées avec les RdPs



#### 4.1.1 Appels répétés

Ce sont les tentatives de retransmission lorsque les récepteurs (les voisins) ne sont pas capables de recevoir les messages lorsqu'ils sont occupés ou bien en état de sommeil, ou encore en panne. Un nœud de capteur tente de retransmettre le message jusqu'à la réussite. Cette contrainte est prise en considération dans plusieurs travaux, nous citons : [Wüchner et al. \[2010\]](#), [Gharbi and Charabi \[2012\]](#), [Oukas and Boulif \[2019a; 2020b\]](#), [Bérczes et al. \[2013\]](#).

#### 4.1.2 Capacité de la mémoire tampon (buffer)

Les capteurs ont une capacité limitée de mémoire. C'est pour quoi le nombre de messages que le nœud peut stocker est limité. Cette contrainte est prise en considération avec d'autres phénomènes dans : [Wüchner et al. \[2010\]](#), [Oukas and Boulif \[2019b\]](#) et [Oukas and Boulif \[2020a\]](#).

### 4.1.3 Nombre et types des messages

La consommation d'énergie varie selon le nombre de messages servis (reçu ou transmis) par unité de temps. Nous voulons dire par le type de messages ; la taille des messages transmis. Nous distinguons les messages de données et les messages de contrôles. Les messages de données consomment plus d'énergie. La plupart des travaux publiés dans la littérature considèrent le nombre de paquets. Le type de messages est considéré dans [Oukas and Boulif \[2020a\]](#).

### 4.1.4 Nombre et distances des voisins

Le nombre de voisins représente le nombre de destinations possibles pour envoyer un message par un nœud de capteur. Si la distance est grande, cela implique une grande consommation d'énergie parce que le capteur doit amplifier le signal qui véhicule le message pour atteindre le récepteur. La localisation des voisins est prise en considération dans [Oukas and Boulif \[2020b\]](#).

### 4.1.5 Récupération d'énergie ou Energy-Harvesting

Collecter l'énergie renouvelable et la transformer en énergie électrique pour l'utiliser pour alimenter les capteurs ou recharger ses batteries s'appelle Energy-Harvesting . L'énergie récupérée peut être utilisée directement par les composants du nœud de capteur ou accumulée par le convertisseur DC-DC. Ensuite, l'énergie sera conservée dans une batterie rechargeable. Cette fonctionnalité est prise en compte dans plusieurs travaux tels que : [Oukas and Boulif \[2019b; 2020b\]](#), [Oukas et al. \[2022\]](#), [Oukas and Boulif \[2020a\]](#) et autres.

### 4.1.6 Consommation d'énergie

La plupart des travaux considèrent les sources consommatrices de l'énergie telles que la réception des paquets, la transmission, la capture, l'agrégation et d'autres fonctionnalités fondamentales. Nous citons comme exemples les travaux

suivants : [Oukas and Boulif \[2020c\]](#), [Oukas et al. \[2022\]](#), [Dâmaso et al. \[2014\]](#) et [Oukas and Boulif \[2021a\]](#).

#### 4.1.7 Mécanisme de veille

Un mécanisme simple de veille et sommeil est considéré dans : [Oukas and Boulif \[2019b; 2020b; 2021a\]](#), [Wüchner et al. \[2010\]](#), [Azgomi and Khalili \[2009\]](#). Un mécanisme de veille intelligent est présenté dans [Oukas et al. \[2022\]](#).

#### 4.1.8 Perte des messages

Ce phénomène apparaît s'il y a des collisions lors de la communication entre les capteurs. Nous citons comme exemples des travaux de recherche qui considèrent cette contrainte : [Oukas and Boulif \[2019b\]](#), [Wüchner et al. \[2010\]](#).

#### 4.1.9 Pannes et réparations

La panne des capteurs dégrade les performances des RCSFs. la réparation représente soit le changement du capteur, ou le changement de sa batterie, ou le rechargement de sa batterie. les échecs des capteurs sont considérés dans [Oukas and Boulif \[2019a; 2022a\]](#).

#### 4.1.10 Autres contraintes

En plus des contraintes précédentes, quelques auteurs dans ce domaine considèrent d'autres phénomènes. Différents degrés de priorités assignées aux messages sont introduits dans [Hakmi et al. \[2017\]](#), [Bérczes et al. \[2012\]](#). Dans [Gharbi and Charabi \[2012\]](#), des serveurs à des vitesses différentes. Les vacations des serveurs sont introduites dans [Boutoumi and Gharbi \[2018\]](#). L'agrégation des données est introduite dans : [Lacerda and Lima \[2011\]](#), [Oukas and Boulif \[2021b\]](#).

## 4.2 ÉTAT DE L'ART

D'une manière générale, l'utilisation des réseaux de Petri et autres formalismes tels que les files d'attente et les chaînes de Markov pour modéliser les problèmes liés au réseau a été adoptée depuis longtemps.

Shojafar et al. [Shojafar et al. \[2013\]](#) a proposé une nouvelle approche à trois niveaux pour résoudre le problème de planification des ressources dans les environnements de calcul en grille à l'aide de réseaux de Petri stochastiques hiérarchiques. Les demandes de ressources sont classées en couches. Chaque couche a des tâches spécifiques pour recevoir des sous-tâches et fournir des données à la couche supérieure ou inférieure. Dans [Shojafar et al. \[2015\]](#), les auteurs ont présenté ce qu'ils ont appelé ALATO, qui est un algorithme intelligent basé sur l'apprentissage d'automates et de réseaux de Petri stochastiques adaptatifs. Dans [Farooq et al. \[2022\]](#), les auteurs ont proposé une approche basée sur des réseaux de Petri colorés pour calculer le routage de chemin aléatoire dans les RCSFs. Dans les réseaux satellitaires, deux modèles de réseaux de Petri stochastiques sont proposés pour analyser les performances du réseau satellitaire dans les états de défense traditionnels et actifs [Shi et al. \[2021\]](#).

Le mécanisme de sommeil pour les RCSFs est pris en compte dans [Dahiya et al. \[2015\]](#), où les auteurs ont proposé un modèle de chaîne de Markov pour les nœuds de capteurs économes en énergie.

Berczes et al. [Bérczes et al. \[2013\]](#) a introduit un modèle de mise en file d'attente de réessai à source finie pour étudier les caractéristiques de transmission dans les RCSFs. Ils ont considéré deux classes de capteurs : un pour les requêtes spéciales avec une priorité élevée (utilisé pour l'alerte), et le second pour les requêtes normales (pour transmettre des données).

### 4.2.1 Modélisation des RCSFs par les RdPSGs

Pour les travaux liés aux RCSFs, plusieurs chercheurs ont eu recours aux réseaux de Petri comme outil de modélisation pour évaluer les performances

de ces réseaux. Yadollah et al. dans [Yadollah zadehTabari and Mohammadizad \[2020\]](#) ont présenté une méthode de modélisation analytique qui utilise des réseaux de Petri pour l'évaluation de la consommation d'énergie. Le modèle proposé conduit à la construction d'un modèle formel basé sur les RdPSG pour évaluer la consommation électrique des capteurs dans un RCSF basé sur S-MAC. Les expériences menées traitent du nombre de nœuds, du taux de cycle de service, du flux de données de la couche supérieure et de la taille des paquets.

Les auteurs de [Lacerda and Lima \[2011\]](#) ont présenté une méthode pour analyser le comportement des réseaux de capteurs sans fil dans une architecture multi-sauts, où les nœuds capteurs transmettent les informations recueillies à nœud puits. Les auteurs ont analysé l'impact de l'agrégation des données dans les nœuds intermédiaires, en comparant l'augmentation du temps d'arrivée des messages au nœud puits avec la diminution du nombre total de messages envoyés par l'ensemble du réseau. L'approche proposée permet de définir les paramètres d'entrée assurant que la durée de vie du réseau soit prolongée sans que la latence ne dépasse un certain seuil.

Zairi et al. [Zairi et al. \[2015\]](#) a proposé un réseau de Petri coloré pour étudier la consommation d'énergie des protocoles MAC. Ils ont construit ce qu'ils ont appelé CP-NET pour analyser le comportement des RCSFs. Le modèle proposé permet aux constructeurs de protocoles de prédire le comportement du réseau, mais l'approche proposée n'a pas pris en compte la récupération d'énergie, ni les aspects de panne/réparation.

Béchar et al. [Bechar et al. \[2020\]](#) a proposé une approche pour modéliser et vérifier la cohérence et l'exactitude des protocoles des RCSFs en utilisant un réseau de Petri coloré. Ils ont utilisé une méthode formelle basée sur la méthode Event-B. Dans un premier temps, le réseau de Petri est utilisé pour élaborer des modèles de la couche réseau, puis chacun d'eux est détaillé par un formalisme Event-B.

Dans la littérature de modélisation des RCSFs, il existe des travaux qui prennent en considération le phénomène de rappel tout en considérant le

manque de fiabilité du capteur, comme dans [Shi et al. \[2010\]](#). Les auteurs ont proposé un réseau de Petri pour prédire la consommation d'énergie en considérant un nouveau mécanisme de sommeil pour construire le plan énergétique.

Wuchner et al. dans [Wüchner et al. \[2010\]](#) ont introduit un modèle RdPSG avec une orbite non fiable pour modéliser les pertes de messages afin d'évaluer les performances des RCSFs. Les auteurs sont penchés sur le mécanisme du sommeil et ont présenté une analyse expérimentale qui montre l'influence du rapport veille/sommeil sur le temps de réponse moyen des noeuds de capteurs. À l'aide de modèle proposé, les auteurs ont discuté aussi l'influence de la perte des messages et du blocage des messages sur les performances des noeuds de capteurs. Les paramètres de performances considérés sont le temps de réponse moyen (ou latence : c'est la somme du temps d'attente et le temps de transmission), la probabilité de service et la probabilité de blocage.

[Gharbi and Charabi \[2012\]](#) ont proposé une approche algorithmique basée sur le formalisme RdPSG pour modéliser et analyser les RCSFs à source finie avec phénomène de rappel et deux classes de serveurs. Dans [Hakmi et al. \[2017\]](#), les auteurs Hakmi et al. ont modélisé la transmission radiofréquence dans les RCSF. Deux types de demandes sont pris en compte, les demandes les plus prioritaires étant servies de manière préventive. Boutoumi et Gharbi [Boutoumi and Gharbi \[2018\]](#) ont proposé ce qu'ils ont appelé : une politique de vacances-travail à deux seuils. Le modèle proposé vise à assurer des économies d'énergie et une efficacité de latence. Ils ont envisagé une communication en duplex intégral.

#### 4.2.2 Modélisation par les RdPSGs colorés

Dans [Azgomi and Khalili \[2009\]](#), les auteurs ont présenté un modèle basé sur les RdPS colorés pour la modélisation et l'évaluation des performances d'un protocole de contrôle d'accès au support dans les RCSFs nommé : protocole de contrôle d'accès au support de capteur (S-MAC) [Ye et al. \[2004\]](#). S-MAC est un protocole MAC de conservation de l'énergie. Le modèle proposé pour ce protocole utilise la capacité de modélisation hiérarchique des RdP colorés. Les auteurs ont utilisé les RdP colorés pour modéliser une nouvelle méthode de diffusion de

paquets. Selon les auteurs, l'approche proposée permet de modéliser et d'évaluer tout autre protocole MAC dans les RCSFs.

Un modèle basé sur les RdP colorés est proposé dans [Zairi et al. \[2011\]](#). Il utilise une approche hiérarchique. Selon les auteurs, le modèle peut présenter une grande classe de comportement dans les RCSFs grâce à sa généralité. Le comportement modélisé comprend le contrôle et la collecte de données, l'accès et l'évaluation des données, la formulation d'affichages significatifs à l'utilisateur et l'exécution de fonctions de prise de décision et d'alarme pour ce dernier. Le modèle proposé permet à la fois l'analyse qualitative et quantitative.

Dans [Ibrahim et al. \[2014\]](#), une modélisation par les RdP colorés est exploitée pour analyser le comportement d'un protocole de routage (Vector Based Forwarding) dans les RCSFs. La vérification de ce modèle est effectuée par l'analyse des statistiques de l'espace d'état. Ces statistiques incluent la vivacité, la réactivité et l'absence de blocages.

Dans [Dâmaso et al. \[2014\]](#), les auteurs proposent une approche pour évaluer les RCSFs en terme de durée de vie en simulant sa consommation d'énergie à l'aide de RdP colorés. Cette approche comprend trois parties principales telles qu'un processus entièrement automatisé d'évaluation de la durée de vie du WSN, un ensemble de modèles RdP colorés réutilisables exprimant la consommation d'énergie des protocoles de communication dans les RCSFs et une stratégie pour composer des modèles de RdP colorés d'évaluation des protocoles dans les RCSFs.

Dans [Trinh et al. \[2016\]](#), les auteurs ont présenté une approche basée sur les RdP colorés pour la modélisation et la détection de congestion des RCSFs. Le modèle proposé décrit les paramètres et les comportements d'un RCSF. Ensuite, le problème de détection de congestion est réduit à un problème d'accessibilité sur l'espace d'état du modèle basé sur les RdP colorés. De plus, le modèle proposé utilise la capacité de modélisation hiérarchique des RdP colorés, y compris la possibilité de représenter le système en plusieurs niveaux d'abstraction (sous-modules). Cela facilite la manipulation et l'extension du modèle. De plus, le modèle proposé est étendu pour exprimer la concurrence, et améliorer les résultats de détection de congestion.

Les auteurs de [Le et al. \[2017\]](#) ont présenté un modèle basé sur les RdP colorés pour la vérification de la probabilité de congestion sur les réseaux de capteurs sans fil. Pour chaque capteur, les auteurs ont attaché une probabilité de fiabilité pour aider les utilisateurs à connaître la probabilité d'atteindre le puits lors de la transmission des paquets. Les probabilités sont assignées aux transitions de leur modèle avant la vérification de la congestion. Cependant, la modélisation des RCSFs en négligeant certaines contraintes mène à des résultats approximatifs. En réalité, la fiabilité du capteur dépend également de plusieurs contraintes telles que la disponibilité de l'énergie, la position du capteur (si les nœuds sont mobiles), l'état des capteurs (actifs ou en sommeil) etc. Plus le niveau de consommation d'énergie est élevé, plus le traitement est fiable sur les nœuds. De plus, le déplacement des capteurs provoque un changement de topologie et ils dépendront de l'énergie pour connaître les nouvelles localisations. Par conséquent, la fiabilité du capteur devrait être considérée avec d'autres contraintes réelles.

### 4.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes contraintes des RCSFs et un état de l'art sur les modèles utilisant les RdPSGs simples et colorés.

Dans ce qui suit, nous proposons des modèles pour tenir compte des circonstances réelles évoquées au début de ce chapitre à fin de permettre aux constructeurs de ce genre de réseaux d'évaluer leurs performances ou bien de prévoir le comportement d'un RCSF non-encore installé.

# MODÈLES AVEC CONTRAINTES ET CONFIGURATIONS LIÉES À L'ÉNERGIE

# 5

Dans ce chapitre, nous présentons divers modèles basés sur les RdPs pour l'évaluation des performances des nœuds de capteurs. Ces modèles prennent en compte plusieurs contraintes de déploiement et facteurs de configuration concernant l'énergie.

En premier temps, nous présentons un modèle de base pour un nœud de capteur équipé par un système de récolte d'énergie renouvelable. Le but est de prévoir le comportement du nœud avant le déploiement réel par la modélisation de différentes opérations de consommation d'énergie, l'opération de recharge de la batterie et les opérations de mise en veille et de mise en marche.

En suite, en améliorant le modèle de base par la considération de plus de contraintes telles que l'absence de l'énergie solaire pendant la nuit, les différentes tailles des paquets, les différents niveaux d'ensoleillement, etc.

## 5.1 MODÉLISATION AVEC RÉCOLTE D'ÉNERGIE

Dans cette section, nous utilisons les RdPSGs pour décrire les modules opérationnels d'un nœud de capteur avec récupération d'énergie renouvelable et mécanisme de veille.

Ce modèle suppose que la radio d'un capteur peut être dans l'un des modes suivants :



TABLE 5.1 – Description des transitions du modèle de la Figure 5.1

Transition	Description	taux
<i>Receiving</i>	Représente la réception d'un message	$\lambda$
<i>Send</i>	Représente l'envoi d'un message	$\mu$
<i>Be_Standby</i>	Le nœud rejoint l'état de veille	$\omega$
<i>Be_awake</i>	Le nœud rejoint l'état actif	$\theta$
<i>Listening</i>	Représente l'opération d'écoute	$\alpha$
<i>Working</i>	Représente les opérations de traitement et de captage	$\beta$
<i>Harvesting</i>	Représente l'opération de récolte d'énergie	$\delta$
<i>Go_sleep</i>	Le nœud rejoint l'état de veille immédiatement si l'énergie devient inférieure au seuil $T_1$	/
<i>init</i>	Pour initialiser le modèle après une journée	$\nu$

$T_1 < T_2$ . Lorsque le nombre de quanta descend en dessous du premier seuil  $T_1$ , le nœud passe en mode de veille afin d'économiser de l'énergie. Lorsque le niveau d'énergie s'améliore jusqu'à atteindre  $T_2$  grâce à la récupération d'énergie, le capteur passe en mode actif pour reprendre son service.

La figure 5.1 décrit le RdPSG proposé où les fonctionnalités du capteur sont représentées par des transitions. La place *Battery* représente la batterie du capteur. Chaque jeton de cette place représente un quantum d'énergie. La batterie a une capacité maximale dénotée par  $C$ . Lorsque le niveau de charge de la batterie devient inférieure au seuil  $T_1$ , le nœud rejoint immédiatement l'état de veille (voir la transition immédiate *Go\_sleep*). Un nœud en état de veille est représenté par une marque dans la place *Standby*. Si le nœud est en veille, il ne peut plus écouter, ni envoyer, ni recevoir (voir les trois arcs inhibiteurs reliés à la place *Standby*). Pendant le sommeil, le nombre de quantas peut augmenter en raison de la récupération d'énergie. Le capteur reste en état de veille jusqu'à ce que le nombre de quantums dépasse le seuil  $T_2$ . Dans ce cas, le déclenchement de la transition temporisée *Be\_awake* devient possible. La Table 5.1 donne une courte description de chaque transition.

Nous rappelons ici que même si le modèle utilise une valeur quantique unique, il peut prendre en compte différents taux de consommation d'énergie pour les différentes fonctionnalités en utilisant différentes valeurs des taux de

déclenchement des transitions.

En plus de la place *Battery*, qui est le cœur du modèle, le RdPSG de la Figure 5.1 contient quatre autres places :

- La place *Msgs* : chaque jeton dans cette place représente un message. Le nombre initial de jetons dans cette place est supposé égale à  $N$ .
- La place *Standby* : cette place contient au plus un jeton qui signifie que le nœud est en état de sommeil.
- La place *Buffer* : un jeton dans cette place représente un message reçu.
- La place *SentMsgs* : un jeton dans cette place représente un message envoyé avec succès.

## 5.2 MODÉLISATION AVEC DIFFÉRENTIATION ENTRE MESSAGES

Le modèle proposé dans la Figure 5.2 se concentre sur les échanges de messages dans la relation capteur-voisins. Dans cette communication, deux types de messages sont échangés : des messages de contrôle et des messages de données. Du fait de leur longueur, ces deux types de messages n'ont pas le même impact sur l'énergie consommée. Nous définissons trois types de jetons comme indiqué dans le tableau 5.2. Le premier est *Msg* qui représente une classe de messages. Plusieurs couleurs peuvent être instanciées à partir de cette classe (nous utilisons deux couleurs : message *data* et message *hello* ). Le deuxième type de jeton est *Neighbor* qui représente un conteneur assemble un nœud de capteur avec un message. Le dernier type de jeton est *Level*. Chaque objet (couleur) de cette classe contient un certain nombre de quanta. Ici, pour simplifier, nous supposons que chaque niveau contient un seul quantum d'énergie.

Le système de communication est modélisé comme suit : lorsqu'un message arrive à un capteur par le franchissement de la transition *Coming*, il est stocké dans le buffer s'il y a assez de place (voir la capacité du buffer  $[B]$  à la place correspondante). Autrement, le jeton doit attendre. Le premier message dans la file d'attente du tampon sera immédiatement transmis à un voisin du prochain

FIGURE 5.2 – Modélisation basée sur les RdP colorés pour les RCSFs

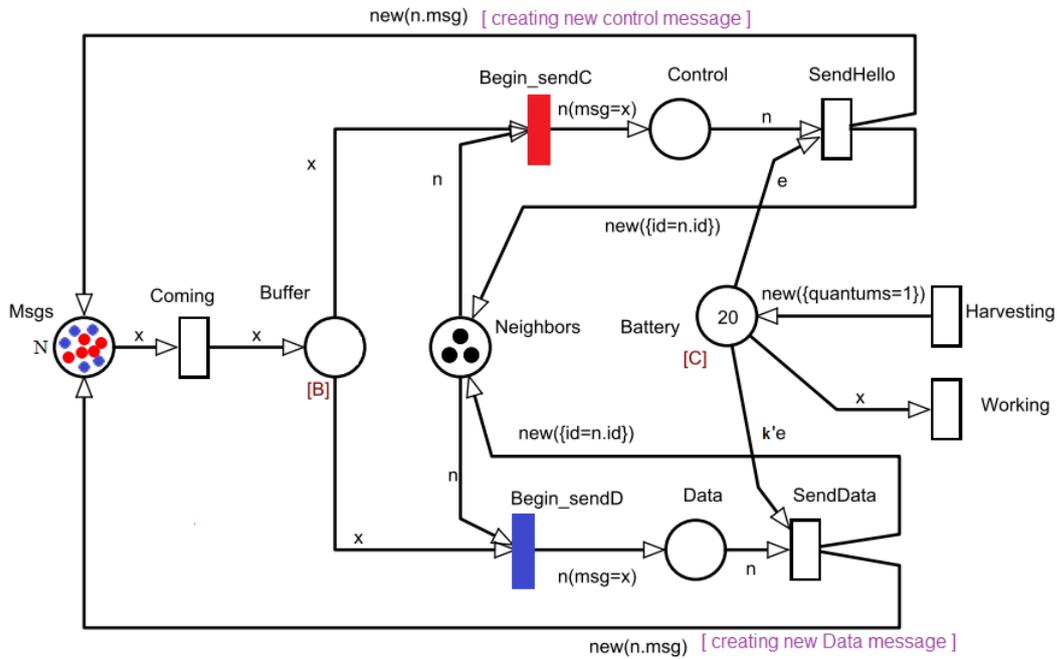


TABLE 5.2 – Description des types de jetons

Type de jeton	Description	Structure C ++
Msg	Classe Message; Chaque objet instancié (couleur du jeton) de cette classe représente un message avec un type précis	<code>struct Msg { string type; int length; }</code>
Neighbor	Une classe conteneur pour un voisin actif et un message avec un type précis.	<code>struct Neighbor { int id; Msg msg; }</code>
Level	Un objet instancié de cette classe représente une quantité d'énergie	<code>struct Level {int quanta;}</code>

saut. Si la transition immédiate *Begin\_sendC* se déclenche, le message sélectionné dans la file d'attente du tampon est de type "hello". Après cela, le déclenchement de la transition *SendHello* signifie un envoi réussi de ce message de contrôle à un voisin. Si la transition *Begin\_sendD* se déclenche, le message en tête de file d'attente est du type données et donc, le déclenchement de la transition *SendData* représente la fin de transmission. L'envoi d'un message de contrôle consomme un quantum d'énergie, tandis que l'envoi d'un message de données consomme  $k$  quanta, où  $k$  peut être défini selon le domaine d'application du réseau qui définit la quantité d'énergie consommé pour chaque type de message.

D'autre part, les délais de déclenchement *hello\_d* et *data\_d* sont respectivement associés aux transitions *SendHello* et *SendData*. La Table 5.3 résume les principales propriétés des transitions temporisées tandis que la Table 5.4 décrit les transitions immédiates. La Table 5.5 décrit les places du modèle.

De plus, toutes les transitions temporisées sont censées utiliser une sémantique *serveur unique*. Chacune des deux transitions immédiates a une fonction de garde locale (un filtre) comme il est mentionné dans la Table 5.4. Certains arcs qui ont des inscriptions spéciales sont étiquetés avec leurs expressions [Zimmermann \[2007a\]](#). Certains autres sont étiquetés avec un seul caractère tel que  $x$ ,  $n$  et  $e$ . Pour le rendre plus clair, par exemple, la transition *Begin\_sendC* a deux arcs d'entrée à partir des emplacements *Buffer* et *Neighbors* étiquetés respectivement avec  $x$  et  $n$ . Cette transition a également une fonction de garde qui sélectionne uniquement les messages de contrôle. Le message sélectionné est directement affecté à  $x$  et le voisin sélectionné est affecté à  $n$ . Le déclenchement de cette transition immédiate agrège le message  $x$  avec le voisin  $n$  (voir la structure *Neighbor* dans la Table 5.2) en affectant  $x$  à l'attribut *msg* du conteneur  $n$ .

Dans le modèle, les considérations de récupération d'énergie sont modélisées avec la transition temporisée *Harvesting*. Après chaque tir de la transition *Harvesting*, un nouveau quantum d'énergie est ajouté à la batterie. Si la batterie est pleine (c'est-à-dire qu'elle contient  $C$  quanta), aucun jeton ne peut être reçu. La transition *Working* représente la consommation d'énergie des tâches restantes

qu'un capteur doit effectuer, telles que le traitement, la détection, etc. Chaque déclenchement de cette transition consomme un quantum d'énergie.

TABLE 5.3 – Description des transitions temporisées

Transition	Signification	Délai de franchissement
<i>Coming</i>	Arrivée d'un message	<i>come_d</i>
<i>SendData</i>	Envoi d'un message de données	<i>data_d</i>
<i>SendHello</i>	Envoi d'un message de contrôle	<i>hello_d</i>
<i>Harvesting</i>	Récupération d'énergie	<i>harvest_d</i>
<i>Working</i>	Consommation d'énergie	<i>work_d</i>

TABLE 5.4 – Description des transitions immédiates

Transition	Signification	Filtre	Priorité
<i>Begin_sendD</i>	Début d'envoi d'un message de données.	<i>[x.type=="data"]</i>	1
<i>Begin_sendC</i>	Début d'envoi d'un message de contrôle.	<i>[x.type=="hello"]</i>	2

TABLE 5.5 – Description des places

Place	Signification	Type de jeton	Capacité
<i>Msgs</i>	Source d'un message	Msg	/
<i>Buffer</i>	Mémoire tampon du capteur	Msg	<i>B</i>
<i>Neighbors</i>	Voisins du prochain saut	Neighbor	/
<i>Control</i>	Messages de contrôle dans l'état d'envoi	Neighbor	/
<i>Data</i>	Messages de données encours d'envoi	Neighbor	/
<i>Battery</i>	Représente la batterie	Level	<i>C</i>

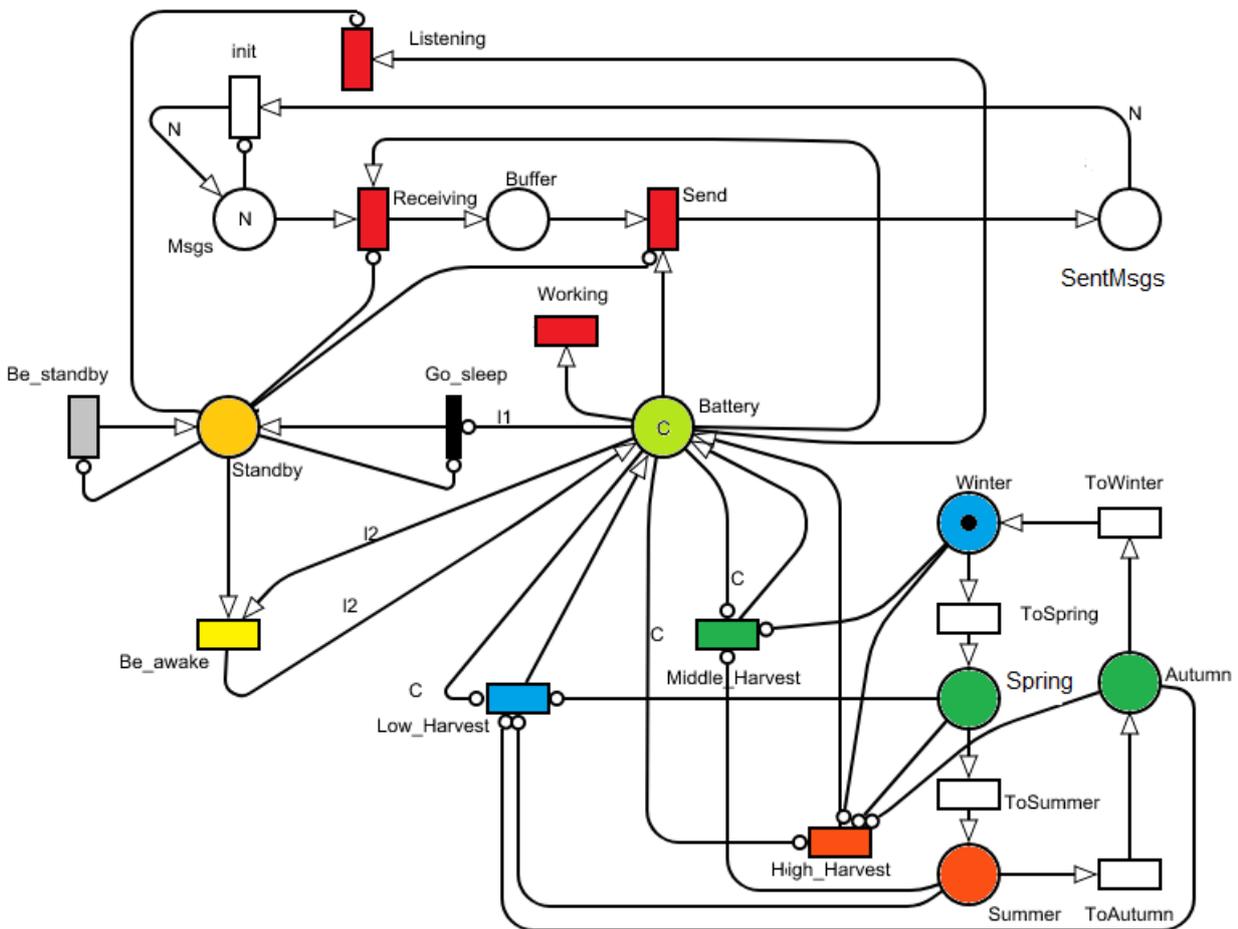
### 5.3 MODÉLISATION AVEC DIFFÉRENTS NIVEAUX D'ENSOLEILLEMENT

Dans plusieurs scénarios d'application, la durée de vie du nœud de capteur doit varier généralement de deux à dix ans selon les exigences de l'application spécifique. Prenons par exemple le cas du déploiement de nœuds de capteurs sur des montagnes glacées éloignées pour détecter le niveau d'épaisseur de la glace. Il faudra des années pour que le processus de fusion soit mesurable. Par conséquent, la durée de vie des nœuds capteurs doit durer plusieurs années

avant qu'ils ne passent à l'état inactif. Dans l'affirmative, la durée de vie d'un ou de plusieurs nœuds de capteur, selon la taille du réseau, aurait une incidence sur la performance du RCSF, (voir [Tan and Panda \[2010\]](#)).

Le déploiement d'un RCSF avec la récolte d'énergie renouvelable doit tenir compte de l'influence des saisons sur les performances du réseau si la source de l'énergie récoltée est l'énergie solaire. Dans cette section, nous présentons une nouvelle modélisation basée sur les RdPSGs qui prend en compte les différents taux saisonniers de la récolte d'énergie dues à la disparité des niveaux d'ensoleillement.

FIGURE 5.3 – Modélisation d'un nœud de capteur avec différents niveaux d'ensoleillement



La Figure 5.3 représente une modélisation d'un noeud de capteur dans le système capteur-voisins avec la prise en considération de l'impact de différents niveaux d'ensoleillement.

Lorsque le nœud de capteur est activé, il reçoit des messages (transition *Receiving*), envoie des messages à ses voisins (transition *Send*), écoute le réseau (transition *Listening*) et réalise ses opérations de base (transition *Working*). Pour économiser de l'énergie, le capteur rejoint périodiquement l'état de sommeil par le déclenchement de la transition *Be\_standby*. La récupération d'énergie est modélisée par les transitions *Low\_Harvest*, *Middle\_Harvest* et *High\_Harvest* qui représentent respectivement trois niveaux d'ensoleillement :

- le faible niveau de récolte est associé à la saison hivernale.
- le niveau moyen de récolte concerne à la fois les saisons de printemps et d'automne.
- le niveau de récolte élevé concerne la saison d'été.

Pour chaque saison, nous associons une place. Les places : *Spring*, *Summer*, *Autumn*, et *Winter* représentent respectivement les saisons : Printemps, Été, Automne et Hiver. Le changement de saison se fait en déclenchant les transitions temporelles qui ont les même taux de franchissement.

Le modèle proposé contient plusieurs arcs inhibiteurs décrits comme suit :

- De la place *Battery* à chaque transitions de récolte pour empêcher leur déclenchement si la batterie est pleine (c'est à dire que le nombre de quantum est égal à C).
- De la place *Standby* aux transitions *Be\_standby*, *Go\_sleep*, *Listening*, *Send* et *Receiving* pour interdire leurs franchissements associés lorsque le nœud de capteur est en veille.
- Depuis les places associés aux quatre saisons *Spring*, *Summer*, *Autumn* et *Winter* aux transitions associées au niveau de récolte *Low\_Harvest*, *Middle\_Harves* et *Hight\_Harvest* afin d'empêcher le déclenchement d'une transition de récolte inappropriée comme expliqué précédemment.

Comme dans le modèle de la Figure 5.1, nous définissons deux seuils pour le mécanisme de sommeil :  $T1$  et  $T2$ . Si l'énergie de la batterie devient inférieure à  $T1$  quanta, le nœud de capteur rejoint immédiatement l'état de sommeil par le déclenchement de la transition *Go\_sleep*. Le capteur se réveille par le franchissement de la transition *Be\_awake* si son niveau d'énergie devient supérieur ou égal au seuil  $T2$ .

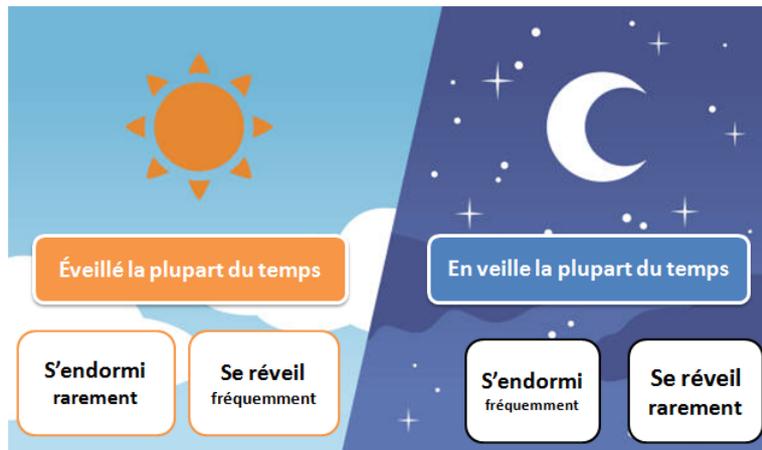
## 5.4 MODÉLISATION AVEC MÉCANISME DE VEILLE INTELLIGENT

La radiation du soleil est l'une des ressources énergétiques les plus abondantes et facilement disponibles sur notre planète. La quantité d'énergie solaire qui atteint la surface de la terre est grande. Bien que cela semble être une source d'énergie renouvelable parfaite, la quantité d'énergie solaire que nous pouvons utiliser varie en fonction de l'heure de la journée et de la saison de l'année ainsi que de l'emplacement géographique.

Les travaux précédents qui utilisent l'énergie solaire comme source de rechargement des batteries ont considéré que cette source est constante tout au long de la journée, ce qui ne correspond pas aux circonstances réelles. Afin de pallier ces lacunes, dans cette section nous proposons une amélioration du modèle de base (voir la Figure 5.1) en adoptant un mécanisme de double sommeil. En effet, dans la nuit où il n'y a pas d'énergie solaire, et donc, maintenir le même rythme de sommeil que le jour va affecter les performances du réseau. Pour que ça soit plus clair, comme le montre la figure 5.4, l'idée est d'augmenter les performances du capteur en le gardant active la plupart du temps pendant la journée, car en présence d'énergie solaire nous permettons à un tel comportement de contribuer à l'amélioration du temps de réponse global du réseau. Alors que, dans la nuit, où il n'y a pas d'énergie solaire, nous configurons le capteur de manière à préserver l'énergie stockée en diminuant son temps de réveil (c'est-à-dire le nœud de capteur rejoint l'état de veille la plupart du temps).

Cependant, obtenir le taux de sommeil exact pour atteindre les meilleures performances est l'objectif de notre modélisation surtout que cela dépend de

FIGURE 5.4 – La stratégie du mécanisme de veille intelligent



plusieurs facteurs. Par conséquent, en utilisant une modélisation avec les RdPSG, nous pouvons calibrer les entrées pour obtenir la configuration la plus appropriée.

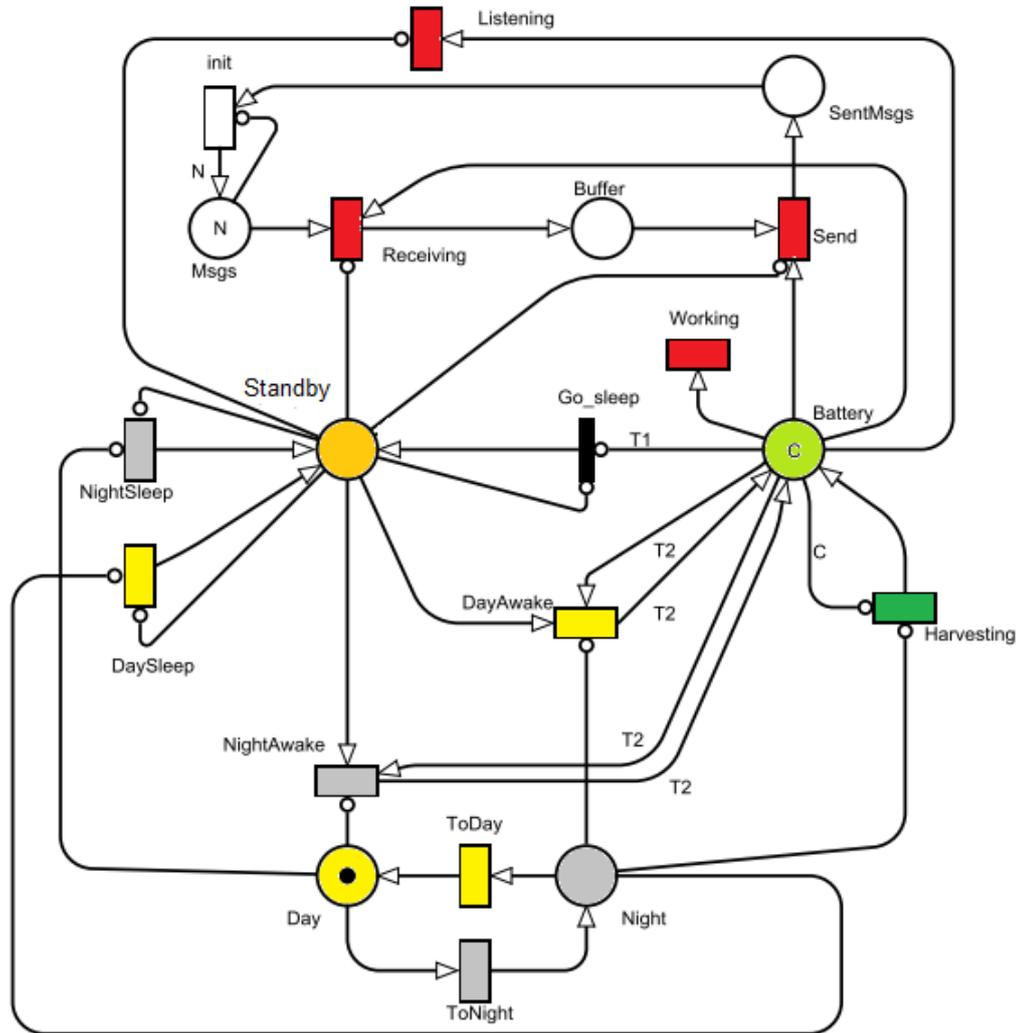
Les hypothèses que nous considérons dans cette formulation sont les suivantes :

- Tous les nœuds sont équipés de petites batteries ayant une énergie initiale égale à  $C$  quanta.
- Tous les nœuds sont équipés d'un système de récupération d'énergie solaire.
- Toutes les fonctions atomiques suivantes consomment un quantum d'énergie : la réception et l'envoi de messages, l'écoute et les fonction de base du capteur (détection, traitement ou agrégation).

La figure 5.5 représente notre proposition de modélisation. Nous supposons que le nombre de messages servis dans une journée est égal à  $N$ . La place *Battery* modélise la batterie par niveaux. En présence de l'énergie solaire, la transition *Harvesting* ajoute un quantum à la batterie après un délai prédéfini. Dans le modèle, nous définissons trois indicateurs : indicateur de nuit, indicateur de jour et indicateur de sommeil (représentés respectivement par les places *Night*, *Day* et *Standby*).

Le mécanisme de double sommeil est utilisé tel qu'il est représenté sur la figure

FIGURE 5.5 – Modélisation d'un nœud de capteur avec un mécanisme de veille intelligent



5.4 : dans la journée, les transitions *DaySleep* et *DayAwake* sont activées. Alors que dans la nuit on active les transitions *NightSleep* et *NightAwake*.

## 5.5 MODÉLISATION AVEC MÉCANISME DE VEILLE INTELLIGENT ET DIFFÉRENTS NIVEAUX D'ENSOLEILLEMENT

Le déploiement d'un réseau à longue durée lorsqu'il s'appuie sur la récolte de l'énergie solaire, doit prendre en considération l'influence des différents niveaux d'ensoleillement dus au changement de saisons, sur les performances

du réseau. Cette considération a été abordée dans le modèle de la Figure 5.3. Cependant, la formulation proposée suppose que le taux d'énergie solaire est constant durant toute les 24 heures, ce qui contraste avec les circonstances réelles (comme il est montré dans le modèle de la Figure 5.5). Dans cette section, nous présentons une modélisation avec la prise en compte simultanée de ces deux aspects, c'est-à-dire, les différents niveaux d'ensoleillement avec une stratégie de veille intelligente pour combler l'absence d'énergie solaire pendant la nuit.

Dans le tableau 5.6, nous comparons les contraintes considérées dans cette proposition par rapport aux approches basées sur les RdPSGs présentées dans les sections précédentes et autres liées à l'état de l'art.

En résumé, cette formulation présente une nouvelle modélisation basée sur les RdPSGs qui considère simultanément :

- Différents taux de récolte d'énergie à cause de différent niveaux d'ensoleillement.
- L'absence de la récupération d'énergie solaire dans la nuit en adoptant une stratégie de veille intelligente.

FIGURE 5.6 – Modélisation d'un nœud de capteur avec un mécanisme de veille intelligent et différents niveaux d'ensoleillement

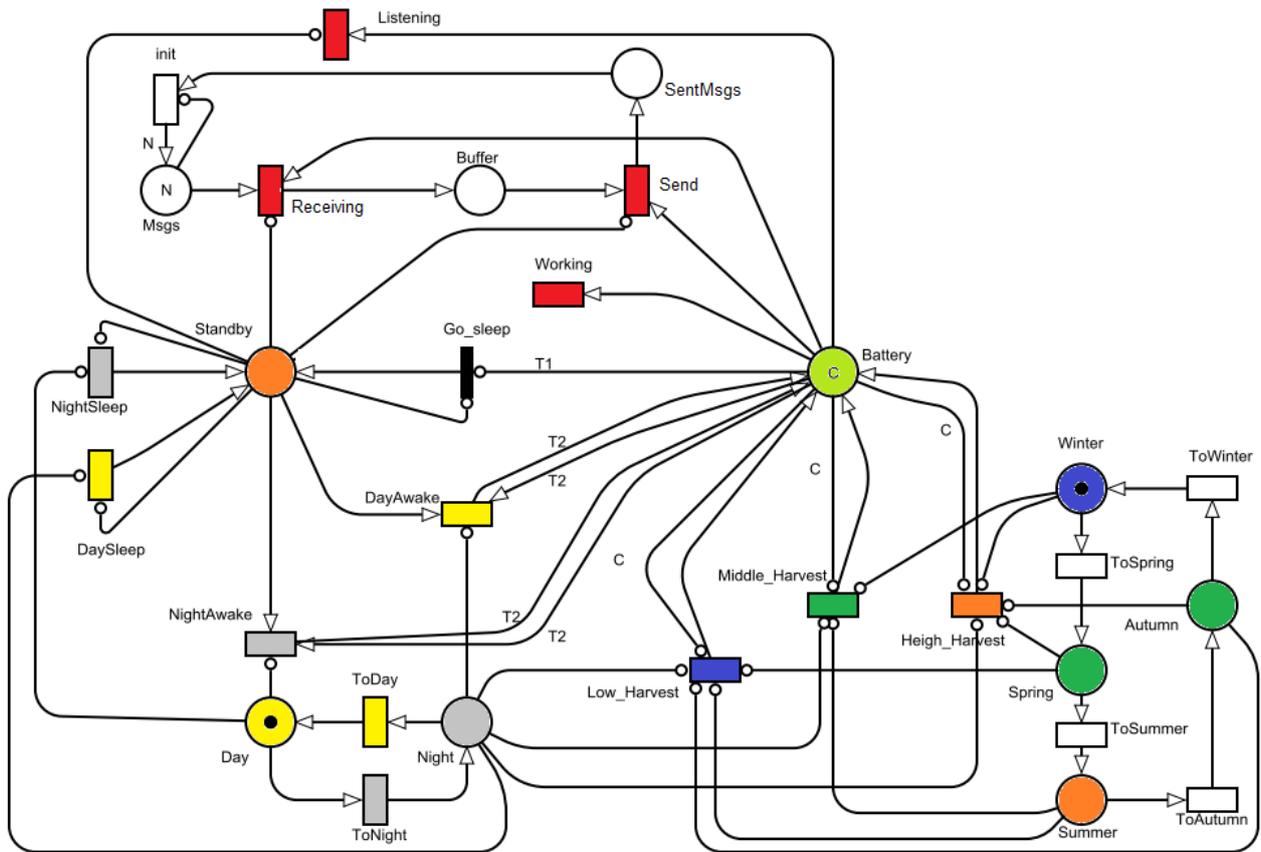
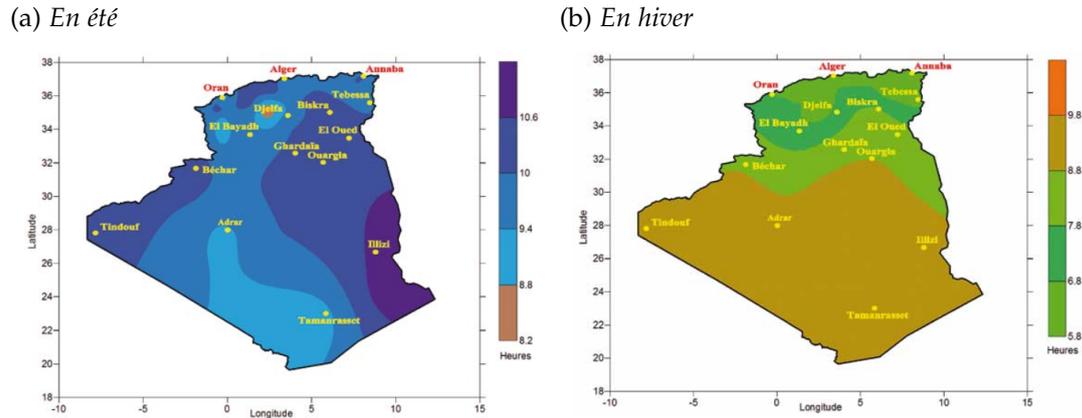


TABLE 5.6 – Comparaison entre les modèles précédents (MS : mécanisme de sommeil, DNE : différents niveaux d'enseoileillement)

Référence	Année	Récolte d'énergie	MS	DNE	Mesures de performance	Contribution
Wüchner et al.	2011	Non	Non	Non	Latence	Manque de fiabilité de l'orbite
Charbi and Charabi	2012	Non	Non	Non	Latence et probabilité de blocage	Deux types de serveurs : rapide et lent
Hakmi et al.	2017	Non	Non	Non	Latence, taille d'orbite et longueur de file d'attente	Fréquence de transmission
Boutoumi and Charbi	2018	Non	Non	Non	Temps d'attente, probabilité de blocage et consommation énergétique	Politique vacances-travail
Oukas and Boulif	2019	Solaire	Simple	Non	Latence et énergie résiduelle	Principe de quantification
Oukas and Boulif	2019	Général	Simple	Non	Latence et énergie résiduelle	Capacité tampon limitée et pertes de messages
Oukas and Boulif	2020	Général	Simple	Non	Latence et énergie résiduelle	Configuration avec double cluster-head
Oukas and Boulif	2020	Général	Simple	Non	Latence et énergie résiduelle	distance des voisins
Oukas and Boulif	2021	Général	Simple	Oui	Latence, Énergie résiduelle et utilisation de radio	différents niveaux d'enseoileillement
Oukas et al.	2021	Solaire	Double	Non	Latence et énergie résiduelle	Stratégie de double sommeil
Oukas and Boulif	2022	Solaire	Double	Oui	Latence, énergie résiduelle et Pourcentage de sommeil	Mécanisme de veille intelligent avec différents niveaux d'enseoileillement saisonnier

FIGURE 5.7 – La durée moyenne d'ensoleillement dans l'Algérie



### 5.5.1 Description du modèle

Dans la modélisation de la Figure 5.6, la récupération d'énergie est modélisée par les transitions *Low\_Harvest*, *Middle\_Harvest* et *High\_Harvest* qui matérialisent le taux de récolte autorisé en fonction du niveau d'ensoleillement de chaque saison. Cette considération permet de respecter les contraintes réelles. En effet, la Figure 5.7 montre le temps d'ensoleillement moyen sur l'Algérie en été et en hiver. Par exemple, la wilaya d'Ilizi située dans la zone sud-est, a un niveau d'ensoleillement élevé en été (supérieur à 10,8 heures par jour) par rapport à l'hiver (moins de 9,8 heures par jour) [Yaiche et al. \[2014\]](#).

Le modèle de la Figure 5.6 met en œuvre la stratégie du double sommeil. Il définit deux places pour jouer le rôle d'un drapeau indiquant alternativement le jour et la nuit. Pour le jour, deux transitions temporelles sont définies. Une pour mettre le nœud de capteur en veille et la deuxième pour l'activer (transitions : *DaySleep* et *DayAwake*). De même, deux transitions sont utilisées pour la nuit : *NightSleep* et *NightAwake* pour mettre le capteur dans l'état de veille et dans l'état actif respectivement. La Table 5.7 représente la description des places et la Table 5.8 donne la description des transitions.

Le modèle proposé comporte plusieurs arcs inhibiteurs qui peuvent être expliqués comme suit :

- De la place *Battery* à chaque transitions de récolte pour empêcher leur

déclenchement si la batterie est pleine c'est-à-dire que le nombre maximal de quanta est égal à  $C$ .

- De la place *Standby* aux transitions *NightSleep*, *DaySleep*, *Go\_sleep*, *Listening*, *Send* et *Gathering* pour interdire à leurs événements associés de se produire lorsque le nœud de capteur est en veille.
- De places : *Spring*, *Summer*, *Autumn* et *Winter* à chaque transition qui ne correspond pas au niveau de récolte requis.
- De la place *Night* aux transitions *Low\_Harvest*, *Middle\_Harvest*, *High\_Harvest*, *DaySleep* et *DayAwake* afin d'interdire à leurs événements associés de se produire pendant la nuit.
- De la place *Day* aux transitions *NightSleep* et *NightAwake* afin d'interdire à leurs événements associés de se produire pendant le jour.

Pour le mécanisme de sommeil, nous définissons deux seuils :  $T1$  et  $T2$ . Si l'énergie de la batterie est inférieure à  $T1$  quanta, le nœud de capteur rejoint immédiatement l'état de veille en déclenchant la transition *Go\_sleep*. Le nœud de capteur se réveille lorsqu'une transition entre *DayAwake* et *NightAwake* se déclenche. Ce déclenchement ne peut avoir lieu que si le niveau d'énergie du nœud de capteur est supérieur ou égal à  $T2$  quanta.

TABLE 5.7 – Description des places du RdPSG de la Figure 5.6

Place	Libellé	Description	valeur initiale
P1	<i>Msgs</i>	Source des messages	$N$
P2	<i>Buffer</i>	La file d'attente des messages	0
P3	<i>Standby</i>	Le nœud de capteur est en veille	0
P4	<i>SentMsg</i>	Messages envoyés avec succès	0
P5	<i>Battery</i>	Batterie du capteur	$C$
P6	<i>Winter</i>	Saison d'hiver	1
P7	<i>Spring</i>	Saison de printemps	0
P8	<i>Summer</i>	Saison d'été	0
P9	<i>Autumn</i>	Saison d'automne	0
P10	<i>Day</i>	Indicateur du jour	1
P11	<i>Night</i>	Indicateur de la nuit	0

TABLE 5.8 – Description des transitions du RdPSG de la Figure 5.6

Transition	Libellé	Description	Taux de tir
$t_1$	<i>Gathering</i>	Réception des messages	<i>receive_r</i>
$t_2$	<i>Transmit</i>	Transmission d'un message	<i>send_r</i>
$t_3$	<i>Working</i>	Traitement et détection	<i>working_r</i>
$t_4$	<i>Listening</i>	Écouter le réseau	<i>listen_r</i>
$t_5$	<i>Init</i>	Ré-initialisation du modèle	<i>init_r</i>
$t_6$	<i>GO_sleep</i>	Mise en veille immédiate	/
$t_7$	<i>NightSleep</i>	Sommeil long pendant la nuit	<i>Nsleep_r</i>
$t_8$	<i>DaySleep</i>	Sommeil court pendant la journée	<i>Dsleep_r</i>
$t_9$	<i>NightAwake</i>	Réveil court pendant la nuit	<i>Nawake_r</i>
$t_{10}$	<i>DayAwake</i>	Réveil long pendant la journée	<i>Dawake_r</i>
$t_{11}$	<i>ToNight</i>	La nuit arrive	<i>Ncome_r</i>
$t_{12}$	<i>ToDay</i>	Le jour arrive	<i>Dcome_r</i>
$t_{13}$	<i>Low_Harvest</i>	Récolte faible d'énergie	<i>low_r</i>
$t_{14}$	<i>Middle_Harvest</i>	Récolte moyenne d'énergie	<i>middle_r</i>
$t_{15}$	<i>Hight_Harvest</i>	Récolte haute d'énergie	<i>hight_r</i>
$t_{16}$	<i>ToSpring</i>	Le printemps arrive	<i>season_r</i>
$t_{17}$	<i>ToSummer</i>	L'été arrive	<i>season_r</i>
$t_{18}$	<i>ToAutumn</i>	L'automne arrive	<i>season_r</i>
$t_{19}$	<i>ToWinter</i>	L'hiver arrive	<i>season_r</i>

### 5.5.2 Analyse des modèles

Nous présentons dans cette partie l'analyse du modèle qui combine toutes les améliorations citées précédemment (modèle de la Figure 5.6). Cependant, montrer l'ergodicité de ce modèle implique l'ergodicité des autres modèles.

En utilisant l'analyse structurelle, nous pouvons dériver certaines propriétés qualitatives pour prouver que le système modélisé se stabilisera. En effet, en montrant que le RdPSG présenté est borné, vivant et réversible, nous concluons que le modèle est ergodique, et par conséquent, nous pouvons procéder à l'analyse quantitative en calculant les métriques de performance dans l'état stationnaire.

Tout d'abord, on remarque que le système est borné. En effet, chaque place est couverte par un certain P-invariant, et donc le modèle a un espace d'état fini. Par exemple, les P-invariants suivants couvrent l'ensemble des place de notre

modèle :

- $I1 : \#P10 + \#P11 = 1$
- $I2 : \#P6 + \#P7 + \#P8 + \#P9 = 1$
- $I3 : \#P1 + \#P2 + \#P4 = N$
- $I4 : \#P5 \leq C$
- $I5 : \#P3 \leq 1$

D'autre part, la structure du RdPSG de la Figure 5.6 et la présence de T-invariants permettent de vérifier la condition de vivacité. Nous remarquons que le modèle présenté a les T-invariants suivants :

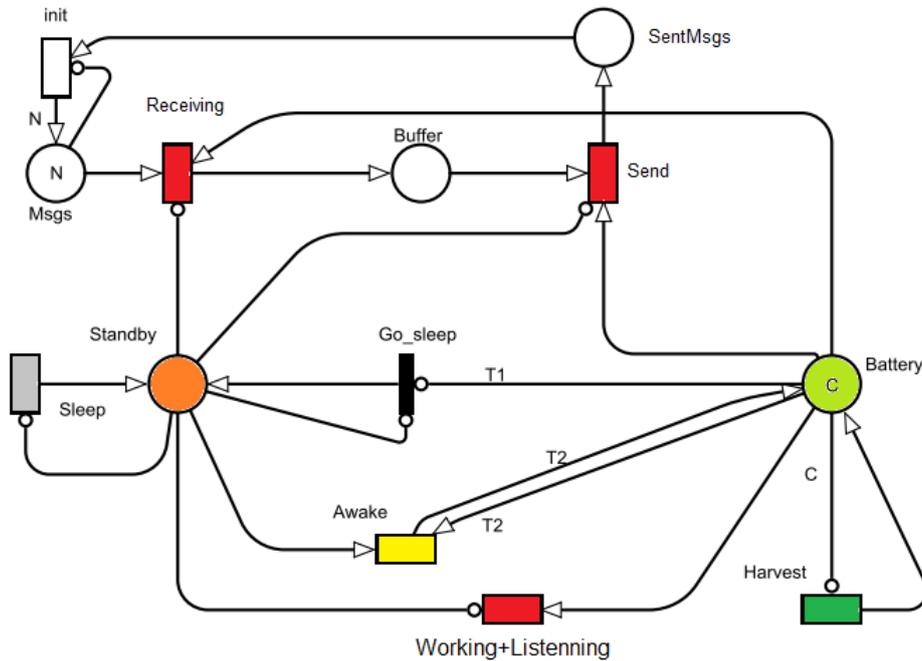
- $I6 : (t_{16}, t_{17}, t_{18}, t_{19})$
- $I7 : (t_{11}, t_{12})$
- $I8 : (t_1, t_2, t_5)$

$I6$  et  $I7$  définissent deux modules de graphe dont les transitions sont vivantes. En effet, leur franchissement ne dépend que du marquage local défini par l'ensemble des lieux  $\{P6, P7, P8, P9\}$  et  $\{P10, P11\}$  respectivement. De plus, les places de ces deux modules ne sont reliées au graphe restant que par des arcs inhibiteurs sortants. Par conséquent, réduire le RdPSG proposé en :

1. supprimant ces deux modules avec tous leurs arcs incidents
2. et en fusionnant les transitions  $(t_7, t_8)$ ,  $(t_9, t_{10})$  et  $(t_{13}, t_{14}, t_{15})$ .

Cela, ne modifie pas la propriété de vivacité des transitions restantes. Nous pouvons également fusionner  $(t_3, t_4)$  qui sont toujours activés et ont des fonctionnalités similaires. En effet, les deux consomment le même nombre de jetons de  $P5$  lorsqu'ils sont déclenchés, et sont inhibés par la même place  $P3$ . Cette ré-

FIGURE 5.8 – Le graphe réduit du RdPSG de la Figure 5.6



duction donne le graphique représenté sur la Figure 5.8. Dans le graphe obtenu, nous pouvons soit déclencher plusieurs fois la transition *Harvest* pour reporter le pouvoir d'inhibition que la place  $P3$  a sur les transitions de l'invariant  $I3$ , soit déclencher la transition consommatrice de jetons *Working + Listening* jusqu'à le déclenchement de la transition immédiate  $t_6$ . Par ce développement, nous pouvons conclure que toutes les transitions du RdPSG de la Figure 5.6 sont vivantes et donc, la vivacité du RdPSG est maintenue.

La condition de réversibilité peut être démontrée par construction. En fait, étant donné deux marquages différents  $M = (m_1, \dots, m_{11})$  et  $M' = (m'_1, \dots, m'_{11})$ , nous pouvons construire un chemin d'accessibilité de  $M$  à  $M'$  :

1. en détectant la première différence par composant.
2. et en utilisant le module T-invariant associé pour avoir le marquage ciblé.

Si dans les deux marquages,  $p_3 = \text{"Standby"}$  contient un jeton, il faut d'abord le supprimer en déclenchant  $t_{10}$  après avoir paramétré le marquage local du module  $I1$  si nécessaire. Une fois que tous les repères de place sauf  $p_3$  coïncident avec la cible  $M'$ , nous déclenchons la transition prête entre  $t_7$  et  $t_8$  pour obtenir

une correspondance complète. Ceci prouve que le graphe d'accessibilité associé au RdPSG de la Figure 5.6 est fortement connexe ce qui implique à son tour que le système est réversible.

Étant donné que les trois conditions mises en évidence sont satisfaisantes, le modèle est ergodique et, par conséquent, nous pouvons dériver les mesures de performance de l'état stationnaire.

### 5.5.3 Mesures de performances

Après avoir trouvé la distribution de probabilité en régime permanent (stationnaire)  $\pi$ , plusieurs mesures de performance et indices de fiabilité peuvent être dérivées comme suit :

- Le nombre moyen de paquets dans la place *Buffer* :

$$\overline{Buffer} = \sum_{i: M_i \in M} M_i(Buffer) * \pi_i \quad (5.1)$$

- La charge moyenne de la batterie correspond au nombre de quanta à la place *Battery* :

$$\overline{Battery} = \sum_{i: M_i \in M} M_i(Battery) * \pi_i \quad (5.2)$$

- La probabilité d'un événement  $E$  notée  $P(E)$  :

$$P(E) = \sum_{i: M_i \in M} \pi_i. \quad (5.3)$$

où  $M_i$  satisfait  $E$ .

- Le débit moyen de la transition *Send* a un taux égale à  $send\_r$ , noté  $\overline{send\_r}$  :

$$\overline{send\_r} = send\_r * P(\#Buffer > 0) * P(\#Standby > 0) * P(\#Battery > T1) \quad (5.4)$$

Où  $\#Standby$ ,  $\#Buffer$  et  $\#Battery$  sont le nombre de jetons dans les places *Standby*, *Buffer* et *Battery* respectivement.

- Le débit effectif d'arrivée des messages : il correspond au débit moyen de

la transition *Receiving* de taux  $receive\_r$  noté  $\overline{receive\_r}$  :

$$\overline{recevoir\_r} = recevoir\_r * P(\#Standby > 0) * P(\#Msgs > 0) * P(\#Battery > T1) \quad (5.5)$$

Où  $\#Msgs$  est le nombre de jetons dans la place *Msgs*.

- Le temps moyen de séjour dans la place *Buffer* noté  $wait(Buffer)$  :  
Soit *Buffer* la place d'entrée de la transition temporisée *Send* et  $\overline{send\_r}$  son débit moyen. Alors,

$$wait(Buffer) = \frac{1}{\overline{send\_r}} * \sum_{i: M_i \in M} M_i(Buffer) * \pi_i \quad (5.6)$$

- Le pourcentage moyen de sommeil noté *sleep* correspond au nombre moyen de marques dans la place *Standby* multiplié par 100 :

$$sleep = 100 * \sum_{i: M_i \in M} M_i(Standby) * \pi_i \quad (5.7)$$

- Le pourcentage moyen d'éveil noté *actif* :

$$actif = 100 * (1 - \sum_{i: M_i \in M} M_i(Standby) * \pi_i) \quad (5.8)$$

- L'utilisation de la radio notée  $U_r$  :

$$U_r = \sum_{i: M_i \in M} P(\#Buffer > 0) * P(\#Standby > 0) * P(\#Battery > T1) \quad (5.9)$$

- La probabilité de blocage notée  $P_b$  : elle correspond à la probabilité de l'épuisement énergétique où le capteur rejoint l'état de veille :

$$P_b = \sum_{i: M_i \in M} (P(\#Standby = 1) + P(\#Battery \leq T1)) \quad (5.10)$$

## 5.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté des modèles de RdPSGs qui tiennent compte de contraintes ayant une relation avec la consommation d'énergie.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons une approche tenant compte de contraintes liées à l'indisponibilité de capteurs dans le réseau.

# MODÉLISATION DES RCSFs AVEC DES CONSIDÉRATIONS DE DISPONIBILITÉ

# 6

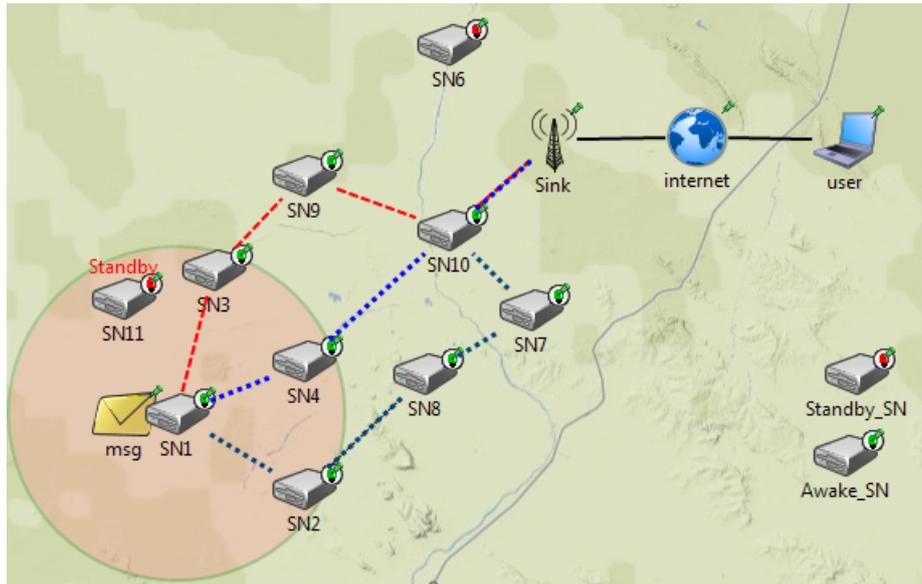
Dans ce chapitre, nous proposons des modèles basés sur les RdPSGs qui permettent de mesurer les performances des RCSFs en considérant une abstraction se focalisant sur la relation capteur-voisins. Les modèles proposés prennent en compte plusieurs contraintes réelles telles que les pannes et l'indisponibilité des voisins. La nouveauté de ces modèles est la prise en compte des appels répétés, de la discipline de pannes dépendantes et du mécanisme de sommeil.

## 6.1 ABSTRACTION DU RCSF PAR UNE RELATION CAPTEUR-VOISINS

Afin d'analyser le comportement du RCSF, nous adoptons une approche basée sur la modélisation de la communication entre un capteur et ses voisins [Wüchner et al. \[2010\]](#). Un voisin est un capteur qui peut être atteint en un seul saut dans le chemin d'envoi des messages à la station de base.

L'émetteur, que nous appelons le nœud principal, surveille les incidents de sa proximité, puis tente de transmettre un rapport à la station de base en envoyant un message à un voisin actif (Figure 6.1 ). Le nœud principal peut également recevoir des messages de ses voisins et se charge de les acheminer vers la station de base. Ainsi, un message à envoyer peut être émis par le nœud principal lui-même ou par des voisins de prochain saut.

FIGURE 6.1 – Un nœud capteur et ses voisins dans un RCSF



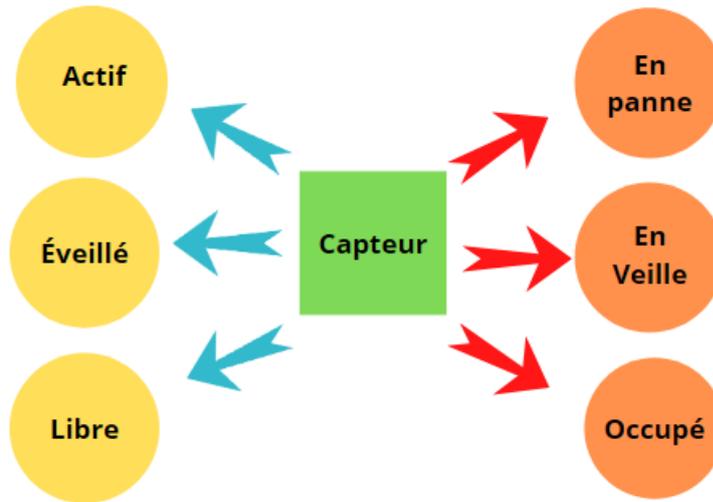
Nous supposons dans notre modélisation que tous les capteurs sont identiques. Tout capteur peut être en état opérationnel ou en panne. Il peut être dans un état éveillé ou endormi et il peut être inactif ou occupé (voir Figure 6.2).

## 6.2 MODÉLISATION AVEC APPELS RÉPÉTÉS ET PANNES DES VOISINS

La Figure 6.3 représente un RdPSG qui décrit comment un nœud interagit avec ses voisins. Lorsqu'un incident est détecté par un capteur, il crée un message et tente de l'envoyer à un voisin. S'il reçoit un message d'un autre capteur, il se charge de le transmettre à un voisin plus proche du puits. Si aucun voisin n'est actif (pas de jeton dans la place *Neighbors*), le message rejoint l'orbite (cette action est déclenchée par le franchissement de la transition *Reject*) afin que le nœud puisse retarder ses tentatives d'appel en espérant qu'un voisin devient disponible. S'il y a au moins un voisin libre, la transition *Send\_start* se déclenche et le message entre dans le processus de transmission. L'envoi prend fin lorsque la transition *Send* se déclenche.

Les capteurs sont susceptibles de tomber en panne. Le déclenchement de

FIGURE 6.2 – Les états d'un capteur



la transition *Be\_down* représente un plantage d'un voisin. La place *SN\_down* comptabilise les voisins en panne. Après une opération de réparation, un voisin en panne devient opérationnel et rejoint la place *Neighbors* après déclenchement de la transition *Repair*.

Le modèle proposé est générique et peut donc être adapté selon les spécificité du domaine d'application visé. Par exemple, pour des applications militaires, on peut tenir compte de la forte vraisemblance de destruction des capteurs, en particulier sur le champ de bataille où plusieurs capteurs peuvent être détruits en même temps, on peut augmenter la probabilité associée à la transition *Destroy*.

Pour toutes les transitions temporelles, les délais de déclenchement sont supposés suivre la loi exponentielle. Celles-ci sont récapitulées dans la Table 6.1 avec une courte description. Par ailleurs, la Table 6.2 décrit les transitions immédiates.

Dans le modèle de la Figure 6.3, un capteur peut basculer entre deux états : actif et en veille. Afin d'économiser de l'énergie et d'améliorer la charge de la batterie, chaque capteur reste en état de veille jusqu'à ce que la charge de la batterie devienne supérieure ou égale à un seuil nommé *t*. La Table 6.3 décrit les places du modèle.

FIGURE 6.3 – Modèle basé sur les RdPSGs pour les RCSFs avec appels répétés et pannes

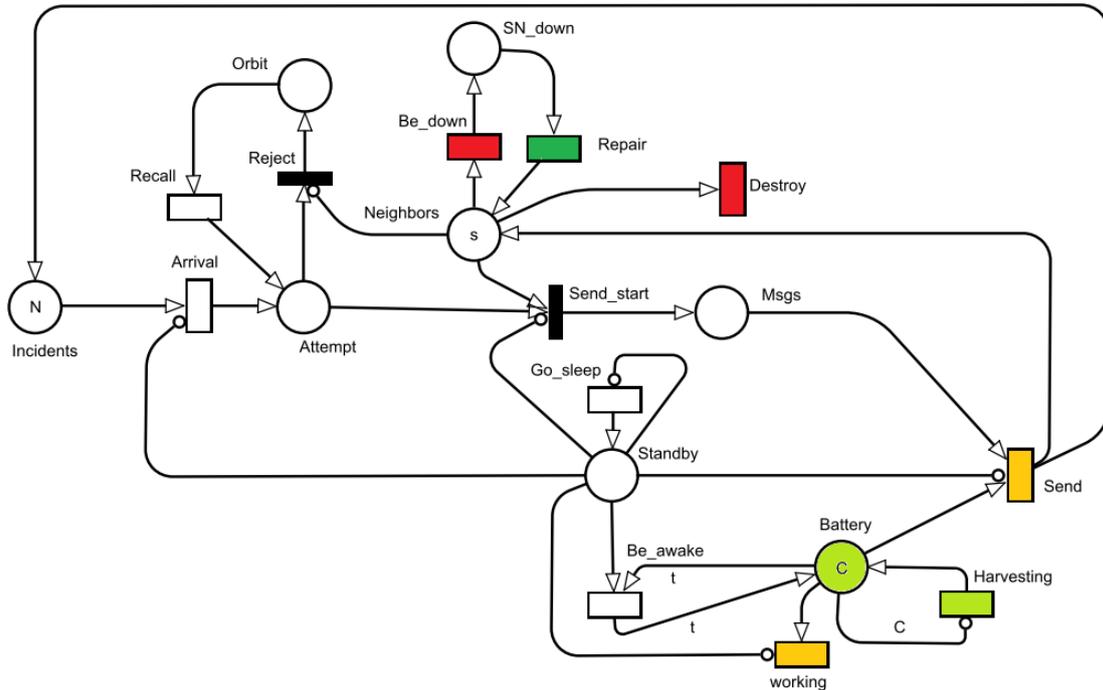


TABLE 6.1 – Description des transitions du modèle de la Figure 6.3

Transition	Signification	taux de franchissement
<i>Arrival</i>	Arrivée d'un message	$t_{arrive}$
<i>Send</i>	Envoi réussi à un voisin	$t_{send}$
<i>Be_down</i>	Survenue d'une panne d'un voisin	$t_{down}$
<i>Destroy</i>	Destruction d'un ou de plusieurs voisins	$t_{dest}$
<i>Recall</i>	Tentative de renvoi d'un message	$t_{recall}$
<i>Repair</i>	Réparation d'un voisin	$t_{repair}$
<i>Harvesting</i>	Récupération d'énergie	$t_{rcolte}$
<i>Working</i>	Consommation d'énergie de travail	$t_{travail}$
<i>Go_sleep</i>	Le capteur principal rejoint l'état de veille	$t_{sleep}$
<i>Be_away</i>	Activation du capteur principal	$t_{awake}$

TABLE 6.2 – Description des transitions immédiates du modèle de la Figure 6.3

Transition	Signification	Priorité
<i>Send_start</i>	Démarrage de transmission à un voisin	2
<i>Reject</i>	Mettre les messages en orbite	1

TABLE 6.3 – Description des places du modèle de la Figure 6.3

Place	Signification	Marquage initial
<i>Incidents</i>	source des messages	$N$
<i>Attempt</i>	tentative d'envoi des messages	0
<i>Orbit</i>	le message attend un voisin libre	0
<i>Neighbors</i>	voisins inactifs	$s$
<i>Msgs</i>	messages en cours d'envoi	0
<i>SN_down</i>	voisins nécessitant une réparation	0
<i>Battery</i>	niveau d'énergie	$C$
<i>Standby</i>	le capteur rejoint l'état de veille	0

### 6.3 MODÉLISATION DES RCSFs AVEC APPELS RÉPÉTÉS, PANNES DÉPENDANTES ET MÉCANISME DE VEILLE INTELLIGENT

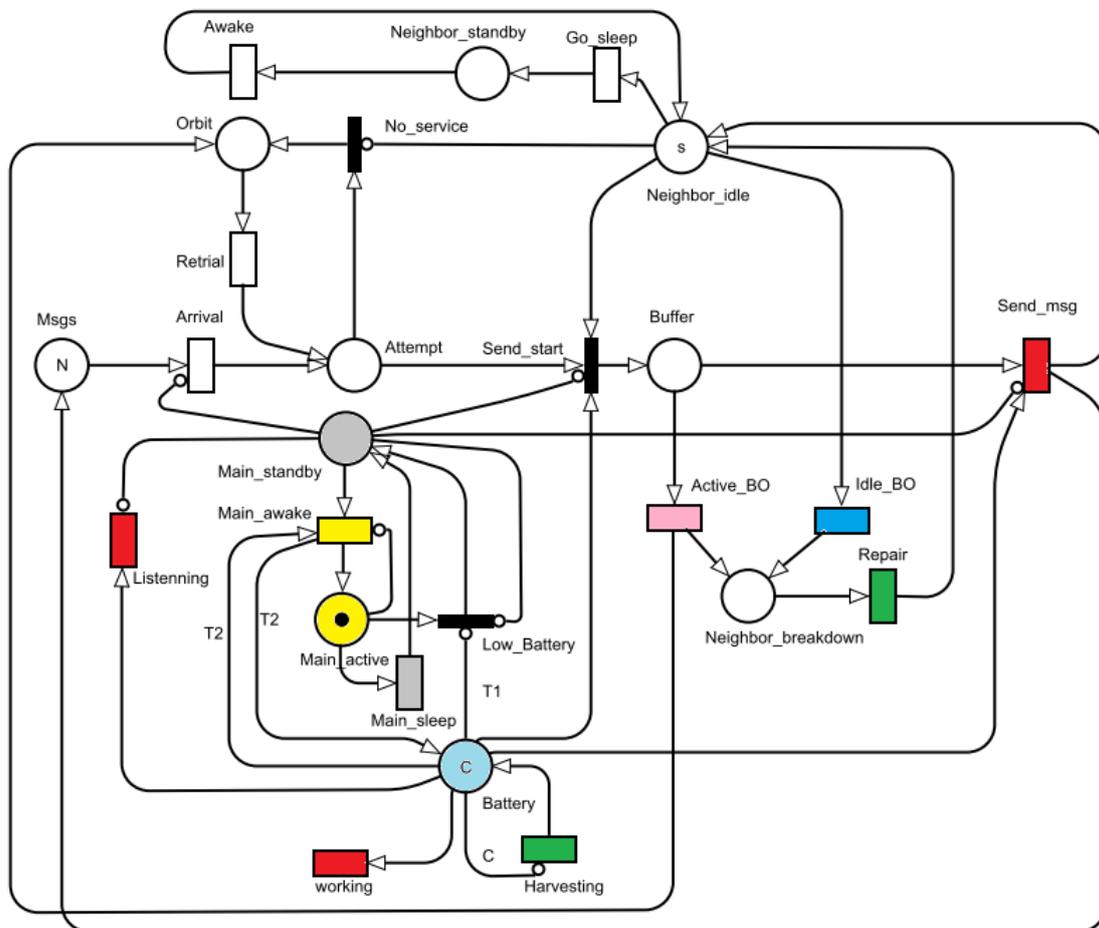
La Figure 6.4 représente un modèle basé sur le formalisme des RdPSGs qui prend en compte la répétition des appels, un mécanisme de veille intelligent, les pannes dépendantes, les réparations, la consommation d'énergie et le rechargement de batterie par récupération d'énergie.

La place *Msgs* contient les messages à envoyer par le capteur principal. La place *Attempt* représente l'arrivée d'un rapport d'incident depuis l'unité de captage/traitement, d'un message reçu ou d'une nouvelle tentative de renvoi d'un message qui était en orbite. Chaque jeton à la place *Orbit* représente donc une nouvelle tentative d'envoi d'un ancien message. La place *Neighbor\_idle* contient des jetons représentant chacun un voisin libre. Au départ, il y a  $s$  jetons dans cette place. La place *Neighbor\_standby* représente les capteurs voisins en état de veille. Les jetons à la place *Buffer* représentent les messages dans la file d'attente d'envoi. Pour tenir compte de la non fiabilité des capteurs, la place *Neighbor\_breakdown* contient les voisins tombés en panne.

Si un message arrive à la place *Attempt* et trouve un voisin libre et opérationnel, il entre directement dans le service de transmission car *Send\_start* est une transition immédiate. S'il n'y a pas de voisin disponible (la place *Neighbor\_idle* est vide) ou si le capteur principal est en veille (i.e. il y a un jeton dans la

place *Main\_standby*), le message rejoint l'orbite pour d'ultérieures tentatives. Le déclenchement de la transition *Send\_msg* représente un envoi réussi de message. Deux jetons seront générés, l'un représente la libération d'un capteur voisin qui rejoint la place *Neighbor\_idle*, et le deuxième est associé à un message qui rejoint la place *Msgs*. Ce lien de retour à la place *Msgs* est utilisé comme moyen de régénérescence permettant de préserver la vivacité et la réversibilité du modèle.

FIGURE 6.4 – RdPSG modélisant la répétition d'appels, pannes dépendantes et la mise en veille intelligente



Afin d'économiser l'énergie, les voisins rejoignent l'état de veille avec le taux  $\theta$ . Après un certain temps, la transition *Awake* est déclenchée avec le taux  $\omega$ . Par ailleurs, le capteur principal rejoint l'état de veille en déclenchant périodique-

TABLE 6.4 – Description des transitions temporelles

Transition	Signification	taux de tir
<i>Send_msg</i>	Le capteur envoie un message	$\mu$
<i>Retrial</i>	Réessaie d'envoi d'un message	$\nu$
<i>Idle_BO</i>	Panne d'un voisin inactif	$\delta$
<i>Active_BO</i>	Panne d'un voisin occupé	$\gamma$
<i>Repair</i>	Réparation de voisins	$\alpha$
<i>Go_sleep</i>	Un voisin passe à l'état de veille	$\theta$
<i>Awake</i>	Un voisin se réveille	$\omega$
<i>Main_sleep</i>	Mise en veille du capteur principal	$\theta$
<i>Main_awake</i>	Réveil du capteur principal	$\omega$
<i>Listening</i>	Écoute du canal par le capteur principal	$\alpha_2$

ment la transition *Main\_sleep*. Pour instaurer un mécanisme de veille intelligent, nous définissons deux seuils :  $T1$  et  $T2$ . Lorsque le niveau d'énergie de la batterie est inférieur à  $T1$ , le capteur principal éteint sa radio et rejoint l'état de veille immédiatement par le déclenchement de la transition *low\_battery*. Le capteur principal se réveille par le déclenchement de la transition *Main\_awake*. Cette dernière ne se déclenche que si le niveau d'énergie dans la batterie est supérieur ou égal au seuil  $T2$ .

Concernant les considérations énergétiques, comme dans le précédent modèle, la présence d'une batterie rechargeable est représentée par la place *Battery* qui contient initialement  $C$  quanta d'énergie. Le nombre de quanta augmente lorsque la transition *Harvesting* se déclenche (voir les transitions en vert dans le modèle) et il diminue lorsque le capteur principal est actif (voir les transitions en rouge). Nous supposons que l'envoi ou la réception d'un message vers ou depuis un voisin consomme la quantité d'énergie égale à un quantum.

D'autre part, avant la fin de la réception du message, le voisin choisi peut tomber en panne en raison d'une batterie déchargée ou de toute autre cause de défaillance. Cet événement déclenche la transition *Active\_BO* qui génère deux jetons : l'un rejoint la place *Neighbor\_breakdown* et le second la place *Orbit* pour répéter les essais d'envoyer le message. Notons que si un capteur tombe en panne alors qu'il est inactif, un jeton sera produit par la transition *Idle\_BO* et rejoindra la place *Neighbor\_breakdown*. Le Table 6.4 contient la description des

nouvelles transitions temporelles non présentes dans la Table 6.1.

L'état initial du modèle est décrit par le marquage initial  $M_0$  tel que  $M_0(Msgs) = N$ ,  $M_0(Neighbor\_idle) = s$ ,  $M_0(Main\_active) = 1$ ,  $M_0(Batterie) = C$ , et le reste 0 i.e. ils n'ont aucun jeton.

Le modèle de la Figure 6.4 est *borné* et le graphe d'accessibilité dérivé est *fortement connexe*. Par conséquent, le modèle est *ergodique* et engendre une solution unique pour le système de distributions de probabilité associées au *régime permanent*.

## 6.4 FORMULES DE PERFORMANCES

Ayant la distribution de probabilité en régime permanent  $\pi$ , plusieurs formules de mesures de performance, et indices de fiabilité du système peuvent être dérivés. Parmi ceux-ci on peut citer les suivants [Charbi and Ioualalen \[2006\]](#), [Florin et al. \[1991\]](#) :

- Nombre moyen de voisins occupés  $\bar{n}_b$ . Il correspond au nombre moyen de marques dans la place *Buffer* :

$$\bar{n}_b = \sum_{i:M_i \in M} M_i(Buffer) \cdot \pi_i \quad (6.1)$$

- Nombre moyen de voisins libres  $\bar{n}_i$ . Il correspond au nombre moyen de marques de la place *Neighbor\_idle* :

$$\bar{n}_i = \sum_{i:M_i \in M} M_i(Neighbor\_idle) \cdot \pi_i \quad (6.2)$$

- Nombre moyen de messages ayant requis une répétition d'appel  $\bar{n}_o$ . Il correspond au nombre moyen de marques dans la place *Orbit* :

$$\bar{n}_o = \sum_{i:M_i \in M} M_i(Orbit) \cdot \pi_i \quad (6.3)$$

- Charge moyenne de la batterie  $\overline{Battery}$ . Il correspond au nombre moyen de marques de la place *Batterie* :

$$\overline{Battery} = \sum_{i:M_i \in M} M_i(Battery).\pi_i \quad (6.4)$$

- Nombre moyen de messages présents dans le système d'attente  $\bar{n}$ . Il correspond à la somme du nombre moyen de marques dans les places *Orbit* et *Buffer* :

$$\bar{n} = \bar{n}_b + \bar{n}_o \quad (6.5)$$

- Nombre moyen de voisins dans en veille  $\bar{n}_s$ . Il correspond au nombre moyen de jetons dans la place *Neighbor\_standby* :

$$\bar{n}_s = \sum_{i:M_i \in M} M_i(Neighbor\_standby).\pi_i \quad (6.6)$$

- Nombre moyen de voisins en panne  $\bar{n}_f$ . Il correspond au nombre moyen de marques dans la place *Neighbor\_breakdown* :

$$\bar{n}_f = \sum_{i:M_i \in M} M_i(Neighbor\_breakdown).\pi_i \quad (6.7)$$

- Taux moyen d'arrivées des messages  $\bar{\lambda}$ . Il correspond au débit de la transition *Arrival* :

$$\bar{\lambda} = \sum_{i:M_i \in M(Arrival)} \lambda.M_i(Msgs).\pi_i \quad (6.8)$$

- Taux moyen de répétitions d'appels  $\bar{v}$ . Il correspond au débit de la transition *Retrial* :

$$\bar{v} = \sum_{i:M_i \in M(Retrial)} v.M_i(Orbite).\pi_i \quad (6.9)$$

- Taux moyen d'envoi de messages  $\bar{\mu}$ . Il correspond au débit de la transition *Send\_msg* :

$$\bar{\mu} = \sum_{i:M_i \in M(Send\_msg)} \mu.M_i(Buffer).\pi_i \quad (6.10)$$

- Taux moyen d'activation d'un capteur  $\bar{\omega}$ . Il correspond au débit de la transition *Be\_awake* :

$$\bar{\omega} = \sum_{i:M_i \in M(Be\_awake)} \omega.M_i(Neighbor\_standby).\pi_i \quad (6.11)$$

- Taux moyen de sommeil  $\bar{\theta}$ . Il correspond au débit de la transition *Go\_sleep* :

$$\bar{\theta} = \sum_{i:M_i \in M(Go\_sleep)} \theta.M_i(Neighbor\_idle).\pi_i \quad (6.12)$$

- Temps d'attente moyen d'un message  $\bar{W}$ . Il correspond au temps moyen entre l'arrivée et le début de l'envoi des messages.  $\bar{W}$  est calculé par la formule de Little [Florin et al. \[1991\]](#) :

$$\bar{W} = \frac{\bar{n}_o}{\lambda} \quad (6.13)$$

- Temps de réponse moyen  $\bar{R}$ . Il correspond au temps moyen entre l'arrivée et la fin de transmission des messages :

$$\bar{R} = \frac{\bar{n}}{\lambda} \quad (6.14)$$

## 6.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté des modèles basés sur les RdPSGs pour analyser le comportement d'un RCSF en tenant compte d'un certain nombre de caractéristiques plus ou moins liées à la non fiabilité des capteurs tels que les pannes, la perte de messages et la discontinuité de disponibilité d'énergie.

Afin de montrer la capacité des modèles proposés de prévoir le comportement du réseau de capteurs avant un réel déploiement, le chapitre suivant procure une analyse expérimentale qui aide à ajuster les paramètres du réseaux selon les besoins de performance (niveau de batterie, temps de réponse, etc.) escomptés.

Dans ce chapitre, nous donnons une brève description de l'outil *TimeNet* avec lequel notre étude expérimentale a été réalisée. Ensuite, nous présentons une mise en œuvre des modèles proposés dans les deux derniers chapitres. Pour ce faire, nous commençons par l'analyse des modèles avec lesquels nous réalisons une étude de cas. Cette dernière illustre comment on peut évaluer les performances d'un RCSF lorsqu'il est déployé sur différentes zones du vaste territoire algérien. Nous considérons les différents taux de récupération d'énergie que la zone géographique peut fournir, ainsi que les différentes orientations possibles des panneaux solaires installés au sein des capteurs. Dans une deuxième étape, nous présentons une analyse détaillée d'un RdPSG modélisant un RCSF à capteurs non fiables.

## 7.1 OUTIL LOGICIEL

*TimeNet* est un framework graphique et interactif d'aide à la modélisation avec les RdPSGs et RdPSGs colorés [Zimmermann \[2017\]](#). Il est spécialement conçu pour l'analyse en régime permanent des réseaux de Petri stochastiques. De plus, il peut être utilisé pour réaliser une analyse transitoire.

*TimeNet* sert entre autres à dériver le graphe d'accessibilité d'un RdPSG ; ce qui permet de résoudre le système associé (voir eq.3.2) à l'état stationnaire. Cet outil implémente également un cadre unifié pour la modélisation et l'évaluation des performances des réseaux de Petri stochastiques non markoviens.

En comparant *TimeNet* avec d'autres outils, *TimeNet* fournit une variété d'algorithmes d'analyse qualitative et quantitative efficaces. L'interface graphique de *TimeNet* a été entièrement écrite en JAVA. Nous renvoyons le lecteur intéressé à [Zimmermann and Knoke \[2007\]](#), [Zimmermann \[2007a; 2017\]](#) pour plus de détails.

En utilisant l'outil *TimeNet*, différentes mesures de performance peuvent être calculés. L'analyse est menée en alimentant le modèle analysé avec différentes valeurs de paramètres d'entrée pour expérimenter le comportement du réseau pour plusieurs scénarios.

## 7.2 ANALYSE DES RCSFs AVEC RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE SOLAIRE

La Table 7.1 récapitule certaines caractéristiques des modèles choisis pour l'étude comparative.

TABLE 7.1 – Modèles de l'étude comparative (SS : *Seasonal Sunshine*, DS : *Double Sleeping*, SS : *Simple Sleeping*)

Libellé	DS	SS	Modèle	Description
GSPN_SS	Non	Non	Figure 5.1	RdPSG avec récupération d'énergie solaire et mise en veille simple
GSPN_SS_SL	No	Oui	Figure 5.3	RdPSG avec récupération d'énergie solaire, mise en veille simple et différents niveaux d'ensoleillement
GSPN_DS	Oui	Non	Figure 5.5	RdPSG avec récupération d'énergie solaire et double mécanisme de veille
GSPN_DS_SL	Oui	Oui	Figure 5.6	RdPSG avec récupération d'énergie solaire, double mécanisme de veille et différents niveaux d'ensoleillement

La Table 7.2 montre les valeurs des paramètres d'entrée que nous utilisons dans l'analyse. Nous faisons varier ces paramètres un par un et gardons les autres inchangés pour montrer l'influence de chacun d'eux sur le temps de réponse moyen et la charge moyenne de la batterie. Nous utilisons les paramètres techniques du capteur MicaZ (voir la Table 2.1).

TABLE 7.2 – Valeurs des paramètres d'entrés

Paramètre	Signification	Valeur
<i>receive_r</i>	Taux d'arrivée des messages	0,2/s
<i>send_r</i>	Taux de transmission	0,2/s
<i>working_r</i>	Taux de consommation (détection et traitement)	0.01/s
<i>listen_r</i>	Taux d'écoute	1/60 (s <sup>-1</sup> )
<i>init_d</i>	Initialisation pour un nouveau jour	24 (h)
<i>Nsleep_d</i>	Mise en veille pendant la nuit	180 (s)
<i>Dsleep_d</i>	Mise en veille pendant le jour	120 (s)
<i>Nawake_d</i>	<i>Se réveiller pendant la nuit</i>	120 (s)
<i>Dawake_d</i>	<i>Se réveiller pendant le jour</i>	180 (s)
<i>Ncome_d</i>	<i>Durée de la nuit</i>	12 (heures)
<i>Dcome_d</i>	<i>Durée du jour</i>	24 - <i>Ncome_d</i> (h)
<i>low_r</i>	Taux de récolte faible	1/300 (q/s)
<i>moyen_r</i>	Taux de récolte moyen	1/200 (q/s)
<i>high_r</i>	Taux de récolte élevé	1/100 (q/s)
<i>season_r</i>	Durée de la saison	03 (mois)
N	Nombre quotidien de messages	20
C	Capacité maximale de la batterie	100 quanta
T1	Seuil de charge faible	20 %
T2	Seuil de charge bonne	40 %

### 7.2.1 Influence du taux de récolte d'énergie sur les paramètres de performance

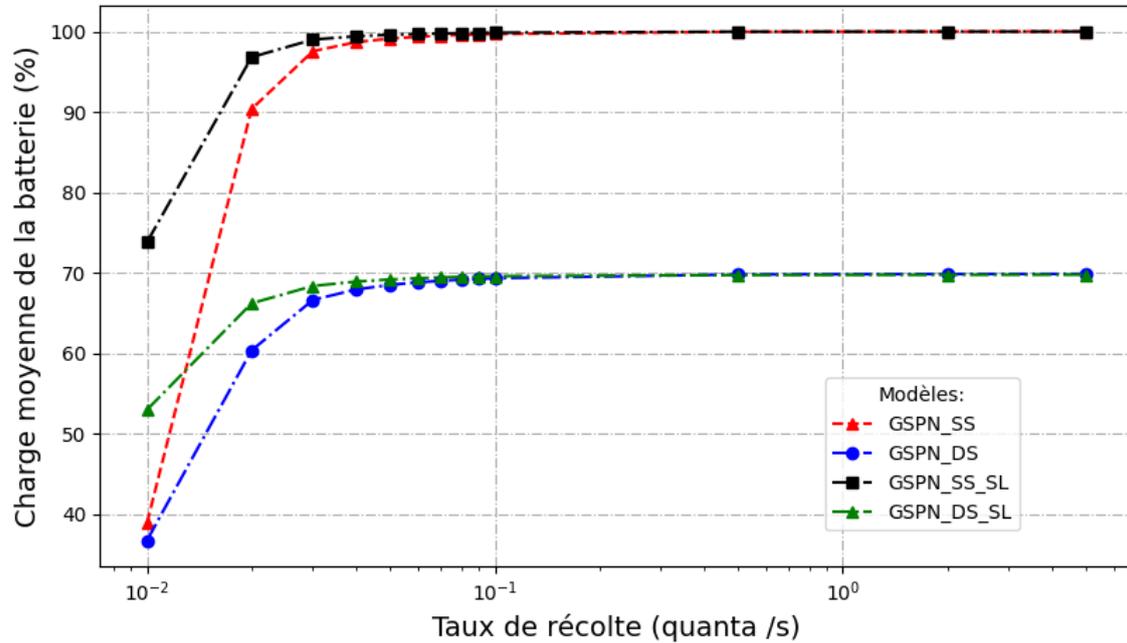
Le taux de récolte d'énergie change selon plusieurs paramètres. Nous pouvons citer :

- Zone géographique de déploiement.
- Latitude du champs de déploiement.
- Degré de clarté du ciel.
- Surface du panneau photovoltaïque du capteur.
- Quantité d'accumulation de poussière sur le panneau solaire.
- Direction du panneau solaire : l'angle d'inclinaison du panneau affecte considérablement le taux de récolte. Trouver la direction optimale peut être délicat [Oh et al. \[2021\]](#). Par conséquent, diverses orientations peuvent être envisagées, telles que : orientation horizontale, inclinée verticalement est/ouest, inclinée verticalement sud et bien d'autres.

Nous faisons varier le taux de récupération d'énergie, et nous analysons le

comportement du système. Nous avons obtenu les résultats illustrés dans les Figures 7.1 et 7.2.

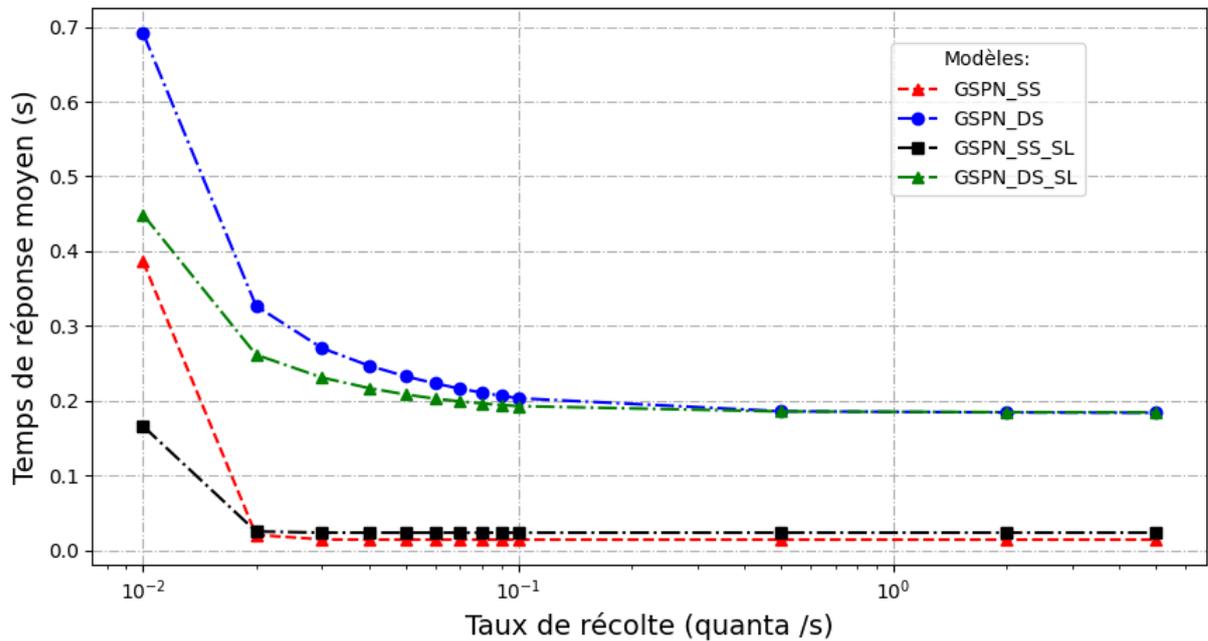
FIGURE 7.1 – Charge moyenne de la batterie vs taux de récolte



La Figure 7.1 montre comment la charge moyenne de la batterie des modèles considérés augmente lorsque le taux de récolte augmente. Nous remarquons que la charge moyenne de la batterie commence à augmenter lorsque l'énergie récoltée augmente. Ensuite, elle se stabilise près de la valeur 70% pour GSPN\_DS et GSPN\_DS\_SL lorsque l'énergie récoltée est supérieure ou égale à 0,03 (ceci équivaut à un taux de récolte de deux quanta par minute). Alors que pour GSPN\_SS et le GSPN\_SS\_SL, la charge moyenne de la batterie se stabilise autour de 100% à partir de la même valeur du taux de récolte.

On remarque également que les courbes de GSPN\_SS et GSPN\_SS\_SL ont presque la même allure. C'est aussi le cas pour les courbes de GSPN\_DS et GSPN\_DS\_SL mais elles sont situées sous les deux autres qui utilisent un mécanisme de veille simple. Ceci nous permet de dire que la stratégie de double sommeil semble avoir un impact significatif sur l'économie d'énergie si nous considérons l'absence de récupération d'énergie solaire pendant la nuit. En effet, considérer différents ensoleillements saisonniers sans tenir compte de la

FIGURE 7.2 – Latence vs taux de récolte d'énergie



différence entre le jour et la nuit en termes de disponibilité d'énergie génère des résultats erronés, car le modèle utilise un taux de récolte fixe.

La Figure 7.2 représente l'influence du taux de récolte sur la latence du système. Nous remarquons que lorsque le taux de récolte augmente, la latence diminue pour tous les modèles. Cela est dû à la quantité suffisante d'énergie stockée dans la batterie qui permet au capteur d'accomplir rapidement ses tâches. En effet, les messages sont envoyés dès qu'ils sont reçus, et donc ils n'ont pas besoin d'attendre.

En comparant les courbes des modèles, on constate un écart de 0,2 seconde entre GSPN\_DS et GSPN\_DS\_SL d'un part et, GSPN\_SS et GSPN\_SS\_SL de l'autre. Cela est dû à la prise en compte ou non du mécanisme de double sommeil. En fait, adopter un tel mécanisme pour économiser de l'énergie lorsqu'il n'y a pas d'énergie solaire affecte négativement la latence. Par conséquent, l'administrateur du réseau doit choisir les bons paramètres d'entrée pour obtenir le

comportement requis.

Néanmoins, il faut souligner le fait que les modèles sans la stratégie de double sommeil continuent de recharger la batterie pendant la nuit avec le même taux de récolte considéré pendant le jour. Par conséquent, nous devons alimenter ces modèles avec des valeurs moyennes des taux de récolte quotidien pour avoir une comparaison équitable. Cette valeur moyenne se situe entre la moitié et le tiers du total journalier. Par exemple, dans une zone où le nœud de capteur peut récolter 6,2 wh par 9,46 heures (qui est la durée d'ensoleillement quotidienne), le taux moyen de récolte est égal à 0,182 quantum/seconde (si l'on suppose qu'un quantum est égal à 1 *mwh*) sans récupération d'énergie à la nuit. Pour le GSPN\_SS, l'énergie quotidiennement récoltée est de 6,2 wh par 24 heures. Ainsi, le taux de récolte doit être défini sur 0,072 quantum/seconde, soit environ un tiers de 0,182. Ceci explique aussi pourquoi GSPN\_DS\_SL semble être plus lent que les autres modèles en termes de latence.

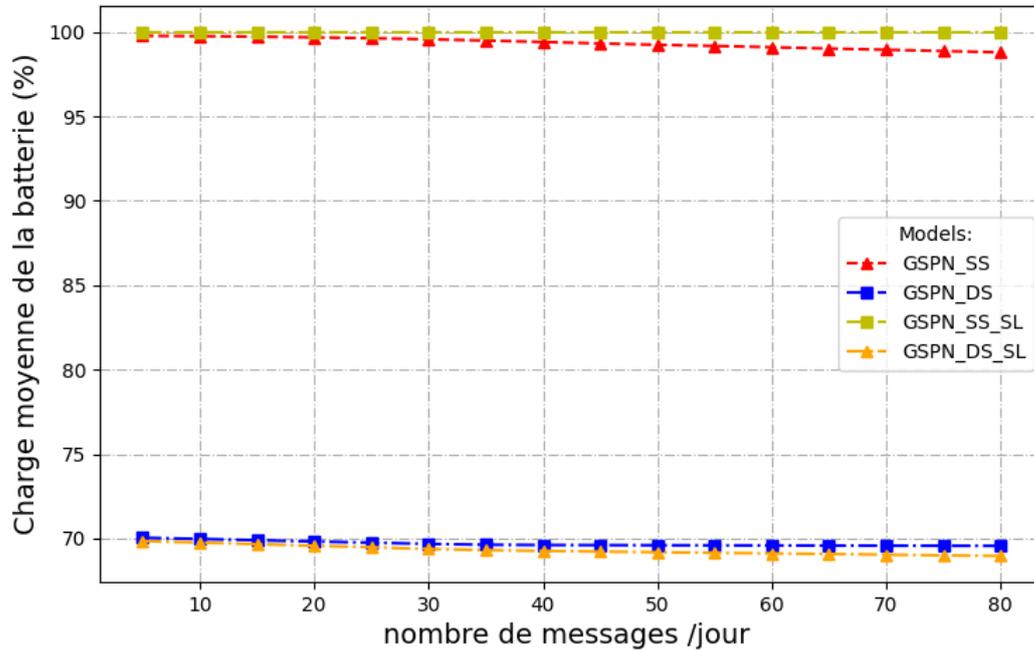
### 7.2.2 Influence du nombre quotidien de messages sur les paramètres de performance

Le nombre de messages servis par un nœud de capteur dépend de plusieurs paramètres parmi lesquels on peut citer : le protocole implémenté, la densité et la topologie du réseau, le taux de rappel, le nombre de sauts, le domaine d'application et bien d'autres.

Les Figures 7.4 et 7.3 représentent respectivement la latence du système et la charge moyenne de la batterie en fonction du nombre quotidien de messages servis, noté  $N$ , pour les quatre modèles étudiés.

Nous remarquons que pour tous les modèles, la charge moyenne de la batterie est quasiment stable au départ. Elle diminue très lentement lorsque  $N$  augmente. En effet, on voit que GSPN\_SS et GSPN\_SS\_SL se stabilisent à la valeur 100%; alors que GSPN\_DS et GSPN\_DS\_SL se stabilisent autour de 70%. Il est clair qu'avec la configuration de la Table 7.2, GSPN\_DS et GSPN\_DS\_SL produisent des résultats plus réalistes.

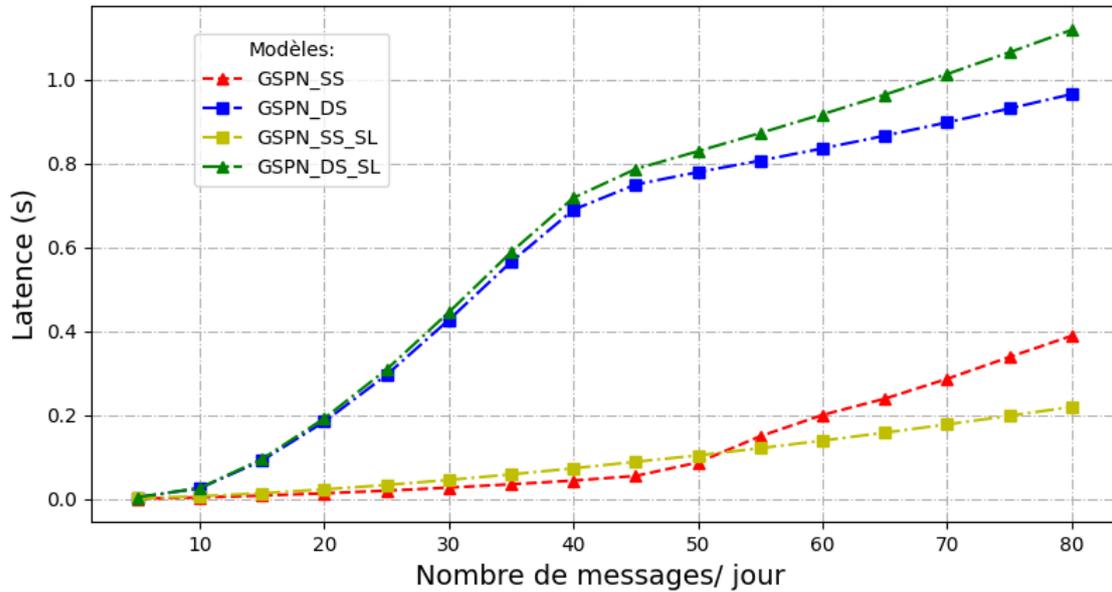
FIGURE 7.3 – Charge moyenne de la batterie vs nombre de messages



La latence du système est affectée de manière significative par la variation de  $N$ . Initialement, lorsque le nombre de messages quotidiens est inférieur à 10, tous les modèles donnent les mêmes temps de réponse. La petitesse du temps de réponse (moins d'un centième de seconde) donne un système très rapide. Ensuite, le temps de réponse commence à augmenter lorsque le nombre de messages quotidiens augmente jusqu'à ce que celui-ci atteigne 20 messages par jour. À ce rythme, nous obtenons une latence de 0,01 seconde pour GSPN\_SS, 0,18 seconde pour GSPN\_DS, 0,19 seconde pour GSPN\_DS\_SL, et enfin 0,02 seconde pour GSPN\_SS\_SL.

Nous remarquons une croissance rapide pour GSPN\_DS et GSPN\_DS\_SL. En effet, lorsque le nombre de messages envoyés quotidiennement est égal à 50, le temps de réponse moyen pour GSPN\_SS et GSPN\_SS\_SL est d'environ 0,1 seconde. Alors qu'il est égal à 0,8 seconde pour les autres modèles. Cela donne une différence d'environ 0,7 seconde, ce qui est un temps non négligeable, surtout lorsque le réseau est dédié à des tâches de temps réel. Cela nous informe que les modèles utilisant la double stratégie de sommeil sont plus lents que les

FIGURE 7.4 – Latence vs nombre de messages



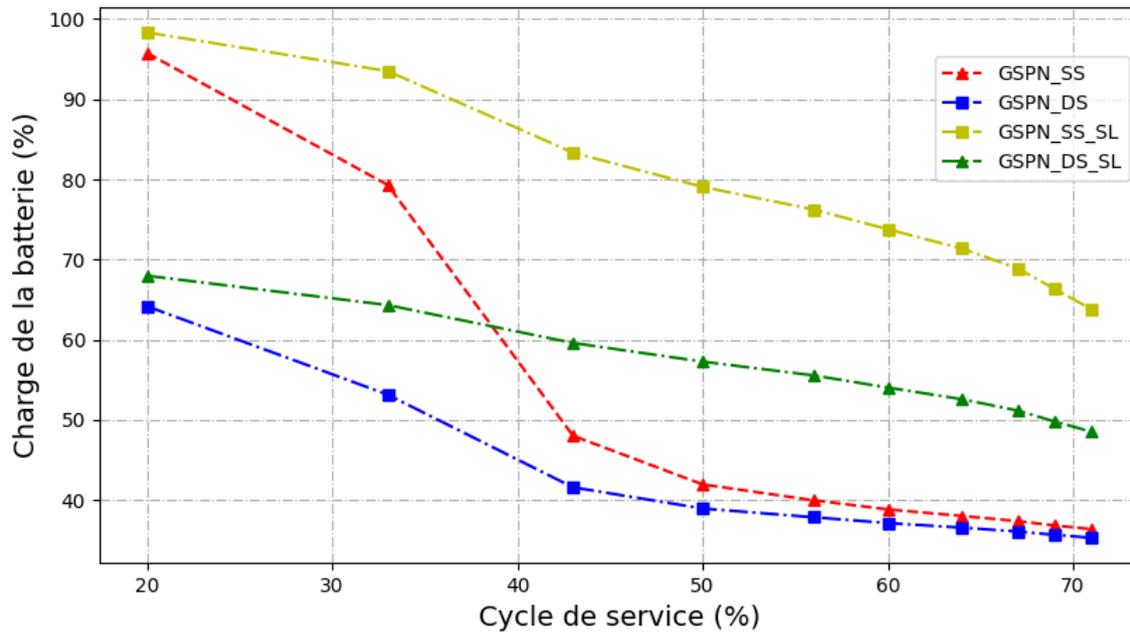
autres modèles. Par conséquent, les administrateurs du réseau doivent configurer les capteurs en fonction de la tâche à effectuer pour un comportement approprié. Cela nécessite de choisir un temps de réponse moyen spécifique qui permet de réaliser la tâche prévue en tenant compte de la quantité d'énergie solaire disponible.

### 7.2.3 Influence du cycle de service sur les paramètres de performance

Comme mentionné précédemment, nous avons considéré les paramètres suivants comme paramètres d'entrée, puis nous avons fait varier la durée d'activité pour obtenir les résultats illustrés dans les figures 7.5 et 7.6.

- le temps de sommeil est égal à 2 minutes pendant le jour et 3 minutes pendant la nuit pour les modèles mettant en œuvre une stratégie de double sommeil.
- Pour la stratégie de mise en veille simple, le temps de veille est égale à 2 minutes.

FIGURE 7.5 – Charge moyenne de la batterie vs cycle de service

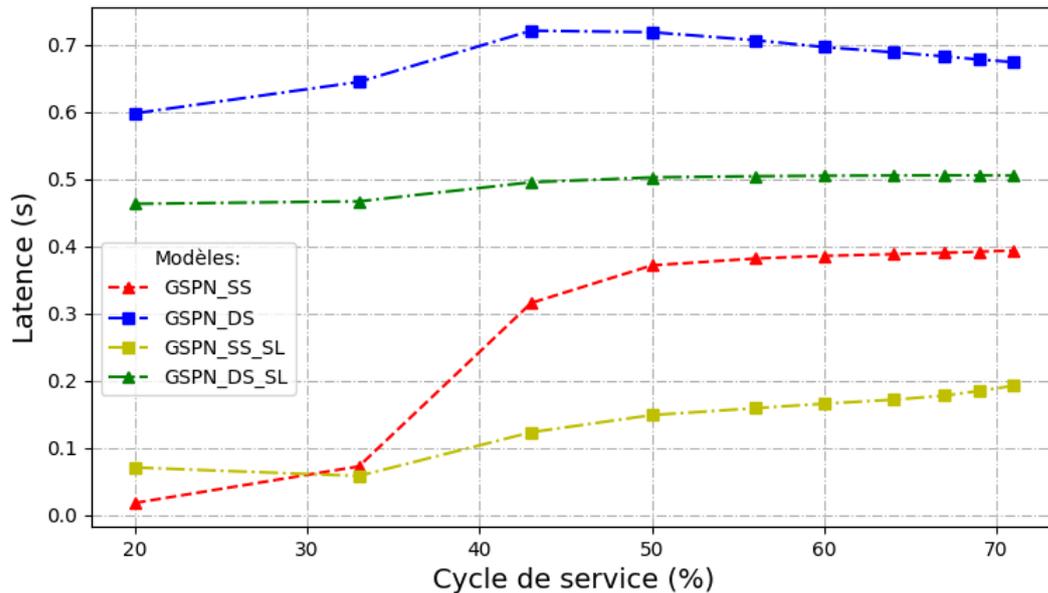


- Le seuil de batterie faible pour la mise en veille  $T1$  est de 20%, et le seuil de réveil  $T2$  est fixé à 40%.

Les Figures 7.5 et la Figure 7.6 présentent la variation de la charge moyenne de la batterie et la latence par rapport au cycle de service. Le cycle de service est défini par le rapport du temps d'éveil sur la somme de deux temps d'éveil et de sommeil. Pour la charge moyenne de la batterie, nous remarquons que l'influence sur GSPN\_SS et GSPN\_DS est plus importante que sur les deux autres modèles. GSPN\_DS\_SL occupe une place intermédiaire par rapport aux autres modèles. Cette performance découle de sa mise en œuvre de la stratégie du double sommeil, qui lui permet de concilier entre économie d'énergie et vitesse du système.

Par exemple, lorsque le rapport cyclique (cycle de service) prend la valeur 50% (ce qui signifie que les temps de sommeil et de réveil sont égaux), on constate que GSPN\_DS\_SL donne la valeur 57,3% comme valeur d'énergie moyenne de la batterie. Les autres modèles donnent les valeurs : 42%, 39% et 79% pour GSPN\_SS, GSPN\_DS et GSPN\_SS\_SL, respectivement. Par conséquent, GSPN\_SS et GSPN\_DS sont piégés à la valeur de seuil  $T2$  de 40% (comme

FIGURE 7.6 – Temps de réponse moyen vs cycle de service



indiqué dans la Table 7.2). GSPN\_DS\_SL se stabilise à la valeur de 50%, tandis que le modèle restant (GSPN\_SS\_SL) se stabilise à la valeur de 70%.

D'autre part, la Figure 7.6 représente la variation du temps de réponse moyen en fonction du cycle de service. Nous constatons une légère augmentation du temps de réponse pour GSPN\_SS\_SL et GSPN\_DS\_SL, alors qu'il y a des augmentations significatives pour le reste des modèles lorsque le rapport cyclique augmente. Ceci est perceptible avant que le rapport cyclique n'atteigne 50%. Ensuite, chaque modèle se stabilise à une certaine valeur. Ces valeurs de convergence sont : 0,25s, 0,4s, 0,5s et 0,7s pour GSPN\_SS\_SL, GSPN\_SS, GSPN\_DS\_SL et GSPN\_DS, respectivement.

#### 7.2.4 Étude de cas

Afin de montrer la capacité des modèles proposés de simuler le comportement du système avant son déploiement effectif pour une application à long terme, nous présentons l'étude de cas suivant :

Grâce à sa position et sa grande superficie, l'Algérie a une durée d'ensolei-

FIGURE 7.7 – Un capteur équipé d'un panneau solaire



ment importante. Elle est d'environ 2000 heures par an sur le territoire nord. Dans la zone méridionale appelée Sahara (province d'Ilizi par exemple), la durée peut atteindre plus de 3900 heures [Yaiche et al. \[2014\]](#). L'énergie journalière reçue sur une surface horizontale de  $1m^2$  est de l'ordre de 5  $KWh$  sur la majeure partie du territoire, avec près de  $1700 KWh/m^2/an$  au nord et  $2263 kWh/m^2/an$  dans le sud.

TABLE 7.3 – Paramètres d'entrée pour l'étude de cas (panneau horizontal)

Paramètre	Valeur	Description
Quantum	1 $mwh$	unité d'énergie
C	5000 quanta	capacité de la batterie
N	40 messages	nombre quotidien de messages
Surface du panneau	10 $cm^2$	/
Direction du panneau	Horizontal	comment le panneau est orienté
Taux d'écoute	0.014 q/s	consomme 50 q/h
Taux de travail	0.0056 q/s	consomme 20 q/h
Consommation d'envoi	1 q/msg	consomme 1 q/msg
consommation de réception	1 q/msg	consomme 1 q/msg

Dans cette étude de cas, nous considérons un capteur équipé d'un panneau solaire d'une surface de  $10 Cm^2$ . La Figure 7.7 donne un aperçu sur un tel capteur.

Les Figures 7.8 et 7.9 montrent la variation de l'énergie résiduelle par unité

TABLE 7.4 – Valeurs du taux de récolte pour l'étude de cas (panneau horizontal)

Wilaya	Basse-récolte	Moyenne-récolte	Haute-récolte
Boumerdes	0.133 q/s	0.203 q/s	0.184 q/s
In-Salah	0.144 q/s	0.201 q/s	0.191 q/s

TABLE 7.5 – Valeurs du taux de récolte pour l'étude de cas (panneau incliné verticalement est/ouest)

Wilaya	Basse-récolte	Moyenne-récolte	Haute-récolte
Algiers	0.096 q/s	0.056 q/s	0.1 q/s
Boumerdes	0.087 q/s	0.111 q/s	0.102 q/s
Djanet	0.095 q/s	0.126 q/s	0.117 q/s
In-Salah	0.09 q/s	0.112 q/s	0.107 q/s

FIGURE 7.8 – Énergie résiduelle dans différents territoires algériens en utilisant GSPN\_DS\_SL avec un panneau horizontal

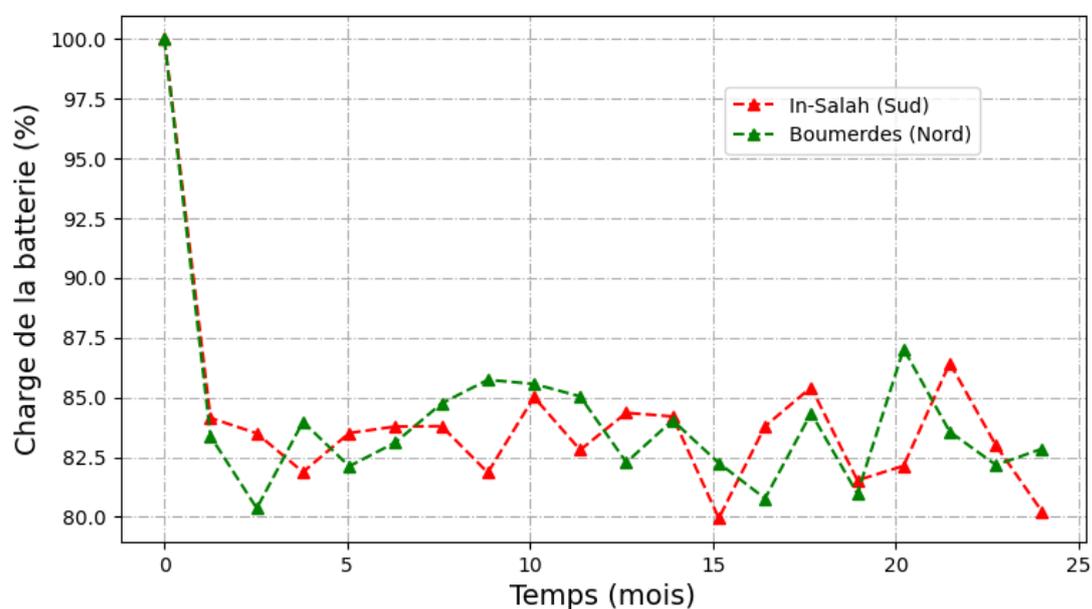
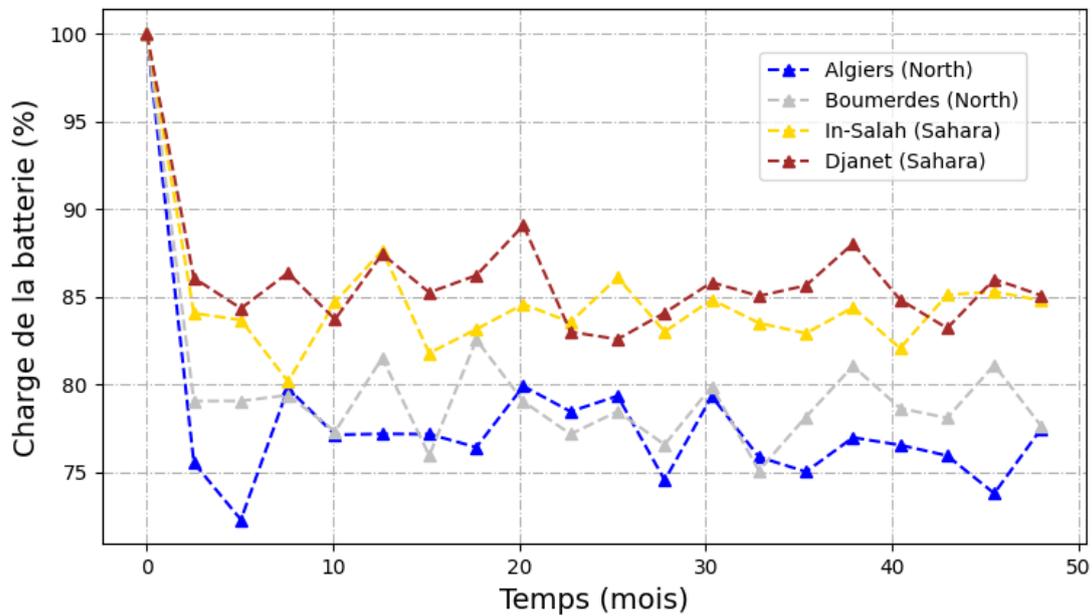


FIGURE 7.9 – Énergie résiduelle dans différents territoires algériens en utilisant GSPN\_DS\_SL avec panneau incliné verticalement est/ouest



de temps liée à des capteurs déployés dans des zones différentes de l'Algérie avec un panneau horizontal et un panneau incliné, respectivement. Les calculs ont été effectués en utilisant les entrées réelles présentées dans les Tables 7.3, 7.4 et 7.5. Avec ces résultats, nous pouvons prédire que l'énergie résiduelle pour tous les nœuds de capteurs varie entre 75% et 90 % pour tous les territoires algériens même après quatre ans. La wilaya de Djanet fournit la meilleure quantité d'énergie solaire récoltée grâce à la durée considérable d'ensoleillement et la clarté de son ciel. La wilaya d'Alger, située au nord, fournit la valeur la plus faible.

La Figure 7.10 montre comment la charge de la batterie se comporte en fonction du temps en utilisant le modèle de base (GSPN\_SS) pour un capteur MicaZ équipé d'un panneau photovoltaïque incliné verticalement est/ouest. Nous utilisons les taux moyens de récolte annuels. Le résultat est présenté dans la Figure 7.9. La prédiction illustrée suppose un bon comportement (la charge de la batterie est supérieure à 50%) pour les wilayas algériennes qui autorisent plus de 0,039 quantum/seconde comme Djanet et Sétif. Lorsque le taux de

récolte devient inférieur à cette valeur (nous avons pris Alger et Djelfa comme exemples), les nœuds de capteurs ne peuvent supporter un déploiement durable.

Nous remarquons aussi qu'il y a une grande disparité entre la charge des batteries des nœuds déployés dans la wilaya de Djelfa et la wilaya de Setif malgré des taux de récolte d'énergie solaire qui semblent très proches (0.0388 q/s et 0.0395 q/s, respectivement). En effet, la charge des batteries dans la wilaya de Setif est 88.96% en moyenne durant 48 mois ; tandis qu'à Djelfa, elle est d'environ 46.9%. Cela donne un écart de 42%.

Au fait, cette disparité est dû à l'accumulation de déficit énergétique. La petite différence entre les deux taux qui est de 0.0007 quantum/s est trompeuse. En effet, cette différence équivaut à 60.48 quanta par jour et 1814,4 quanta par mois ; ce qui est égal à 36.3% de disparité entre les niveaux de batteries des deux zones pendant un mois seulement. Après 35 jours, l'écart atteint une valeur de 42%, ce qui fait que dans la wilaya de Djelfa, les nœuds ont recours plus souvent au mécanisme de veille, sinon leurs batteries vont se décharger de manière définitive. Dans cette même figure, on peut remarquer que le niveau de batteries dans la wilaya de Djelfa est maintenu à environ 46.9%. Ceci est dû à la valeur du seuil d'activation adoptée par le mécanisme de veille qui est égal à 40%.

D'autre part, le mécanisme de veille simple n'est pas intéressant pour des applications de longue durée dans des zones qui n'offrent pas assez d'énergie ambiante. C'est pour ça, les nœuds de capteurs restent la plupart du temps en état de veille comme le montre la Figure 7.11 ; alors qu'à Djanet, le nœud de capteur est actif la plupart du temps.

Afin de voir l'état des batteries des capteurs lors d'une application à long terme avec une activité de communication intense, ce qui est en général le cas pour les RCSFs à haute densité, nous utilisons des valeurs d'entrée plus grandes. Les Figures 7.12 et 7.13 montrent l'influence du nombre quotidien de messages sur les énergies résiduelles des batteries. Comme prévu, lorsque le nombre de messages par jour augmente, l'énergie résiduelle diminue. Cependant, son influence peut être plus ou moins importante selon la localisation du réseau de

FIGURE 7.10 – Energie résiduelle dans des différents territoires algériens vs temps en utilisant GSPN\_SS avec panneau incliné verticalement est/ouest

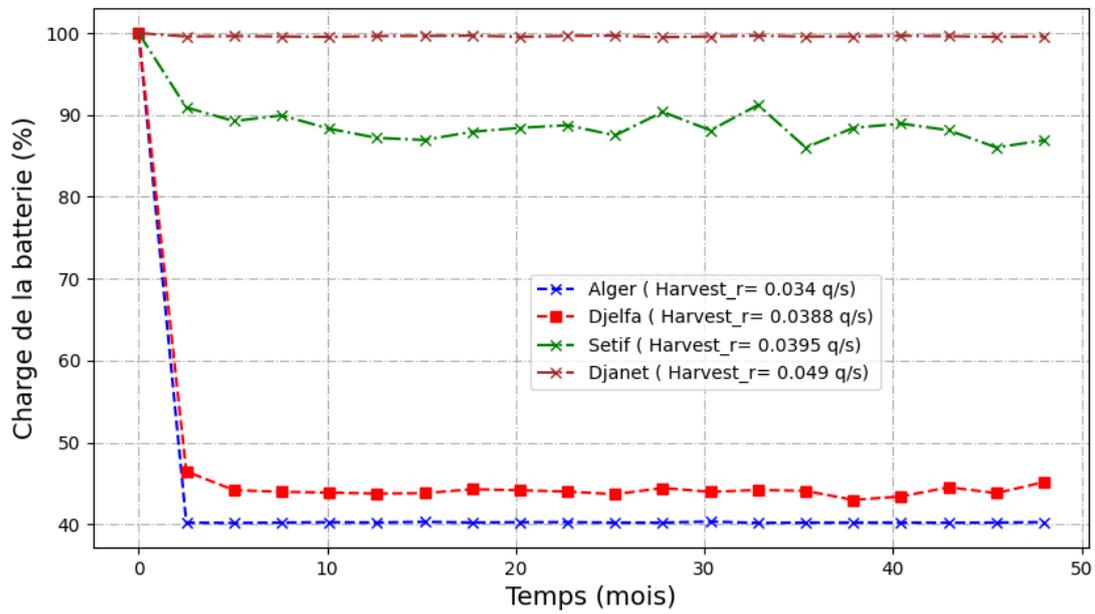


FIGURE 7.11 – Pourcentage de sommeil dans les provinces d'Alger et de Djanet en utilisant GSPN\_SS avec panneau incliné verticalement est/ouest

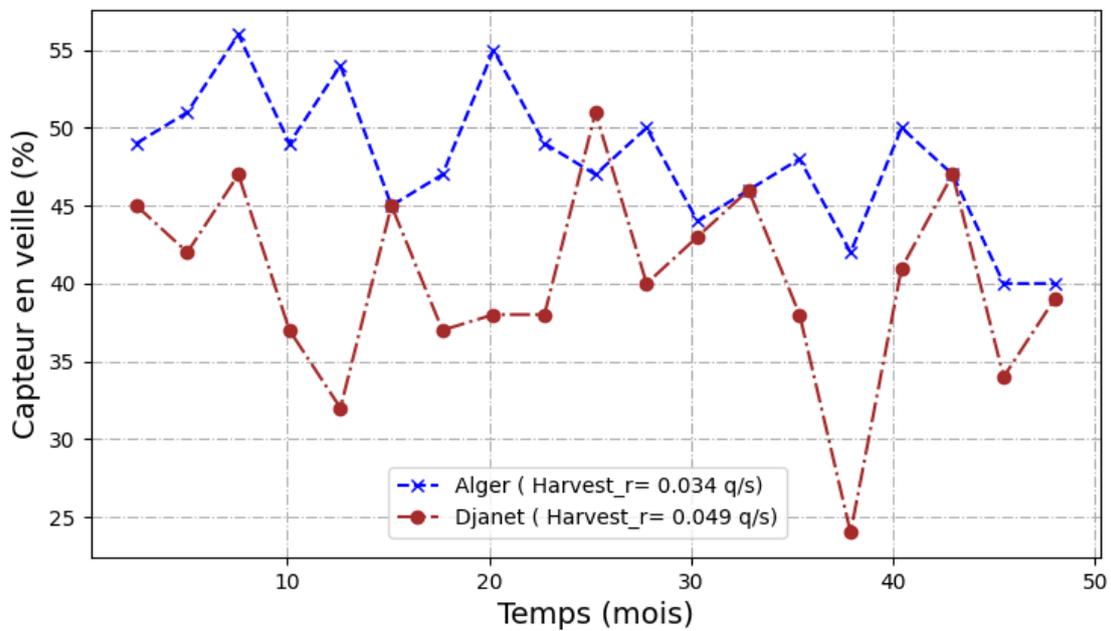
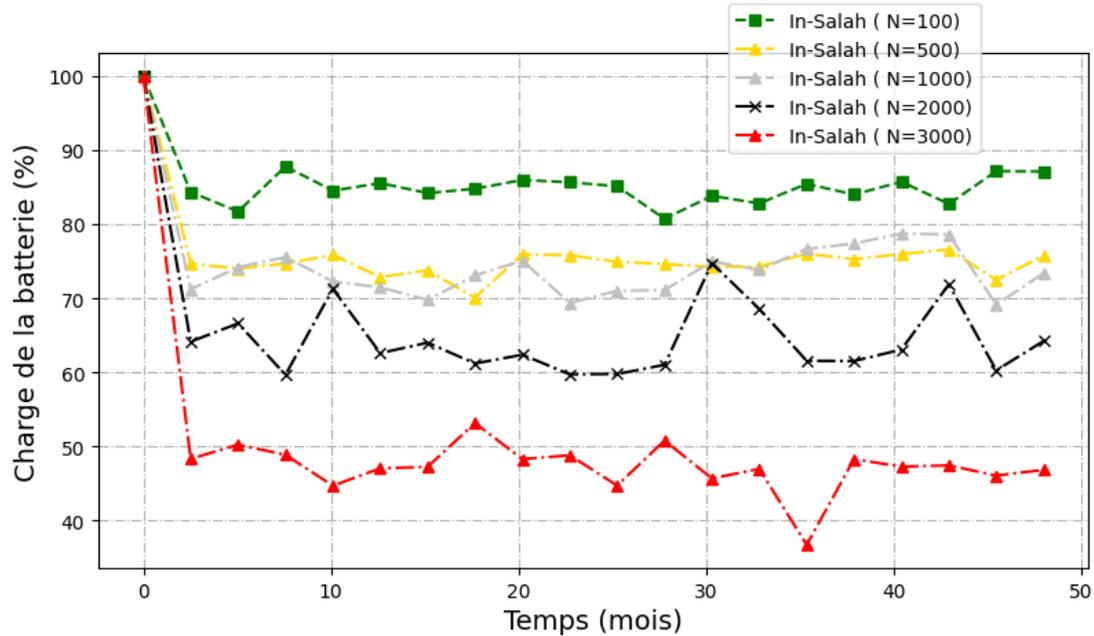


FIGURE 7.12 – Énergie résiduelle des capteurs dans la wilaya d'In-Salah avec panneau incliné verticalement est/ouest vs nombres de messages quotidiens

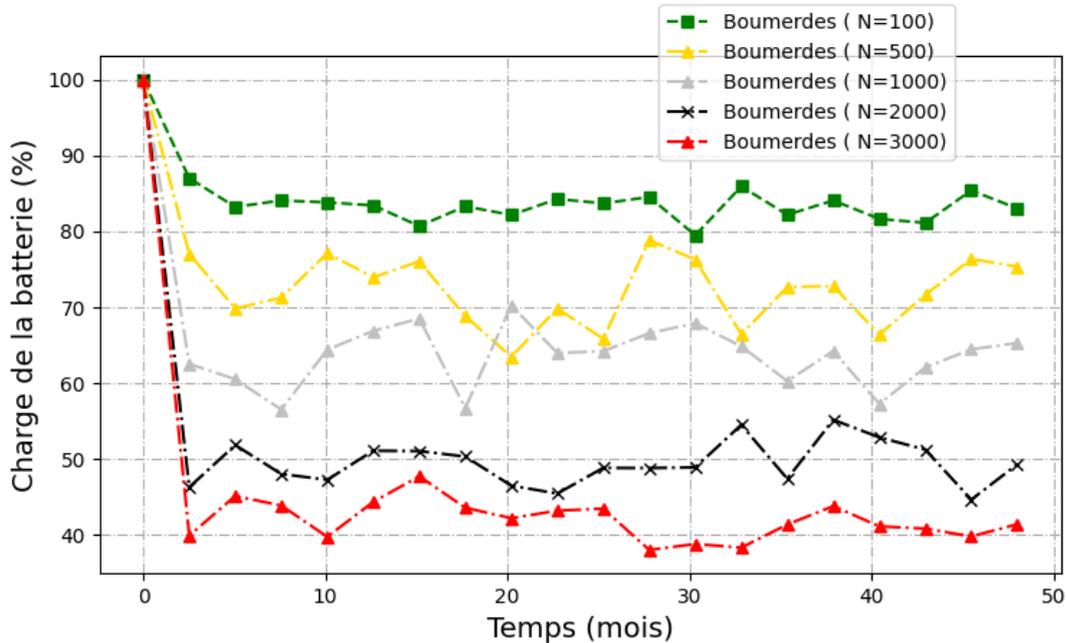


capteur. En effet, l'énergie résiduelle des nœuds d'un RCSF installé dans le nord de l'Algérie (wilaya de Boumerdès par exemple) est plus affectée que dans le sud (wilaya d'In-Slah par exemple).

Les résultats obtenus montrent la capacité du modèle GSPN\_DS\_SL à prédire le comportement d'un RCSF générant jusqu'à 3000 messages par jour et par capteur. Au-delà de cette valeur, le modèle GSPN proposé nécessite énormément de ressources de calcul et l'outil de simulation utilisé se bloque fréquemment.

Enfin, à partir des mesures de performance discutées ci-dessus, nous pouvons conclure que le modèle GSPN\_DS\_SL offre certains avantages tels que la prise en compte de plusieurs circonstances réelles qui donnent des résultats plus réalistes. Cependant, le modèle se concentre uniquement sur la récolte de l'énergie solaire et ne prend pas en compte les autres types d'énergies renouvelables. Pour un autre type d'énergie ambiante, on peut utiliser le modèle GSPN\_SS.

FIGURE 7.13 – Énergie résiduelle des capteurs dans la wilaya de Boumerdès avec panneau incliné verticalement est/ouest vs nombre de messages quotidiens



### 7.3 ANALYSE DES RCSFs AVEC PANNES FRÉQUENTES

La Table 7.6 contient les valeurs des taux que nous avons utilisées. L'analyse est menée en alimentant le modèle proposé dans la Figure 6.4 avec différentes valeurs de paramètres pour expérimenter le comportement du réseau pour plusieurs scénarios. Concernant le nombre de messages et de voisins, nous les fixons respectivement aux valeurs  $N = 20$  et  $s = 5$ .

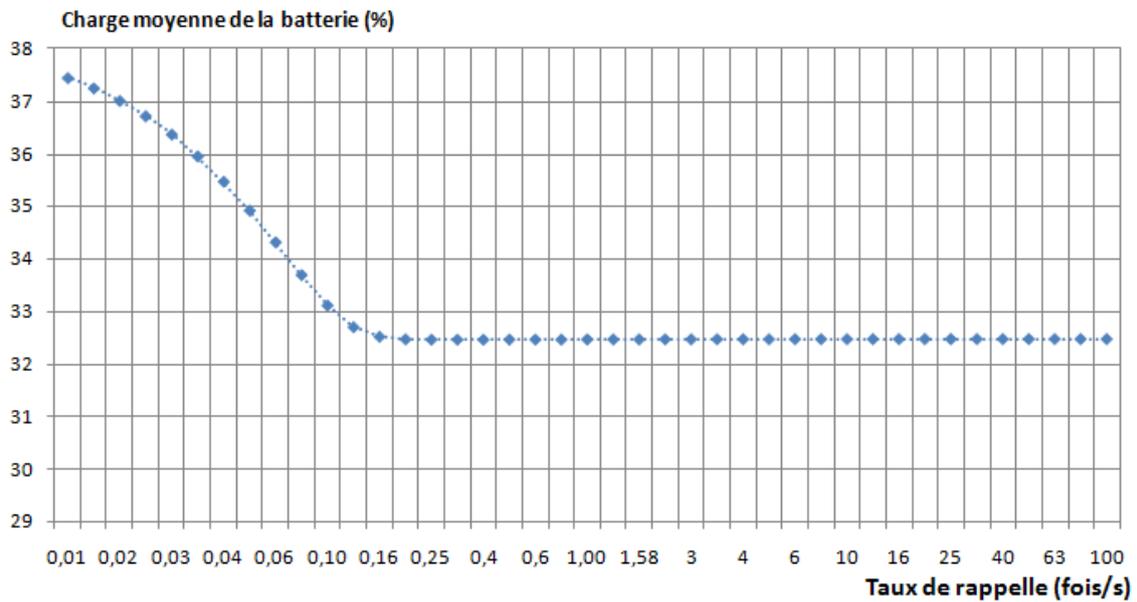
#### 7.3.1 Influence du taux de rappel sur les performances du réseau

Lorsqu'un capteur ne trouve pas de voisin libre pour envoyer un message, il doit attendre un délai avant de refaire une nouvelle appelle d'envoi afin de ne pas épuiser son énergie. Le nombre de tentatives par unité de temps s'appelle le taux de rappel. En faisant varier ce paramètre, nous obtenons les résultats présentés dans la Figure 7.14, la Figure 7.15 et la Figure 7.16.

TABLE 7.6 – Paramètres d'entrés pour l'analyse expérimentale

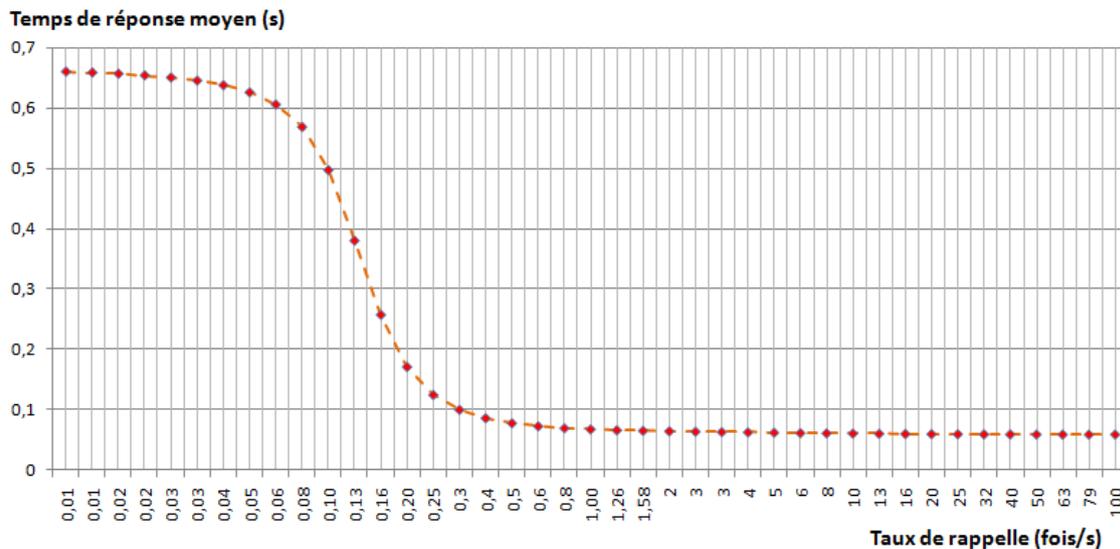
Taux	Signification	Valeur
$\lambda$	taux d'arrivé d'un message	0.2
$\mu$	taux de transmission	0.2
$\nu$	taux de rappelle d'un message	20
$\delta$	taux de panne oisif d'un voisin	$10^{-6}$
$\gamma$	taux des pannes actives	$10^{-5}$
$\alpha$	taux de réparation	2
$\theta$	taux de sommeil des voisins	0.03
$\omega$	taux de réveil des voisins	0.6
$\theta$	taux de sommeil du capteur principale	0.03
$\omega$	taux de réveil du capteur principale	0.6
$H_r$	taux de récolte d'énergie	2
$W_r$	taux de consommation	3
$\alpha 2$	taux d'écoute pour la capteur principale	0.016

FIGURE 7.14 – Charge moyenne de la batterie vs taux de rappel



La Figure 7.14 décrit l'impact du taux de rappel sur la charge moyenne de la batterie. Comme prévu, si ce taux augmente, la charge moyenne de la batterie diminue. Mais lorsque ce taux atteint la valeur de 0,16, la charge moyenne de la batterie se stabilise à la valeur de 32,5 %, ce qui est supérieur au seuil d'endormissement  $T_1$  qui est égale à 20 %. Par conséquent, si l'exigence de l'application réseau peut permettre une valeur de charge moyenne de la batterie plus petite, nous pouvons alors utiliser un seuil plus petit.

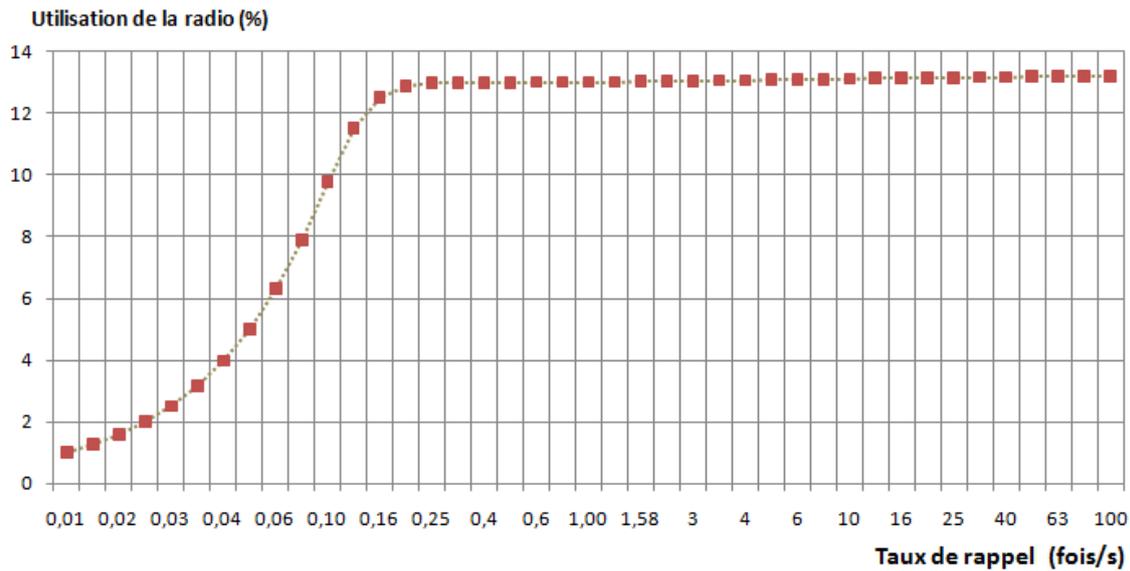
FIGURE 7.15 – Temps de réponse vs taux de rappel



La Figure 7.15 illustre l'impact du taux de rappel sur le temps de réponse moyen. Nous constatons que lorsque le temps entre deux tentatives est petit, le temps de réponse moyen diminue. Cependant, à partir de la valeur de 1,5, il n'y a pas d'amélioration du temps de réponse moyen. Par conséquent, augmenter le taux de rappel au-dessus de cette valeur et s'attendre à obtenir un réseau plus rapide sera un gaspillage d'énergie seulement.

La Figure 7.16 présente l'utilisation de l'émetteur-récepteur pour plusieurs valeurs de taux de rappel. Nous remarquons que plus nous diminuons le temps entre les tentatives d'envoi, plus le pourcentage d'utilisation de l'émetteur-récepteur augmente. Cependant, le gain d'utilisation s'arrête à la valeur 13,2%

FIGURE 7.16 – Utilisation de l'unité de transmission vs taux de rappel



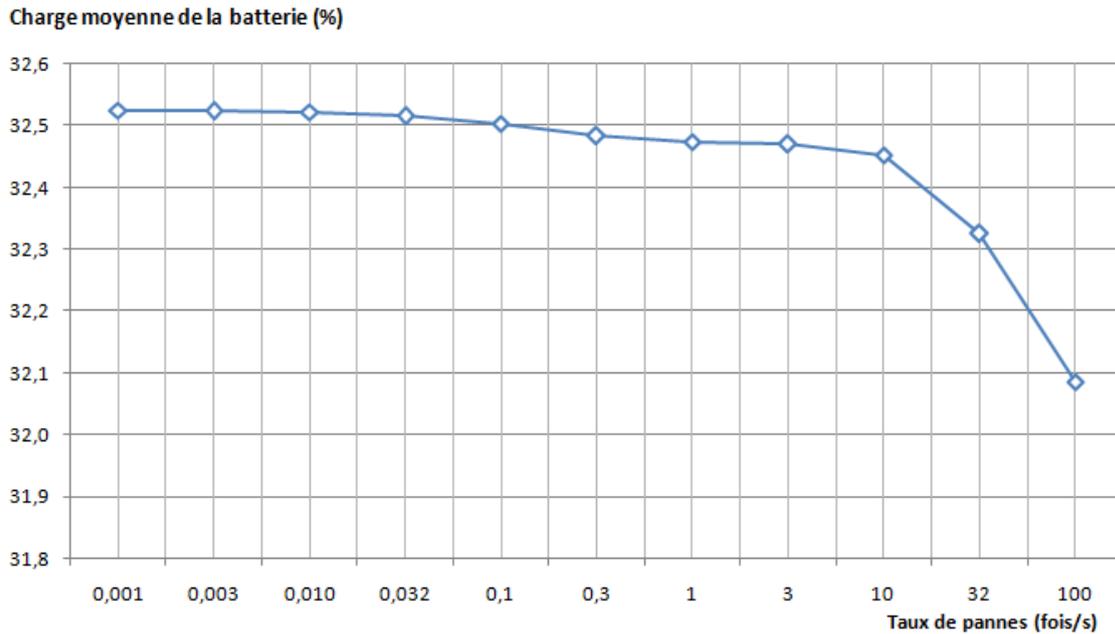
car abuser avec des tentatives de rappel épuise la batterie, et le capteur basculera directement dans un état de veille où il ne pourra plus travailler.

### 7.3.2 Influence du taux de pannes sur les performances du réseau

Le phénomène de panne est une caractéristique indésirable car il entrave les performances du réseau. Nous pouvons y faire face en partie en évitant la raison de ces échecs. Dans les RSCFs, la plupart des pannes proviennent de l'expiration de l'énergie de la batterie. Par conséquent, la récolte d'énergie à partir de l'environnement implique une diminution de la probabilité de panne, ce qui améliore les performances globales du réseau. En modifiant le taux d'échec, nous avons obtenu les résultats suivants :

La Figure 7.17 nous permet d'étudier l'effet du taux de pannes sur l'énergie moyenne de la batterie. D'une manière générale, lorsque le taux de pannes augmente, la charge moyenne de la batterie diminue. En effet, lorsque le nœud de capteur ne trouvant pas de voisins où faire envoyer ses messages, il va continuer d'essayer jusqu'à ce qu'il réussisse. De plus, les pannes actives relancent tout le processus d'envoi qui affecte directement la quantité d'énergie stockée dans la

FIGURE 7.17 – Charge moyenne de la batterie vs taux de pannes

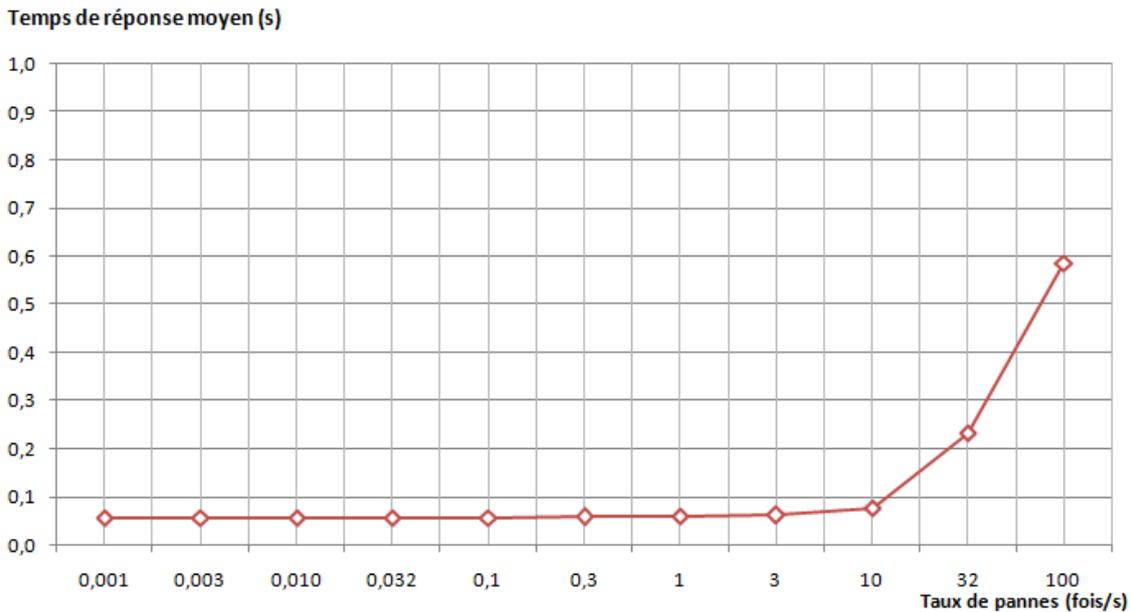


batterie.

Rappelons que dans notre modélisation, nous avons opté pour la discipline plus générale des pannes dépendantes. Autrement dit, nous pouvons avoir deux types de pannes : pannes actives ou inactives, et leurs probabilités associées ne sont pas nécessairement les mêmes. De plus, pour la transition de panne, on considère la stratégie du serveur infini, ce qui signifie que chaque capteur peut être tomber en panne indépendamment des autres. De plus, nous avons défini un seuil qui empêche les capteurs d'épuiser leurs batteries. Dans nos expériences, nous avons défini  $T1$  sur 20% et  $T2$  sur 40%. Pour cette raison, nous ne pouvons voir sur la Figure 7.17 qu'une petite variation lorsque nous augmentons le taux de pannes.

La Figure 7.18 illustre l'effet de taux de pannes sur le temps de réponse moyen. Par exemple, si ce taux égale  $10^{-3}$ , ce qui implique que la charge de la batterie du voisin tombe à 20% entre 3 et 4 fois par heure, le temps de réponse moyen est proche de 0,06 seconde. Nous remarquons que pour un délai relati-

FIGURE 7.18 – Temps de réponse moyen vs taux de pannes



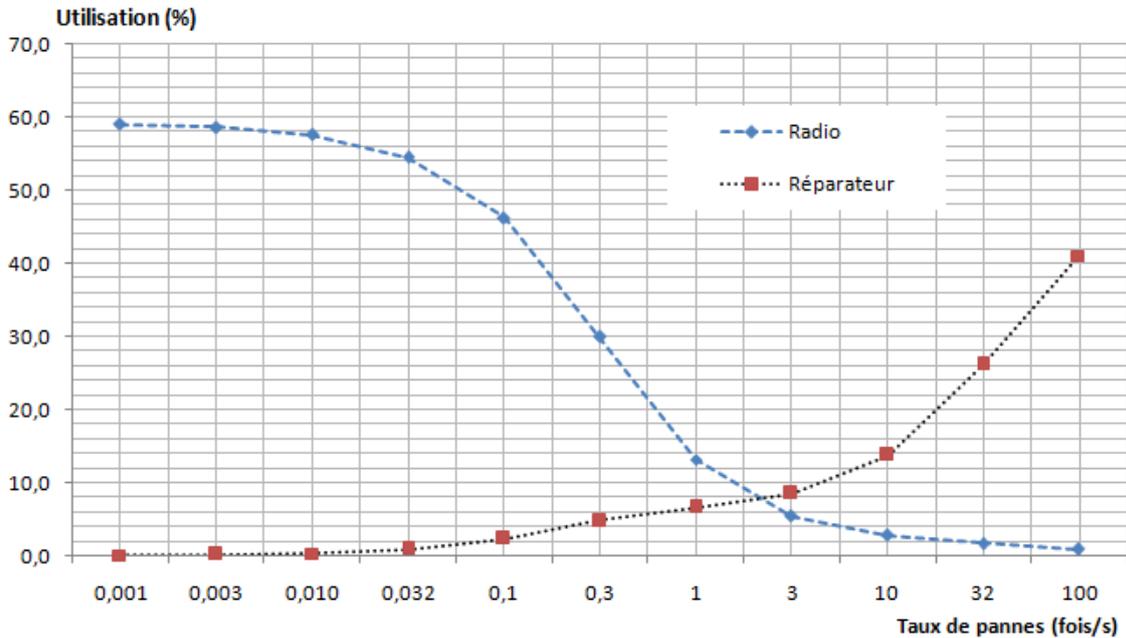
vement long entre deux pannes, le temps de réponse moyen est très faible. Ce dernier reste stable à 0.06 seconde jusqu'à ce que le taux de panne atteigne la valeur 10 où le temps de réponse moyen commence à croître.

La Figure 7.19 décrit le comportement de l'émetteur-récepteur et du réparateur. Une utilisation élevée de l'émetteur-récepteur (supérieure à 30 %) est perceptible lorsque le taux de pannes est inférieur à 0,3. Contrairement au comportement de l'émetteur-récepteur, plus il y a de pannes, plus le réparateur est sollicité. On remarque que les deux courbes se coupent à la valeur de taux de pannes égale 2. Après cette valeur, où les deux utilisations de l'émetteur-récepteur et du réparateur sont égales à 10 %, la situation est inversée.

D'autres expériences peuvent être menées en faisant varier d'autres paramètres d'entrée tels que :

- Nombre de messages.
- Valeurs des deux seuils  $T_1$  et  $T_2$ .
- Capacité de la batterie.

FIGURE 7.19 – Utilisation du réparateur et de l'émetteur-récepteur vs taux de pannes



- Nombre de voisins.
- etc.

## 7.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons mené une étude comparative entre quatre modèles illustrés dans les deux chapitres précédents. L'étude a montré la supériorité du modèle GSPN\_DS\_SL combinant plusieurs contraintes de déploiement. De plus, comme le montre l'étude de cas présentée dans ce chapitre, les modèles aident à prédire la faisabilité de la mise en œuvre d'un RCSF dans des zones avec une durée d'ensoleillement donnée et à conseiller pour quel type de panneau solaire à utiliser et comment il doit être orienté. Par conséquent, le modèle GSPN\_DS\_SL est le mieux adapté pour fournir aux concepteurs du réseau un moyen de configurer les capteurs de manière à assurer autant que possible la cohérence entre la rapidité du réseau et la conservation de l'énergie afin de prolonger la durée de vie du réseau jusqu'à la fin du projet.

D'autre part, pour le cas non-fiable, nous avons mené des évaluations en présentant l'influence de certains paramètres d'entrée comme le taux de rappels et le taux de pannes. L'analyse s'avère capable d'aborder le compromis entre les paramètres de performance et la durée de vie des nœuds de capteurs pour décider quel paramètre d'entrée ajuster pour obtenir les meilleures performances des RCSFs avec récolte de l'énergie ambiante.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans cette thèse, nous avons présenter la modélisation et l'évaluation des performances des réseaux de capteurs sans fil à capteurs non-fiables. Les RCSFs ont un intérêt certain dans nombreux domaines d'applications de surveillance et de contrôle. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé les Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés pour modéliser le trafic de communication dans un RCSF. Nous avons commencé par présenter d'une manière générale les réseaux de capteurs sans fil, leurs caractéristiques et leurs applications. Ensuite, nous avons défini la durée de vie d'un RCSF, les sources des pannes et les disciplines de pannes. En plus, nous avons présenté les classifications des techniques de tolérance aux pannes et nous avons présenté le mécanisme de veille et la technique de récupération d'énergie renouvelable comme solutions des problématiques des RCSFs.

Ensuite, nous avons présenté le formalisme de réseaux de Petri stochastiques généralisés que nous avons utilisé pour modéliser et analyser les RCSFs. Nous avons présenté aussi un état de l'art sur les travaux liés à notre recherche. L'analyse d'un réseau de capteur et plus précisément, le trafic de communication inter capteurs par le modèle de RdPSG permet de prendre en compte plusieurs paramètres d'entrée qui influent sur la performance d'un tel réseau. Ainsi, la considération du phénomène de rappel, du non fiabilité des capteurs, le mécanisme de veille et la récolte d'énergie en même temps est un des avantages de cette analyse.

Nous avons utilisé l'outil logiciel *TimeNet 4.5* pour faire l'évaluation et l'étude expérimentale des modèles proposés dans cette thèse. Les résultats sont présentés sous forme des graphes. Nous avons présenté une étude de cas qui donne une application pratique de notre modèles proposés. Cette étude illustre

comment les modèles peuvent évaluer les performances d'un RCSF lorsqu'il est déployé sur différentes territoires algériennes, en considérant le taux de récupération d'énergie que la zone géographique peut fournir, et l'orientation du panneau solaire installé sur les nœuds de capteurs.

Dans le but de réduire le temps de réponse et de conserver au mieux l'énergie des capteurs dans un RCSF, nous avons étudié l'effet de certains paramètres d'entrées importants sur le temps de réponse moyen ; la charge moyenne de la batterie d'un capteur et le pourcentage d'utilisation de certains composant tels que :

- Le taux de rappels
- Le taux de pannes
- Le temps de sommeil
- Le taux de récolte d'énergie ambiante
- La zone géographique de déploiement
- L'orientation des panneaux solaires dans le cas de récolte d'énergie solaire
- La capacité des batteries.

Les résultats obtenus après analyse du modèle proposé permettent aux concepteurs de réseaux de capteurs de bien choisir le matériel utilisé en tenant compte des contraintes techniques pour atteindre le but désiré et pour répondre aux exigences voulus par un tel réseau.

## PERSPECTIVE ET TRAVAUX FUTURS

Comme tout produit d'un effort humain, on a toujours tendance une fois le travail accompli de vouloir l'améliorer. Dans ce contexte, il serait intéressant de mener des études pour modéliser les différents problèmes posés dans le domaine des réseaux de capteurs en se basant sur d'autres extensions de RdPs. D'autre part, vu le problème d'explosion combinatoire que pourrait engendrer ces modèles quand le nombre de messages à transmettre, le nombre de nœuds voisins, et la capacité de la batterie (nombre de niveaux) sont importants, il serait

bénéfique de recourir à des méthodes d'analyse appropriées pour remédier à ce problème comme l'utilisation de méta-heuristiques.

En plus, il serait intéressant de :

- Combiner lors de la modélisation l'aspect discret des RCSFs avec celui continu. Les RdPs hybrides étendus ont la capacité de modéliser l'aspect discret (comme les paquets et les voisins) avec l'aspect contenu (comme l'énergie).
- Étudier l'influence des attaques de niveau physique sur les performances du réseau.
- Considérer d'autres sources d'énergie renouvelable telles que le « Remote Power Transfer » avec la technologie RF.
- Considérer la propriété State of Health (SoH) des batteries.

# BIBLIOGRAPHIE

- Abinaya, M. and Asha, A. (2015). Energy efficient routing protocol for homogeneous and heterogeneous wireless sensor networks. *International Journal of Future Innovative Science and Engineering Research (IJFISER)*, 20(20).
- Afsar, M. M. and Tayarani-N, M.-H. (2014). Clustering in sensor networks : A literature survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 46 :198 – 226.
- Ahmad, I., Shah, K., and Ullah, S. (2016). Military applications using wireless sensor networks : A survey. *Int. J. Eng. Sci*, 6(6) :7039.
- Akbari, S. (2014). Energy harvesting for wireless sensor networks review. In *Proceedings of the 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, page 987–992. IEEE.
- Akyildiz, I. F., Melodia, T., and Chowdhury, K. R. (2007). A survey on wireless multimedia sensor networks. *Computer networks*, 51(4) :921–960.
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002a). A survey on sensor networks. *IEEE Communications magazine*, 40(8) :102–114.
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002b). Wireless sensor networks : a survey. *Computer networks*, 38(4) :393–422.
- Al-Ariki, H. D. E. and Swamy, M. S. (2017). A survey and analysis of multipath routing protocols in wireless multimedia sensor networks. *Wireless Networks*, 23(6) :1823–1835.
- Alfayez, F., Hammoudeh, M., and Abuarqoub, A. (2015). A survey on mac protocols for duty-cycled wireless sensor networks. *Procedia Computer Science*, 73 :482–489.

- Alvarado, G., Bosquez, C., Palacios, F., and Córdoba, L. (2017). Low-energy adaptive clustering hierarchy protocol and optimal number of cluster head algorithm in a randomized wireless sensor network deployment. In *2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT)*, pages 1–4. IEEE.
- Ammari, H. M., Gomes, N., Jacques, M., Maxim, B., and Yoon, D. (2015). A survey of sensor network applications and architectural components. *Ad-Hoc and Sensor Wireless Networks*, 25.
- An, S.-h., Lee, B.-H., and Shin, D.-R. (2011). A survey of intelligent transportation systems. In *2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, pages 332–337. IEEE.
- Azgomi, M. A. and Khalili, A. (2009). Performance evaluation of sensor medium access control protocol using coloured petri nets. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 242(2) :31–42.
- Baccelli, E., Hahm, O., Wählisch, M., Gunes, M., and Schmidt, T. (2012). *RIOT : One OS to rule them all in the IoT*. PhD thesis, INRIA.
- Ballman, K. (1998). Coloured petri nets : Basic concepts, analysis methods and practical use, volume 3. *The American Mathematical Monthly*, 105(5) :493.
- Basagni, S., Naderi, M. Y., Petrioli, C., and Spenza, D. (2013). Wireless sensor networks with energy harvesting. *Mobile Ad Hoc Networking : Cutting Edge Directions*, pages 701–736.
- Bechar, R., Tahar Abbes, M., Mezzoudj, F., and Bellatreche, L. (2020). On formal modeling and validation of wireless sensor network protocols. *Wireless Personal Communications*, 114(4) :2855–2888.
- Bejar, N. (2002). Zone routing protocol (zrp). *Networking Laboratory, Helsinki University of Technology, Finland*, 9(1) :12.
- Bérczes, T., Almási, B., Kuki, A., Sztrik, J., and Kakubava, R. (2013). Modeling the performance and the energy usage of wireless sensor networks by retrieval

- queueing systems. In *Proceedings of the 8th ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks*, pages 133–138. ACM.
- Bérczes, T., Sztrik, J., and Orosz, P. (2012). Tool supported modeling of sensor communication networks by using finite-source priority retrial queues. *Carpathian Journal of Electronic and computer engineering*, 5 :13.
- Bhardwaj, M. and Chandrakasan, A. P. (2002). Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments. In *Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 3, pages 1587–1596. IEEE.
- Bhatti, S., Carlson, J., Dai, H., Deng, J., Rose, J., Sheth, A., Shucker, B., Gruenwald, C., Torgerson, A., and Han, R. (2005). Mantis os : An embedded multithreaded operating system for wireless micro sensor platforms. *Mobile Networks and Applications*, 10(4) :563–579.
- Bisdikian, C. (2001). An overview of the bluetooth wireless technology. *IEEE Communications magazine*, 39(12) :86–94.
- Boutoumi, B. and Gharbi, N. (2018). Two thresholds working vacation policy for improving energy consumption and latency in wsns. In *International Conference on Queueing Theory and Network Applications*, pages 168–181. Springer.
- Boyle, G. (2004). *Renewable Energy*.
- Cao, Q. and Abdelzaher, T. (2006). Liteos : a lightweight operating system for c++ software development in sensor networks. In *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 361–362.
- Cărbunar, B., Grama, A., Vitek, J., and Cărbunar, O. (2006). Redundancy and coverage detection in sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 2(1) :94–128.
- Cardei, M. and Wu, J. (2004). Coverage in wireless sensor networks. *Handbook of sensor networks*, 21 :201–202.

- Cerpa, A. and Estrin, D. (2004). Ascent : Adaptive self-configuring sensor networks topologies. *IEEE transactions on mobile computing*, 3(3) :272–285.
- Cha, H., Choi, S., Jung, I., Kim, H., Shin, H., Yoo, J., and Yoon, C. (2007). Retos : resilient, expandable, and threaded operating system for wireless sensor networks. In *2007 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, pages 148–157. IEEE.
- Chang, J.-H. and Tassiulas, L. (2000). Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks. In *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No. 00CH37064)*, volume 1, pages 22–31. IEEE.
- Chouikhi, S. (2016). *Tolérance aux pannes dans un réseau de capteurs sans fil multi-canal*. PhD thesis, Paris Est.
- Dahiya, R., Arora, A., and Singh, V. (2015). Modelling the energy efficient sensor nodes for wireless sensor networks. *Journal of The Institution of Engineers (India) : Series B*, 96(3) :305–309.
- Dâmaso, A., Rosa, N., and Maciel, P. (2014). Using coloured petri nets for evaluating the power consumption of wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 10(6) :423537.
- David, R. and Alla, H. (2010). *Discrete, continuous, and hybrid Petri nets*, volume 1. Springer.
- Diaz, M. (2001). *Les réseaux de Petri : modèles fondamentaux*. Hermès science publications.
- Dimitrakopoulos, G. and Demestichas, P. (2010). Intelligent transportation systems. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 5(1) :77–84.
- Donta, P. K., Amgoth, T., and Annavarapu, C. S. R. (2022). Delay-aware data fusion in duty-cycled wireless sensor networks : A q-learning approach. *Sustainable Computing : Informatics and Systems*, 33 :100642.

- Dunkels, A., Gronvall, B., and Voigt, T. (2004). Contiki-a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. In *29th annual IEEE international conference on local computer networks*, pages 455–462. IEEE.
- Eswaran, A., Rowe, A., and Rajkumar, R. (2005). Nano-rk : an energy-aware resource-centric rtos for sensor networks. In *26th IEEE International Real-Time Systems Symposium (RTSS'05)*, pages 10–pp. IEEE.
- Farooq, M. O. and Kunz, T. (2011). Operating systems for wireless sensor networks : A survey. *Sensors*, 11(6) :5900–5930.
- Farooq, M. S., Idrees, M., Rehman, A. U., Khan, M. Z., Abunadi, I., Assam, M., Althobaiti, M. M., and Al-Wesabi, F. N. (2022). Formal modeling and improvement in the random path routing network scheme using colored petri nets. *Applied Sciences*, 12(3) :1426.
- Florin, G., Fraize, C., and Natkin, S. (1991). Stochastic petri nets : Properties, applications and tools. *Microelectronics Reliability*, 31(4) :669–697.
- Gharbi, N. and Charabi, L. (2012). Wireless networks with retrials and heterogeneous servers : Comparing random server and fastest free server disciplines. *International Journal on Advances in Networks and Services Volume 5, Number 1 & 2, 2012*.
- Gharbi, N. and Ioualalen, M. (2006). Gspn analysis of retrial systems with servers breakdowns and repairs. *Applied Mathematics and Computation*, 174(2) :1151–1168.
- Gislason, D. (2008). *Zigbee wireless networking*. Newnes.
- Gussen, C. M., Diniz, P. S., Campos, M., Martins, W. A., Costa, F. M., and Gois, J. N. (2016). A survey of underwater wireless communication technologies. *J. Commun. Inf. Sys*, 31(1) :242–255.
- Hakmi, S., Lekadir, O., and Aissani, D. (2017). Application of generalized stochastic petri nets to performance modeling of the rf communication in sensor networks. In *International Conference on Verification and Evaluation of Computer and Communication Systems*, pages 33–47. Springer.

- Han, C.-C., Rengaswamy, R. K., Shea, R., Kohler, E., and Srivastava, M. (2005). Sos : A dynamic operating system for sensor networks. In *Proceedings of the Third International Conference on Mobile Systems, Applications, And Services (Mobisys)*, volume 10, pages 1067170–1067188. Citeseer.
- Han, G., Jiang, J., Guizani, M., and Rodrigues, J. J. C. (2016). Green routing protocols for wireless multimedia sensor networks. *IEEE Wireless Communications*, 23(6) :140–146.
- Hao, J., Zhang, B., and Mouftah, H. T. (2012). Routing protocols for duty cycled wireless sensor networks : A survey. *IEEE Communications Magazine*, 50(12) :116–123.
- Ibrahim, D. M., Sallam, E. A., Eltobely, T. E., and Fahmy, M. M. (2014). Coloured petri net model for vector-based forwarding routing protocol. In *The International Conference on Computing Technology and Information Management (ICCTIM)*, page 169. Society of Digital Information and Wireless Communication.
- Islam, K. Y., Ahmad, I., Habibi, D., and Waqar, A. (2022). A survey on energy efficiency in underwater wireless communications. *Journal of Network and Computer Applications*, 198 :103295.
- Jain, M. and Jain, A. (2010). Working vacations queueing model with multiple types of server breakdowns. *Applied Mathematical Modelling*, 34(1) :1–13.
- Javed, F., Afzal, M. K., Sharif, M., and Kim, B.-S. (2018). Internet of things (iot) operating systems support, networking technologies, applications, and challenges : A comparative review. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(3) :2062–2100.
- Jayarajan, P., Maheswar, R., and Kanagachidambaresan, G. (2019). Modified energy minimization scheme using queue threshold based on priority queueing model. *Cluster Computing*, 22(5) :12111–12118.
- Jensen, K. (2013). *Coloured Petri nets : basic concepts, analysis methods and practical use*, volume 1. Springer Science & Business Media.
- Jensen, K. and Kristensen, L. M. (2009). *Coloured Petri nets : modelling and validation of concurrent systems*. Springer Science & Business Media.

- Kacimi, R. (2009). *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis.
- Kalnoor, G. and Subrahmanyam, G. (2020). A review on applications of markov decision process model and energy efficiency in wireless sensor networks. *Procedia Computer Science*, 167 :2308–2317.
- Kang, M., Yoon, I., and Noh, D. K. (2019). Efficient location service for a mobile sink in solar-powered wireless sensor networks. *Sensors*.
- Karl, H. and Willig, A. (2007a). *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. John Wiley & Sons.
- Karl, H. and Willig, A. (2007b). *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. John Wiley & Sons.
- Kasmi, Z., Norrdine, A., and Blankenbach, J. (2017). Platform architecture for decentralized positioning systems. *Sensors*, 17(5) :957.
- Katopodis, P., Katsis, G., Walker, O., Tummala, M., and Michael, J. B. (2007). A hybrid, large-scale wireless sensor network for missile defense. In *2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering*, pages 1–5. IEEE.
- Kausar, A. Z., Reza, A. W., Saleh, M. U., and Ramiah, H. (2014). Energizing wireless sensor networks by energy harvesting systems : Scopes, challenges and approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38 :973 – 989.
- Khedr, A. M., Aziz, A., and Osamy, W. (2021). Successors of pegasis protocol : A comprehensive survey. *Computer Science Review*, 39 :100368.
- Khelifa, B., Haffaf, H., Madjid, M., and Llewellyn-Jones, D. (2009). Monitoring connectivity in wireless sensor networks. In *2009 IEEE Symposium on Computers and Communications*, pages 507–512. IEEE.
- Khelladi, L. and Badache, N. (2004). Les réseaux de capteurs : état de l'art. *Rapport de recherche, Algérie*.
- Kwak, K. S., Ullah, S., and Ullah, N. (2010). An overview of iee 802.15. 6 standard. In *2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010)*, pages 1–6. IEEE.

- Lacerda, B. and Lima, P. U. (2011). Petri nets as an analysis tool for data flow in wireless sensor networks. In *1st Portuguese Conference on WSNs, Coimbra, Portugal*, pages 1–6. Citeseer.
- Le, K., Cao, T., Le, P., Pham, B., Bui, T., and Quan, T. (2017). Probabilistic congestion of wireless sensor networks : a coloured petri net based approach. *Communications on Applied Electronics*, 7(2) :1–7.
- Levis, P., Madden, S., Polastre, J., Szewczyk, R., Whitehouse, K., Woo, A., Gay, D., Hill, J., Welsh, M., Brewer, E., et al. (2005). Tinyos : An operating system for sensor networks. In *Ambient intelligence*, pages 115–148. Springer.
- Lindsey, S. and Raghavendra, C. S. (2002). Pegasus : Power-efficient gathering in sensor information systems. In *Proceedings, IEEE aerospace conference*, volume 3, pages 3–3. IEEE.
- Liu, H., Wan, P., and Jia, X. (2006). On optimal placement of relay nodes for reliable connectivity in wireless sensor networks. *Journal of Combinatorial Optimization*, 11(2) :249–260.
- Liu, H., Wan, P., Yi, C.-W., Jia, X., Makki, S., and Pissinou, N. (2005). Maximal lifetime scheduling in sensor surveillance networks. In *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.*, volume 4, pages 2482–2491. IEEE.
- Logan, J., Thompson, R., Gayl, I., et al. (2015). Alert2™ transmission protocol, next generation real-time hydrologic monitoring standard. In *36th Hydrology and Water Resources Symposium : The art and science of water*, pages 758–765. Engineers Australia Barton, ACT.
- Majeed, A. and Rauf, I. (2020). Graph theory : A comprehensive survey about graph theory applications in computer science and social networks. *Inventions*, 5(1) :10.
- Malik, P. S., Abouhawwash, M., Almutairi, A., Singh, R. P., and Singh, Y. (2022). Comparative analysis of magnetic induction based communication techniques for wireless underground sensor networks. *PeerJ Computer Science*, 8 :e789.

- Megowan, P. J., Suvak, D. W., and Knutson, C. D. (1996). Irda infrared communications : An overview. *Counterpoint Systems Foundry, INC*, 96.
- Mo, W., Qiao, D., and Wang, Z. (2005). Mostly-sleeping wireless sensor networks : Connectivity, k-coverage, and  $\alpha$ -lifetime. In *Proceedings of the 43rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, pages 1–10. Citeseer.
- Nithya, R. and Mahendran, N. (2015). A survey : Duty cycle based routing and scheduling in wireless sensor networks. In *2015 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS)*, pages 813–817. IEEE.
- Oh, M., Kim, J.-Y., Kim, B., Yun, C.-Y., Kim, C. K., Kang, Y.-H., and Kim, H.-G. (2021). Tolerance angle concept and formula for practical optimal orientation of photovoltaic panels. *Renewable Energy*, 167 :384–394.
- Onishi, T. and Ogose, S. (March 2018). Lifetime extension of wireless sensor networks with energy harvesting. *Journal of Signal Processing*, 22 (2) :77 – 86.
- Oraskari, J. (2000). Bluetooth versus wlan iee 802.11 x. *Helsinki University of Technology (Department of Computer Science and Engineering) Nov*.
- Oukas, N. and Boulif, M. (2019a). Energy-consumption-aware modelling and performance evaluation for eh-wsns. In *(IAM 2019) Proceedings of the second conference on Informatics and Applied Mathematics*, pages 57–62. labstic.univ-guelma.dz.
- Oukas, N. and Boulif, M. (2019b). A petri net modelling for eh-wsn with buffer limitation and message losses. In *Proceedings of The first International Conference on Networking Telecommunications, Biomedical Engineering and Applications (ICNTBA'19)*. Boumerdès, Algeria.
- Oukas, N. and Boulif, M. (2020a). A colored petri net to model message differences in energy harvesting wsns. In *Proceedings of The 4th Conference on Computing Systems and Applications*. Ecole Militaire Polytechnique - Chahid Abderahmane Taleb (EMP), Algiers, Algeria.

- Oukas, N. and Boulif, M. (2020b). Generalized stochastic petri nets modelling for energy harvesting wsns considering neighbors with different vicinity levels. In *2020 International Conference on Computing and Information Technology (ICCIT-1441)*, pages 1–5.
- Oukas, N. and Boulif, M. (2020c). A petri net modeling for wsn sensors with renewable energy harvesting capability. In *Smart Energy Empowerment in Smart and Resilient Cities*, pages 524–534, Cham. Springer International Publishing.
- Oukas, N. and Boulif, M. (2021a). A new generalised stochastic petri nets modelling for solar energy harvesting sensors in long lasting wsns, considering seasonal sunshine levels. In *Recent Advances in Communication Technology, Computing and Engineering, Proceedings of The International Conference on Advances in Communication Technology, Computing and Engineering (ICACTCE)*. Meknes, Morocco.
- Oukas, N. and Boulif, M. (2021b). A new stochastic petri nets modeling for dual cluster heads configuration in energy-harvesting wsns. In *2nd International Workshop on Human-Centric Smart Environments for Health and Well-being (IHSH 2020)*.
- Oukas, N. and Boulif, M. (2022a). Modeling and assessment of energy harvesting wsns with unreliable sensors for military applications. In *First International Conference on Autonomous Systems and their Applications (ICASA'22)*, Chadli Bendjedid El-Tarf University.
- Oukas, N. and Boulif, M. (2022b). 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*.
- Oukas, N., Boulif, M., Hadiouche, H., and Bengharabi, C. (2022). 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.
- Perkins, C., Belding-Royer, E., and Das, S. (2003). Rfc3561 : Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing.

- Peterson, J. L. (1981). Petri net theory and the modeling of systems.
- Polastre, J., Hill, J., and Culler, D. (2004). Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 95–107.
- Pottie, G. and Kaiser, W. (2000). Wireless integrated network sensors. *COMMUNICATIONS OF THE ACM*, 43(5) :51.
- Prabhu, S. B. and Sophia, S. (2013). A review of energy efficient clustering algorithm for connecting wireless sensor network fields. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2(4) :477–481.
- Radmand, P., Talevski, A., Petersen, S., and Carlsen, S. (2010). Comparison of industrial wsn standards. In *4th ieee international conference on digital ecosystems and technologies*, pages 632–637. IEEE.
- Raghunathan, V., Schurgers, C., Park, S., and Srivastava, M. B. (2002). Energy-aware wireless microsensor networks. *IEEE Signal processing magazine*, 19(2) :40–50.
- Rault, T., Bouabdallah, A., and Challal, Y. (2014). Energy efficiency in wireless sensor networks : A top-down survey. *Computer Networks*, 67 :104–122.
- Sah, D. K. and Amgoth, T. (2020). Renewable energy harvesting schemes in wireless sensor networks : A survey. *Information Fusion*, 63 :223 – 247.
- Shahkaram, M. M. (2019). Ballistic missile defense in the middle east. Technical report, Naval Postgraduate School Monterey United States.
- Sharma, H., Haque, A., and Jaffery, Z. A. (2018). Modeling and optimisation of a solar energy harvesting system for wireless sensor network nodes. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 7(3).
- Shi, L., Du, S., Miao, Y., and Lan, S. (2021). Modeling and performance analysis of satellite network moving target defense system with petri nets. *Remote Sensing*, 13(7) :1262.

- Shi, Z.-s., Wang, C.-f., Zheng, P., and Wang, H.-y. (2010). An energy consumption prediction model based on gspn for wireless sensor networks. In *2010 International Conference on Computational and Information Sciences*, pages 1001–1004. IEEE.
- Shojafar, M., Pooranian, Z., Abawajy, J. H., and Meybodi, M. R. (2013). An efficient scheduling method for grid systems based on a hierarchical stochastic petri net. *Journal of computing science and engineering*, 7(1) :44–52.
- Shojafar, M., Pooranian, Z., Meybodi, M. R., and Singhal, M. (2015). Alato : an efficient intelligent algorithm for time optimization in an economic grid based on adaptive stochastic petri net. *Journal of intelligent manufacturing*, 26(4) :641–658.
- Singh, M. and Kumar, S. (2017). A survey : Ad-hoc on demand distance vector (aodv) protocol. *International Journal of Computer Applications*, 161(1) :38–44.
- Singh, P., Singh, R. P., Singh, Y., Chohan, J. S., Sharma, S., Sadeghzadeh, M., and Issakhov, A. (2022). Magnetic induction technology-based wireless sensor network for underground infrastructure, monitoring soil conditions, and environmental observation applications : Challenges and future aspects. *Journal of Sensors*, 2022.
- Sohraby, K., Minoli, D., and Znati, T. (2007). *Wireless sensor networks : technology, protocols, and applications*. John Wiley & Sons.
- Sony, C. T., Sangeetha, C. P., and Suriyakala, C. D. (2015). Multi-hop leach protocol with modified cluster head selection and tdma schedule for wireless sensor networks. In *2015 Global Conference on Communication Technologies (GCCT)*, pages 539–543.
- Soro, S. and Heinzelman, W. B. (2005). Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering. In *19th IEEE international parallel and distributed processing symposium*, pages 8–pp. IEEE.
- Tan, Y. K. and Panda, S. K. (2010). Review of energy harvesting technologies for sustainable wsn. In Seah, W. and Tan, Y. K., editors, *Sustainable Wireless Sensor Networks*, chapter 2. IntechOpen, Rijeka.

- Thakur, S., Prasad, D., and Verma, A. (2017). Energy harvesting methods in wireless sensor network : A review. *International Journal of Computer Applications*, 165(9) :19–22.
- Tian, D. and Georganas, N. D. (2002). A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pages 32–41.
- Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N. B., and Heinzelman, W. (2002). A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 6(2) :28–36.
- Trinh, G., Le, K., Bang, T., Tram, Q., Bui, T., and Quan, T. (2016). Modelling and congestion detection of wireless sensor networks : A concurrent-based approach using coloured petri nets. *International Journal of Applied Information Systems*, 11(7) :1–9.
- Đurišić, M. P., Tafa, Z., Dimić, G., and Milutinović, V. (2012). A survey of military applications of wireless sensor networks. In *2012 Mediterranean conference on embedded computing (MECO)*, pages 196–199. IEEE.
- Vijayaraghavan, K. and Rajamani, R. (2007). Active control based energy harvesting for battery-less wireless traffic sensors. In *2007 American Control Conference*, pages 3106–3111.
- Wang, X., Ren, Y., Zhao, J., Guo, Z., and Yao, R. (2004). Comparison of ieee 802.11 e and ieee 802.15. 3 mac. In *Proceedings of the IEEE 6th Circuits and Systems Symposium on Emerging Technologies : Frontiers of Mobile and Wireless Communication (IEEE Cat. No. 04EX710)*, volume 2, pages 675–680. IEEE.
- Wang, X., Xing, G., Zhang, Y., Lu, C., Pless, R., and Gill, C. (2003). Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 28–39.
- Wu, K., Gao, Y., Li, F., and Xiao, Y. (2005). Lightweight deployment-aware scheduling for wireless sensor networks. *Mobile Networks and applications*, 10(6) :837–852.

- Wüchner, P., Sztrik, J., and de Meer, H. (2010). Modeling wireless sensor networks using finite-source retrial queues with unreliable orbit. In *International Workshop on Performance Evaluation of Computer and Communication Systems*, pages 73–86. Springer.
- Würfel, P. (2007). Photovoltaic principles and organic solar cells. *CHIMIA International Journal for Chemistry*, 61(12) :770–774.
- Yadollah zadehTabari, M. and Mohammadizad, P. (2020). Modeling and performance evaluation of energy consumption in s-mac protocol using generalized stochastic petri nets. *International Journal of Engineering*, 33(6) :1114–1121.
- Yaiche, M., Bouhanik, A., Bekkouche, S., Malek, A., and Benouaz, T. (2014). Revised solar maps of algeria based on sunshine duration. *Energy Conversion and Management*, 82 :114–123.
- Yang, M., So, S. S., Eun, S., Kim, B., and Kim, J. (2007). Sensos : A sensor node operating system with a device management scheme for sensor nodes. In *Fourth International Conference on Information Technology (ITNG'07)*, pages 134–139. IEEE.
- Ye, W., Heidemann, J., and Estrin, D. (2002). An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 3, pages 1567–1576. IEEE.
- Ye, W., Heidemann, J., and Estrin, D. (2004). Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on networking*, 12(3) :493–506.
- Ye, W., Silva, F., and Heidemann, J. (2006). Ultra-low duty cycle mac with scheduled channel polling. In *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 321–334.
- Yick, J., Mukherjee, B., and Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer networks*, 52(12) :2292–2330.

- Younis, O. and Fahmy, S. (2004). Heed : a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on mobile computing*, 3(4) :366–379.
- Zairi, S., Eric, N., and ZOUARI, B. (2011). Global generic model for formal validation of the wireless sensor networks properties. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1) :5395–5400.
- Zairi, S., Mezni, A., and Zouari, B. (2015). Formal approach for modeling, verification and performance analysis of wireless sensors network. In *International Conference on Wired/Wireless Internet Communication*, pages 381–395. Springer.
- Zhang, H., Hou, J. C., et al. (2005). Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Ad Hoc Sens. Wirel. Networks*, 1(1-2) :89–124.
- Zimmermann, A. (2007a). *Stochastic Discrete Event Systems*. Springer.
- Zimmermann, A. (2007b). *Stochastic Discrete Event Systems Modeling, Evaluation, Applications*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Zimmermann, A. (2017). Modelling and performance evaluation with timenet 4.4. In *International conference on quantitative evaluation of systems*, pages 300–303. Springer.
- Zimmermann, A. and Knoke, M. (2007). Timenet 4.0.