



**HAL**  
open science

# Evaluation de la fiabilité des réseaux de capteurs sans fils pour la détection en milieu naturel

Rabih Kassan

► **To cite this version:**

Rabih Kassan. Evaluation de la fiabilité des réseaux de capteurs sans fils pour la détection en milieu naturel. Electronique. Université de Technologie de Troyes, 2017. Français. NNT : 2017TROY0013 . tel-02420320

**HAL Id: tel-02420320**

**<https://theses.hal.science/tel-02420320>**

Submitted on 19 Dec 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse  
de doctorat  
de l'UTT

**Rabih KASSAN**

# Évaluation de la fiabilité des réseaux de capteurs sans fils pour la détection en milieu naturel

**Spécialité :**  
Optimisation et Sûreté des Systèmes

2017TROY0013

Année 2017



---

---

# THESE

*pour l'obtention du grade de*

## DOCTEUR de l'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES

**Spécialité : OPTIMISATION ET SURETE DES SYSTEMES**

*présentée et soutenue par*

**Rabih KASSAN**

*le 24 mai 2017*

---

---

### **Évaluation de la fiabilité des réseaux de capteurs sans fils pour la détection en milieu naturel**

---

---

#### JURY

M. C. PHAM	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Président (Rapporteur)
M. É. CHÂTELET	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Directeur de thèse
M. B. EL HASSAN	PROFESSEUR	Directeur de thèse
Mme L. MERGHEM-BOULAHIA	MAITRE DE CONFERENCES - HDR	Examinatrice
M. M. NOUR EL FATH	PROFESSEUR	Rapporteur
M. M. SALLAK	MAITRE DE CONFERENCES - HDR	Examineur



## Abstract

The objective of my thesis was to evaluate the reliability of wireless sensor networks (WSN) in natural settings. My evaluation takes into account the physical components of sensor nodes, photovoltaic (PV) cells, rechargeable and non-rechargeable batteries, communication and data transmission protocols, and elements necessary for effective detection, especially for the case of forest fires.

The study first deals with the functioning of a WSN in nature by taking into account its energy consumption, and physical and functional failures to assess its reliability. Reliability is then compared between a PV-free (WSN) and PV- (PV-WSN) network under complex data exchange conditions. Finally, the evaluation of the reliability of the PV-WSN is carried out in the context of the detection and propagation of forest fires under the same conditions of data exchange.

The main assumptions considered are: the WSN is structured randomly with one sink per cluster and identical sensors, environmental and orientation losses affect PV-cell recharge, the radio signal may be weakened by natural obstacles, fire propagation is uniform and elliptical, vegetation is homogeneous, and there is communication loss using the Dynamic Source Routing (DSR) protocol.

A simulator was developed to carry out these assessments. The results obtained show the importance of physical failures in assessing reliability and extending WSN and PV-WSN lifetime.

**Keywords:** Sensor networks, Photovoltaic cell, Reliability (Engineering), Monte Carlo method, Computer network protocols, Forest fires

## Résumé

L'objectif de la thèse est d'évaluer la fiabilité des réseaux de capteurs (WSN) en milieu naturel. L'évaluation prend en compte les composants physiques des nœuds de capteurs, les cellules photovoltaïques éventuelles (PV), les batteries rechargeables ou non, les protocoles de communications et d'échange de données ainsi que les éléments nécessaires pour une détection efficace, en particulier les feux de forêt.

L'étude traite d'abord du fonctionnement du réseau de capteur dans la nature en prenant en compte sa consommation d'énergie et les défaillances physiques et fonctionnelles pour évaluer sa fiabilité. Puis, la fiabilité est comparée entre un réseau sans PV (WSN) et avec PV (PV-WSN) dans des conditions d'échange de données difficiles. Enfin, l'évaluation de la fiabilité des PV-WSN est effectuée dans le cadre de la détection et de la propagation des feux de forêts avec les mêmes conditions d'échange de données.

Les principales hypothèses considérées sont : des distributions de capteurs aléatoires dans des réseaux avec un seul nœud « sink », des nœuds identiques, l'affaiblissement du signal radio dû aux obstacles naturels, une propagation de feu uniforme et elliptique, une végétation homogène, une perte possible de paquets de données ainsi que l'utilisation du protocole de routage « Dynamic Source Routing (DSR) ».

Un simulateur a été développé pour effectuer les différentes études. Les résultats obtenus montrent l'importance des défaillances physiques pour l'évaluation de la fiabilité et pour la prolongation de la durée de vie des WSN et PV-WSN.

**Mots clefs :** Réseaux de capteurs (technologie), Photopiles, Fiabilité, Monte-Carlo, Méthode de, Protocoles de réseaux d'ordinateurs, Forêts – Incendies

## Remerciements

Je remercie en premier temps mon directeur de thèse, M. CHATELET Eric, Professeur à l'Université de Technologie de Troyes, pour ses conseils avisés et son écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de cette thèse. Je lui suis également reconnaissant pour le temps qu'il m'a accordé, sa qualité pédagogique et scientifique, sa franchise et sa sympathie. J'ai beaucoup appris à ses côtés, et je lui adresse ma gratitude pour tout cela.

Je tiens à remercier aussi mon co-directeur de thèse Dr. EL HASSAN Bachar, Enseignant à l'Université Libanaise Faculté de génie – branche 1, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et son suivi.

Je tiens à remercier particulièrement Monsieur DABBOUSSI Toufic, Président de la chambre de commerce, d'industrie et d'agriculture de Tripoli et du Liban nord pour son soutien et l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

J'associe à ces remerciements le Docteur SARDOUK Ahmad, qui m'a aidé dans mes démarches et ma beaucoup inspiré dans ma thèse, et m'a porté conseil.

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur NOUR EL FATH Mustapha, professeur à l'Université Laval au Québec, et à Monsieur PHAM Congduc, professeur à l'université de Pau et Pays d'Adour, de m'avoir fait l'honneur d'accepter de rapporter sur mon travail de doctorat.

Je remercie également Madame MERGHEM-BOULAHIA Leïla, Enseignant-chercheur à l'université de technologie de Troyes, et Monsieur SALLAK Mohamed, Enseignant-chercheur à l'université de technologie de Compiègne, d'avoir bien voulu être examinateurs de ce travail de thèse.

Je tiens à exprimer à tous les membres du jury ma profonde gratitude.

J'aimerais aussi remercier SOUKIEH Jasmine, qui m'a aidé et venu en aide, accompagné de son soutien et de ses encouragements continuels. Ainsi, je pense également à KASSAN Mohamad Fouad, pour son soutien et ses remarques tellement précieuses.

Je remercie ma mère et lui dédie cette thèse. Je remercie également ma famille et plus précisément ma sœur Nada pour son soutien continu.

Je conclus en remerciant de tout mon cœur Rana pour une multitude de raisons qui ne concerne qu'elle.

## Sommaire

<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION .....</b>	<b>16</b>
1.1. FONCTIONNEMENT DES NŒUDS DE CAPTEURS .....	19
1.2. LA SURETE DE FONCTIONNEMENT ET SON APPLICATION AUX WSN .....	21
1.2.1. <i>La fiabilité des WSN</i> .....	21
1.2.2. <i>La disponibilité</i> .....	23
1.2.3. <i>La résilience</i> .....	23
1.3. INTERET DES WSN POUR LES FEUX DE FORET .....	24
<b>CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART .....</b>	<b>26</b>
2.1. INTRODUCTION .....	28
2.2. FIABILITE DES RESEAUX DE CAPTEURS .....	29
2.3. RESEAUX DE CAPTEURS ALIMENTES EN ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE .....	34
2.4. RESEAUX DE CAPTEURS POUR LA DETECTION DE FEUX DE FORET .....	36
2.4.1. <i>Solutions algorithmiques et logicielles</i> .....	36
2.4.2. <i>Solutions techniques</i> .....	38
2.5. CONCLUSION .....	39
<b>CHAPITRE 3 : MODÉLISATION DES RÉSEAUX DE CAPTEUR ET ÉVALUATION DE LA FIABILITÉ (WSN) 42</b>	<b>42</b>
3.1. INTRODUCTION .....	44
3.2. PROBLEMATIQUE ETUDIEE ET HYPOTHESES .....	44
3.3. MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DES WSN .....	46
3.3.1. <i>Étape 1</i> .....	46
3.3.2. <i>Étape 2</i> .....	47
3.3.3. <i>Étape 3</i> .....	48
3.3.4. <i>Étape 4</i> .....	48
3.3.5. <i>Étape 5</i> .....	48
3.3.6. <i>Étape 6</i> .....	49
3.3.7. <i>Synthèse sur le fonctionnement</i> .....	49
3.4. ÉVALUATION DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE DES WSN .....	51
3.5. ÉVALUATION DE LA FIABILITE DES WSN .....	60
3.5.1. <i>Évaluation de la fiabilité physique</i> .....	61
3.5.2. <i>Détection des événements</i> .....	64
3.5.3. <i>Autres approches pour l'évaluation de fiabilité des WSN</i> .....	67
3.5.4. <i>Fiabilité des batteries</i> .....	68
3.6. CAS D'APPLICATION .....	71
3.7. CONCLUSION .....	82
<b>CHAPITRE 4 : MODÉLISATION ET ÉVALUATION DE LA FIABILITÉ DES RÉSEAUX DE CAPTEURS ALIMENTÉS PAR CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES (PV-WSN) .....</b>	<b>84</b>
4.1. INTRODUCTION .....	86
4.2. CAPTEURS ALIMENTES PAR ENERGIE SOLAIRE .....	86
4.3. PROBLEMATIQUE ETUDIEE ET HYPOTHESES .....	90

4.4.	MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DES PV-WSN .....	90
4.5.	PRODUCTION DE L'ENERGIE SOLAIRE.....	91
4.6.	FIABILITE DES PV-WSN.....	93
4.6.1.	<i>Fiabilité des cellules photovoltaïques</i> .....	96
4.6.2.	<i>Fiabilité des batteries</i> .....	97
4.7.	CAS D'APPLICATION 1.....	97
4.8.	CAS D'APPLICATION 2.....	103
4.9.	CONCLUSION .....	110
<b>CHAPITRE 5 : MODÉLISATION AVANCÉE DES PV-WSN ET DÉTECTION DE FEUX DE FORÊT .....</b>		<b>112</b>
5.1.	INTRODUCTION .....	114
5.2.	PROBLEMATIQUES ETUDIÉES ET HYPOTHESES.....	116
5.3.	MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DES PV-WSN AVANCE.....	117
5.4.	ÉTUDES D'EFFICACITE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES.....	119
5.5.	MODELISATION DE LA PROPAGATION ET DE LA DETECTION DE FEUX DE FORET .....	121
5.6.	FIABILITE DES PV-WSN AVANCES.....	123
5.6.1.	<i>Introduction</i> .....	123
5.6.2.	<i>Probabilité de détection</i> .....	123
5.6.3.	<i>Fiabilité de la transmission de l'information</i> .....	124
5.6.4.	<i>Évaluation de la fiabilité du PV-WSN</i> .....	124
5.7.	CAS D'APPLICATION .....	125
5.8.	RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	126
5.8.1.	<i>Scénarios de 1 à 4 (départ de feu = 365 jours)</i> .....	128
5.8.2.	<i>Scénarios de 5 à 8 (départ de feu = 21 jours)</i> .....	133
5.9.	CONCLUSION .....	139
<b>CHAPITRE 6 : CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>		<b>140</b>
6.1.	APPORT DES MODELES PROPOSES .....	142
6.2.	SYNTHESE SUR LE POSITIONNEMENT DE NOS TRAVAUX .....	143
6.3.	PRINCIPAUX RESULTATS DE LA THESE .....	145
6.4.	PERSPECTIVES GENERALES .....	147
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>		<b>150</b>

## Liste de Figures

Figure 1 : Architecture de WSN.....	19
Figure 2 : Illustration de transfert de données .....	20
Figure 3 : Réseau de capteurs WSN avec un seul nœud « sink ».....	47
Figure 4 : Algorithme de 6 étapes.....	50
Figure 5 : Algorithme d'unslotted CSMA/CA.....	53
Figure 6 : Nœud en mode transmission de données.....	57
Figure 7 : Algorithme de CTD.....	58
Figure 8 : Évolution de la valeur relative du nombre moyen de capteurs défectueux en fonction du nombre de simulations .....	74
Figure 9 : Évolution de l'erreur relative de la fiabilité du WSN en fonction du nombre de simulations (1934 jours).....	74
Figure 10 : Évolution de l'erreur relative de la convergence des écarts types de la fiabilité en fonction du nombre de simulations (1934 jours).....	75
Figure 11 : Évolution de l'erreur relative de la convergence de l'écart-type du nombre de capteurs défectueux en fonction du nombre de simulations .....	75
Figure 12 : Fiabilité de WSN en fonction de temps (jours).....	77
Figure 13 : Le nombre cumulé moyen de capteurs défectueux en fonction de temps (jours) .....	78
Figure 14 : Les contributions de la consommation énergétique et les défaillances physiques aléatoires (jours) .....	79
Figure 15 : densité de probabilité du nombre de nœuds défectueux lors de la défaillance du WSN.....	80
Figure 16 : Probabilité de défaillance des nœuds WSN .....	81
Figure 17 : Nœud de capteurs équipé de PV .....	87
Figure 18 : WSN équipé de 10% de PV placé à la frontière de la zone .....	88
Figure 19 : PV-WSN avec illustration des zones îles « islands ».....	89
Figure 20 : PV-WSN avec illustration combiné entre de zones îles « islands » et nœud de bords.....	89
Figure 21 : Fiabilité de réseau de capteur sans PV (WSN) en fonction de temps.....	99
Figure 22 : Fiabilité de réseau de capteur avec PV (PV-WSN). La courbe en trait continu représente la fiabilité maximale du PV-WSN théorique (application de la formule 12).....	100
Figure 23 : Types de défaillances dans le cas des WSN en fonction de temps.....	101
Figure 24 : Types de défaillances dans le cas des PV-WSN en fonction de temps .....	102
Figure 25 : fiabilité de système « Non-clustered structure » .....	105
Figure 26 : fiabilité de système « clustered structure » .....	106
Figure 27 : Types de défaillances dans le cas de « non-clustered structure » .....	107
Figure 28 : Types de défaillances dans le cas de « clustered structure ».....	108
Figure 29 : fiabilité de système « clustered structure » (100 capteurs).....	109
Figure 30 : Algorithme d'attributions des zones.....	118
Figure 31 : Réseau de capteurs avec les positions de démarrage de feu de forêts (P1 et P2) .....	127
Figure 32 : Types de défaillances de nœud PV-WSN en fonction du temps jusqu'à 365 jours (scénarios 1 à 4) .....	129
Figure 33 : Fiabilité du PV-WSN en fonction du temps (scénario 2) .....	130
Figure 34 : Types de défaillances de nœud PV-WSN en fonction du temps (scénario 2) .....	131
Figure 35 : Fiabilité du PV-WSN en fonction du temps (scénario 3) .....	132

<i>Figure 36 : Types de défaillances de nœud PV-WSN en fonction du temps (scénario 3) .....</i>	<i>133</i>
<i>Figure 37 : Types de défaillances de nœud PV-WSN en fonction du temps jusqu'à 21 jours (scénarios 5 à 8) .....</i>	<i>135</i>
<i>Figure 38 : Fiabilité du PV-WSN en fonction du temps (scénario 6) .....</i>	<i>136</i>
<i>Figure 39 : Types de défaillance de nœud PV-WSN en fonction du temps (scénario 6).....</i>	<i>136</i>
<i>Figure 40 : Fiabilité du PV-WSN en fonction du temps (scénario 7) .....</i>	<i>138</i>
<i>Figure 41 : Types de défaillances de nœud PV-WSN en fonction du temps (scénario 7) .....</i>	<i>138</i>

## Liste de tableaux

<i>Tableau 1 : Définitions de la fiabilité de WSN dans la littérature.....</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 2 : Paramètres pour l'évaluation du taux de défaillance des composants électroniques.....</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 3 : Paramètres pour l'évaluation du taux de défaillance des cellules PV.....</i>	<i>96</i>
<i>Tableau 4 : Les 8 scénarios de simulations.....</i>	<i>125</i>
<i>Tableau 5 : Modèles existants et proposées.....</i>	<i>144</i>

## Abréviations

ACK	Acknowledgment
AMNN	Acyclic Multi-state Node Network
BDD	Binary Decision Diagram
CCA	Clear Channel Assessment
CCE	Common Cause Event
CCF	Common Cause Failures
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
DSR	Dynamic Source Routing Protocol
EOBDD	Enhanced Ordered Binary Decision Diagram
EWMA	Exponentially Weighted Moving Average
GA	Genetic Algorithm
MAWNs	Mobile Ad-Hoc Wireless Networks
MC	Monte Carlo
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MNN	Multi-state Node Network
MTTF	Mean Time To Failure
NiCd	Nickel Cadmium
NiMH	Nickel-Metal Hydride
PV	Photovoltaïque
PV-WSN	Wireless Sensor Network équipé de mini cellule photovoltaïque
RE	Renewable Energy
REC	Reliability of electronic components
UGFM	Universal Generating Function Methods
WCMA	Weather Conditioned Moving Average
WSN	Wireless Sensor Network

## Acronymes

$\alpha$	Angle d'élévation du soleil
$a(t)$	Disponibilité (ou fiabilité) du nœud de capteur $i$ au temps $t$
$A(t)$	Disponibilité (ou fiabilité) de WSN ou PV-WSN à l'instant $t$ pour le cas où l'activation d'un seul capteur est nécessaire pour le processus de détection
$A_{n,s}(t)$	Approximation de disponibilité (ou fiabilité) de WSN ou PV-WSN à l'instant $t$ (coupes prépondérantes)
$A_{PV}$	Surface d'une cellule photovoltaïque (m <sup>2</sup> )
$A_S(t)$	Disponibilité (ou fiabilité) de WSN ou PV-WSN à l'instant $t$
$B$	Channel acquisition overhead (mJ)
$\beta$	Angle d'inclinaison mesuré à partir de l'horizontale (orientation des cellules PV)
$BC$	Capacité de la batterie (mJ)
$d$	Nombre de jours à partir du 1er janvier (d)
$d_h$	Intervalles périodiques d'envoi de messages HELLO (s)
$d_i$	Durée de vie énergétique de batteries de chaque capteur $i$ (s)
$d_s$	Intervalles périodiques pour l'envoi de messages donnés vers le sink (s)
$D_i(t)$	Probabilité d'occurrence de l'événement de batterie appauvri du nœud $i$ au temps $t$
$\delta$	Angle de déclinaison solaire
$e_{s,k}=\{j_{1,k} \dots j_{s,k}\}$	$k$ th ensemble de détection de capteurs ( $k = 1.. N_s$ )
$E_0$	Consommation d'énergie d'un message HELLO (mJ)
$E_{C,i}(t)$	Consommation d'énergie du nœud de capteur $i$ pendant le temps $t$ (mJ)
$E_{C-PV,i}(t)$	Consommation d'énergie du nœud de capteur $i$ pendant le temps $t$ (mJ) dans le PV-WSN
$E_d(T)$	Consommation d'énergie pour un capteur intermédiaire dans la période $T$ (mJ)
$E_f$	Consommation d'énergie d'un nœud de frontière (mJ)
$E_h(T)$	Consommation d'énergie due aux messages HELLO pour un capteur dans la période $T$ (mJ)
$E_{H,i}$	Énergie récoltée pour le nœud de capteur $i$ (mJ)
$E_{hr,i}$	Energy harvested in 1 hour for sensor node $i$ (J.h <sup>-1</sup> )

$E_i(t)$	Énergie restante pour le nœud de capteur $i$ pendant la période $t$ (mJ)
$E_{int0}$	Consommation d'énergie pendant chaque transmission de données par nœuds intermédiaires (mJ)
$E_{int,i}$	Consommation d'énergie d'un nœud intermédiaire (mJ)
$E_{mJ,i}(t)$	Énergie récoltée pendant la période $t$ pour le nœud de capteur $i$ (mJ)
$E_{Ni}$	Consommation d'énergie dans les communications avec les voisins « message Beacon » (mJ)
$F_i(t)$	Probabilité de défaillance physique du nœud de capteur $i$ au temps $t$
$\varphi$	Latitude
$G_i(t)$	Probabilité de temps de défaillance (y compris un événement de batterie épuisée) du nœud de capteur $i$
$H$	Rayonnement solaire annuel sur les panneaux inclinés ( $W.m^{-2}$ )
$kWp$	Kilowatt peak (kW)
$\lambda_B(t)$	Taux de défaillance des batteries
$\lambda_{p,e}$	Taux de défaillance des composants électroniques (constant)
$\lambda_{p,PV}$	Taux de défaillance des mini cellules solaires (constante)
$\lambda_{s,n}$	Taux de défaillance d'un nœud voisin de « sink » (constante)
$m_r$	Taille des paquets reçus (octets)
$m_s$	Taille des paquets transmis (octets)
$M_{size}$	Taille de message d'informations (octets)
$MTTF_{n,S}$	Approximation du temps moyen jusqu'à la défaillance de WSN ou PV-WSN (coupes prépondérantes)
$n_p$	Position du nœud intermédiaire dans un chemin
$N_i$	Nombre de voisins du nœud de capteur $i$
$N_r$	Nombre de chemins $r_{ik}$ pour tous les nœuds du réseau de capteurs sans fil
$N_s$	Nombre de capteurs nécessaires pour la détection des événements
$n_s$	Nombre de nœuds voisins de puits
$P_D(t)$	Probabilité de détection dans le WSN ou le PV-WSN
$PI$	Longueur du chemin entre le nœud source et le nœud sink
$PR$	Rapport de performance d'une cellule photovoltaïque
$P_{s,i}(t)$	Probabilité que les informations envoyées par le nœud de capteur $i$ soient reçues par le sink au temps $t$
$R$	Rendement du panneau solaire
$R_h$	Rayonnement solaire annuel mesuré sur une surface horizontale (en $W.m^{-2}$ )

$r_{ik}$	$k^{\text{ème}}$ chemins des nœuds capteurs activés $i$
$S$	Sensibilité au seuil des capteurs
$s(t)$	Sensibilité du nœud de capteur $i$
$t_i$	Temps de défaillance aléatoire du nœud du capteur $i$



---

# Chapitre 1 : Introduction

---



## 1. Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN) (voir Yick et al.2008 et Akyildiz et al. 2002 pour la description de WSN) sont utilisés pour la surveillance, la supervision, le contrôle et la gestion pour un large éventail d'environnements tels que les zones naturelles sauvages, les zones industrielles, les villes, pour détecter les feux de forêt, la diffusion de gaz, les problèmes de refroidissement, la surveillance de la santé dans le domaine médical, le suivi agricole, etc. Ils peuvent également être utilisés dans de nouvelles technologies comme l'Internet des objets (IoT). La mise en œuvre des WSN peut être structurée, telle que dans les IoT, les zones industrielles, les smart grids, ou non-structurée, tel que dans les forêts, les zones naturelles, rivières, etc. Un réseau structuré est constitué de nœuds installés, dans des emplacements prédéterminés (pour le gestionnaire de réseau / administrateur), et alimentés via une source d'énergie stable (courant électrique continue). Un réseau non structuré est constitué de nœuds placés aléatoirement dans une zone géographique. Cette distribution (non-structurée) est souvent utilisée dans la surveillance des zones inaccessibles afin de détecter des événements naturels dangereux tels que les incendies de forêt, les inondations, les tsunamis, etc.

La taille du réseau de capteur dépend de l'environnement pour lequel il est utilisé, c'est pourquoi un réseau de capteurs peut être composé de centaines voire de milliers de « nœuds » de capteurs. Chaque nœud de capteur est composé de plusieurs composants électroniques tels que les capteurs (température, humidité, lumière,...), transmetteurs radio, microcontrôleurs, circuits électroniques et d'une ou plusieurs sources d'énergie.

Les WSN sont composés de nombreux clusters; chaque cluster contient un nombre variable de nœuds de capteurs sans fil (selon la taille du cluster), avec une ou plusieurs stations de base appelées nœuds « sink » voir Figure 1. Les WSN non structurés présentent de nombreuses limitations notamment en termes de durée de vie (Wang et al. (2014). Cette durée de vie dépend principalement de la capacité de la batterie (BC) et de la fiabilité de ses composants électroniques (REC).

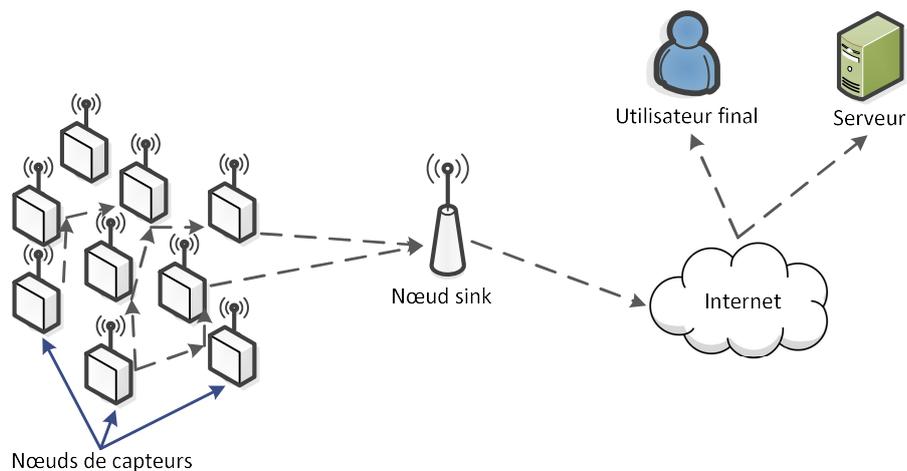


Figure 1 : Architecture de WSN

Contenu des illustrations présentées, notre étude s'intéresse à l'évaluation de la fiabilité dans les réseaux de capteurs ainsi que leur fonctionnement dans la détection en milieu naturel, et plus précisément dans le cadre d'une application aux feux de forêt. Également, notre étude traite de la durée de vie des WSN non structurés, et se propose de chercher des solutions pour l'étendre, en particulier grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïques.

Afin de mieux comprendre les problématiques étudiées, ce chapitre présente les fonctionnements des nœuds de capteurs (WSN), la sûreté de fonctionnement et finalement l'intérêt des WSN dans la détection des feux de forêts.

### 1.1. Fonctionnement des nœuds de capteurs

Les nœuds de WSN sont équipés de différents capteurs qui peuvent varier selon leurs utilisations. Les capteurs permettent de récolter les informations nécessaires au WSN en fonction d'objectifs définis. Par exemple, les nœuds conçus pour la détection de feu de forêts sont généralement équipés de capteurs de température, d'humidité, CO, CO<sub>2</sub>, etc.

Chaque nœud dans le réseau de WSN doit connaître le(s) chemin(s) de transmission vers le nœud « sink » afin d'acheminer ses données récoltées via les divers capteurs associés (voir Vupputuri et al. 2010). Pour cela chaque nœud commence par découvrir ses voisins directs dans un rayon « radio » défini par des performances techniques (choisies par le concepteur et en fonction des technologies disponibles) et des limites environnementales (obstacles). Une fois que l'apprentissage des voisins est effectué (voir Kohvakka et al. 2009), chaque capteur commence à découvrir les chemins vers le nœud sink et une table de routage est ainsi construite (liste des chemins disponibles vers le sink). Différentes technologies existent pour le calcul de chemins, tel que les routages statiques et les routages dynamiques, via les protocoles de routages (voir Johnson et al. 2007).

Après l'apprentissage des chemins (réalisation des tables de routage), chaque nœud commence à effectuer les relevés nécessaires. Ensuite, les données récoltées sont envoyées au nœud sink en se servant des tables de routage, qui par la suite transfère ces données vers leurs destination finale (serveurs de données, centre de collectes d'informations, centre de traitements, etc.), voir Figure 2.

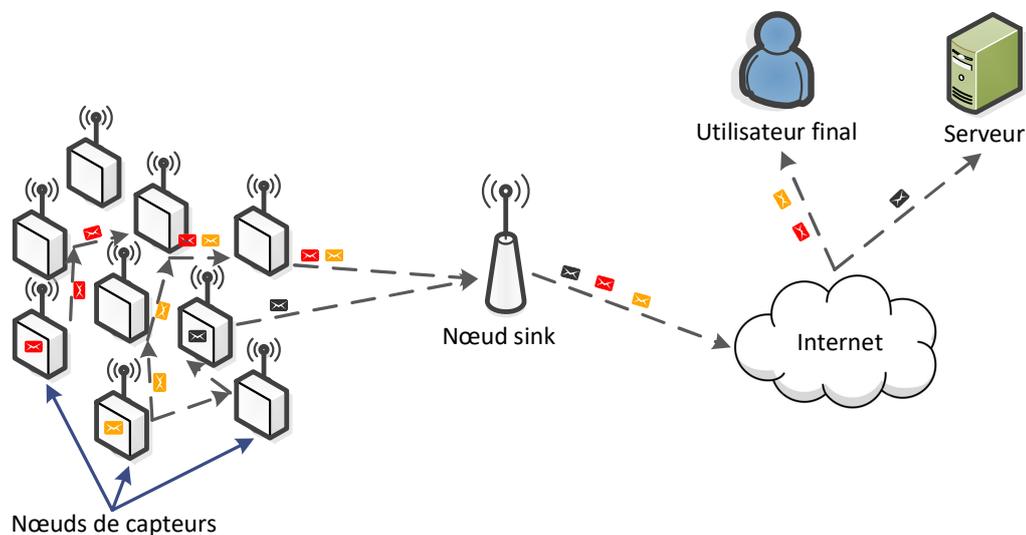


Figure 2 : Illustration de transfert de données

## 1.2. La sûreté de fonctionnement et son application aux WSN

La sûreté de fonctionnement moderne est apparue dans les années 1940 dans le domaine de l'aéronautique qui faisait face à des défaillances des systèmes électroniques. Cela a nécessité de définir les défaillances en tenant compte de la fiabilité des composants du système et les relations qui existent ou peuvent exister entre ces composants. À partir de cette approche, plusieurs méthodes ont été développées pour évaluer les risques qui peuvent surgir au sein d'un système. Ces méthodes permettent de déterminer les événements potentiels qui peuvent mener à une défaillance totale du système puis d'établir un niveau de performance et de fiabilité.

Ceci nous amène à définir la sûreté de fonctionnement d'un réseau de capteurs WSN, par l'aptitude du système WSN à remplir ces fonctions requises (la détection des événements) dans des conditions données (telles que les feux de forêt, les conditions météorologiques) (voir livre de Laprie 1996 pour plus d'information), ainsi que les concepts de bases qui y sont associés tel que : la fiabilité, la disponibilité (CEI 60050-191, NF EN 13306 (2010)) et la résilience.

### 1.2.1. La fiabilité des WSN

La fiabilité du réseau de capteurs est définie dans notre étude par l'aptitude que le système de réseaux de capteurs WSN à fonctionner dans une période de temps (CEI 60050-191, NF EN 13306 (2010)). Cela se définit par la capacité de fournir des informations conformes à un cahier des charges. En l'occurrence pour notre application, cela correspond à une détection dont la précision est suffisante (localisation et importance du phénomène) pour intervenir avec une probabilité de réussite définie.

D'après la définition précédente, on peut exprimer la fiabilité  $R(t)$  par l'expression générale suivante :

$$R(t) = P(\vec{X}(\tau) \geq \vec{X}_0(\vec{y}(\tau)), \forall \tau \in [0, t])$$

Où  $\vec{X}(\tau)$  représente le vecteur des variables mesurant les performances du système à l'instant  $\tau$  et  $\vec{X}_0(\vec{y})$  les valeurs seuil correspondantes des performances minimales permettant d'assurer les fonctionnalités définies par l'utilisateur, qui dans notre cas

concernent celles du processus de détection. La variable  $\vec{y}(\tau)$  est une variable d'environnement qui peut évoluer au cours du temps ou être stable. Elle permet de prendre en compte l'influence de processus ou de facteurs externes non « maîtrisables ». Dans le cas où le seuil est imposé par l'utilisateur la composante de  $\vec{X}_0$  correspondantes est fixée. A noter que, parfois, les variables de  $\vec{X}(\tau)$  peuvent être interdépendantes.

Par la suite, comme il n'y a pas de maintenance prise en compte, la fiabilité est identique à la disponibilité et s'exprime alors par :

$$A(t) = P(\vec{X}(t) \geq \vec{X}_0(\vec{y}(t)))$$

Celle-ci dépend de la combinaison de plusieurs variables et de seuils associés, qui dans notre cas sont (à noter que la maintenance des capteurs n'est pas prise en compte dans cette approche) :

1. La fiabilité de la communication entre capteurs, portées réelles de la communication des capteurs, représentées globalement par  $\vec{C}(t)$  associée à la distance de couverture radio maximale entre les nœuds  $d_R$  et en fonction de l'influence des conditions environnementales sur la transmission ( $y_e$ ), ces aspects permettant de définir les seuils  $\vec{C}_0(d_R, y_e)$ ;
2. La fiabilité physique des composants des nœuds (électroniques, batteries, cellules-photovoltaïque (PV),...) traduite par des seuils de défaillances,  $\vec{Y}(t) \geq \vec{Y}_0$ ;
3. La sensibilité des capteurs des nœuds et leurs seuils associés en fonction de critères prédéfinis d'après les objectifs de la détection ( $\vec{S}(t) \geq \vec{S}_0$ ) ;
4. Fiabilité de la transmission des données conformes jusqu'au sink (possibilité de données erronées ou perdues même si la transmission radio et les conditions environnementales sont correctes) que l'on peut traduire par la probabilité que l'on ait un nombre minimal d'erreurs dans les données réceptionnées par le sink par exemple, soit  $n_e(t) \leq n_{e,0}$ .

Les variables liées à la transmission de données dépendent en particulier de la position du sink et de l'énergie disponible au sein du réseau. L'influence liée à la configuration du réseau concerne les chemins d'accès depuis les autres capteurs

jusqu'au sink, l'énergie disponible étant elle-même influencée par les transmissions via ces chemins (voir détails au § 3.4).

Dans ce cadre, on peut exprimer la fiabilité ou disponibilité comme suit :

$$A(t) = P(\vec{C}(t) \geq \vec{C}_0(d_R, \gamma_e), \vec{Y}(t) \geq \vec{Y}_0, \vec{S}(t) \geq \vec{S}_0, n_e(t) \leq n_{e,0})$$

À partir de ces éléments, on peut ainsi définir la fiabilité d'un WSN. Toutefois, diverses définitions existent et sont présentées au § 2.2. Une définition de la fiabilité d'un WSN (et d'un WSN équipé de cellules photovoltaïques (PV-WSN)) non accessible en milieu naturel est proposée dans le cadre de nos travaux au § 3.5 (et § 4.6), ainsi que dans le cadre de la détection d'un feu de forêt (§ 5.6).

### 1.2.2. La disponibilité

La disponibilité se définit par le fait que le réseau WSN (ou bien une partie à condition de respecter la couverture de la zone de surveillance) soit disponible et en état de fonctionnement à un instant donné. Dans les travaux proposés, le réseau est supposé inaccessible. Pour cette raison, on ne tient pas compte des activités ou opérations de la maintenance. Ainsi, la disponibilité et la fiabilité coïncident.

### 1.2.3. La résilience

La résilience se caractérise par la capacité de se remettre en état fonctionnel après une défaillance (Di Pietro et al. (2011), Velásquez-Villada et al. (2013) et Friginal et al. (2014)). En effet, après chaque défaillance de nœuds, le système se remet en mode de rétablissement pour déterminer les chemins et faire en sorte de se mettre en mode opérationnel (il s'agit donc d'une forme de reconfiguration). Cette résilience peut être établie en s'appuyant sur les paramètres suivants :

1. La procédure de maintenance des chemins en trouvant des chemins alternatifs en cas de pannes ;
2. La capacité de retransmission de données perdues ;
3. La fiabilité de la redondance avec pour chaque nœud plusieurs chemins différents possibles vers le sink.

De plus, la résilience peut être caractérisée par le fait qu'un réseau de capteurs équipé de cellules photovoltaïques, peut se remettre en mode fonctionnel après une défaillance générale due aux épuisements des batteries durant la nuit, cela grâce aux recharges le jour. Cette hypothèse n'est pas considérée dans nos études, mais peut être intégrée au modèle proposé (cf. § 6.4).

### 1.3. Intérêt des WSN pour les feux de forêt

L'étude des feux de forêt a fait l'objet de nombreux travaux depuis longtemps (Henri Amouric (1992), Daniau (2008)) et ne cesse d'évoluer vu leur impact potentiel sur les activités humaines, les biens et les personnes, l'environnement, la faune et la flore, et en particulier les changements sur l'écosystème. L'utilisation des tours de surveillance était une technique souvent utilisée, ainsi que les satellites. Cependant, ces techniques ne permettent pas d'avoir une vue précise et précoce compte tenu de l'erreur d'observation humaine potentielle. De plus, dans le cas d'obstacles tels que les nuages, brouillards, ... les images satellites ne peuvent détecter la présence de feu du moins être suffisamment précises. C'est pourquoi les réseaux de capteurs constituent une solution qui peut être complémentaire voire alternative aux solutions habituellement déployées. En particulier, la précision de l'information sur la présence et la propagation de feu de forêt, la rapidité d'alerte, et un faible coût global sont autant d'atouts pour les réseaux de capteurs. Reste toutefois à en évaluer la fiabilité...

### 1.4. Description succincte de la thèse

Après cette introduction générale, ce mémoire est constitué de quatre chapitres suivis d'une conclusion générale. Le deuxième chapitre présente l'état de l'art accompagné d'un positionnement de nos travaux. Le troisième chapitre présente une modélisation initiale des WSN avec l'évaluation de la fiabilité associée et un premier cas d'application de base. Une intégration de mini cellules photovoltaïques dans le modèle précédent est proposée dans le chapitre quatre avec l'évaluation de la fiabilité des PV-WSN. Plusieurs cas d'application sont alors présentés. Le chapitre cinq est consacré à l'intégration d'un modèle de propagation de feu de forêt dans le cadre de l'utilisation de PV-WSN en apportant des améliorations sur l'évaluation de la performance des PV. Finalement une conclusion générale est proposée avec des perspectives.



---

## Chapitre 2 : État de l'art

---



## 2. État de l'art

### 2.1. Introduction

Cette partie présente les différents travaux pertinents publiés concernant les différents aspects traités dans cette thèse comme la fiabilité des réseaux de capteurs et les définitions utilisées pour la fiabilité dans ce contexte. Celles-ci peuvent se baser sur différents critères comme :

- La fiabilité des chemins entre les nœuds de capteurs et le nœud de station de base « sink »,
- La fiabilité d'information récoltée par les nœuds de capteurs,
- La fiabilité de détection,
- La fiabilité de transmission, etc.

De plus, les travaux qui nous intéressent traitent de l'alimentation en énergie des nœuds de capteurs, et de la potentielle utilisation de différentes sources d'énergie alternatives, durables et renouvelables. Également, l'état de l'art traite de la détection des feux de forêts, les différents algorithmes qui traitent la prédiction de la présence du feu, ainsi que la propagation de feux de forêts. Cependant, l'état de l'art sur les modèles de propagation de feux de forêt est traité au chapitre 5.

Comme précisé dans l'introduction (cf. § 1.2.1), une définition concrète de la fiabilité d'un réseau adaptée à notre problématique est nécessaire compte tenu de la multitude de définitions présentées dans la littérature. Ensuite, il est essentiel de trouver une approche réaliste et efficace pour être en mesure d'améliorer les performances et la durée de vie des WSN (et par conséquent leur fiabilité). Enfin, la présence d'incendie et sa détection s'avèrent très impactant sur le réseau du point de vue de son fonctionnement et de sa robustesse. Pour cette raison, il est nécessaire de s'intéresser à sa fiabilité en présence du feu de forêts.

## 2.2. Fiabilité des réseaux de capteurs

Plusieurs travaux traitant de la fiabilité et de la durée de vie des réseaux de capteurs ont été publiés. Ces travaux relient la fiabilité des réseaux de capteurs à plusieurs aspects comme par exemple : la disponibilité d'au moins un chemin entre un nœud et le sink, la maintenance des chemins en trouvant des chemins alternatifs en cas de pannes, le choix de la position du sink afin de maximiser la fiabilité de réseaux, la fiabilité de connectivité entre 2 nœuds, la probabilité d'une communication réussie entre tous les nœuds, la probabilité que les nœuds opérationnels puissent communiquer, la capacité de corriger les données corrompues, la capacité de retransmission de données perdues, la fiabilité de la détection des événements et la quantité d'énergie associée consommée. Cependant, la fiabilité dans les réseaux de capteurs et son impact sur sa durée de vie est rarement étudiée de façon détaillée avec la considération des effets physiques (dégradation, défaillance et la perturbation de l'énergie due au phénomène environnementaux) dans un contexte concret. Cependant, il existe plusieurs méthodes qui peuvent être utilisées afin de mieux évaluer la fiabilité des réseaux de capteurs telles que : les processus stochastiques, les diagrammes de décision binaire (DDB), les réseaux de Petri stochastiques (RdPS), les automates à état fini, la méthode de fonction génératrice universelle (UGFM). Ces méthodes sont présentées au paragraphe § 3.5.3.

Xiao et al. (2009) ont défini la fiabilité dans un réseau de capteurs (WSN) par la présence d'au moins un lien (chemin) entre la station de base (sink) et un nœud de capteur. L'article montre que si ce lien est perdu alors toutes les ressources des capteurs seront perdues. La considération de défaillances de causes communes est prise en compte (CCF), en relation avec les événements environnementaux comme les feux de forêts. Ensuite, les auteurs proposent une solution afin d'évaluer la fiabilité de réseaux de capteurs (WSN) en utilisant un algorithme de diagramme de décision binaire d'ordonnancement amélioré (EOBDD). Ceux-ci analysent les événements de causes communes. Un exemple de tel événement est le feu de forêt pour lequel le réseau sera structuré selon un graphe stochastique d'après le modèle d'AboElFotouh et al. (2005) qui a été adopté par les auteurs et qui transforme un WSN en un graphe stochastique non orienté. Cependant, l'introduction des cellules photovoltaïques ou bien la défaillance des composants physiques ou encore la propagation des feux de forêt ne sont pas traités dans cette étude.

Al-Habashneh et al. (2011) ont proposé une solution pour améliorer la fiabilité d'un réseau de capteurs sans fils (WSN) par l'ajout d'un mécanisme de maintenance de chemin. Ce mécanisme consiste à trouver un chemin alternatif du nœud de capteurs vers le nœud « sink » si le chemin principal devient défaillant (défaillance d'au moins un capteur intermédiaire). Ainsi, la fiabilité est considérée comme un pourcentage des nœuds actifs connectés au nœud « sink » sur l'ensemble des nœuds actifs sachant que la quantité de trafic émise est considérée similaire pour tous les nœuds. Ce travail se positionne dans la continuité d'un travail antérieur qui traitait de trois mécanismes (P-CSMA, PHS-CSMA et S-TDMA) dans la détection de feux de forêts (Al-Habashneh et al. (2009)). Ceci consiste à faire du routage dynamique (re-routage « re-détermination des chemins vers le sink »), une technique similaire étant utilisée dans nos travaux qui s'appuient sur l'algorithme de Dijkstra pour le calcul des chemins et la ré-détermination des chemins en cas de défaillance de nœuds (cf. § 3.3).

Hassan et al. (2014) ont proposé une solution pour trouver le meilleur emplacement pour la station de base (sink) afin de maximiser la fiabilité d'un chemin d'accès et de réduire le flux de messages ; ceci dans le but d'économiser l'énergie des nœuds de capteurs pour aboutir à un réseau plus fiable. Une méthode de programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP) a été utilisée afin de trouver le meilleur emplacement pour le « sink » pour un réseau de capteurs à petite échelle, ainsi qu'un algorithme génétique pour un réseau de capteurs de grande échelle. En effet, le choix de l'emplacement du nœud de station de base est très important pour la prolongation de la durée de vie du réseau de capteurs, le sink étant l'entrée/sortie initiale et unique du réseau. En s'inspirant de cette étude, ceci nous a permis de bien définir l'emplacement de la station de base « sink » (cf. § 3.3).

Dans le contexte du réseau mobile, Cook & Ramirez-Marquez (2008) ont proposé une solution basée sur les réseaux sans fils ad-hoc constitués de clusters d'un réseau mobile (MAWN), déployés dans des applications avec des contraintes sur les ressources de réseaux telles que la bande passante et l'énergie. En effet, l'hypothèse que certains nœuds ne sont pas capables de communiquer directement entre eux dans un tel réseau est prise en compte. La fiabilité est définie à partir de trois types de contributions : fiabilité de deux-terminaux « 2TR » (définie par la probabilité de connectivité entre deux nœuds « source et destination »), fiabilité de tout-terminal « ATR » (définie par la probabilité d'une communication réussie entre tous les nœuds) et la fiabilité de tous les nœuds opérationnels « AoTR » (définie par la probabilité que les nœuds opérationnels

puissent communiquer). C'est pourquoi une solution basée sur la méthode de simulation de Monte Carlo est proposée afin de formuler et analyser la fiabilité des réseaux basés sur les clusters (MWAN). Les résultats montrent que plus le réseau est grand (150 nœuds) plus l'ATR devient négligeable, alors que l'AoTR montre une contribution importante. Cette dernière est justifiée par le fait que plus il y a des nœuds de capteurs plus il y a de chemins disponibles et donc le réseau devient plus fiable. Cette étude traite de l'évaluation de la fiabilité du réseau de capteurs, cependant, elle ne considère pas les défaillances des composants électroniques, qui fait partie de l'évaluation de fiabilité que nous proposons.

Un modèle intéressant a été proposé par Yeh (2008). Un algorithme est proposé afin de résoudre les problèmes de fiabilité dans un réseau de capteurs multi-états (MNN). Ceci peut être appliqué pour calculer la fiabilité de réseaux de capteurs acycliques multi-états (AMNN). La méthode de fonction génératrice universelle (UGFM) a été étudiée afin d'évaluer la connectivité d'un capteur à tous les autres dans le réseau. Une étude comparative sur le temps de calcul reste à faire pour établir les avantages de la méthode « UGFM » proposée. En outre, plus d'expérimentations doivent être réalisées afin de prendre en considération les réseaux à grande échelle avec un nombre important d'états. Ainsi, on pourrait déterminer le temps de calcul nécessaire par l'UGFM pour évaluer la fiabilité de réseaux de dimension réaliste. Également, les effets dynamiques tels que la corrélation entre consommation d'énergie et défaillances des composants physiques restent une difficulté majeure pour l'utilisation de ce modèle.

Une proposition de Mahmood et al. (2015) est basée sur une combinaison de la fiabilité de retransmission de données et la redondance. La technique de retransmission s'appuie sur le concept de la récupération des paquets perdus par le biais de retransmissions de données afin d'assurer une meilleure fiabilité de transmission. La technique de redondance consiste à récupérer les bits perdus dans un paquet en utilisant un schéma de codage adapté. Ainsi, en corrigeant des bits perdus ou corrompus dans un paquet, l'encombrement des données dues à la retransmission de paquets sera réduit. Ces deux méthodes traitent donc uniquement de la fiabilité de transmission et de la fiabilité des données dans des réseaux de capteurs, mais la fiabilité des composants physique des capteurs n'est pas considérée. Or, de telles défaillances physiques peuvent avoir des conséquences très lourdes sur le réseau de capteurs (perte d'une partie des transmissions du réseau ...) et affecte directement la fiabilité de réseau.

La proposition de Bouabdallah et al. (2013) considère que la fiabilité d'un réseau de capteurs dépend du niveau de la fiabilité de la détection des événements et la quantité d'énergie associée consommée. Ils se sont concentrés sur l'amélioration des performances en utilisant une métrique de routage qui reflète la qualité des liens en termes de fiabilité de détection ainsi que la consommation énergétique relative. Cette métrique est spécifiée par l'exploitation de la corrélation spatiale entre les nœuds de capteurs déployés et l'agrégation des informations relatives à la détection au niveau de nœuds intermédiaires. En effet, en fonction de nombre de nœuds par chemin la capacité de détection ainsi que la consommation énergétique sont évalués. De plus, un lien entre deux nœuds peut posséder plusieurs valeurs de métrique selon le nombre de chemins qui utilise ce lien. Plus le nombre de nœuds est important, plus la détection s'améliore et la consommation d'énergie est plus élevée aussi. Ainsi le protocole de routage (algorithme de Fast-Dijkstra) a été adapté pour intégrer cette métrique et choisir les meilleurs chemins en termes de détections. La solution proposée ne prend pas en compte la fiabilité du réseau en termes de défaillances physique des nœuds de capteurs.

Wang et al. (2014) a illustré la fiabilité et la durée de vie d'un nœud de capteur sans fil par le biais de trois scénarios afin de contribuer à une analyse de fiabilité précise d'un réseau de capteurs. Ces scénarios sont définis en fonction des modes de nœud du capteur (actif ou repos) et du mécanisme d'alternance entre les modes. Les trois scénarios utilisés sont définis selon le protocole MAC : protocole MAC traditionnel (où les nœuds sont toujours en mode actif et la consommation d'énergie est constantes, ainsi que la fiabilité dépend uniquement de la disponibilité d'énergie dans le nœud), le S-MAC (où les nœuds passent de mode repos au mode actif, ainsi qu'un cycle est déterminé en fonction des deux périodes « repos et actif » qui sont fixes), et le T-MAC (similaire au S-MAC avec une différence que les périodes de temps de chaque mode sont variables). Les résultats numériques montrent que le scénario 3 est le plus fiable et le scénario 1 est le moins fiable. Dans cette étude, la durée de vie d'un nœud de capteur dépend uniquement des batteries, tandis que tous les autres aspects sont généralement considérés comme fiables dont en particulier les composants électroniques des capteurs.

Pour conclure, plusieurs études ont traité de la fiabilité des réseaux de capteurs sans fils en utilisant différentes définitions. Ces définitions (Tableau 1) bien qu'importantes vis-à-vis du fonctionnement du réseau, relèvent plus de la qualité de

service et de l'information que de la fiabilité complète du réseau (voir § 1.2.1). En particulier, cela est dû au fait qu'aucune de ces études ne traite de la fiabilité des composants physiques des nœuds de capteurs qui a une influence directe sur la durée de vie du réseau de capteurs, sa fiabilité et sa robustesse (voire résilience, terme parfois utilisé dans le domaine des réseaux).

Auteurs	Définition de la fiabilité
Mahmood et al. (2015)	La capacité de retransmissions de données perdues
	La capacité de correction des bits dans des messages corrompus
Xiao et al. (2009)	La disponibilité d'au moins un chemin entre un nœud et le sink
Al-Habashneh et al. (2009)	L'amélioration de la fiabilité de réseau par l'ajout d'un mécanisme de maintenance de chemins
Bouabdallah et al. (2013)	La fiabilité de la détection des événements
	La quantité d'énergie associée à la détection consommée
Hassan et al. (2014)	Influence de la position du sink sur la fiabilité
Cook & Ramirez-Marquez (2008)	fiabilité de deux-terminaux « 2TR » (définie par la probabilité de connectivité entre deux nœuds « source et destination ») et fiabilité de tout-terminal « ATR » (définie par la probabilité d'une communication réussie entre tous les nœuds) et la fiabilité de tous les nœuds opérationnels « AoTR » (définie par la probabilité que les nœuds opérationnels puissent communiquer)

Tableau 1 : Définitions de la fiabilité de WSN dans la littérature

### 2.3. Réseaux de capteurs alimentés en énergie photovoltaïque

Plusieurs études traitent des réseaux de capteurs (WSN) en prenant en compte une source d'énergie alternative telle que l'énergie renouvelable. Cet aspect est important surtout du point de vue de l'extension de la durée de vie des réseaux de capteurs déployés dans des milieux naturels avec l'impossibilité de fournir à chaque nœud une source continue d'énergie - par exemple à l'aide d'une unique source d'énergie (deux batteries par exemple) fournie initialement. Certaines études tiennent compte de la conservation de l'énergie ou bien de l'économie de sa consommation en améliorant les protocoles utilisés dans le réseau de capteurs ou bien ses propriétés techniques (comme par exemple, Bergonzini et al. 2009, Thayananthan & Alzranhi 2014, Basurra et al. 2015).

Jie et al. (2012) ont proposé un système de recharge d'énergie qui peut être introduit dans un réseau de capteurs sans fils en utilisant l'énergie solaire avec cellules photovoltaïques. Leur étude s'est concentrée sur la composition électronique du système de recharge afin d'obtenir un niveau fiable de recharge de batteries. Ce système exploite un supercondensateur et un stabilisateur de tension pour le stockage de l'énergie collectée. Cependant, le fonctionnement des réseaux de capteurs n'a pas été étudié ni la fiabilité associée. En effet, le système de stockage d'énergie utilisé (le supercondensateur) pourrait être une solution alternative des batteries rechargeables, cependant elle nécessite une étude approfondie qui englobe une évaluation de son efficacité, sa fiabilité physique, sa durée de vie, et son coût vis-à-vis des batteries rechargeables. Dans notre étude, le système classique avec batteries rechargeable est la seule solution traitée et utilisée car elle reste la plus simple et mieux connue en termes de fiabilité, efficacité et durée de vie.

La conservation d'énergie dans les régions « chaudes » et la perte par chaleur ont été étudiés par Thayananthan et al. (2014). Cette étude portait sur l'efficacité énergétique dans le fonctionnement du protocole de routage combiné à l'énergie solaire pour la collecte énergétique. De plus, la conservation d'énergie a été identifiée sur trois niveaux :

- l'énergie dissipée qui concerne l'utilisation par des nœuds non-actifs (non émetteurs d'énergie) et par les nœuds actifs (émetteurs d'énergie) selon la distance entre les nœuds,

- l'énergie consommée par les calculs des données (tel que : latence, traitement de données, transmission, réception,...),

- le choix de protocoles de routage permettant d'améliorer l'efficacité énergétique.

Les auteurs proposent des méthodes de conservation d'énergie en se basant sur l'identification des ressources consommatrices d'énergie au sein de la couche physique du nœud de capteurs ainsi que dans la couche logique. Cependant, la quantité d'énergie qui peut être collectée par l'énergie solaire dépend principalement de l'orientation des cellules photovoltaïques et d'autres composantes (telles que : la taille des panneaux photovoltaïques ou bien le stabilisateur de voltage, etc.) qui n'ont pas été considérés dans ces travaux.

Une investigation sur l'énergie solaire a été menée par Gakkestad et al. (2011) pour la récolte d'énergie dans différentes zones en Europe. L'irradiation solaire pendant plusieurs saisons a été examinée afin d'évaluer au mieux la quantité d'énergie qui peut être récoltée par une cellule photovoltaïque. La taille des panneaux photovoltaïques qui a été employée correspond à la taille d'une carte de crédit. Ces panneaux ont été implémentés à grande échelle dans cette étude. Cela correspond typiquement à l'utilisation de l'énergie solaire et la taille des panneaux photovoltaïques proposés dans nos travaux. En effet, cette dimension s'avère très pratique et applicable pour le type de capteurs proposé (Tmote Sky). Cependant, la fiabilité et le fonctionnement des réseaux de capteurs manquent dans l'étude de Gakkestad et al.

Le photovoltaïque est considéré comme une solution simple à appliquer et à monter dans les réseaux de capteurs et il ne demande pas ou peu d'interventions humaines après son déploiement. De plus, il représente une source d'énergie renouvelable assez fiable et respectueuse de l'environnement. En résumé plusieurs études ont pris en compte l'énergie renouvelable, et plus particulièrement l'énergie photovoltaïque. Plusieurs méthodes de récoltes d'énergie solaire dans les réseaux de capteurs sans fils ont ainsi été développées. Cependant, la fiabilité des composantes physiques n'a pas été étudiée pour les réseaux de capteurs sans fils équipés de systèmes photovoltaïques dans les milieux naturels tels que les forêts. Ainsi, l'amélioration de l'évaluation de la fiabilité des réseaux de capteurs sans fils équipés de panneaux photovoltaïques combinés avec tous les autres éléments qui peuvent produire leurs défaillances, est un des objectifs dans nos études.

## 2.4. Réseaux de capteurs pour la détection de feux de forêt

De nombreuses modèles de propagation de feux de forêt existent (cet aspect est détaillé dans le chapitre 5) et des études traitent des WSN dans le contexte des feux de forêt. En effet, les solutions basées sur le WSN permettent de détecter les feux de forêt ainsi que de donner des informations précises sur sa propagation, d'une manière efficace et rapide (cf. § 1.3). Dans ce contexte, plusieurs aspects sont traités tels que la prédiction de la propagation des feux de forêt et la détection des incendies de forêt. Ainsi, ce paragraphe présente des travaux sur des solutions algorithmiques et logicielles ainsi que des solutions techniques pour traiter la détection et la prédiction de la propagation des feux de forêt.

### 2.4.1. Solutions algorithmiques et logicielles

Vijayalakshmi et al. (2016) ont proposé une étude d'analyse comparative pour la détection d'incendie dans les WSN entre l'algorithme DST qui est basé sur la théorie de Dempster-Shafer (1968) et un nouvel algorithme utilisant des méthodes de comparaison. L'algorithme basé sur une méthode de comparaison est simple à mettre en œuvre mais avec moins de performances que l'algorithme DST plus complexe dans sa mise en œuvre. Cependant, les auteurs n'ont pas tenu compte de la propagation des feux de forêt ni de l'influence de l'environnement tel que le vent, la végétation, etc., qui ont un impact majeur sur la propagation et la détection des incendies.

Méndez-Garabetti et al. (2016) ont proposé une solution pour améliorer les capacités de la méthodologie d'analyse statistique évolutive (ESS) dans la modélisation de la propagation des feux de forêt avec une méthode de réduction de l'incertitude. De ce fait, l'interaction de l'analyse statistique, du calcul parallèle et des algorithmes évolutionnaires parallèles a permis à ESS d'améliorer la qualité de la prédiction du feu de forêt (pour plus d'information voir Bianchini et al. (2010)). L'auteur a intégré dans sa solution un modèle en îlots pour améliorer la qualité de la prédiction des feux de forêt. Il s'agit de découper la forêt en plusieurs zones (îlots) et d'appliquer la solution sur chaque îlot. Ce modèle, bien qu'il paraisse proche de nos travaux en considérant des multizones (îlots) dans le traitement des feux de forêt. Cependant, il ne considère pas les aspects réseautiques tel que les routages, les pertes de données, la retransmission. De plus, les défaillances physiques n'apparaissent pas dans cette étude. Tous ces

paramètres, ainsi que d'autres paramètres (l'intégration de cellules photovoltaïques, pourcentage de couverture réseau par zone,...) ont été traités dans nos travaux.

Moshtaghi et al. (2014) ont structuré leur démarche en trois étapes. D'abord, ils s'intéressent à l'estimation de la limite de décision globale pour la détection d'anomalie robuste en exploitant deux techniques : l'ellipsoïde de volume minimum couvrant l'ensemble des ellipsoïdes de différents capteurs, et l'inégalité de Vysochanskij-Petunin (pour plus d'information voir Vysochanskij et al. (1980)). La deuxième étape est caractérisée par l'évaluation de la performance des deux modèles considérés précédemment avec deux cas réels. L'étape finale de ce travail propose un modèle adaptatif pour maintenir la limite de décision adaptée à la détection des anomalies. Cependant, les auteurs ont supposé que tous les nœuds « capteurs » peuvent communiquer directement avec la station de base et ne tiennent pas compte de la connexion perdue en raison d'un obstacle ni des protocoles de routage. Aussi, pour contourner le protocole de routage, l'utilisation de plusieurs stations de base reste nécessaire pour garantir la connectivité avec les nœuds sans fil (qui ont une zone de couverture limitée). Ainsi, dans la détection des incendies de forêt, en particulier dans les zones naturelles non accessibles ou dangereuses, la solution proposée est impraticable. Également, la notion de perte de données n'est pas prise en compte dans cet article. Pourtant, cet aspect pourrait également avoir un impact sur l'efficacité de la détection par le réseau et sa durée de vie.

Díaz-Ramírez et al. (2012) ont proposé une évaluation de deux algorithmes de détection des incendies de forêts basés sur des techniques de fusion d'informations (cf. Nakamura et al. (2005)). Le premier algorithme utilise une méthode de seuil et des nœuds équipés de capteurs de température, d'humidité et de lumière. En se basant sur de nombreuses collectes de données des paramètres énumérés ci-dessus et en comparant ces valeurs avec des seuils prédéfinis, les auteurs prédisent l'apparition d'un feu. Le deuxième algorithme est basé sur la théorie de Dempster-Shafer déjà évoquée précédemment (voir Vijayalakshmi et al. 2016).

Ces études s'avèrent complémentaires à notre domaine d'intérêt qui est l'évaluation de la fiabilité de réseau de capteurs dans la présence du feu de forêt. Bien que le traitement d'informations collectées par les capteurs, afin de mieux évaluer la détection du feu ou bien l'évolution de la propagation, ne soient pas traités directement

dans nos recherches, cela donne des orientations utiles pour des travaux complémentaires dans le futur. De plus, les méthodes qui permettent de collecter les informations donnent une idée de l'organisation des capteurs nécessaire à la détection. Par exemple, cela oriente les hypothèses sur les nombres de détecteurs nécessaires, par zone en particulier (aspects traités au § 5.5).

Les solutions techniques qui traitent la détection et la prédiction de la propagation des feux de forêt sont présentées dans la section suivante (voir § 2.4.2).

#### 2.4.2. Solutions techniques

Un exemple concret de l'utilisation de WSN dans la détection de feux de forêt a été proposé par Wang et al. (2015) En effet, ils ont proposé une solution pour le système d'alerte de détection des incendies de forêt basé sur les WSN en utilisant plusieurs capteurs d'humidité, de température, de concentration de CO et de CO<sub>2</sub> et de capteurs de flamme, équipés d'antennes Zigbee pour la transmission de données au nœud « sink ». Le nœud récepteur est également proposé comme passerelle des nœuds de surveillance vers un serveur de données. En plus du rôle de nœud « sink », il peut diffuser des informations sur la longitude et la latitude du nœud de surveillance ainsi que la vitesse et la direction du vent vers le serveur. Le système a été déployé avec dix nœuds de surveillances équipés de piles et un nœud « sink » dans une zone circulaire de rayon 1000 mètres. Ceci correspond dans notre étude à la supposition, dans un premier temps, de la transmission de températures détectées.

Une étude sur divers bruits provoqués par le feu a été proposée par Khamukhin et al. (2016) afin d'identifier un paramètre permettant de déterminer le type de feu de forêt. La solution est basée sur l'analyse spectrale du bruit des différents feux de forêts à l'aide de la transformée de Fourier et Matlab pour le développement de solutions. Les enregistrements de bruits de feux naturels ont été pris à partir de sources ouvertes disponibles sur internet (Comparisonics Corp. 2017, sounddogs.com 2017). La vidéo d'accompagnement leur ont permis de pré-classifier le feu à vue. Les auteurs expliquent que la ligne de tendance du spectre de puissance d'un paramètre de bruit de feu de forêt (qui aide à déterminer le type d'incendie de forêt) avec l'alarme détectée par un autre système (WSN) permet aux pompiers d'évaluer immédiatement le tracé de

propagation. En effet, l'utilisation de WSN dans l'évaluation de la propagation de feu de forêt s'avère incontournable.

Bayo et al. (2010) a proposé une solution de développement de nœuds de réseau de capteurs sans fil pour surveiller de grandes surfaces de forêt pour la détection et la prévention des incendies. Il propose des nœuds sous basse tension de faible puissance constitués de composants électroniques tels que l'émetteur-récepteur XBee microcontrôleur et de nombreux capteurs (humidité, température, pression, la foudre, l'humidité du sol, Sensirion SHT11) et deux batteries. Cependant, la solution proposée n'a pas été confrontée au processus de routage ni aux phénomènes environnementaux qui pourraient affecter la durée de vie du réseau.

En conclusion, les travaux qui traitent de la détection et/ou de la propagation des feux de forêts ne cessent d'évoluer. Des techniques et des logiciels ont été développés afin de mieux évaluer la détection des feux de forêt ainsi que leur propagation. De plus, des cas d'applications ont été effectués avec l'utilisation de WSN afin de détecter les feux de forêt. Ces travaux nous ont aidés à mieux intégrer l'effet des feux de forêts sur les réseaux de capteurs ainsi que de prendre en considérations des phénomènes environnementaux.

## 2.5. Conclusion

Les travaux présentés dans cette section portent sur la fiabilité des réseaux de capteurs et les différentes définitions de fiabilité utilisées pour les WSN (voir § 2.2 Tableau 1).

Cependant, aucune de ces études n'a pris en compte la fiabilité des composants physiques des nœuds de capteurs (microprocesseur, batteries, antenne radio, capteurs, cellules photovoltaïque, stabilisateur de voltage,...) de façon complète dans le cas du réseau en mode de fonctionnement normal voire dégradé (cas de détection tardive dans la vie du réseau ou en situation de propagation d'incendie par exemple).

En la matière, le travail le plus « intégrateur » reste celui qui prend en compte la fiabilité de connectivité entre 2 nœuds, la probabilité d'une communication réussie entre tous les nœuds et la probabilité que les nœuds opérationnels puissent communiquer, à savoir l'étude proposée par Cook & Ramirez-Marquez (2008).

Également, des travaux ont introduit l'énergie renouvelable (telle que les cellules photovoltaïques, les éoliennes, etc.) pour prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs. En effet, l'utilisation des cellules photovoltaïque présente plus d'avantage sur les autres solutions énergétiques en termes simplicité d'intégration dans les nœuds de capteurs, en termes de coûts, en termes de fonctionnement et de maniabilité. D'autres travaux s'orientent plus sur l'efficacité énergétique et l'utilisation de l'énergie dissipée par les équipements en mode de fonctionnement ou par les nœuds non actifs (ca photovoltaïque). Cependant, l'évaluation de la fiabilité des composants électroniques n'a pas été traité dans ces travaux malgré des composants physiquement « sensibles » (tels que les batteries rechargeable, les stabilisateurs de voltages,..) et impactant la durée de vie de tels réseaux et par conséquence leur fiabilité.

Enfin, les travaux relatifs à la détection de feux de forêts ainsi que sa propagation et ceux liés à la détermination de son type, n'ont pas considéré la fiabilité, ni l'effet des dégradations sur les capacités de détection ou la durée de vie des réseaux de capteurs dans des tels circonstances. En effet, la durée de vie de réseaux de capteurs ou bien leur fiabilité s'avèrent incontournables pour garantir le maintien de bon fonctionnement du réseau et sa continuité du service ainsi que mieux comprendre ses limites de performances tout au long de son usage y compris en cours voire après la propagation d'un incendie.



---

# Chapitre 3 : Modélisation des réseaux de capteur et évaluation de la fiabilité (WSN)

---



## 3. Modélisation des réseaux de capteur et évaluation de la fiabilité (WSN)

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, un modèle est proposé pour évaluer la fiabilité d'un WSN. Cette dernière nécessite le calcul de la fiabilité des nœuds de capteurs dépendant des défaillances physiques (§ 2.1), de la consommation énergétique (§ 3.4), et de prendre en compte le fonctionnement et le dysfonctionnement des transmissions d'information au sein du réseau (§ 3.3).

Comme indiqué dans le chapitre « État de l'art » au paragraphe « Fiabilité de réseau de capteur », la fiabilité de réseau de capteurs est rarement étudiée en tenant compte simultanément de la fiabilité des capteurs d'une façon réaliste (fiabilité des composants électroniques et fiabilité de transmission) et de la consommation d'énergie. Les études généralement se concentrent sur : la réduction de la consommation énergétique, la capacité de détection des événements (feu en particulier), l'utilisation des informations et les améliorations au niveau des communications (fiabilité des données). La fiabilité des réseaux de capteurs dans d'autres études se base sur le facteur énergétique et le nombre acceptable de capteurs capables de détecter des événements et de transmettre l'information à la station de base (sink). L'optimisation de la détection des événements et de la communication des nœuds de capteurs est considérée comme un facteur principal pour augmenter la fiabilité du réseau de capteurs.

### 3.2. Problématique étudiée et hypothèses

Les travaux proposés dans ce chapitre consistent à évaluer la fiabilité et la capacité de détection de réseau de capteurs avec l'utilisation du protocole de routage « Dynamic Source Routing » (DSR) (voir Tarique et al. 2009, Li et al. 2005) étant donné que ce protocole de routage est le plus utilisé et standardisé pour les réseaux de capteurs. Ainsi, le processus de communication utilisé est élémentaire, chaque capteur transmettant ses données indépendamment des autres capteurs.

Plusieurs hypothèses ont été prises en compte pour évaluer la fiabilité de réseau de capteurs. Les hypothèses ont été divisé en deux types : hypothèses non restrictives (facile à lever en fonction des besoins d'étude), et hypothèses restrictives (qui nécessitent de travaux étendus et/ou des améliorations dans la modélisation/simulation proposées). Les principales hypothèses sont :

1. Une distribution aléatoire non-structurée des nœuds de capteurs dans une zone géographique prédéterminée avec une seule station de base « sink », l'ensemble étant considéré comme un cluster. À noter que l'intégration d'une répartition structurée est faisable mais ceci devient compliqué dans le cas de nœuds mobiles ;
2. Un cluster couvre une zone rectangulaire (typiquement un kilomètre carré). Il est possible de changer la forme de la zone en cas de géométrie régulière mais plus difficile pour les formes non régulières, cela n'impactant pas le modèle générique mais la simulation ;
3. Un nombre fixe de nœuds de capteurs dans une zone géographique fixe (cluster) avec une distance de couverture maximale fixe. Par exemple, on prendra 100 nœuds dans une zone de 1 km<sup>2</sup> avec une couverture réseau omnidirectionnel de 120 mètres. Il est possible de changer le nombre de nœuds par cluster, une adaptation du simulateur est nécessaire afin de prendre en compte l'auto changement de la couverture de réseau pour chaque capteur et de la relier à la puissance et les positions des capteurs. Cependant, dans ce cadre, les capteurs mobiles sont difficiles à prendre en compte ;
4. Un seul protocole de routage est implémenté dans le simulateur : Dynamic Source Routing Protocol (DSR). L'utilisation d'autres protocoles de routage nécessite une implémentation spécifique dans le simulateur. Des études ultérieures pourraient permettre d'étudier l'influence des protocoles sur la durée de vie du réseau par exemple ;
5. Une unique technologie pour tous les capteurs a été considérée pour la modélisation et les simulations : Ultra faible puissance IEEE 802.15.4 Tmote Sky. Le mélange de plusieurs technologies nécessite certains changements dans le modèle et le simulateur. Du point de vue du modèle, cela nécessite de définir des classes différentes de capteurs, mais la difficulté est leur répartition. En effet, celle-ci étant aléatoire, il est nécessaire de définir une loi de répartition ce qui apporte une complication supplémentaire. Du point de vue de la simulation, c'est plus facile, toutefois en fonction de la loi de répartition à exploiter par la technique Monte Carlo des calculs plus longs et compliqués peuvent être nécessaires ;
6. Les conditions météorologiques et environnementales difficiles sont prises en compte pour l'évaluation de la fiabilité des capteurs en les supposant stables ou cycliques comme pour la température. En revanche, les changements de

- température et d'humidité ne sont pas considérés dès lors qu'il s'agit d'influences ponctuelles climatiques. De même, les perturbations ponctuelles dues à l'environnement naturel ne sont pas prises en compte. Cependant, l'isolement des capteurs dû à la végétation peut être intégré ;
7. La détection et la propagation de feu de forêt a été prise en considération (voir § 5.5)

Des hypothèses relatives à l'évaluation de la consommation d'énergie et la fiabilité de réseau de capteurs sont détaillées respectivement dans les sections § 3.4 et § 3.5 (aspect techniques).

### 3.3. Modélisation du fonctionnement des WSN

La modélisation du fonctionnement de réseaux WSN est divisée en 6 étapes :

1. La détermination de la distribution des nœuds du réseau
2. La modélisation de la découverte des voisinages des nœuds
3. Le choix de la position du nœud « sink »
4. La modélisation du protocole de routage et la détermination des chemins
5. La vérification du maintien en vie et les messages « HELLO »
6. La transmission des données

Les paragraphes suivants présentent ces 6 étapes.

#### 3.3.1. Étape 1

La distribution des nœuds de capteurs se fait d'une façon aléatoire en suivant une loi de distribution uniforme sur une zone géographique prédéfinie (rectangulaire par exemple, voir Figure 3). La position de chaque nœud de capteur  $i$  est déterminée sur la base de sa longitude  $long_i$  et sa latitude  $lat_i$ . Chaque zone géographique avec cette configuration est considérée comme un « Cluster ». Ce type de répartition permet d'étendre l'étude pour couvrir des plus larges zones géographiques si nécessaire.

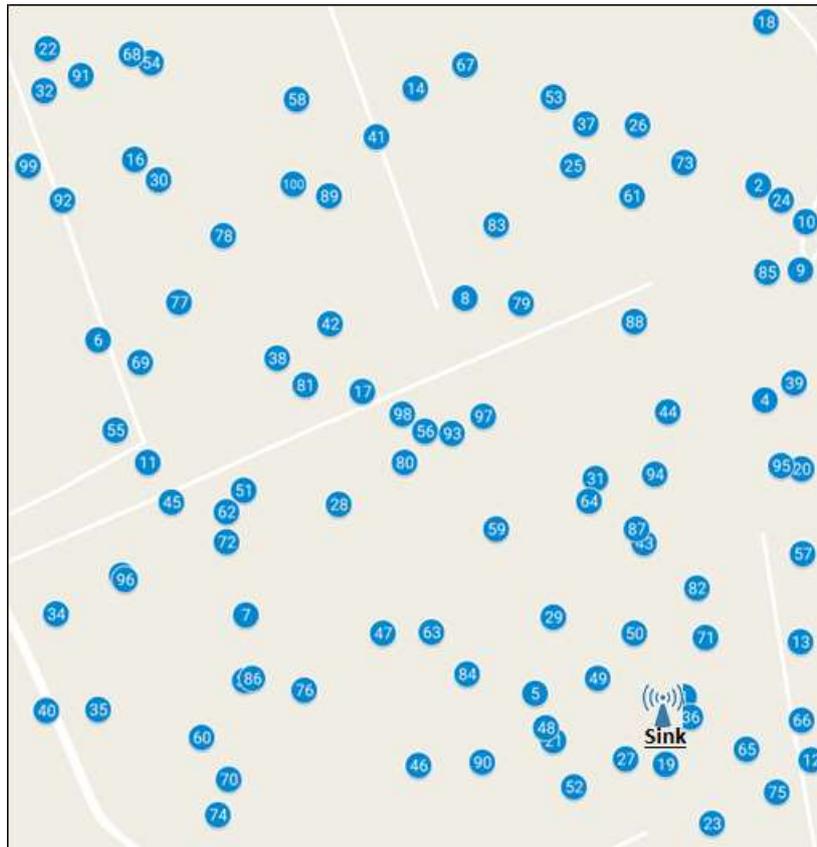


Figure 3 : Réseau de capteurs WSN avec un seul nœud « sink ».

### 3.3.2. Étape 2

Chaque nœud de capteur est limité par une distance de couverture prédéfinie par le constructeur. Une fois que chaque nœud est positionné, chacun d’eux envoie, selon sa distance de couverture, des messages « Beacon » qui lui permettent de découvrir son entourage et ses nœuds voisins. En effet, le message « Beacon » contient toutes les informations pertinentes du nœud initiateur qui permet aux autres nœuds qui se trouvent dans son rayon de transmission de l’identifier et de communiquer avec lui. Ensuite, les résultats de ses découvertes sont stockés dans une table de voisinage pour chaque nœud de capteur. Ces tables sont essentielles pour la construction des chemins vers le nœud « sink » ainsi que pour la transmission de données. Il est important de savoir qu’un nœud de capteur sans voisin est inutile, car il ne peut ni transmettre ni recevoir de l’information et par conséquent les événements détectés ne peuvent pas être transmis.

### 3.3.3. Étape 3

Le choix de la position du nœud « sink » est important afin de garantir une durée de vie plus étendue au réseau et par conséquent un réseau plus fiable et opérationnel. La durée de vie du réseau de capteurs dépend principalement du nœud « sink » et de ses voisins. Comme déjà indiqué, un nœud sans voisin ne peut être utilisé et cela s'applique également au nœud « sink ». De ce fait, le choix du nœud « sink » est basé sur le nombre de voisins pour le nœud de capteur, et donc le nœud qui possède le plus grand nombre de voisins sera le nœud « sink ». Si plusieurs nœuds peuvent être le « sink » (même nombre de voisins maximal), on considère le premier dans la liste comme « sink ». Le nœud « sink » a pour rôle principal d'être le point d'entrée/sortie pour le réseau de capteurs (voir § 2.2 paragraphe Hassan et al. Page 23). La réalisation peut se faire par le biais du lancement des nœuds de capteurs (autres que le sink) par avion en favorisant la répartition autour de l'emplacement du nœud sink.

### 3.3.4. Étape 4

Chaque nœud de capteur doit déterminer les chemins possibles pour atteindre le nœud « sink » (dont sa position lui est connue) afin de pouvoir transmettre les données. Toutefois, entre un nœud de capteurs et le nœud « sink » plusieurs chemins existent en général. Le protocole de routage utilisé ici est le Dynamic Source Routing protocol (DSR) bien connu et utilisé dans le réseau de capteurs et réseau ad-hoc (voir § 3.2). Chaque capteur détermine tous les chemins possibles pour atteindre le nœud « sink » en se basant sur sa table de voisinage ainsi que le protocole de routage. Les chemins déterminés sont ensuite stockés dans une table de routage par capteur et le plus court chemin est considéré comme le meilleur pour atteindre le nœud « sink ». L'algorithme de calcul des chemins est basé sur l'algorithme de Dijkstra.

### 3.3.5. Étape 5

Quand un nœud de capteur envoie un message « HELLO », il annonce son maintien en vie aux autres nœuds de capteurs voisins. Cette étape est importante non seulement parce que ces messages consomment de l'énergie pour chaque nœud mais aussi parce que cela garantit la mise à jour de la table de voisinage ainsi que celle de routage.

### 3.3.6. Étape 6

Chaque nœud de capteurs envoie ses données au nœud « sink » à une fréquence bien déterminée. La fréquence de transmission des données varie en fonction de l'état du réseau. Pour cette raison un réseau en mode normal (sans événement à détecter), transmet moins de données qu'un réseau en mode actif (en cours de détection d'un événement). Ces données peuvent contenir des informations concernant l'état du nœud (niveau d'énergie dans les batteries, défaillance quelconque,...) comme elles peuvent contenir des informations issues de son milieu environnant (température, humidité, luminosité,...). L'acheminement de ces données se fait par le biais de la table de routage en utilisant le plus court chemin de cette table. Cependant, ces données peuvent passer par plusieurs nœuds intermédiaires avant d'atteindre leur destination finale (en partant du nœud émetteur du message à sa destination, le nœud « sink », puis ce dernier répondant par confirmation de réception vers le nœud émetteur). Ceci nécessite l'utilisation des ressources physiques des nœuds intermédiaires telles que les antennes. Ces nœuds intermédiaires consomment donc plus d'énergie que les nœuds de « bords » (en limite de zone de détection). Cette consommation croît en fonction du nombre de fois qu'ils seront utilisés pour l'acheminement des données à travers le réseau.

### 3.3.7. Synthèse sur le fonctionnement

Un nœud qui a consommé tout son stock d'énergie est considéré comme dysfonctionnel (ressource énergétique épuisée). Ainsi, la probabilité qu'un capteur soit énergétiquement dysfonctionnel s'accroît avec son taux d'utilisation. Donc un nœud intermédiaire aura sa probabilité de dysfonctionnement énergétique plus élevée qu'un nœud de « bord ». Le dysfonctionnement d'un capteur provoque le redémarrage du processus de fonctionnement à partir de l'étape 2. En effet, la disparition d'un capteur modifie les tables de voisinages ainsi que les tables de routages et donc par conséquence la fiabilité d'acheminement de données (l'étape 3 est inutile à ce stade car la détermination du nœud « sink » n'est faite qu'une seule fois).

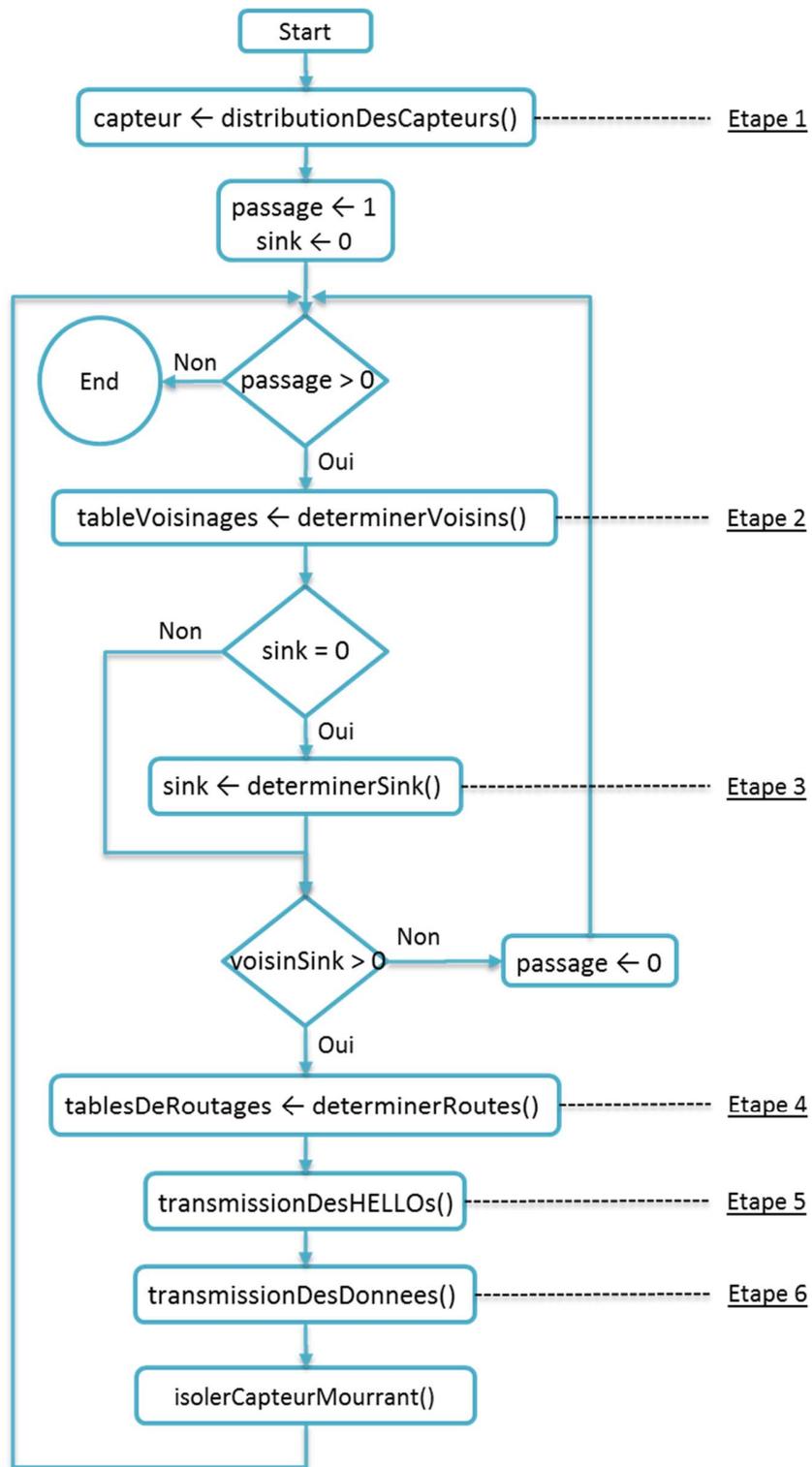


Figure 4 : Algorithme de 6 étapes

L'algorithme dans la Figure 4 synthétise les 6 étapes de fonctionnement du réseau commençant par la distribution du réseau. Le résultat est placé dans une variable appelée « capteur » qui est une matrice de valeurs contenant toutes les informations de chaque nœud. Ensuite, le calcul de voisins avec la transmission des messages « Beacon » est effectué. Il en résulte une table de voisinage par nœud qui est placée dans la variable « tableVoisinage ». Ensuite, la meilleure position du nœud sink en fonction de la distribution des capteurs dans le réseau et le nombre de voisins par nœud sont déterminés. Le résultat est placé dans la variable « sink ». Puis, la détermination des chemins est effectuée et les résultats placés dans la variable matricielle « tablesDeRoutages ». Les transmissions des messages « HELLO » et des messages de données sont ensuite effectuées. Et finalement, l'évaluation de nœud(s) mourant(s) est effectuée par la fonction « isolerCapteurMourrant() » qui prend en compte l'énergie consommée et la défaillance physique de chaque nœud. Alors, le(s) nœud(s) mort(s) sera(ont) isolé(s) voire définitivement inactif(s) dans le réseau. À noter que le calcul d'énergie est réalisé à chaque étape et est détaillé dans le paragraphe suivant (§ 3.4).

### 3.4. Évaluation de la consommation d'énergie des WSN

La consommation d'énergie  $E$  (exprimée en millijoule, mJ) due à la transmission et la réception des données est calculée sur la base d'une relation entre l'énergie due à l'acquisition de canal de transmission/réception (channel acquisition overhead  $b$ ) et l'énergie due aux transmissions/réceptions des messages qui dépend principalement de la taille des messages associés aux données (exprimé en octets). Ceci est représenté dans l'équation linéaire suivante :

$$E = E_{1byte} \times M_{size} + b \quad (1)$$

$E_{1byte}$  est l'énergie nécessaire pour envoyer/recevoir une message de «1 octet »,  $M_{size}$  est la taille des messages à envoyer/recevoir (nombre d'octets) et  $b$  est l'énergie nécessaire pour l'acquisition de canal de transmission/réception « channel acquisition overhead ».

Il est important à noter que la consommation d'énergie due à des échecs de tentatives d'acquisition des canaux, à des collisions ou bien à de pertes partielles de connectivités n'est pas considérée dans cette étude. Leur complexité de modélisations dépendant de la qualité des liens de connexion entre les nœuds, de la qualité des

canaux de transmission/réception qui peuvent être dégradés par de nombreux de facteurs (ex. interférence, réflexion ou diffraction du signal,...) ainsi que les positions physiques relatives entre les nœuds de capteurs dans le milieu naturel (ex. irrégularités topographiques et reliefs, obstacles naturels comme les rochers, forte densité végétale, etc.).

De plus, dans un réseau sans fils, la consommation d'énergie d'un nœud varie selon la distance à ses voisins. Ainsi, un nœud qui est proche de son voisin demande moins d'énergie pour entrer en communication avec lui qu'un nœud plus éloigné car la puissance de signal demandée est alors plus importante. De plus, le rapport énergie/distance de transmission a été évalué afin de déterminer une valeur moyenne qui est inférieure à la distance maximale proposée par le fabricant. Alors, la variation de la consommation énergétique en fonction de la distance entre les capteurs est considérée comme uniforme indépendamment de cette distance avec une seule condition qui est le respect de distance de couverture réseau.

Le standard IEEE802.15.4 est utilisé avec la méthode CSMA/CA « Carrier sense multiple access with collision avoidance » Unslotted mode, où aucun mécanisme de réveil périodique (Duty Cycle) n'a été spécifié, qui est aussi appelé mode non balisé (non Beacon Enabled mode). Et donc afin d'éviter les collisions de données échangées, il faut une vérification constante du canal pour évaluer sa disponibilité afin de pouvoir l'utiliser. Ce mécanisme nécessite donc une consommation énergétique importante. La méthode d'unslotted CSMA/CA est composée de plusieurs étapes qui sont les suivantes :

1. Initialisation des variables locales liées au « backoff »
2. Période aléatoire de « backoff »
3. Vérification que le canal est libre pour transmissions/réceptions (Clear Channel Assessment « CCA »)
4. Transmission
5. Acquiescement

Les trois dernières étapes sont les plus consommatrices en termes énergétiques tandis que les deux premières sont négligeables de ce point de vue. La figure 5 représente l'algorithme de la méthode d'unslotted CSMA/CA avec ces différentes étapes.

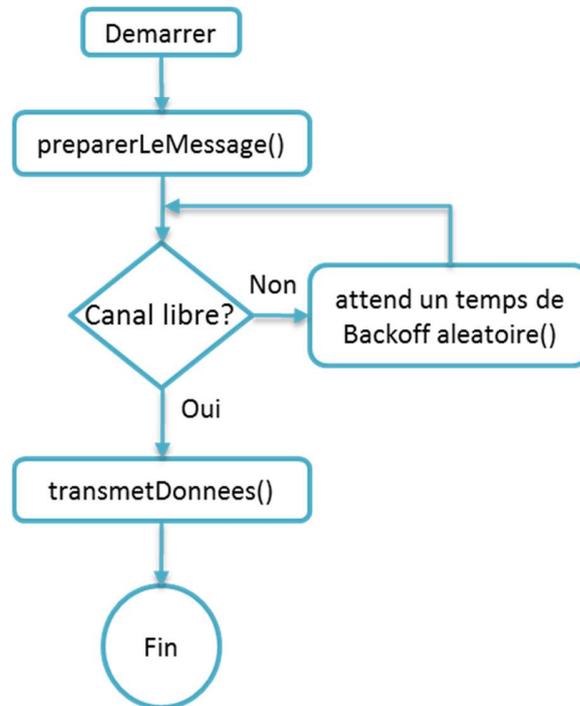


Figure 5 : Algorithme d'unslotted CSMA/CA

Pour mesurer la consommation d'énergie d'un nœud en se basant sur les normes IEEE802.15.4, une différenciation entre les messages de données de transmissions et les messages de données de réceptions est nécessaire. L'énergie consommée par ces processus est calculée selon les formules suivantes en exploitant l'équation (1) :

$$E_{send} = E_{byte} \times M_{send} + b_{send} \quad (2)$$

$$b_{send} = E_{CCA} + E_{n_1 send} + E_{n_2 receive}$$

Et

$$E_{receive} = E_{byte} \times M_{receive} + b_{receive} \quad (3)$$

$$b_{receive} = E_{Listening} + E_{n_2 receive} + E_{n_1 send}$$

Et donc

$$E_C = E_{send} + E_{receive} \quad (4)$$

Selon le fonctionnement du réseau décrit précédemment (section § 3.3) l'évaluation de la consommation d'énergie pour les nœuds serait à calculer en plusieurs étapes :

1. La découverte des voisinages
2. Le protocole de routage et la détermination des chemins
3. La vérification du maintien en vie et les messages « HELLO »
4. La transmission des données

Dans l'étape de découverte de voisinages, l'évaluation de l'énergie consommée par un nœud est effectuée en fonction du nombre de transmissions et réceptions effectuées par chaque nœud tout en considérant les messages transmis  $M_{send}$  et les messages reçus  $M_{receive}$ . De ce fait, si un nœud  $i$  possède  $N_i$  voisins, pour chaque voisin il doit envoyer un message et recevoir un acquittement. L'énergie consommée  $E_{N,i}$  sera :

$$E_{N,i} = E_{send} (Mn_{size} \times N_i) + E_{receive} (Ack_{size} \times N_i)$$

Avec  $Ack_{size}$  la taille de message d'acquiescement et  $Mn_{size}$  la taille de message de découverte de voisinage « Beacon ».

Dans l'étape de construction des chemins, l'évaluation de la consommation d'énergie se fait dans le cadre du protocole de routage utilisé (DSR). Chaque nœud échange des messages afin de construire sa propre table de routage. Ensuite, il sélectionne le meilleur chemin pour transmettre ses messages sur la base du plus court chemin. Chaque message de découverte de chemin contient au moins deux champs d'adresses de 4 octets chacun ( $2_{address} \times 4$ ). De plus, l'entête de chaque message contient aussi 8 octets soit  $2_{header} \times 4$ . Également, la position du nœud joue un rôle important dans la consommation d'énergie. Ainsi, le processus d'évaluation de la consommation d'énergie a été divisé en deux parties : l'évaluation de la consommation d'énergie des nœuds de bords, et l'évaluation de la consommation d'énergie des nœuds intermédiaires. Les nœuds de bords ne servent qu'eux-mêmes et donc leurs consommations d'énergie ne concernent que leurs propres activités, et ceci est formulé par l'équation suivante :

$$E_f = E_{send} [(2_{header} + 2_{address}) \times 4] + E_{receive} [(pl + 2_{header} + 2_{address}) \times 4]$$

Chaque chemin trouvé et retourné au nœud initiateur de la demande contient au moins l'adresse source et l'adresse de destination sur laquelle chacune occupe 4 octets. S'ajoutent les adresses des nœuds intermédiaires chacune comportant 4 octets également. Ceci est représenté par la variable  $pl$  correspondant à la longueur du chemin moins deux (nombre de nœuds intermédiaires sans les adresses source et destination) afin de déterminer la taille approximative du message réceptionné par le nœud initiateur. Cette approximation est due à la considération uniquement des champs des trames qui sont utiles dans la détermination des chemins. Cependant, les variables sont ajustables pour une potentielle amélioration future afin d'avoir des valeurs conformes avec la réalité.

Cependant, les nœuds intermédiaires ont un rôle de propagation et d'acheminement des informations pour les autres nœuds en plus de leurs propres informations. Un nœud intermédiaire reçoit les informations d'un nœud précédent, si ce nœud est en début de chaîne (nœud de bord), le message reçu contiendra 2 adresses (source et destination) et donc le nœud en question ajoute son adresse à ce message puis le fait suivre dans les autres directions. Si le nœud précédent le nœud intermédiaire est aussi un nœud intermédiaire, il ajoute à la pile des adresses sa propre adresse et le fait suivre dans les autres directions. L'évaluation de la consommation énergétique d'un capteur intermédiaire est obtenue par les formules suivantes :

$$\begin{aligned}
 Ei &= Ei_{send} + Ei_{receive} \\
 Ei_{send} &= \underbrace{E_{send} [(np + 1) \times 4]}_{\text{Envoi Messages Des Autres}} + \underbrace{E_{send} [(pl + 2_{header} + 2_{address}) \times 4]}_{\text{Envoi Réponse Aux Autres}} \\
 &+ \underbrace{E_{send} [(2_{header} + 2_{address}) \times 4]}_{\text{Envoi Son Propre Message}} \\
 Ei_{receive} &= \underbrace{E_{receive} [(np) \times 4]}_{\text{Réception Réquête Des Autres}} + \underbrace{E_{receive} [(pl + 2_{header} + 2_{address}) \times 4]}_{\text{Réception Réponse Des Autres}} \\
 &+ \underbrace{E_{receive} [(pl + 2_{header} + 2_{address}) \times 4]}_{\text{Réception Son Propre Réponse}}
 \end{aligned}$$

Dans les équations précédentes  $np$  représente la position du nœud de capteurs intermédiaire dans chaque chemin (son rang dans la liste des nœuds du chemin). Toutefois, la position d'un nœud intermédiaire n'est pas la même pour tous les chemins

et l'évaluation de la consommation d'énergie se fait pour chaque chemin comportant le nœud considéré.

La taille d'un message pour vérifier le maintien en vie est fixe. Il est envoyé périodiquement afin de s'assurer du maintien en vie d'un nœud. C'est pourquoi chaque nœud exécute ce processus. Afin d'évaluer l'énergie consommée par ce processus pour chaque capteur, l'équation suivante est utilisée :

$$E_{h,i} = \left\lfloor \frac{T}{d_h + f_h} \right\rfloor \times E_0$$

La variable  $T$  représente une période de temps écoulée et  $d_h$  la durée de transmission d'un message « HELLO » sachant que  $f_h$  est la période entre envois d'un hello (période de temps entre deux envois). La notation  $\lfloor \rfloor$  correspond à la partie entière.  $E_0$  est l'énergie nécessaire pour envoyer un « HELLO » et recevoir son acquittement.

Le calcul de la consommation énergétique durant la phase de transmission de données consiste à prendre en compte l'envoi et la réception des messages de données à/du nœud « sink ». De plus, la consommation énergétique diffère d'un nœud à un autre selon sa position géographique comme illustré dans la Figure 6 suivante.

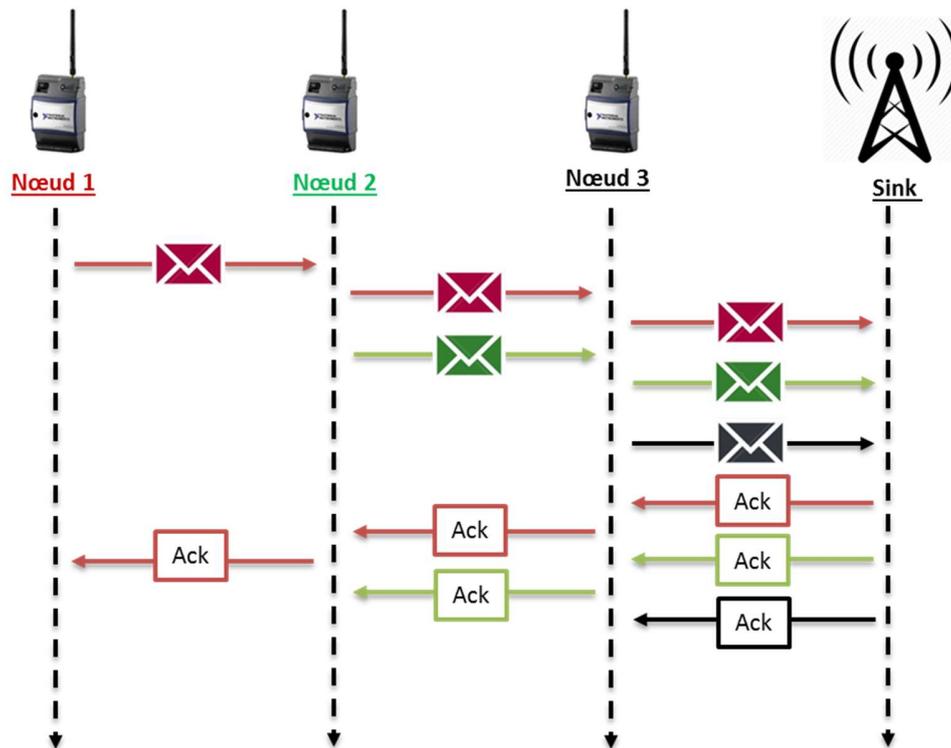


Figure 6 : Nœud en mode transmission de données

Si l'on considère que les données sont envoyées de gauche vers la droite, le nœud 1 envoie ses données, ces données vont être réceptionnées et acheminées par le nœud 2 et le nœud 3 pour atteindre le nœud « Sink ». Ensuite, des messages d'acquiescement « Ack » sont transmis dans le sens inverse en traversant tous les capteurs intermédiaires jusqu'à atteindre le nœud 1 initiateur des données. L'envoi de données reste élémentaire dans ce modèle, chaque nœud envoyant ses propres données indépendamment des autres nœuds.

Un cycle de transmission de données (CTD) correspond au fait que tous les nœuds dans le réseau ont envoyé une fois leurs propres messages de données. Après un cycle de données, chaque capteurs de bord aura transmis un message de données et aura reçu une réponse. Cependant, les nœuds intermédiaires auront envoyé un message de données (leurs propres données), acheminés les messages des autres et reçus une réponse (leur propre réponse) de celles des autres nœuds. L'algorithme suivant explicite le processus d'un CTD (Figure 7) :

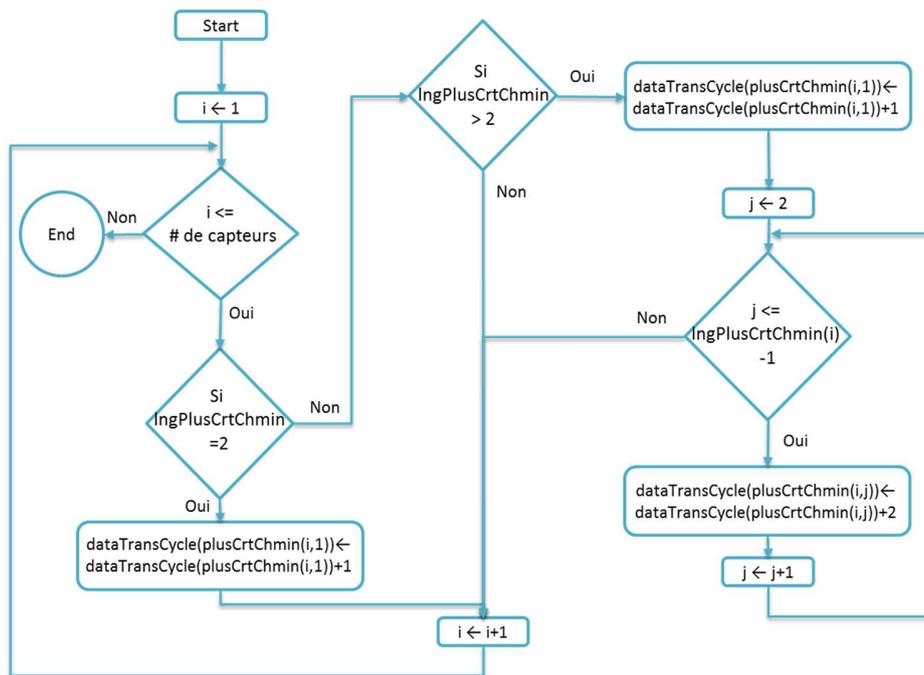


Figure 7 : Algorithme de CTD

Dans l'algorithme de CTD (Figure 7), pour chaque nœud de capteur il faut vérifier son plus court chemin vers le sink. Si ce chemin est égal à 2, alors, il n'y a que lui-même et le sink d'où l'incrémentation de la valeur de CTD (*dataTransCycle* dans la Figure 7) pour le nœud en question. Par contre, si son plus court chemin est plus grand que 2, il comporte des nœuds intermédiaires. Alors, il faut incrémenter sa valeur de CTD, et pour chaque nœud de capteur différent du sink, il faut incrémenter sa valeur de CTD.

Une fois le CTD établi pour chaque nœud, la consommation d'énergie correspondante durant une période de temps  $T$  peut être calculée selon la formule suivante :

$$E_{d,i} = \left( \frac{T}{d_d + f_d} \right) \times dataTransCycle(i) \times E_0$$

La variable  $E_0$  correspond à l'énergie consommée pour envoyer un message de données de 1 octet et recevoir son acquittement (prédéfinie = 4,98 mJ), tandis que la variable  $dataTransCycle(i)$  correspond au nombre de messages de données à envoyer dans un cycle par le nœud ( $i$ ). La durée de transmission d'un message de données est représenté par  $d_d$  et le temps d'attente entre chaque envoi de données (période entre deux envois de données) est représenté par  $f_d$ .

La consommation d'énergie de chaque capteur est ainsi déterminée et accumulée afin d'obtenir la consommation globale par capteur durant le temps. Elle est obtenue par la formule suivante :

$$E_{c,i}(t) = E_{Ni} + E_{Ri} + E_{h,i}(t) + E_{d,i}(t)$$

Avec  $E_{Ri}$  l'énergie nécessaire pour le calcul des chemins par capteur qui englobe le calcul de chemins en fonction de la position des nœuds (bord  $E_{fi}(t)$  ou intermédiaire  $E_{ii}(t)$ ).

La consommation d'énergie  $E_{c,i}(t)$  de chaque nœud  $i$  au temps  $t$  est par conséquent évaluée sur la base de consommations cumulatives dues aux différentes étapes. La durée de vie énergétique  $d_i$  de chaque batterie des nœuds est alors évaluée en connaissant sa quantité initiale totale d'énergie  $BC$  et en tenant compte de la périodicité des transmissions et des réceptions de données. Après une période de temps  $t$  donnée, l'énergie restante  $E_i(t)$  pour un nœud  $i$  est :

$$E_i(t) = \max(0, BC - E_{c,i}(t)) \quad (5)$$

### 3.5. Évaluation de la fiabilité des WSN

Compte tenu des divers études qui ont traité la fiabilité des réseaux de capteurs sans fils en utilisant différentes définitions (illustré dans la section § 2.2), la fiabilité des réseaux de capteurs est définie par :

1. Un seuil de niveau de fiabilité pour la distance de couverture réseau entre les nœuds ;
2. Un seuil de niveau de fiabilité pour la transmission de données ;
3. Un seuil de niveau de fiabilité de nœuds (actif) dans le réseau ;
4. Un seuil de niveau de fiabilité électronique des nœuds (capteurs) ;
5. Un seuil de sensibilité spécifique est atteint en fonction de critères définis pour les capteurs des nœuds.

La combinaison de tous les paramètres ci-dessus permet de définir la fiabilité des réseaux de capteurs sans fils comme le montrent les paragraphes suivants.

Chaque nœud de capteur sans-fil a des limitations au niveau de la couverture réseaux qui varie selon l'environnement où il est utilisé. La couverture réseau ici concerne la distance maximale qui sépare deux nœuds qui peuvent communiquer ensemble. Ces limitations sont déjà pré-testées et définies par le fabricant dans la fiche technique de l'équipement. Afin de prendre en considération les obstacles naturels existant dans les forêts, qui constituent l'environnement de travail de cette étude, tel que les roches, les branches d'arbre, les troncs d'arbre, la pluie, la neige, etc. un seuil de distance de communication a été défini.

De plus, la transmission de données entre les nœuds est considérée avec un niveau de perte de données qui peut être dû à des perturbations naturelles (présences d'obstacles, etc.) ou bien techniques (interférence, etc.). Après la détection d'une perte de donnée, le nœud émetteur doit retransmettre les données perdues. Un réseau de capteurs qui a un taux élevé de perte de données ne peut pas garantir la pertinence de ses données et ne peut pas être utilisé car il sera toujours occupé par la retransmission de données. Ainsi, il n'atteint jamais le seuil de maturité (appelé aussi convergence). Un seuil de retransmission est défini et toléré afin de garantir une bonne fiabilité au niveau de transmission de données (un exemple de définition figure au § 3.6).

L'origine de la longévité des nœuds dans le réseau de capteurs sans fils pour la surveillance de feux de forêts est liée à celle des batteries. Cependant, pour pouvoir surveiller une zone géographique il faut un minimum de nœuds aptes à communiquer avec la station de base et donc « vivants ». L'absence de nœuds connectés avec la station de base « sink » dans une zone, implique la possibilité d'un déclenchement d'un feu de forêt dans le périmètre de surveillance sans qu'il soit détecté et donc remet en cause la fiabilité de système de surveillance. C'est pourquoi un seuil de fiabilité est défini afin de garantir un nombre minimum de nœuds connectés au nœud « sink » pour assurer une fiabilité acceptable du système. Ce nombre est dépendant de la nature et des performances des capteurs et du cadre d'application choisi (voir par exemple, § 3.6).

De plus, chaque nœud est constitué principalement de plusieurs composants électroniques et dépend principalement de leurs durées de vie. L'évaluation de la défaillance du nœud est donc définie principalement à partir de combinaisons de défaillances de ses composants électroniques. Les taux de défaillances de ces composants peuvent être estimés en utilisant la norme de fiabilité de MIL-HBk 217F (1991), ou les formalismes du projet FIDES (2013), et voire des études spécifiques comme dans (White et Bernstein 2008) pour la fiabilité micro-électronique par exemple.

Des ensembles de détection pour réseaux de capteurs (nœuds) typiques comme le Tmote Sky proposé dans l'exemple d'étude (voir § 3.6) sont composés principalement des éléments suivants : émetteur-récepteur sans fil, un microcontrôleur, un contrôleur d'accès direct à la mémoire (ADM), un superviseur de la tension d'alimentation, une antenne embarquée intégrée et de capteurs intégrés ou ajoutés.

### 3.5.1. Évaluation de la fiabilité physique

On présente dans ce paragraphe les modèles de fiabilité de ces composants. La plupart des modèles existant pour les composants électroniques suivent des lois exponentielles (à taux de défaillance constants) car leurs fonctionnements sont quasi-stables jusqu'à l'apparition de la défaillance. Toutefois, ces modèles permettent de prendre en compte des facteurs de fabrication, d'usage et d'environnement, ces deux derniers étant particulièrement critiques pour les réseaux de capteurs. On donnera donc

principalement les méthodes d'évaluation choisies des taux de défaillance de ces composants prenant en compte ces facteurs.

Le taux de défaillance d'un microcontrôleur typique peut être évalué par l'équation suivante (MIL-HBk 217F 1991) :

$$\lambda_p = (C1. \pi_T + C2. \pi_E). \pi_Q. \pi_L. 10^{-6} \text{ h}^{-1} \quad (6)$$

Les paramètres présents dans cette équation sont illustrés dans le Tableau 2.

Symbole	Valeurs ou Formule	Hypothèses
C1	0.56	
C2	$2.8 \cdot 10^{-4} \cdot Np^{1.08}$ ; $Np$ nombre de pins (PGA)	64 pins, § 5-9 in MIL-HBk 217F (1991)
$\pi_L$	$0.01 e^{(5.35 - 0.35 \cdot Y)}$	Facteur d'apprentissage > 2 ans (Y=2)
$\pi_E$	4.0	Ground Mobile GM facteur environnemental
$\pi_Q$	0.25 / 1.0 / 2.0	S/B/B1 Catégories (facteur qualité)
$\pi_T$	$0.1 \cdot \exp \left[ -\frac{E_a}{8.617 \cdot 10^{-5}} \left( \frac{1}{T_j + 273} - \frac{1}{298} \right) \right]$	Silicium avec : - $E_a$ (énergie d'activation efficace eV, CMOS) = 0.35 - $T_j$ (température de jonction, entre 25°C et 175°C, exemple cas extrême 100°C)

Tableau 2 : Paramètres pour l'évaluation du taux de défaillance des composants électroniques

Avec les valeurs des paramètres proposés comme exemple (Tableau 2), la valeur du taux de défaillance est  $\lambda_p = 8.778 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ . On voit que si les conditions d'environnement changent, la valeur du taux peut varier (dans les exemples présentés cet aspect n'a pas été pris en compte, mais avec un profil d'usage / environnement spécifique, cela est tout à fait possible).

Si les principaux dispositifs électroniques du capteur ont au moins un taux de défaillance égal à  $\lambda_p$ , son taux de défaillance global peut être estimé par la somme de ces taux de défaillance (composants principaux en série, dans le pire cas) avec des distributions exponentielles de durée de vie. Par conséquent, dans cet exemple, le taux de défaillance du capteur n'est pas supérieur à  $5.10^{-5} \text{ h}^{-1}$  (au moins  $6\lambda_p$ ) pendant sa période de vie principale.

La disponibilité  $a_i(t)$  ou fiabilité d'un nœud donné  $i$  (réparation exclue ici) peut être calculée par une formule analytique. Cependant,  $a_i(t)$  dépend du taux de défaillance du nœud soit environ  $6.\lambda_p$  en supposant une loi exponentielle, mais aussi de l'épuisement des batteries. L'épuisement des batteries dépend des taux de défaillances  $\lambda_j$  des autres capteurs concernés par les règles de consommation d'énergie (§ 3.4) et de leurs positions relatives définies par leurs longitude *long* et latitude *lat*. Et donc la probabilité de défaillance (l'épuisement de batteries inclus)  $G_i(t)$  du nœud  $i$  est :

$$G_i(t) = P(\min(t_i, d_i) \leq t) \quad (7)$$

Où  $t_i$  est l'instant de défaillance aléatoire du nœud  $i$  et  $d_i$  la durée de vie des batteries suivant une loi aléatoire. Il est alors facile de montrer que la probabilité  $G_i(t)$  de deux variables aléatoires (correspondant au minimum de leurs valeurs) est donnée par :

$$G_i(t) = 1 - (1 - F_i(t)).(1 - D_i(t)) \quad (8)$$

$F_i(t)$  est la probabilité de défaillance d'un nœud  $i$  au temps  $t$  et  $D_i(t)$  est la probabilité que les batteries du nœud  $i$  soient épuisées au même temps  $t$ . Alors, la disponibilité  $a_i(t) = 1 - G_i(t)$  peut être finalement décrite par la relation suivante (en excluant les dépendances implicites entre défaillances physiques et épuisement des batteries) :

$$a_i(t) = e^{-\lambda_i t} . (1 - D_i(t)) \quad (9)$$

Comme la probabilité  $D_i(t)$  est difficile à formuler exactement dans la relation précédente, une évaluation de Monte-Carlo de la disponibilité  $a_i(t)$  est proposée dans notre travail. Ainsi, pour un nombre total  $N$  de simulations et avec  $n_i(t)$  le nombre de simulations pour lesquelles le composant  $i$  est disponible au temps  $t$ ,  $a_i(t)$  est évaluée par la relation :

$$a_i(t) \approx n_i(t) / N \quad (10)$$

De plus, le MTTF des nœuds peut être obtenu en calculant l'espérance suivante (selon l'équation (7)) :

$$MTTF_i = E(\min(t_i, d_i)) \quad (11)$$

La disponibilité d'un WSN est basée sur sa capacité de détecter un événement (exemple : feu de forêt). Ainsi, cette capacité est déterminée dès lors qu'il existe au moins un nœud disponible qui possède un chemin fiable vers le nœud « sink » permettant d'acheminer les potentiels événements détectés (dans ce cas, le feu peut être détecté mais pas nécessairement localisé dans la zone de surveillance). Par conséquent, la disponibilité du réseau WSN au temps  $t$  est la probabilité de l'union des événements, chaque événement étant la combinaison de chemins disponibles au temps  $t$ .

### 3.5.2. Détection des événements

Un événement est considéré comme détecté si les trois conditions suivantes sont vérifiées simultanément :

1. Un seuil de sensibilité spécifique est atteint en fonction de critères définis pour les capteurs des nœuds ;
2. Les capteurs contribuant à la détection sont disponibles au temps  $t$  (disponibilité,  $a_i(t)$ );
3. Les informations de détection envoyées par les capteurs ont été reçues par le nœud récepteur (avec l'hypothèse que le nœud récepteur était dans un état de fonctionnement normal à l'instant  $t$ ).

La première condition est caractérisée pour chaque capteur, par une probabilité de détection  $P_{Di}(t) = P(s_i(t) \geq S)$ , avec un seuil de sensibilité  $S$  (supposé identique pour tous les capteurs) et la sensibilité du capteur  $s_i(t)$  au temps  $t$ . Dans notre étude, on a considéré un ensemble de capteurs  $z_k$  dans une zone donnée, avec  $z_k = \{i_{1,k} \dots i_{n_k,k}\}$ ,  $k = 1 \dots N_z$ ,  $N_z$  étant le nombre de zones de détection et  $n_k$  le nombre de nœuds nécessaires pour la détection d'incendie dans la  $k^{\text{ème}}$  zone (pas nécessairement le nombre total de capteurs dans cette zone). Cette probabilité de détection peut être estimée sur la base du pourcentage de capteurs disponibles dans la zone de détection (au sens de couverture de détection), la sensibilité de chaque capteur étant considérée identique. Dans la simulation,  $n_k$  est supposé identique pour toutes les zones choisies afin de simplifier l'analyse.

La seconde condition est caractérisée par la disponibilité des capteurs activés  $a_i(t)$  à l'instant  $t$  ( $i \in e_s$ ) et dépend de la disponibilité des composants électroniques, de la disponibilité des cellules PV (uniquement pour les PV-WSN), de la disponibilité des piles et de l'épuisement des piles (voir détails dans les paragraphes suivants).

La troisième condition est représentée par la probabilité  $P_{s,i}(t)$  au temps  $t$  que l'information soit reçue par le nœud « sink » ( $i \in e_s$ ). Cette probabilité peut également être évaluée sur la base de l'union des événements définis par les chemins disponibles  $r_{ik}$  à partir des nœuds de capteurs activés  $i$  vers le nœud récepteur « sink ». Par conséquent, l'évaluation de  $P_{s,i}(t)$  doit tenir compte des difficultés suivantes :

- Le nombre de chemins possibles pour un capteur actif donné augmente rapidement avec la croissance de réseau WSN;
- Ces chemins  $r_{ik}$  sont dépendants les uns des autres car ils possèdent des nœuds en commun, ce qui rend nécessaire une évaluation de probabilité d'une union d'événements dépendants avec des disponibilités de nœuds intermédiaires  $a_l(t)$  avec  $l \in r_{ik}$  (indice des nœuds dans les itinéraires  $r_{ik}$  des nœuds activés  $i$ ). La probabilité d'une union d'événements peut être évaluée à l'aide de la formule de Sylvester-Poincaré, qui est une somme avec un grand nombre de termes qui croît rapidement en fonction du nombre d'événements.

$$P_{s,i}(t) = P\left(\bigcup_{i \in e_s} r_{ik}\right) = \sum_{p=1}^{2^{N_r}-1} (-1)^{p+1} \cdot P\left(\bigcap_{e_q} \{r_{ik}\}_{k(i), i \in e_s}\right)$$

Avec  $N_r = \sum_{i \in e_s} k(i)$ , le nombre de chemins  $r_{ik}$  et  $e_q$  l'ensemble des  $q$  chemins  $r_{ik}$  (contenant des nœuds communs possibles) parmi les combinaisons des chemins possibles qui sont données par  $\binom{N_r}{q}$ . Cette expression peut être améliorée en utilisant des algorithmes de disjonction ou une construction basée sur un diagramme de décision binaire (BDD) comme dans Xiao et al. (2009). Toutefois, cette approche reste insuffisante car elle ne prend pas en compte l'influence mutuelle de perte d'énergie et défaillances. Cette dépendance mutuelle nécessite donc une formulation plus complète.

Par conséquent, sans expliciter les dépendances énergie-défaillance, la disponibilité ou fiabilité  $A_S(t)$  d'un WSN (valide aussi pour un PV-WSN) est avec  $N_S$  ensembles de détection (un seul ensemble étant supposé suffisant pour la détection, sinon une prise en compte de la combinatoire est nécessaire, voir formulation détaillée au § 4.6) :

$$A_S(t) = \sum_{k=1}^{N_S} \left( \prod_{i \in e_{s,k}} P_{Di}(t) a_i(t) P_{s,i}(t) \right)_k$$

Si seulement un nœud est nécessaire pour assurer la détection d'un événement parmi les  $N$  nœuds du WSN (ou PV-WSN), la formule précédente s'exprime alors par :

$$A(t) = \sum_{i=1}^N P_{Di}(t) a_i(t) P_{s,i}(t)$$

Dans ce modèle, la probabilité d'événements élémentaires (capacités de détection) des itinéraires est nécessaire pour évaluer  $A(t)$ .

Dans le cas où la source d'énergie est cohérente et les cellules photovoltaïques sont très efficaces, la défaillance du WSN (voire PV-WSN) peut être approchée par la défaillance de tous les nœuds voisins du nœud «sink» (les coupes minimales prépondérantes). La disponibilité  $A_{n,s}(t)$  des  $n_s$  voisins du nœud «sink» est alors (chaque nœud voisin ayant une disponibilité  $a_i(t)$ ) :

$$A_{n,S}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n_S} (1 - a_i(t)) \geq A(t)$$

Cette expression peut être simplifiée quand les composants sont tous identiques et que les lois de probabilité de défaillance sont exponentielles (cas réaliste pour des composants électroniques). On obtient :

$$A_{n,S}(t) = 1 - \left(1 - e^{-\lambda_{n,S}t}\right)^{n_S} \geq A(t) \quad (12)$$

Avec  $\lambda_{n,S}$  est le taux de défaillance pour un nœud voisin du nœud « sink » (dans le cas des cellules photovoltaïques,  $\lambda_{n,S} = \lambda_e + \lambda_{p,PV} + \lambda_B$  s'il faut considérer que des taux de défaillances exponentiels). Et donc, la valeur maximale du MTTF est :

$$MTTF_{n_S} = \int_0^{+\infty} \left(1 - \prod_{i=1}^{n_S} (1 - a_i(t))\right) dt$$

Cela donne pour le cas à composants identiques et avec des lois exponentielles :

$$MTTF_{n_S} = \int_0^{+\infty} \left(1 - \left(1 - e^{-\lambda_{n,S}t}\right)^{n_S}\right) dt \quad (13)$$

### 3.5.3. Autres approches pour l'évaluation de fiabilité des WSN

Les méthodes de sûreté de fonctionnement qui peuvent traiter le cas étudié ici doivent être plus avancées que celles évoquées dans l'état de l'art au § 1.2, comme en particulier aux travaux de Xiao et al. (2009) prenant en compte la perte de transmission en exploitant les diagrammes de décision binaire d'ordonnancement amélioré (EOBDD), le modèle d'AboElFotouh et al. (2005) basé sur un graphe stochastique non orienté, ou encore, le modèle de Cook & Ramirez-Marquez (2008).

La formulation proposée ici peut également être exprimée en utilisant différentes approches dans le cadre de fiabilité dynamique. Plus précisément, le problème peut être formulé en termes de processus stochastiques, en particulier comme un processus markovien hétérogène par morceaux (ou processus semi-markovien). De ce point de vue, une première approche a été proposée par Zhu et al. (2012). Néanmoins, la prise

en compte des différents comportements d'un WSN et le nombre important de composants dans le réseau ne permettent pas une utilisation efficace de ce type d'approche actuellement et on ne peut envisager que l'étude de propriétés asymptotiques peuvent être étudiées (voir de Saporta et al. 2015 ou Zhang et al. 2014 pour plus de détails).

D'autres approches basées sur des automates hybrides ou des réseaux de Petri stochastiques (SPN) peuvent être utilisées, mais la difficulté due au grand nombre de composants dans un WSN limite leur application à des réseaux modestes compte tenu de notre objectif (au moins une centaine de nœuds). Dans ce cadre, on peut citer les travaux de Zhang et al. 2014, ou encore Babykina et al. 2016 par exemple qui ont traités d'autres systèmes complexes.

Le modèle de la fonction de génération universelle (UGFM) peut également être appliqué à ce type de problème (un grand nombre de composants), en particulier dans le cas des réseaux de nœuds (Yeh 2008). Cependant, le comportement dynamique d'un WSN (changement de chemins en fonction des nœuds disponibles/défaillants) et les processus de consommation d'énergie associés (liés au calcul de chemins évolutifs) sont difficiles à prendre en compte dans l'UGFM même à l'aide d'algorithmes performants développés récemment (Yeh 2016, ou par « clusters », voir par ex. Liu et al. 2016).

Ces différents modèles pourraient faire l'objet d'investigations plus approfondies au moins pour des réseaux de dimension modeste avec des hypothèses de fonctionnement proches de celles des WSN considérées dans nos travaux (cf. perspectives, § 6.4).

#### 3.5.4. Fiabilité des batteries

Les piles rechargeables classiques utilisées pour les nœuds peuvent être de type NiMH (nickel-hydrure de métal), NiCd, acide de plomb ou contenant du lithium. Le modèle de taux de défaillance que nous avons utilisé exploite la base de données FIDES (2013) pour le cas des batteries au nickel et au lithium. C'est l'une des bases les plus récentes et présentant une bonne prise en compte des nombreux facteurs et ses variations au cours du temps.

Le taux de défaillance  $\lambda_B(t)$  est donné par :  $\lambda_B(t) = \lambda_0(X(t)) + \lambda_a(t)$  avec comme taux de défaillance de base  $\lambda_0(t) = \lambda_p(X(t)) \cdot C_m \cdot C_{lc}$  qui prend en compte les phénomènes physiques,  $\lambda_p(X(t))$ , la fabrication ( $C_m$ ) et le cycle de vie ( $C_{lc}$ ), alors que  $\lambda_a(t)$  est le taux de défaillance associé au vieillissement.

La partie du taux relative aux phénomènes physiques s'exprime par :

$$\lambda_p(X(t)) = 0.21 \cdot N_c \sum_{i=1}^{n_p} \left( \frac{d_{pi}}{8760} \right) (C_p \cdot C_A \cdot C_D)_i^{0.511 \ln(C_s)} \left( 0.85 e^{11604.04 \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{T_{m,i} + 273} \right)} + 0.14 \left( \frac{12 N_c}{d_{pi}} \right) \left( \frac{\min(d_c, 2)}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\Delta T_{pi}}{20} \right)^{1.9} e^{1414 \left( \frac{1}{313} - \frac{1}{T_{\max,c} + 273} \right)} + 0.01 \cdot C_v \right) \quad (14)$$

Les paramètres de la formule précédente sont :

- $N_c$ , le nombre de cellules (supposé égal à 1 pour les piles simples);
- $n_p$ , le nombre de phases pendant un an (si les cycles de température sont stables pendant un an, alors une seule phase est considérée);
- $d_{pi}$ , la durée de la  $i^{\text{ème}}$  phase de recharge (h);
- $(C_p)_i$ , est le facteur de place concernant l'influence possible des autres composants dans le système;
- $(C_A)_i$ , est le facteur de contexte applicatif (prend en compte l'environnement par rapport au stress d'usage);
- $(C_D)_i$ , est le facteur de durcissement (amélioration de la robustesse contre les surtensions);
- $C_s$ , est le facteur de sensibilité (sensibilité inhérente aux surcharges);
- $N_c$ , nombre de cycles de température (supposé égal à 1 en première approximation, 4 saisons peuvent être prises en compte, si nécessaire);
- $d_c$ , durée du cycle température;
- $\Delta T_{pi}$ , amplitude de température dans la  $i^{\text{ème}}$  phase de recharge;

- $T_{m,i}$ , température moyenne dans la  $i^{\text{ème}}$  phase de recharge;
- $T_{max,i}$ , température maximale dans la  $i^{\text{ème}}$  phase de recharge;
- $C_v$ , facteur de vibration (supposé égal à 1, c'est-à-dire aucune liaison avec les machines et aucun effet sismique considéré).

Avec  $C_m = 0.21.e^{1.39(1-(AQ_f+AQ_c).\varepsilon/24)-0.69}$  et  $C_{lc}=4$  (le cycle de vie est modérément contrôlé et a une valeur entre 1 et 8).  $AQ_f$  et  $AQ_c$  sont les niveaux de qualité respectifs du processus de fabrication et du processus de qualification, et  $\varepsilon$  est le niveau d'expérience du fabricant (on considère ici  $\varepsilon = 4$ , i.e. un fabricant reconnu exploitant des procédés matures pour l'article considéré).

Le taux moyen de défaillance du vieillissement est donné par (plus facile à utiliser qu'un taux dépendant du temps, voir FIDES 2013) :

$$\lambda_a = -\beta.\ln(0.9).n_r \frac{(\ln(0.5)/\ln(0.9))^{\frac{\beta-1}{\beta}}}{8760.n_c}$$

Où  $n_r$  est le nombre de cycles de recharge par an,  $n_c$  le nombre de cycles de recharge moyen que peut réaliser la batterie et  $\beta$  est le paramètre de forme de la distribution de Weibull associée au processus de dégradation de la batterie. La durée de vie fonctionnelle de la batterie est alors  $(n_r/n_c).8760$  h (le nombre d'heures maximal de fonctionnement par an étant 8760 h). Si  $n_c$  n'est pas connu, le facteur de mérite  $f_m$  (exprimé en Wh.kg<sup>-1</sup>) de la batterie permet de l'obtenir (cf. par exemple, approche FIDES 2013).

L'expression de  $\lambda_a$  est obtenue en utilisant le temps  $t_{10}$  correspondant à une probabilité de 10% de défaillance qui vérifie donc la relation suivante pour une loi de distribution de Weibull de paramètre de forme  $\beta$  et d'échelle  $\eta$  :

$$\int_0^{t_{10}} \beta \frac{t^{\beta-1}}{\eta^\beta} \cdot \exp\left(-\frac{t^\beta}{\eta^\beta}\right) dt = \frac{1}{10}$$

On voit ainsi que le taux de défaillance de Weibull est :

$$\lambda_a(t) = \beta \frac{t^{\beta-1}}{\eta^\beta} = -\beta \frac{t^{\beta-1}}{t_{10}^\beta} \ln(0.9)$$

L'approximation proposée par le modèle FIDES consiste à considérer le temps correspondant à une probabilité de 50% comme temps de défaillance moyen pour estimer le taux moyen, soit :

$$t_{50} = t_{10} \left( \frac{\ln(0.5)}{\ln(0.9)} \right)^{\frac{1}{\beta}} \text{ et donc } \lambda_a(t_{50}) = -\beta \cdot \ln(0.9) \cdot \frac{1}{t_{10}} \left( \frac{\ln(0.5)}{\ln(0.9)} \right)^{\frac{\beta-1}{\beta}} \approx \lambda_a$$

A noter que notre modèle peut traiter le cas dépendant du temps sans cette approximation si cela est nécessaire. Mais, en l'occurrence, le manque de données nous a conduit à suivre les recommandations de FIDES 2013.

### 3.6. Cas d'application

Un exemple de WSN est présenté dans cette section avec un seul cluster et un seul nœud « sink » par cluster. Un simulateur à l'aide de Matlab a été développé en tenant compte de la consommation d'énergie détaillée pour chaque capteur en fonction de l'état de sa source énergétique (batterie). Celui-ci prend en compte l'état de fonctionnement et de repos des nœuds au court du temps et la fiabilité des composants impliqués (principaux composants électroniques : micro-processeur, mémoire, dispositif d'émissions et de réceptions). Les paramètres qui ont été utilisés dans cette simulation sont :

- Nombre de clusters = 1
- Nombre de nœuds « sink » par cluster = 1
- Nombre de nœuds par cluster = 99 (un total de 100 nœuds avec le nœud « sink »)
- Surface de la zone de surveillance (déploiement) = 0.7 km<sup>2</sup>
- Distribution de nœuds = aléatoire suivant une loi de distribution uniforme selon une plage en latitude et en longitude choisies arbitrairement.
- Type de nœuds = Ultra Low Power IEEE 802.15.4 Tmote Sky

- Distance de communication maximale entre deux nœuds (distance de couverture réseaux) = 120 mètres x seuil de fiabilité de distance de couverture réseau entre les nœuds (exprimé en % d'efficacité)
- Type d'antenne de communication = omnidirectionnel
- Bande passante = 250 Kbps (selon la fiche technique du fabricant)
- Protocole de routage utilisé = Dynamic Source Routing Protocol (DSR)
- Énergie initiale des batteries avec capacité maximale  $E_0 = 30780$  mJ (correspond à la capacité de deux batteries AA par exemple)
- Taille de message de « Beacon » = 1 octet
- Taille de message de données = 8 octets
- Taille de message de HELLO = 1 octet
- Périodicité d'envoi de messages « HELLO » = 10 secondes
- Périodicité d'envoi de messages « data » = 1 heure
- Seuil de niveau de fiabilité pour la distance de couverture radio entre les nœuds = 84 % (cf. § 3.4, p. 51)
- Seuil de niveau de fiabilité pour la transmission de données = 100 % (sans perte de données)
- Seuil de niveau de fiabilité du réseau : aucun nœud n'est actif autre que le « sink » (outre les nœuds défaillants, les nœuds qui n'ont pas de chemins vers le nœud « sink » ne sont pas considérés comme actifs).

La consommation d'énergie détaillée pour ce type de capteur est ( $n_1 = 17$ ,  $n_2 = 11$ ) et donc les paramètres en relation de la consommation d'énergie sont :

- $E(\text{send 1 octet}) = 0.12$  mJ
- $b_{\text{send}} = E(\text{CCA}) + E(\text{send 17 octets}) + E(\text{send 11 octets}) = 3.54$  mJ
- $E(\text{receive octet}) = 0.12$  mJ
- $b_{\text{receive}} = E(\text{listening}) + E(\text{receive 17 octets}) + E(\text{send 11 octets}) = 4.03$  mJ
- La taille d'un message de type voisin « Neighbor » = 1 octet

Et donc :

- $E_{\text{send}} = 0.12 \times M_{\text{send}} + 3.54$
- $E_{\text{receive}} = 0.12 \times M_{\text{receive}} + 4.03$

Pour un nœud  $i$  qui a  $N_i$  voisins la consommation énergétique de ce nœud de capteur est :

$$E_{N_i} = (0.12 + 3.54) \times N_i = 3.66 \times N_i$$

Les taux de défaillance des capteurs sont fixés à  $10^{-4} \text{ h}^{-1}$  selon l'équation 6 et en tenant compte des six composantes principales susmentionnées (les taux de défaillance suivent des lois exponentielles, cf. § 3.5.1). Il s'agit d'une valeur supérieure à adapter selon les conditions environnementales (pas nécessairement fixes, mais variables avec le temps, ce qui donne un taux de défaillance en fonction du temps). Il est important de noter que le nœud « sink » est considéré comme un nœud toujours disponible (pas de défaillance).

Les performances du réseau WSN ont été étudiées sur la base de  $N=500$  simulations Monte Carlo avec une distribution aléatoire de la défaillance de chaque nœud en fonction de temps et l'évaluation de la consommation d'énergie par nœud. Le nombre de simulations choisi garantit une précision supérieure à 5% pour toutes les valeurs calculées (mesure en valeur relative). Ainsi, on a vérifié l'évolution des erreurs relatives de valeurs moyennes (par ex., nombre de capteurs défaillants, fiabilité du WSN, cf. figures 8-9) en fonction du nombre de simulations. Afin d'avoir une évaluation correcte des densités de probabilité, la convergence des écarts types a également été vérifiée de la même façon (cf. figures 10-11).

Les simulations ont été arrêtées lorsque le WSN est devenu incapable de transmettre des informations de surveillance (situation considérée comme une défaillance de WSN), c'est-à-dire quand le nœud « sink » ne reçoit plus aucune information. Il est important de savoir qu'avec une distribution aléatoire de capteurs, certains d'entre eux se retrouvent sans voisin (dans ce cas, 8 capteurs sans voisin).

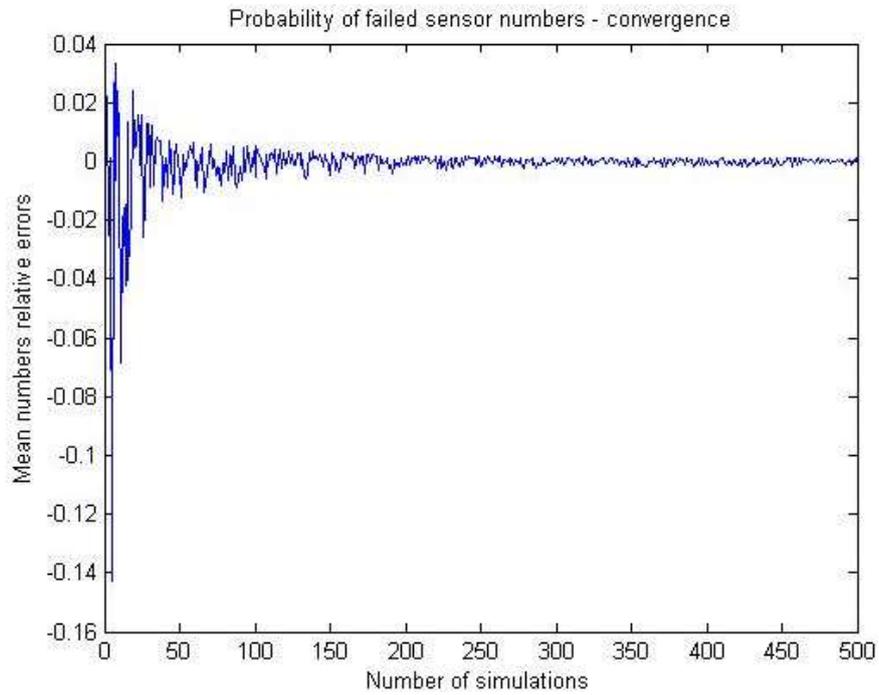


Figure 8 : Évolution de la valeur relative du nombre moyen de capteurs défaillants en fonction du nombre simulations

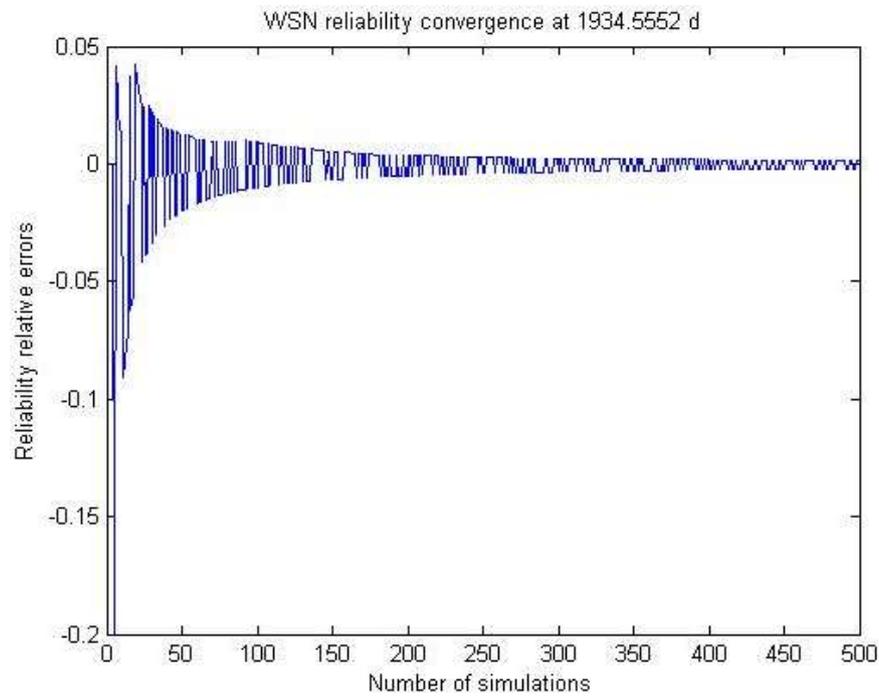


Figure 9 : Évolution de l'erreur relative de la fiabilité du WSN en fonction du nombre de simulations (1934 jours)

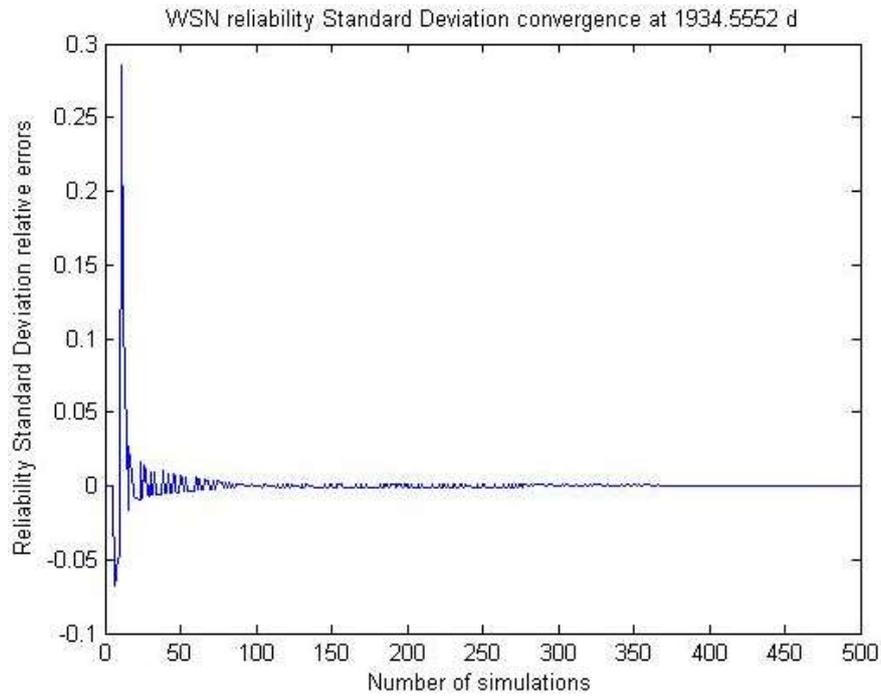


Figure 10 : Évolution de l'erreur relative de la convergence des écarts types de la fiabilité en fonction du nombre de simulations (1934 jours)

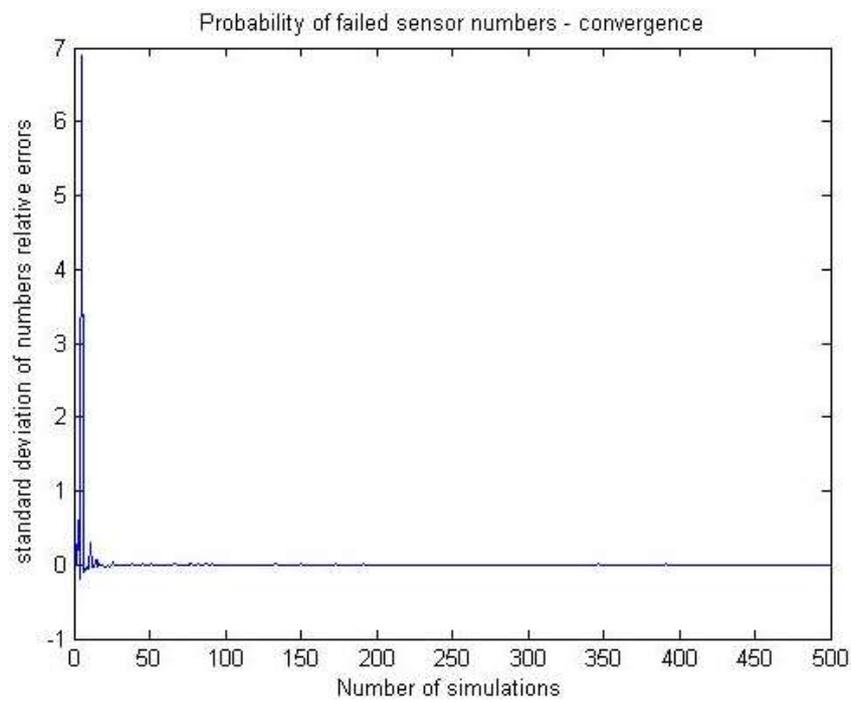


Figure 11 : Évolution de l'erreur relative de la convergence de l'écart-type du nombre de capteurs défaillants en fonction du nombre de simulations

Les valeurs suivantes sont calculées et analysées :

- La fiabilité de réseau de capteurs en fonction de temps,
- Le nombre cumulé moyen de capteurs défaillants en fonction de temps et la répartition des nombres de capteurs défaillants lorsque le réseau WSN devient défaillant,
- Les contributions de la consommation énergétique et des défaillances physiques aléatoires à la défaillance globale de réseau de capteur en fonction de temps.

Les valeurs typiques calculées sont (en jours) :

- Durée de vie moyenne du WSN (MTTF) = 2457,5 jours (écart-type =  $593/\sqrt{500}$  = 26,5 jours)
- Durée de vie moyenne pour un nœud = 1146 jours (écart-type =  $888/\sqrt{29179}$  = 5,2 jours)
- Nombre moyen de capteurs défaillants lorsque le WSN devient défaillant = 58,4 capteurs (écart-type = 1,78)

Le coefficient de variation (CV) de la durée de vie du WSN est donc  $26,6/2457,5 = 11\%$ . Cette variation autour de la moyenne de la durée de vie du WSN peut être considérée comme modérée. En revanche, le CV de la durée de vie d'un nœud est  $5,2/1146 = 0,45\%$ , ce qui représente une très légère variation par rapport à la durée de vie moyenne par nœud. Enfin, le CV du nombre de capteurs défaillants lorsque le WSN devient défaillant est  $1,78/58,4 = 3\%$  ce qui peut aussi être considéré comme une légère variation autour de la moyenne du nombre de capteurs défaillants. Les valeurs moyennes de ces grandeurs restent donc assez significatives et les fluctuations associées relativement faibles.

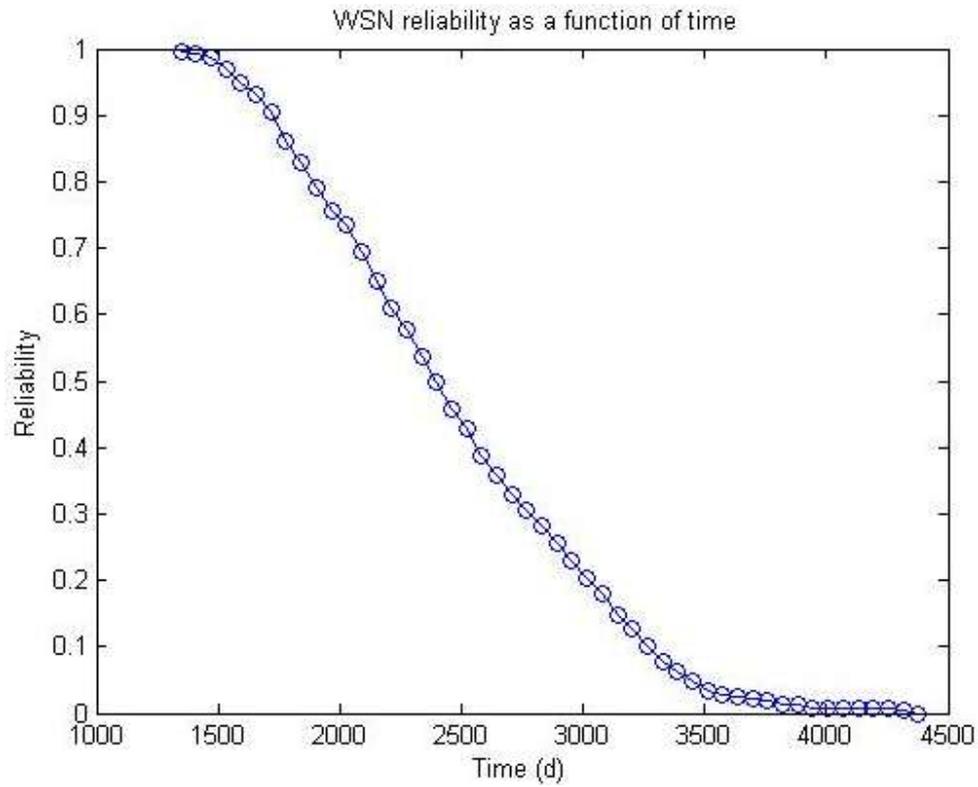


Figure 12 : Fiabilité de WSN en fonction de temps (jours)

La Figure 12 montre l'évolution de la fiabilité de WSN au cours du temps. La courbe est typique pour une fonction de fiabilité, avec un changement de forme après 2500 jours qui est dû aux contributions mutuelles de l'épuisement des batteries et/ou des défaillances physiques des composants électroniques des nœuds.

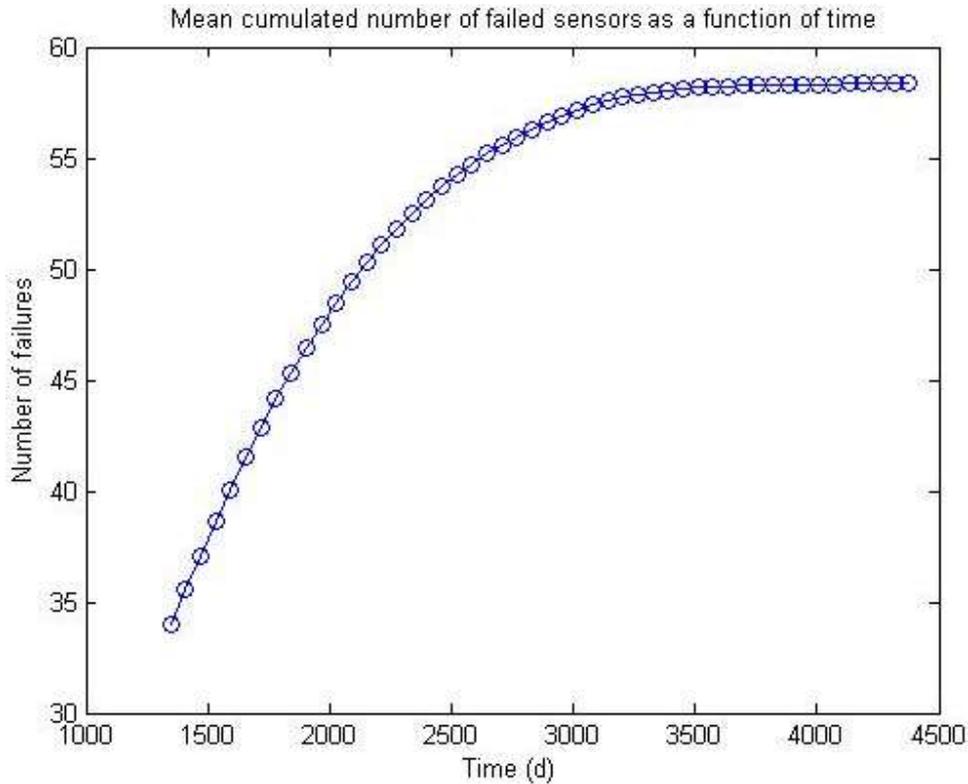


Figure 13 : Le nombre cumulé moyen de capteurs défaillants en fonction de temps (jours)

Le nombre cumulé moyen de capteurs défaillants augmente de plus en plus lentement avec le temps (Figure 13), ce qui est dû au fait qu'un nombre important de capteurs consommant de l'énergie sont devenus indisponibles avant 2500 jours (avec potentiellement quelques défaillances électroniques aléatoires de nœuds). Cela concerne en effet plus particulièrement les nœuds les plus sollicités lors de la transmission d'informations vers le nœud « sink » i.e. les nœuds intermédiaires. Ensuite, la défaillance du WSN est très probable avec une stabilité dans la consommation d'énergie et des défaillances physiques aléatoires.

La Figure 14 explique mieux le comportement de Figure 12 et Figure 13. En effet, l'équilibre entre les défaillances physiques aléatoires et les défaillances dues aux batteries épuisées varie de 0% / 100% à 26% / 74%, avant 2500 jours, et ensuite converge à 28% / 72% (Figure 12).

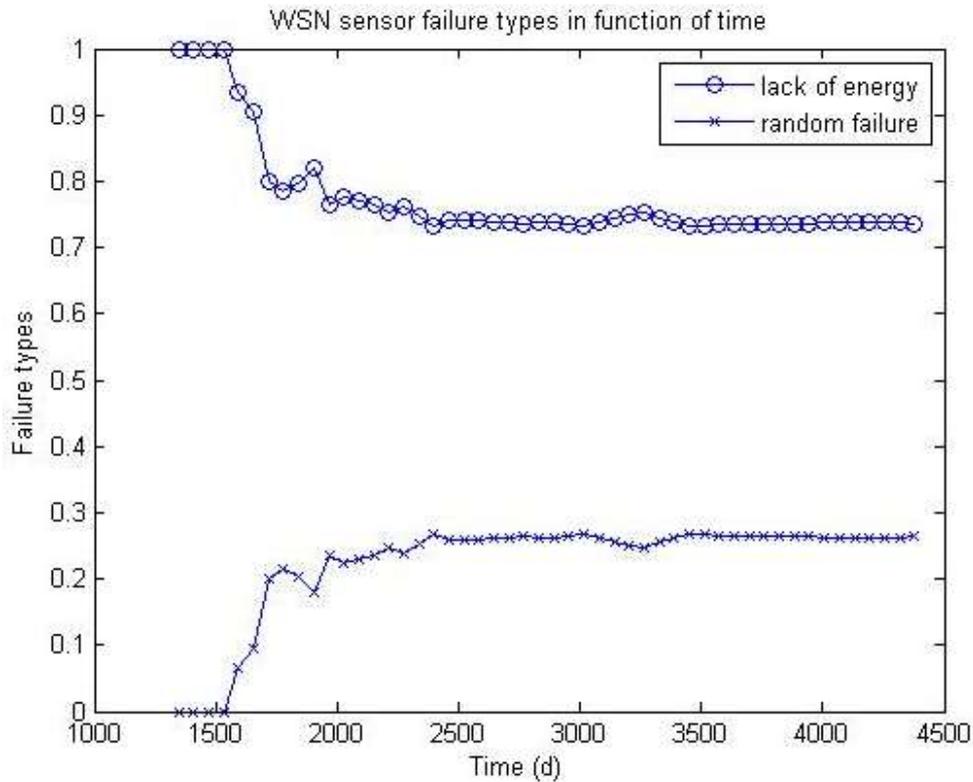


Figure 14 : Les contributions de la consommation énergétique et les défaillances physiques aléatoires (jours)

La Figure 15 décrit les contributions relatives à la défaillance générale après 4400 jours des deux types de défaillances qui ont affecté la fiabilité de réseau de capteurs WSN de la Figure 12, à savoir : les défaillances dues à l'épuisement des batteries et les défaillances des composants électroniques. Les résultats montrent que les défaillances des composants électroniques sont une cause importante de la défaillance globale du réseau pour le cas de WSN, et donc ce type de défaillance affecte significativement la fiabilité WSN.

Ceci montre bien que la défaillance des composants électroniques peut avoir un impact, à ne pas négliger lors de l'évaluation de la durée de vie du réseau WSN. En effet, la contribution des défaillances électroniques augmente jusqu'à près de 30 % des événements de défaillance générale du réseau.

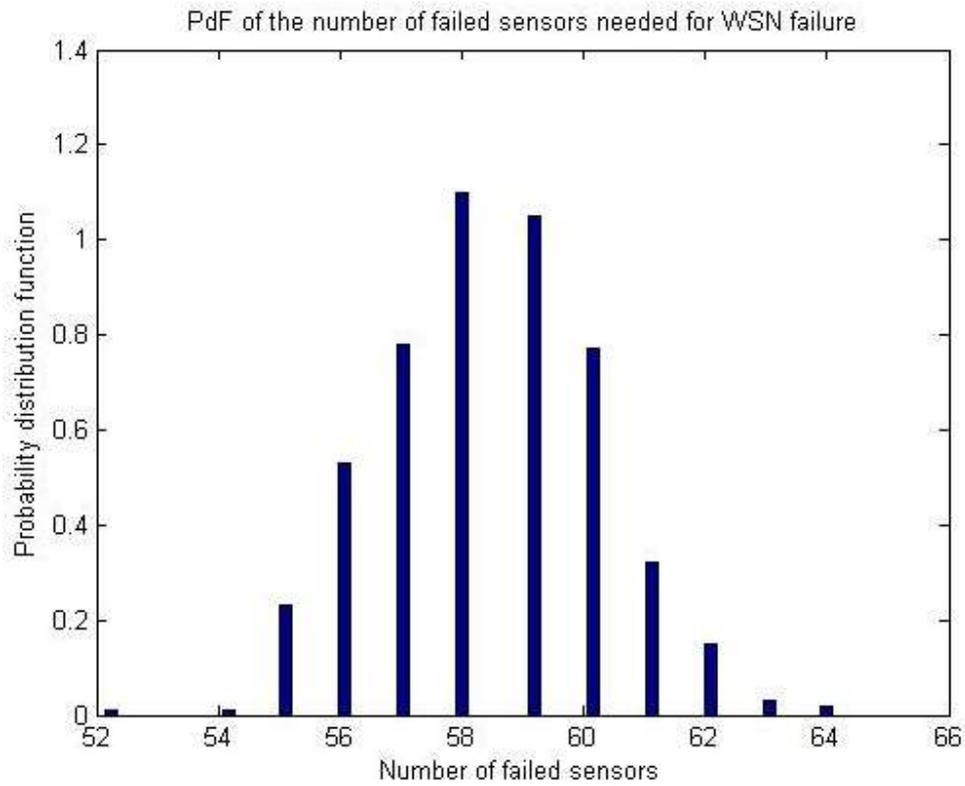


Figure 15 : densité de probabilité du nombre de nœuds défaillants lors de la défaillance du WSN

La densité de probabilité du nombre de capteurs défaillants lors de la défaillance du WSN est représentée (Figure 15) par un histogramme relativement étroit qui confirme la faible valeur du coefficient de variation de 3% et sa valeur moyenne de 58,4 pour 64 défaillances dans le pire cas.

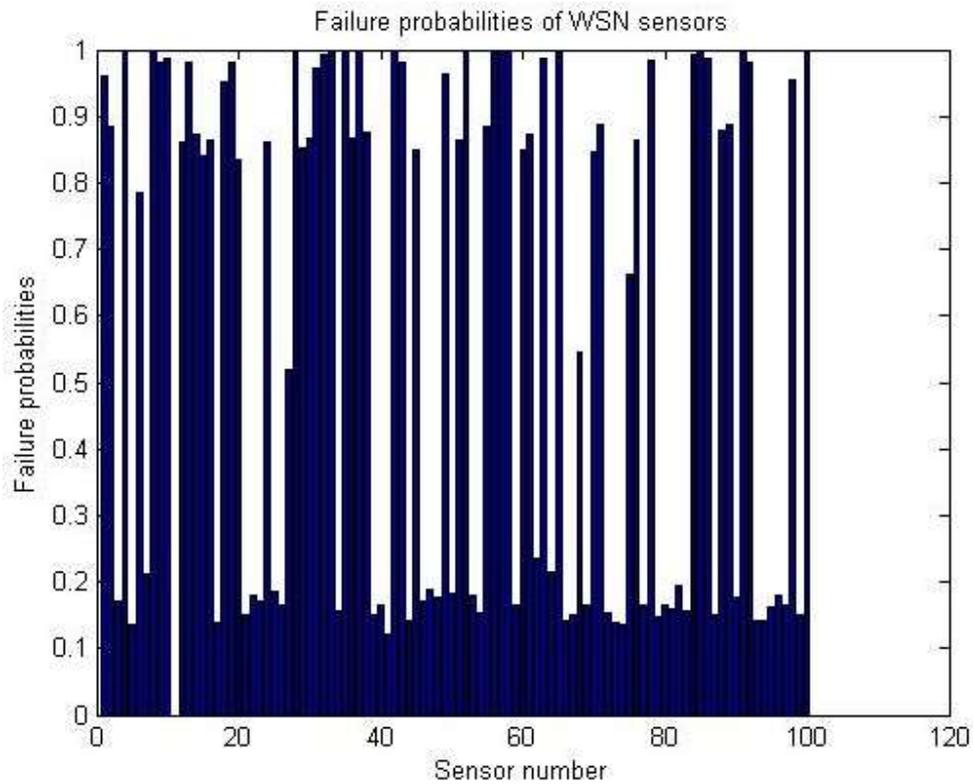


Figure 16 : Probabilité de défaillance des nœuds WSN

En outre, une identification des capteurs les plus critiques dans le WSN en termes de fiabilité ou de capacité de détection est également possible. Les capteurs qui ont les plus grandes probabilités d'être indisponibles à la fin de vie de WSN sont donnés sur la Figure 16. Dans l'exemple étudié, 11 capteurs ont systématiquement échoué avant la fin de vie du WSN.

On pourrait aussi étudier l'impact de la densité de capteurs (nombre de capteurs par unité de surface) sur la fiabilité du WSN, cet aspect est présenté au § 4.8.

### 3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation du fonctionnement du réseau de capteurs a été présentée avec ses principales fonctionnalités telles que le routage, la vérification de son maintien en vie, la détection des événements, la transmission et la réception de données. De plus, une étude détaillée de la consommation énergétique de ce système a été proposée ainsi que sa modélisation.

L'étude de fiabilité est aussi un sujet important traité dans ce chapitre et surtout la fiabilité des composants électroniques de chaque nœud du réseau WSN. En effet, Ce modèle présente une originalité vis-à-vis des travaux présentés auparavant (chapitre 2 section 2.2) vu qu'une étude détaillée de la disponibilité de chaque nœud permet de mieux comprendre la défaillance du système entier, dès lors qu'elle combine défaillance physique et défaillance due à l'épuisement des sources énergétiques des nœuds. Ainsi, une étude plus précise et une évaluation concrète de la fiabilité des WSN ont pu être menées.

Un cas d'application a été aussi présenté montrant clairement que les défaillances électroniques aléatoires ne sont pas négligeables pour l'évaluation de la fiabilité des WSN. En effet, par exemple, la contribution des défaillances électroniques augmente au fil de temps en représentant approximativement 28 % de la défaillance globale du WSN. Ainsi, la fiabilité et par conséquent la durée de vie du WSN sont considérablement impactés par les défaillances électroniques aléatoires.

Sur cette base, il sera aussi possible de comparer différentes technologies et protocoles de communication pour prolonger la durée de vie des WSN. Ceci est possible, par exemple, avec des nœuds comportant des capteurs solaires (présentés dans les chapitres suivants) et / ou à l'aide de protocoles (routages, de collecte de données,...) améliorés, y compris l'amélioration des coûts des solutions (des procédures d'optimisation peuvent alors être nécessaires).



---

# Chapitre 4 : Modélisation et évaluation de la fiabilité des réseaux de capteurs alimentés par cellules photovoltaïques (PV-WSN)

---



## 4. Modélisation et évaluation de la fiabilité des réseaux de capteurs alimentés par cellules photovoltaïques (PV-WSN)

### 4.1. Introduction

Dans le cas de grands WSN dédiés à la supervision des événements climatiques tels que les feux de forêts dans des zones géographiques inaccessibles ou peu accessibles, il est impossible d'accéder régulièrement à chaque nœud (capteur) pour les maintenir en état de fonctionnement. Ainsi, la durée de vie du WSN dépend principalement de la durée de vie de ses nœuds. L'utilisation des énergies renouvelables (RE) représente une alternative possible pour augmenter la durée de vie du WSN, et en particulier l'énergie solaire (cellules photovoltaïques). Cependant, la fiabilité des composants de récoltes et de stockage d'énergie doit être prise en compte, car celle-ci peut avoir un impact sur la fiabilité du WSN. Tels sont les aspects traités dans ce chapitre en suivant les étapes suivantes : présentation des nœuds de capteurs alimentés par énergie solaire (PV-WSN), problématique et hypothèses, modélisation du fonctionnement du PV-WSN, production de l'énergie solaire, fiabilité des PV-WSN (fiabilité des cellules PV et fiabilité des batteries), cas d'application et finalement une conclusion.

### 4.2. Capteurs alimentés par énergie solaire

L'une des énergies renouvelables la plus facilement exploitable pour alimenter des capteurs autonomes tels que ceux intégrés dans des WSN, est l'énergie solaire grâce aux cellules photovoltaïques.

Ainsi, chaque nœud sera équipé de ses composants électroniques (ceux initialement présentés dans le chapitre 0), d'une mini-cellule photovoltaïque (PV) avec deux piles rechargeables (à la place des piles non rechargeables précédemment utilisées au chapitre 0) et d'un contrôleur de charge solaire pour stabiliser l'énergie transitant vers les piles et/ou directement vers le capteur. La Figure 17 illustre bien un exemple d'un nœud de capteurs équipé d'une mini-cellule photovoltaïque, des piles rechargeables et d'un contrôleur de charge.

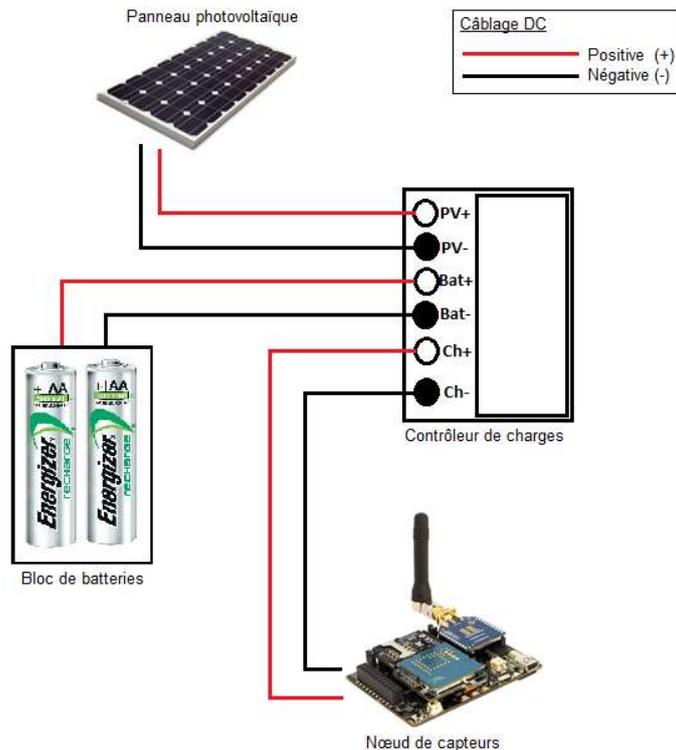


Figure 17 : Nœud de capteurs équipé de PV

Pour éviter ou du moins réduire les problématiques de coût, il est possible d'utiliser une configuration de prix modique avec des cellules PV appropriées (comme expliqué au § 4.1). Cela permet d'obtenir un système WSN équipé des mini cellules PV (PV-WSN) de prix abordable. Dans un PV-WSN, l'addition de composants électroniques supplémentaires peut diminuer la fiabilité du système, indépendamment des conditions énergétiques favorables produites par l'utilisation de cellules PV dans ces réseaux. En outre, l'utilisation d'une distribution aléatoire pour les nœuds d'un WSN rend la durée de vie du réseau améliorée incertaine parce que la position des nœuds PV-WSN par rapport aux autres nœuds (sans PV) est très importante pour garantir la prolongation de la durée de vie du système (bien entendu on peut envisager d'avoir essentiellement des nœuds avec PV mais cette solution peut s'avérer coûteuse). Dans le cas où tous les nœuds équipés de cellules PV se retrouvent aux bords du réseau « nœud de frontières » (illustré par la Figure 18), par exemple, l'augmentation de la durée de vie du réseau devient négligeable même incertaine.

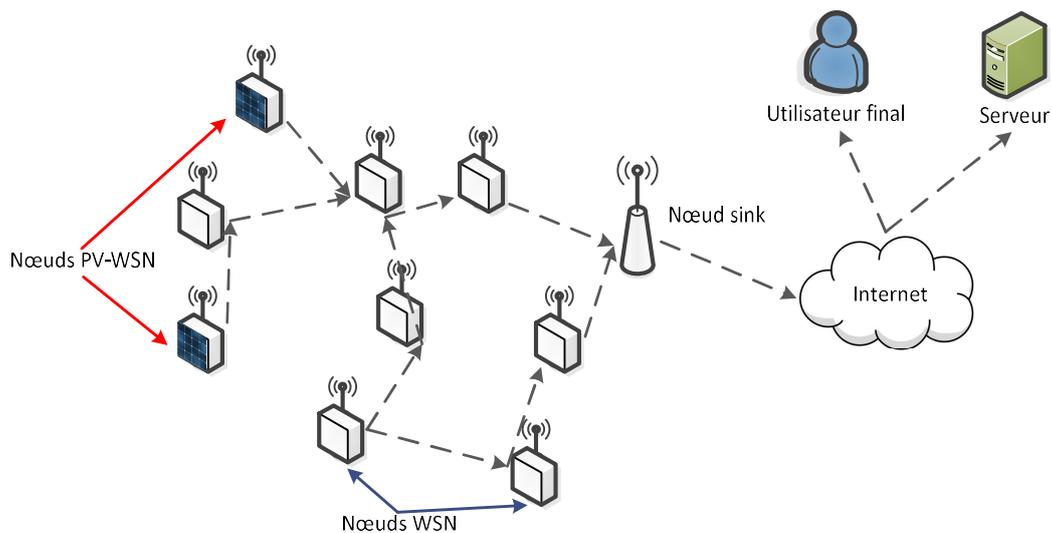


Figure 18 : WSN équipé de 10% de PV placé à la frontière de la zone

D'autres ce cas de figure, la prolongation de la durée de vie du réseau peut être aussi influencée notablement. Ainsi, par exemple, l'amélioration attendue peut être réduite s'il y a concentration de nœuds équipés de PV dans une zone isolé du nœud « sink » (aucun chemin possible jusqu'au « sink », voir Figure 19 comme exemple), zones appelées aussi des îlots dans le réseau « islands ».

De plus, les combinaisons des précédents exemples (exemple 1 « nœuds PV-WSN placé au bord du réseau » et exemple 2 « nœud PV-WSN situé dans des zones îles ») (voir Figure 20), affectent considérablement l'amélioration attendue au système vis-à-vis de sa fiabilité et de sa durée de vie.

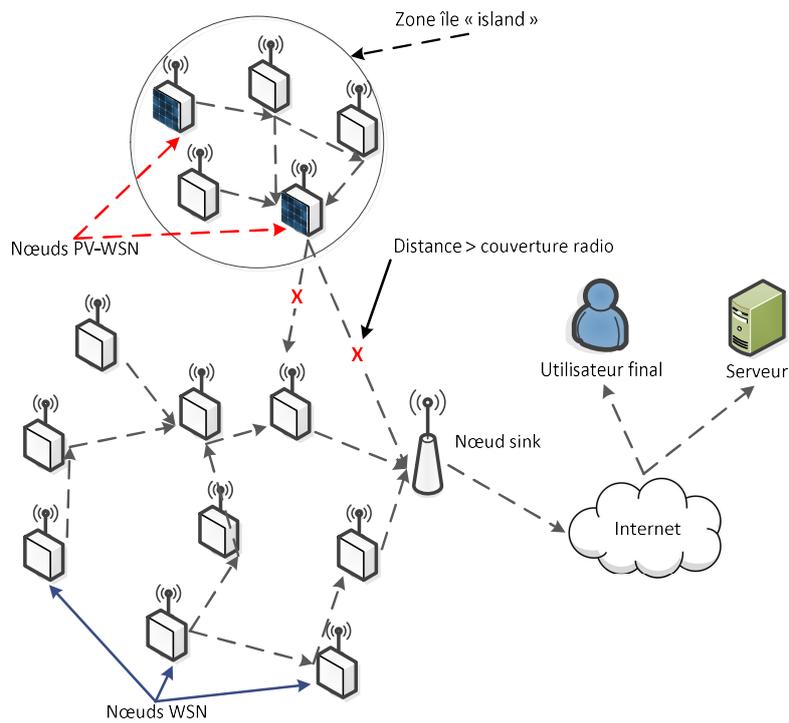


Figure 19 : PV-WSN avec illustration des zones îles « islands »

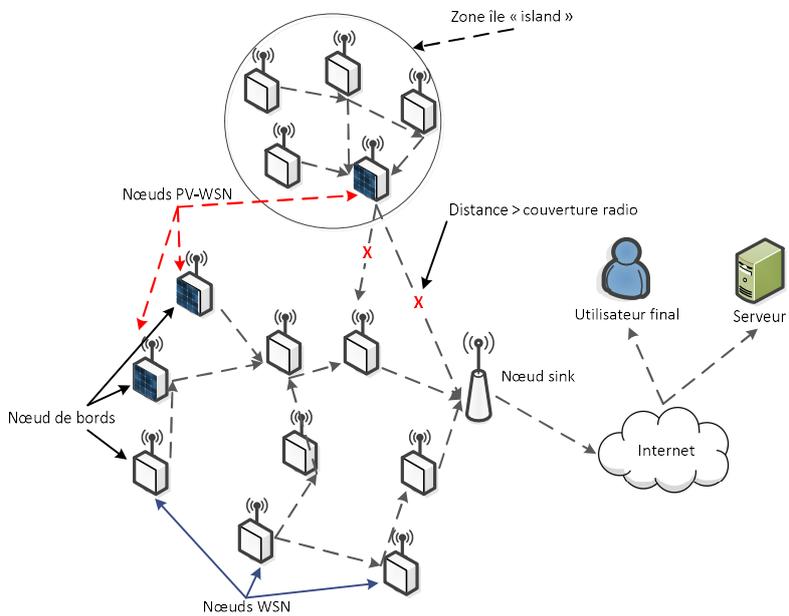


Figure 20 : PV-WSN avec illustration combiné entre de zones îles « islands » et nœud de bords

#### 4.3. Problématique étudiée et hypothèses

Dans ce chapitre un modèle original est étudié et développé capable d'évaluer la fiabilité des WSN (sans PV) et des PV-WSN dans un contexte réaliste i.e. en tenant compte des facteurs environnementaux appropriés, des différents types de défaillances conduisant à la défaillance du réseau et la consommation d'énergie des nœuds. La quantité d'énergie qu'un nœud équipé de cellules photovoltaïques peut récolter dépend de plusieurs paramètres, comme par exemple, l'orientation de nœud par rapport au soleil, son élévation, etc.

Les principales hypothèses figurent dans le chapitre 3, voici celles qui ont été nécessaires pour traiter le cas des nœuds avec cellules photovoltaïques :

1. Les valeurs de recharge pour l'énergie récoltée par la cellule PV sont multipliées par une valeur aléatoire uniformément répartie entre 0 et 1 (taux de performance), pour tenir compte de l'orientation, du climat et des facteurs environnementaux pouvant affecter le système photovoltaïque (voir § 5.6).
2. L'orientation des nœuds de capteurs est évaluée en utilisant une fonction probabiliste afin de calculer le taux de performances des PVs et leurs dégradations en termes de production énergétique.

D'autres hypothèses relatives aux évaluations de la fiabilité des capteurs et à la consommation d'énergie sont détaillées dans des paragraphes ci-après.

#### 4.4. Modélisation du fonctionnement des PV-WSN

Dans ce chapitre, les travaux se concentrent uniquement sur un environnement forestier (bien entendu, il sera plus facile de traiter le cas de déploiement en pleine, les conditions de « terrain » étant moins complexes) où la distribution des nœuds des WSN est aléatoire. Cependant, le nœud récepteur uniquement est considéré comme étant placé dans une zone accessible (donc une source d'énergie stable, maintenance régulière, et intervention rapide si besoin). Dans cette distribution du réseau de capteurs, les nœuds des WSN doivent interagir afin de se « découvrir » les uns les autres

(Orlinski et al. (2015), Zhang et al. (2013)) et de trouver les chemins vers le nœud « sink » afin de transporter les données récoltées vers ce dernier.

Ainsi, le mode de fonctionnement des réseaux de capteurs équipés à quelques pourcents (typiquement 10 %) de cellules photovoltaïques est similaire au niveau de la consommation énergétique décrit au § 3.4 du chapitre 3. La différence concerne le calcul de l'énergie produite suite à la présence de PV dans le système, l'influence de l'ajout de nouveaux composants électroniques sur la fiabilité des composants électroniques, et finalement l'amélioration dans le cas d'applications pour lesquelles les tailles des messages sont ajustées.

On rappelle qu'après une période de temps  $t$  donnée, l'énergie restante  $E(t)$  pour un nœud  $i$  est :

$$E_i(t) = \max(0, BC - E_{C,i}(t))$$

Le but de l'utilisation de l'énergie solaire et des cellules photovoltaïques est de prolonger la durée de vie d'un WSN à l'aide de piles rechargeables. Celles-ci se rechargent à l'aide d'une source environnementale et d'un système plus robuste et fiable.

#### 4.5. Production de l'énergie solaire

Ce paragraphe présente la formulation utilisée pour calculer la récolte d'énergie par les cellules photovoltaïques et la consommation d'énergie (voir détails dans Honsberg et al. 2016).

L'énergie récoltée  $E_{H,i}$  pour un nœud donné  $i$  dépend de nombreux paramètres tels que la surface photovoltaïque disponible ( $A_{PV}$ ), le rendement du panneau solaire  $r$ , le rayonnement solaire moyen annuel sur les panneaux inclinés  $H$  et le rapport de performance  $PR$  (coefficient de pertes) :

$$E_{H,i} = A_{PV} \cdot r \cdot H \cdot PR \quad (15)$$

Avec  $r$ , le rendement du panneau solaire, qui peut être obtenu par la formule suivante :

$$r(\%) = (E_p / A_{PV}) / E_{p,0}$$

$E_p$  est la puissance électrique du panneau photovoltaïque représentée en kilowatt-crête (kilowatt-peak) (kWp) dans les conditions d'essai standard (IEC 60904-3: 2008),  $A_{PV}$  est la surface du panneau PV en mètres carrés et  $E_{p,0}$  est la puissance électrique standard par mètres carré (1 kW.m<sup>-2</sup>).

Le rayonnement solaire moyen par année  $H$  peut être obtenu avec la formule suivante :

$$H = R_h \cdot \sin(\alpha + \beta) / \sin \alpha$$

Où  $R_h$  est le rayonnement solaire annuel mesuré sur une surface horizontale (Wh.m<sup>-2</sup>),  $\alpha$  est l'angle d'élévation du soleil et  $\beta$  est l'angle d'inclinaison du panneau mesuré par rapport à l'horizontale. L'angle d'élévation du soleil est défini comme suit :

$$\alpha = 90 - \varphi + \delta \text{ pour l'hémisphère nord}$$

et

$$\alpha = 90 + \varphi - \delta \text{ pour l'hémisphère sud}$$

Où  $\varphi$  est la latitude et  $\delta$  est l'angle de déclinaison solaire.  $\delta$  est calculé selon la formule :

$$\delta = \arcsin(\sin(23.45^\circ) \times \sin((d - 81) \cdot 360 / 365))$$

Où  $d$  est le nombre de jours à compter du 1<sup>er</sup> janvier. Le rayonnement solaire moyen annuel sur les panneaux inclinés  $H$  est supposé constant dans tous nos calculs.

Le rapport de performance  $PR$  évalue la qualité de l'installation de la cellule photovoltaïque, qui prend en compte toutes les pertes telles que : les pertes dues au contrôleur de charge, celles dues aux températures, dues à la conduction thermique, à l'ombrage, ainsi que des pertes dues à l'inclinaison et l'orientation sous-optimales, etc.  $PR$  peut être évalué à partir de l'expression suivante :

$$PR = c.PV_{ef}$$

Où  $PV_{ef}$  représente le facteur d'efficacité du panneau PV (pertes liées à l'inclinaison et à l'orientation) et  $c$  représente toutes les autres pertes (valeur considérée constante).

On en déduit l'énergie restante  $E_{PV,i}(t)$  dans un nœud de capteur  $i$  équipé d'un PV au sein d'un PV-WSN :

$$E_{PV,i}(t) = \min(BC, \max(0, E_{H,i}(t) - E_{C,i}(t))) \quad (16)$$

Avec  $BC$  la capacité de la batterie du nœud de capteurs,  $E_{H,i}(t)$  l'énergie récoltée par le nœud exprimée en milli-joules sur un temps  $t$ , et  $E_{C,i}(t)$  est l'énergie totale consommée par un nœud en milli-joules sur un temps  $t$ .

#### 4.6. Fiabilité des PV-WSN

La disponibilité de PV-WSN  $A(t)$  est évaluée en utilisant la probabilité qu'un événement soit détecté par le PV-WSN à l'instant  $t$  (par exemple le début d'un incendie ou la présence d'un polluant). On rappelle qu'un événement est considéré comme détecté si les trois conditions suivantes sont vérifiées simultanément :

1. Un seuil de sensibilité spécifique est atteint en fonction de critères définis pour les capteurs des nœuds (voir chapitre 3 section 3.5.2);
2. Les capteurs contribuant à la détection sont disponibles au temps  $t$  (disponibilité,  $a_i(t)$ );
3. Les informations de détection envoyées par les capteurs ont été reçues par le nœud récepteur (avec l'hypothèse que le nœud récepteur était dans un état de fonctionnement normal à l'instant  $t$ ).

La première condition est présentée dans le chapitre précédent (chapitre 3 section 3.5.2), elle se traduit par une probabilité de détection par nœud  $i$ , soit  $P_{Di}(t) = P(s_i(t) \geq S)$ . Dans la cas d'un ensemble de détecteurs (nœuds) nécessaire pour assurer la détection d'un évènement on remplace  $i$  par  $e_{s,k}(t) = \{i_{1,k} \dots i_{s,k}\}$  qui est le  $k^{\text{ème}}$  ensemble de détection  $k \in \{1 \dots N_s\}$ .

La seconde condition est caractérisée par la disponibilité des capteurs activés  $a_i(t)$  à l'instant  $t$  ( $i \in e_s$ ) et dépend de la disponibilité des composants électroniques, de la disponibilité des cellules PV (uniquement pour les PV-WSN), de la disponibilité des piles et de l'épuisement des piles (voir détails dans les paragraphes suivants et dans le chapitre 3 section 3.5.2 pour les composants présents dans les nœuds sans PV).

La troisième condition est représentée par la probabilité  $P_{s,i}(t)$  au temps  $t$  que l'information soit reçue par le nœud « sink » ( $i \in e_s$ ). Cette probabilité peut également être évaluée sur la base de l'union des événements définis par les chemins disponibles  $r_{ik}$  à partir des nœuds capteurs activés  $i$  vers le nœud récepteur « sink » (c'est-à-dire lorsque la perte aléatoire des paquets est considérée comme négligeable comme expliqué précédemment voir chapitre 3 section 3.5.2).

La disponibilité  $A_S(t)$  peut toutefois être exprimée d'un point de vue général par (avec  $n_k$  détections par des nœuds dans  $z_k$ ) :

$$A_S(t) = A_0(t) \cdot \prod_{k=1}^{N_z} \sum_{\substack{i \in Z_k \\ j = \lfloor p \cdot n_k \rfloor}}^{n_k} \binom{n_k}{j} a_i^j(t) (1 - a_i(t))^{n_k - j}$$

Avec  $j$  capteurs disponibles identiques (disponibilité identique  $a_i(t)$ ) parmi  $n_k$  nécessaires pour une détection dans une zone donnée  $z_k$ , et  $A_0(t)$  la probabilité qu'au moins un chemin atteigne le sink :

$$A_0(t) = \sum_{i=1}^{N_z n_k} a_i(t) P_{s,i}(t)$$

Dans ce modèle, la probabilité d'événements élémentaires (disponibilité des nœuds de capteurs) des chemins est nécessaire pour évaluer  $A_S(t)$ . Par conséquent, la disponibilité de PV-WSN peut être approchée par la disponibilité de tous les voisins du nœud « sink » (les coupes minimales prépondérantes). Et donc, la disponibilité  $A_{n,S}(t)$  des  $n_s$  voisins du nœud « sink » est :

$$A_{n,S}(t) = 1 - \left(1 - e^{-\lambda_{n,S} t}\right)^{n_s} \geq A_S(t)$$

Avec  $\lambda_{n,S}$  est le taux de défaillance d'un voisin du nœud « sink » (un taux de défaillance exponentiel identique est supposé pour chaque voisin du nœud « sink »).

#### 4.6.1. Fiabilité des cellules photovoltaïques

Le calcul de la fiabilité des cellules photovoltaïques peut être basé sur la même approche que pour la fiabilité des composants électroniques (photodiode, MIL-HBk 217F 1991) en utilisant l'expression (Bazzi et al. 2011, avec  $\pi_s = \pi_c = 1$ ) :

$$\lambda_{p,PV} = \lambda_{p,b} \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \quad \text{h}^{-1} \quad (17)$$

Avec  $\lambda_{p,b} = 0.04 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$  qui est le taux de défaillances de base et d'autres paramètres donnés dans le Tableau 2. Le facteur environnement est choisi pour les conditions dures (GM) afin de tenir compte de la poussière et d'autres perturbations naturelles. Le facteur de température  $\pi_T$  (température et humidité) est détaillé ci-dessous (Tableau 3). Toutefois, les données et études actuelles restent insuffisantes pour appliquer des modèles pertinents plus avancés.

	<b>Formules ou valeurs</b>	<b>Hypothèses</b>
$\pi_E$	9.0 (1.0 in Bazzi <i>et al</i> 2011, GB)	GM
$\pi_Q$	5.5	Inférieur
$\pi_T$	$\exp \left[ -3091 \left( \frac{1}{T_J + 273} - \frac{1}{298} \right) \right]$	$T_J = 40^\circ\text{C}$ (comme dans Bazzi <i>et al.</i> 2011)

Tableau 3 : Paramètres pour l'évaluation du taux de défaillance des cellules PV

D'autres dégradations à long terme comme le stress UV (décoloration) peuvent également être prises en compte (cf. Ndiaye et al. 2013) mais restent peu pertinentes pour un réseau de capteurs en milieu naturel dont la durée de vie est assez courte comparativement à la durée de vie des cellules photovoltaïques utilisées pour la production d'énergie domestique ou de masse.

Avec ces hypothèses, le taux de défaillance des cellules PV  $\lambda_{p,PV}$  peut être évalué à environ  $2 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ . Les influences environnementales ont été globalement prises en

compte mais devront être améliorées dans les futurs modèles (en particulier en fonction de l'évolution des études actuelles et futures du comportement des cellules photovoltaïques avec des conditions d'usage en milieu naturel).

#### 4.6.2. Fiabilité des batteries

Les batteries considérées ici correspondent à celles du § 3.5.3, i.e. des piles rechargeables classiques de type NiMH (nickel-hydrure de métal), NiCd, acide de plomb ou contenant du lithium. La fiabilité est calculée à partir d'un modèle de taux de défaillance (FIDES 2013) pour le cas des batteries au nickel et au lithium. Le taux de défaillance de ces piles est de la forme  $\lambda_B(t) = \lambda_0(X(t)) + \lambda_a(t)$  où  $\lambda_0(t)$  est le taux de défaillance de base qui prend en compte les phénomènes physiques, la fabrication et le cycle de vie, et  $\lambda_a(t)$  est le taux de défaillance associé au vieillissement.

En particulier, on peut approximer  $\lambda_a(t)$  par :

$$\lambda_a = -\beta \cdot \ln(0.9) \cdot n_r \frac{(\ln(0.5) / \ln(0.9))^{\frac{\beta-1}{\beta}}}{8760 \cdot n_c}$$

Ce taux moyen de défaillance de vieillissement dépend ainsi de  $n_r$  le nombre de cycles de recharge par an,  $n_c$  le nombre de cycles de recharge moyen que peut réaliser la batterie et  $\beta$  le paramètre de forme de la distribution de Weibull associée au processus de dégradation de la batterie (cf. § 3.5.3).

#### 4.7. Cas d'application 1

Un exemple de PV-WSN est présenté dans cette partie avec un seul cluster et un seul nœud « sink » par cluster. Un système de WSN sans cellules photovoltaïques est proposé afin de comparer la fiabilité des deux systèmes et les avantages/inconvénients de chaque système en termes de durée de vie. Les paramètres et caractéristiques utilisés dans cet exemple sont les mêmes que ceux de la section 3.6 avec quelques modifications et ajouts indiqués ci-dessous :

- La fréquence d'envoi des messages « HELLO » est de 6 secondes;

- La taille des messages de type « HELLO » est de 64 octets ( $E_0 = 10,74$  mJ)
- La taille des messages de type « données » est de 128 octets dont l'en-tête, les données, et la queue ( $E_{into} = 18,78$  mJ);
- Taille de message de « Beacon » = 8 octets
- Le facteur d'irradiation solaire annuel pour le déploiement du système dans une région comme Troyes est fixé à  $H = 1200$  kWh.m<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>, plus faible que la valeur estimée de 1380 kWh.m<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> de la Commission européenne (JRC 2017) pour prendre en compte l'atténuation de l'irradiation solaire dans les zones forestières;
- Deux batteries rechargeables de type Energizer NiHN 15-2000;
- Les cellules photovoltaïques sont du type Silicium poly-cristallin (SolarCell-52x78);
- Dimension des cellules-PV,  $A_{PV} = 52 \times 78$  mm<sup>2</sup>;
- Le watt-peak  $E_p = 0,71$  Watt;
- Le taux de performance de PV est composé de deux parties : les pertes estimées à 0,75 (les pertes relatives à la connectivité de raccordement, les circuits électriques,...) et l'efficacité de PV ( $PV_{ef}$ ) impacté par l'orientation, l'élévation du soleil, le climat « nuages ou autres », la poussière et la pluie ;
- 10% de nœuds sont équipés de cellule-PV.

Les résultats ont été obtenus à partir de 1500 simulations Monte Carlo à l'aide d'un PC (HP Envy, Core i7, 16 Gb de mémoire volatile), avec des temps de calcul maximum d'environ 24 heures par simulation pour chacun des cas WSN et PV-WSN. Le cas WSN ne comporte aucune cellule photovoltaïque, tandis que la condition PV-WSN présente 10% de nœuds équipés de cellules-PV et de piles rechargeables. Cette configuration PV-WSN proposée est relativement peu coûteuse par rapport à un WSN classique.

Plusieurs simulations ont été effectuées pour les cas WSN et PV-WSN afin d'obtenir des informations sur la fiabilité du réseau pour plusieurs types de défaillances comme par exemple, les défaillances des composants électroniques des nœuds conduisant à la défaillance du réseau. Il était attendu que l'impact des défaillances de composants électroniques (c'est-à-dire du matériel réseau) sur la fiabilité globale du réseau soit négligeable pour le cas du WSN, sur la base des résultats rapportés dans la littérature existante. Cependant, les simulations ont révélé que la défaillance des composants électroniques joue un rôle important dans la détérioration de la fiabilité du réseau pour les deux cas évalués : WSN, réseau de capteurs équipés de deux batteries à usage

unique sans avoir une source d'énergie alternative (Figure 21); PV-WSN, réseau de capteur équipé avec des cellules PV (seulement 10 % de nœuds de capteurs sont équipés de cellules PV) ainsi que des batteries rechargeables comme source alternative d'énergie (Figure 22).

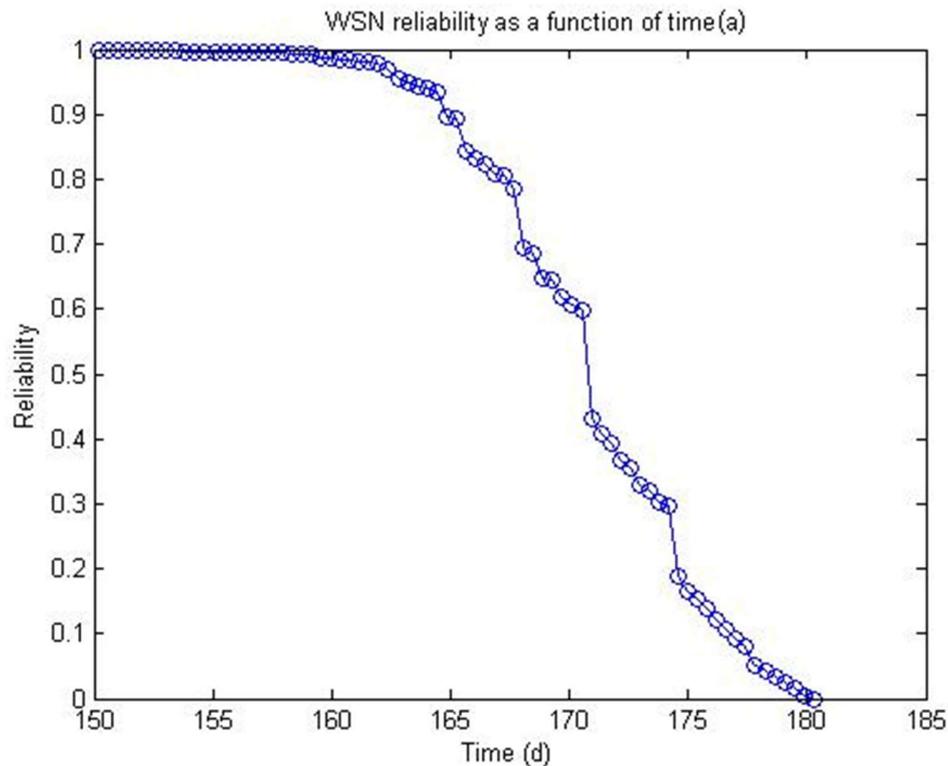


Figure 21 : Fiabilité de réseau de capteur sans PV (WSN) en fonction de temps

Pour le WSN, une défaillance complète du réseau s'est produite après 180 jours. Le seuil de défaillance est défini par l'absence de chemin disponible entre n'importe quel nœud source et le nœud « sink » dans le réseau WSN. Les changements apportés au cas d'applications du WSN par rapport à la section 3.5 ont contribué à la réduction importante de la durée de vie du réseau de capteurs. Ces changements concernent la taille des messages de données, la taille du message « Hello », la périodicité de transmission ainsi que la taille du message « Beacon ». La durée de vie du réseau a été considérablement prolongée pour l'état PV-WSN, cependant une défaillance complète du réseau se produit après 10 000 jours en moyenne. La défaillance observée sur la Figure 21 peut être expliquée par l'épuisement d'énergie des batteries de capteurs et de leurs incapacités de se recharger (absence d'une source alternative d'énergie et

batteries à usage unique). Comme le cas PV-WSN permet à 10% des nœuds de recharger leurs batteries, la durée de vie du réseau a été prolongée. L'échec éventuel dans les cas WSN et de PV-WSN peut être dû également à la défaillance des composants électroniques.

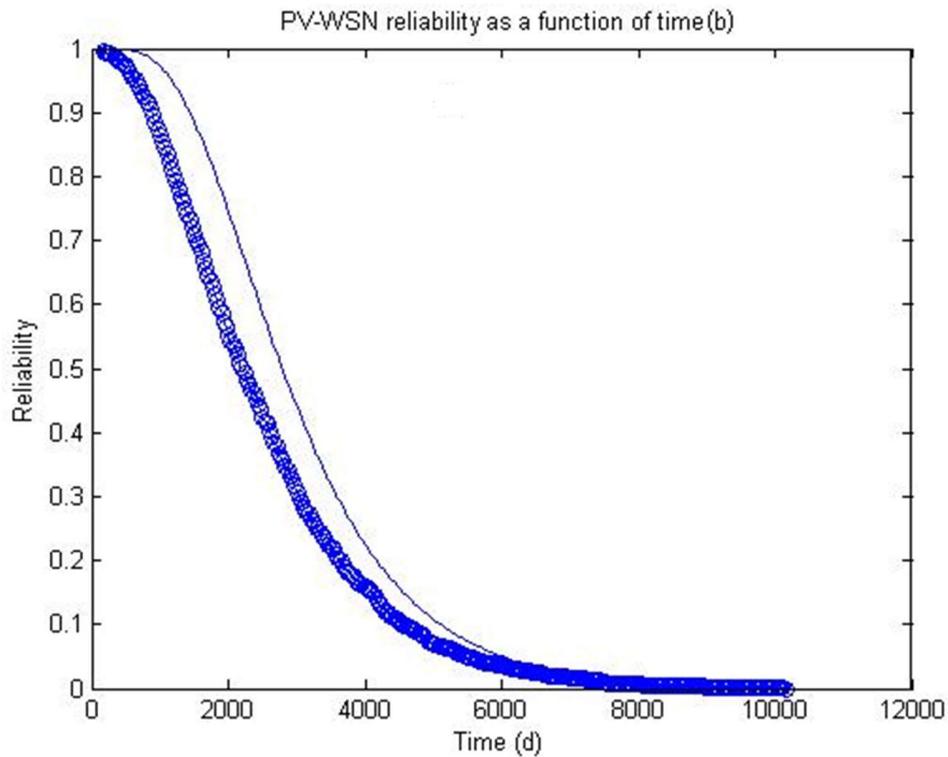


Figure 22 : Fiabilité de réseau de capteur avec PV (PV-WSN). La courbe en trait continu représente la fiabilité maximale du PV-WSN théorique (application de la formule 12).

De la même façon que dans la section 3.6, Figure 14, les résultats illustrés par la Figure 23 montrent que les défaillances des composants électroniques constituent une cause importante de la défaillance globale du réseau pour le cas de WSN, et donc ce type de défaillance affecte significativement la fiabilité WSN.

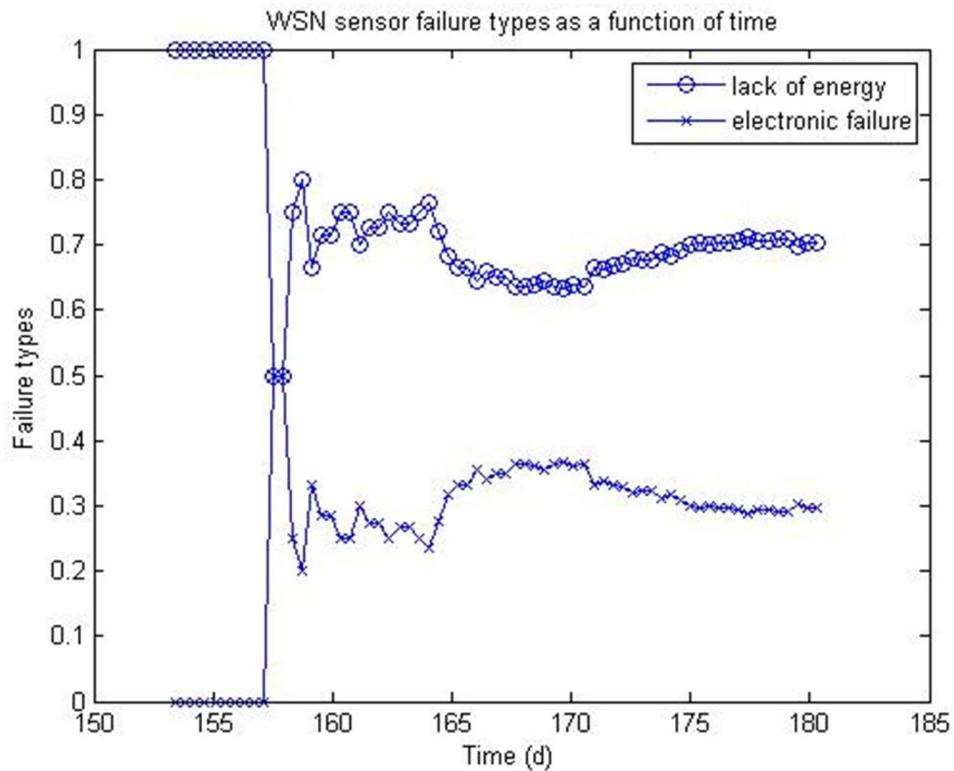


Figure 23 : Types de défaillances dans le cas des WSN en fonction de temps

Comme le montre la Figure 23, les défaillances des capteurs dues aux défaillances physiques des composants électroniques restent négligeables jusqu'à 156 jours, le manque d'énergie (c'est-à-dire l'épuisement de batteries) étant alors le principal facteur responsable de la défaillance du WSN. Ceci s'avèrent ressemblant à la contribution du même type de défaillance représenté précédemment dans la section 3.6 figure 10 avec un taux de défaillance physique qui devient plus important après 1700 jours. Cependant, entre 157 jours et 158 jours, la contribution des défaillances des composants électroniques augmente pour atteindre 50% des défaillances globales des nœuds. Pour décrire cette augmentation significative, on peut calculer le temps moyen nécessaire aux piles des nœuds voisins du nœud « sink » pour être épuisées : celui-ci est de 140 jours.

La répartition observée des types de défaillance présentée à la Figure 23 peut être expliquée en considérant la consommation d'énergie des nœuds voisins du « sink » comme étant le type de défaillance limite dans les 140 à 156 premiers jours de la durée

de vie du WSN, après quoi les défaillances des composants électroniques commencent à contribuer plus significativement à la fiabilité du réseau de capteurs WSN. Ainsi, une fois que les nœuds qui consomment le plus d'énergie échouent (c'est-à-dire lorsque les nœuds voisins du « sink » échouent), la proportion de défaillances de composants électroniques augmente. La Figure 23 montre également qu'après 158 jours, les contributions relatives des deux types de défaillance se stabilisent, les défaillances dues aux défaillances électroniques et aux défaillances par manque d'énergie contribuant respectivement à environ 30% et 70% aux défaillances du WSN. Ces résultats mettent en évidence l'importance des défaillances des composants électroniques dans les évaluations de fiabilité de WSN.

La Figure 24 décrit en détail les types de défaillance affectant la fiabilité de PV-WSN (Figure 22), comprenant deux types de défaillances supplémentaires afin de mieux décrire les causes de la défaillance de PV-WSN.

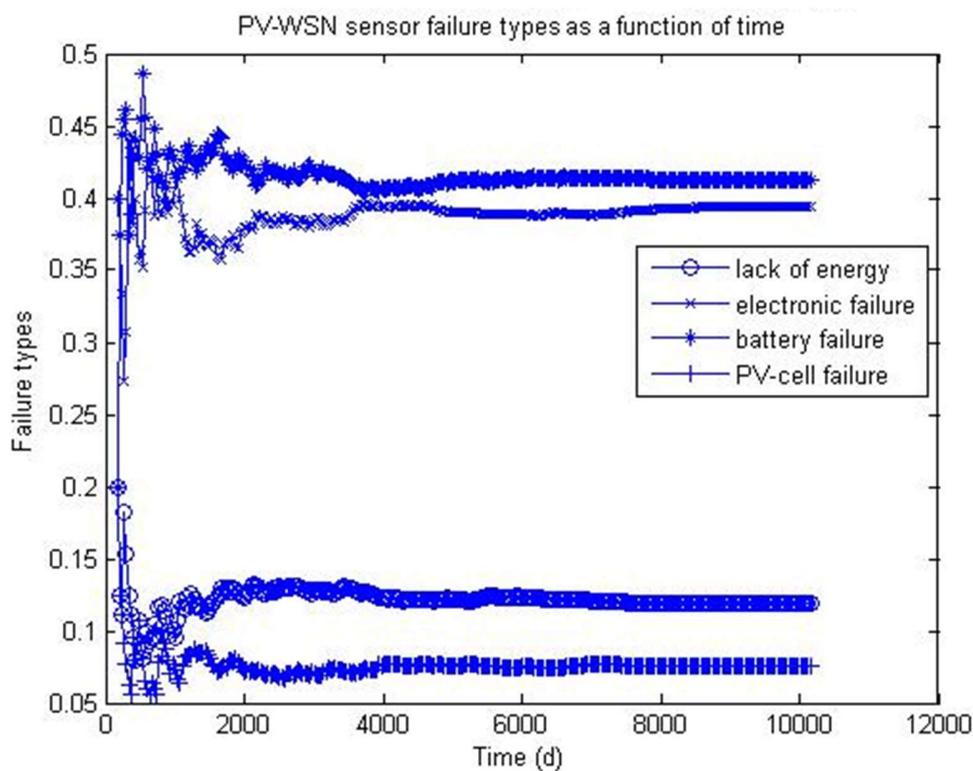


Figure 24 : Types de défaillances dans le cas des PV-WSN en fonction de temps

La Figure 24 montre que les quatre types de défaillance ont affecté la fiabilité de PV-WSN dès le début de la simulation. Les défaillances dues à un manque d'énergie représentent environ 12% de la défaillance globale et cela augmente à 20% après 200 jours. Ce grand décalage dans les pourcentages entre le cas de WSN (sans PV) et le cas de PV-WSN peut être expliqué par la présence d'une source d'énergie alternative dans le deuxième cas.

Cependant, les défaillances dues aux composants électroniques représentent approximativement 39% sur l'ensemble des types de défaillances. Ce taux est particulièrement important et peut être expliqué par l'augmentation considérable de la durée de vie du réseau. Bien que le pourcentage des défaillances dues aux composants électroniques s'avère élevé, il n'en est pourtant pas plus significatif sur les autres types de défaillance. Le type de défaillance le plus impactant pour la défaillance globale est la défaillance physique des batteries représentant approximativement 41%. Cela met en évidence un deuxième aspect à prendre en considération dans les études de fiabilité de réseaux de capteurs. Le paramètre qui contribue le moins à la défaillance globale est la défaillance physique des cellules photovoltaïques (<7,5%). Ceci peut être justifié par le manque de données réalistes qui permettent d'évaluer au mieux cette contribution.

#### 4.8. Cas d'application 2

Cet exemple du PV-WSN présente un système de 4 sous-clusters avec un seul nœud « sink » appelé « clustered structure » et un système à un seul cluster avec un seul nœud « sink » appelé « non-clustered structure ». Le système multi-cluster garantit une meilleure qualité de surveillance de la zone ainsi qu'une meilleure identification spatiale de détection des événements (départ de feu) grâce aux exigences requises qui nécessitent un seuil minimum de nœuds actifs par cluster (nœuds capables de détecter un événement et apte à transmettre ses informations via des chemins actifs vers le sink). L'étude s'intéresse à l'évaluation de la fiabilité de chaque système tout en garantissant une couverture réseaux « seuil de  $k$ -couverture » prédéfinie. La couverture réseau consiste à avoir un nombre minimum de nœuds de capteurs non défaillants disposant de chemins valides vers le nœud « sink ». Dans la « clustered structure » le seuil de couverture est exigé par sous-cluster tandis que dans la « non-clustered structure » il est défini par le cluster en entier. Les paramètres et caractéristiques utilisés dans cet exemple sont les mêmes que ceux du paragraphe 4.7 avec quelques modifications et ajouts indiqués ci-dessous :

- Surface de déploiement = 1 km<sup>2</sup>
- Nombre de nœud = 150
- 100% de nœuds sont équipés de cellule-PV
- Seuil de *k*-couverture = 25 %
- Simulation Monte Carlo = 5000

Une comparaison est effectuée entre les deux systèmes afin d'évaluer la fiabilité des deux systèmes et voir les avantages/inconvénients de chacun en termes de durée de vie et de qualité de surveillance de chacun.

L'évolution de la fiabilité au fil du temps (en jours) du PV-WSN « non-clustered structure » est représentée dans la Figure 25. La courbe de cette figure est typique pour une fonction de fiabilité, présentant un changement de forme après 450 jours, ce qui peut s'expliquer par les contributions changeantes de différents types de défaillances. La courbe montre en outre que la durée de vie maximale du réseau a atteint 1200 jours (MTTF de 561 j) pour le scénario « non-clustered structure », ce qui s'explique par le seuil de couverture de 25%, qui englobe à la fois les nœuds «critique» (nœuds voisins du « sink » pour le scénario « non-clustered structure », en ajoutant ceux qui jouent le rôle de passerelle d'une zone à une autre pour le scénario « clustered structure ») et des nœuds non critiques. Lorsqu'un nœud passerelle devient défaillant, plusieurs nœuds de sous-clusters desservis par ce nœud deviennent également indisponibles, ce qui rend ces nœuds vulnérables vis-à-vis de la durée de vie du réseau.

Le scénario « clustered structure » a plus de nœuds critiques (à la fois passerelle et voisins du « sink »), ce qui le rend plus vulnérable à la défaillance du réseau, comme la perte de fonction pour un de ces nœuds conduisant à l'indisponibilité les nœuds connectés le long du chemin. En effet, le scénario « non-clustered structure », avec ses nombres de nœuds critiques moins importants, aura une durée de vie prolongée du réseau par rapport au scénario « clustered structure ».

La Figure 26 représente l'évolution de la fiabilité en fonction de temps (en jours) pour le scénario « clustered structure ».

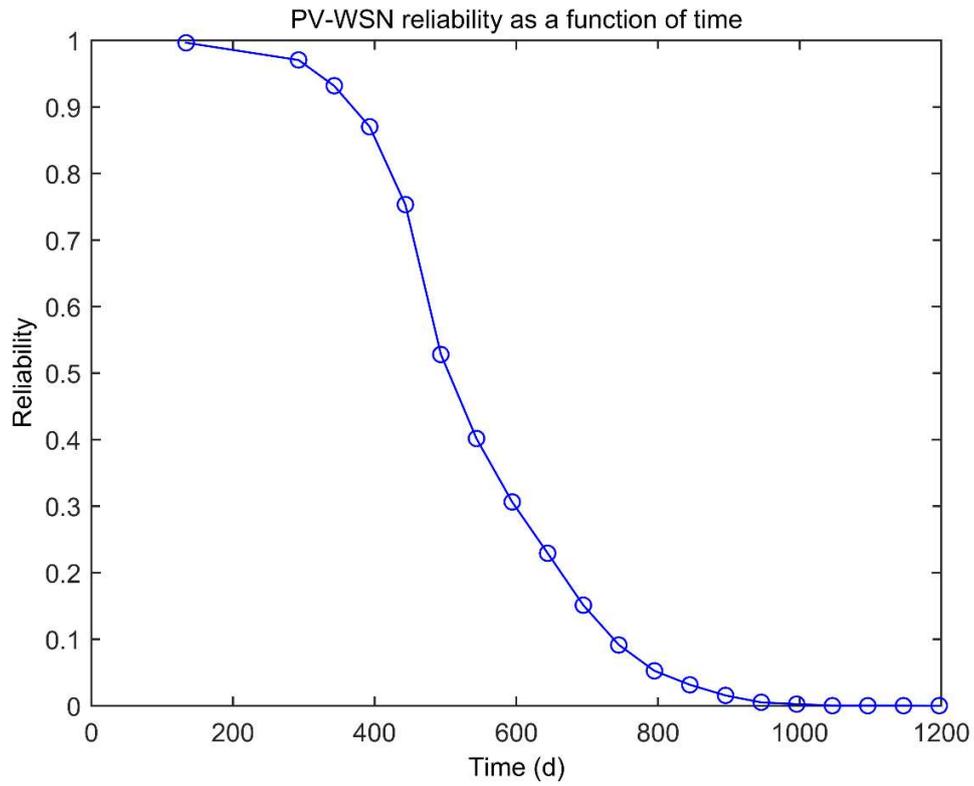


Figure 25 : fiabilité de système « Non-clustered structure »

La courbe de la Figure 26 est également typique pour une fonction de fiabilité, diminuant légèrement après 250 jours pour atteindre sa valeur minimale à environ 450 jours (MTTF de 324,5 j). Cela s'explique par la fiabilité de  $k$ -couverture par phénomène de sous-cluster, qui limite la couverture d'une zone surveillée.

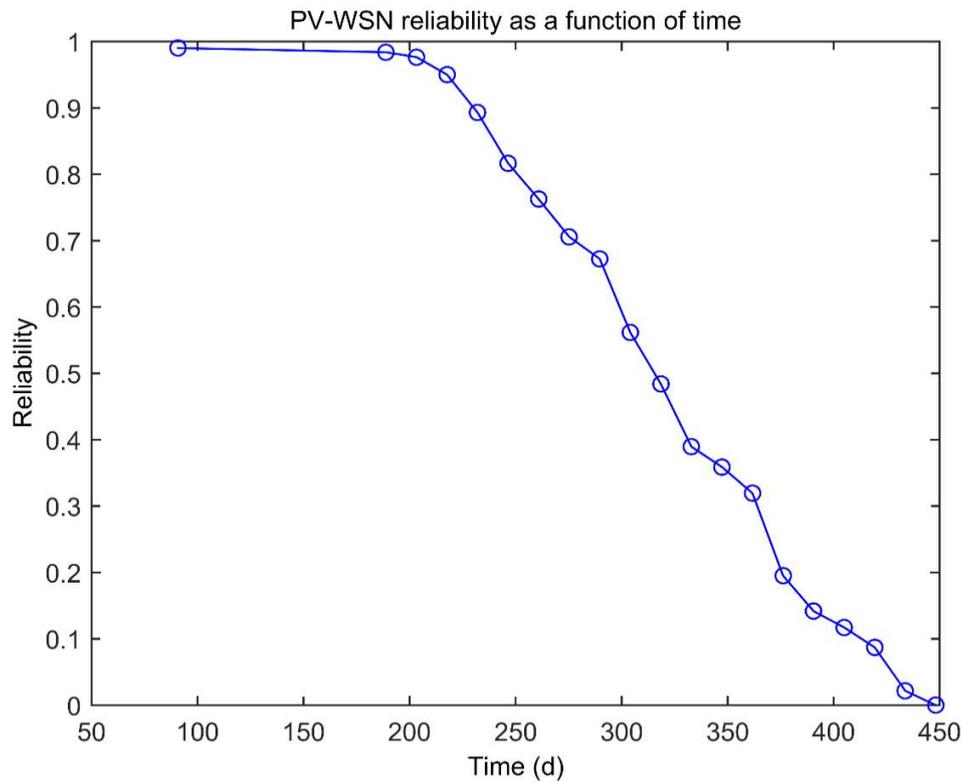


Figure 26 : fiabilité de système « clustered structure »

Ainsi, on constate que la Figure 26 à une forme générale comparable à celle de la Figure 25, les paramètres de simulation demeurant les mêmes entre les deux scénarios. Mais, la durée de vie du réseau dans le scénario de « non-clustered structure » est beaucoup plus longue, ce qui s'explique par sa « résistance » à la défaillance, et donc une disponibilité qui est meilleure car le scénario « non-clustered structure » a comparativement moins de nœuds critiques.

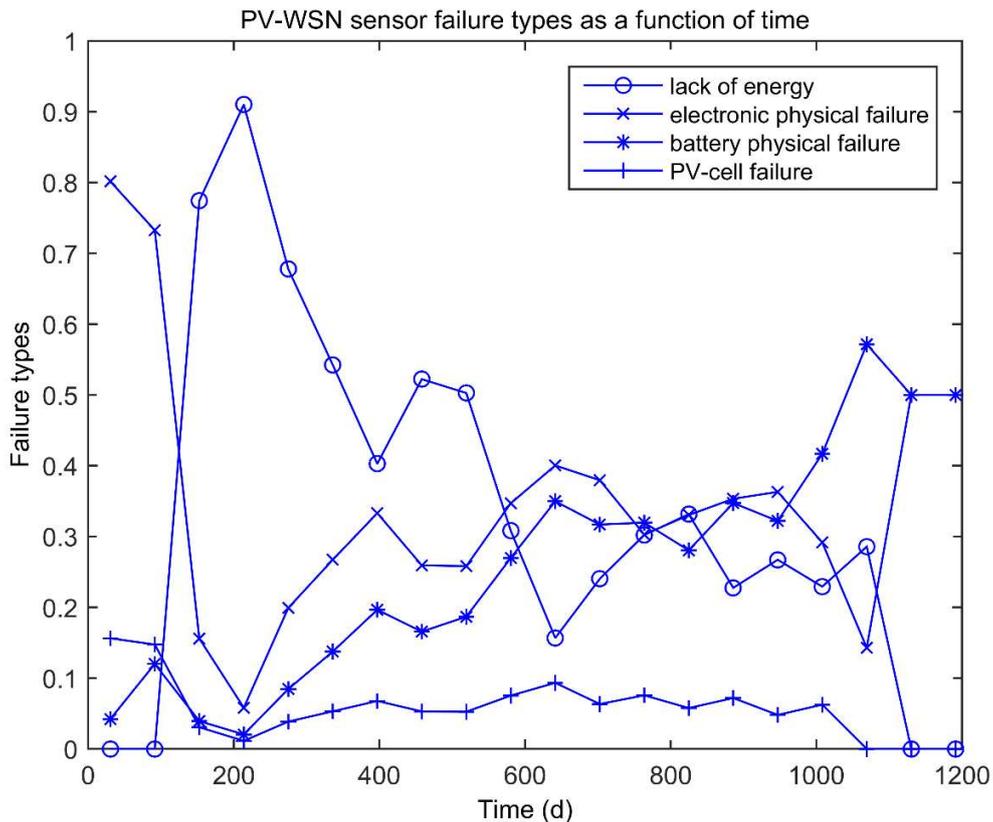


Figure 27 : Types de défaillances dans le cas de « non-clustered structure »

Les défaillances physiques électroniques sont les facteurs les plus importants pour la défaillance des capteurs au cours des 175 premiers jours pour les deux scénarios (Figure 27 et 28), ce qui représente plus de 65% des défaillances. Ceci peut s'expliquer par le fait que les nœuds sont tous équipés de mini-cellules photovoltaïques qui diminuent leurs probabilités de défaillance par manque d'énergie. Cependant, après 175 jours, les défaillances dues au manque d'énergie apparaissent et deviennent prépondérantes par rapport aux autres types de défaillance pour les deux scénarios (Figure 27 et 28). Ceci est dû au fait que dans la première période plusieurs nœuds intermédiaires sont devenus défaillants (défaillances physiques). Alors, cette diminution du nombre de nœuds intermédiaires implique que les autres nœuds intermédiaires encore actifs prennent le relais afin d'acheminer le trafic vers le nœud. Cela nécessite une consommation énergétique plus importante et conduit à des défaillances dues au manque d'énergie. Bien que la durée de vie maximum du réseau soit atteinte à 450 jours dans le scénario de « non-clustered structure » (Figure 28), la contribution des différents types de défaillance se poursuit dans le scénario « clustered structure »

(Figure 27) jusqu'à 1200 jours. En effet, d'autres types de défaillance font leur apparition en contribuant à la défaillance de réseau telle que la défaillance de batterie physique qui contribue à 40% en moyenne pour atteindre les 50% en fin de vie. Le type de panne de cellule PV a contribué de façon négligeable dans les deux scénarios, représentant seulement 5% en moyenne dans chacun des deux cas.

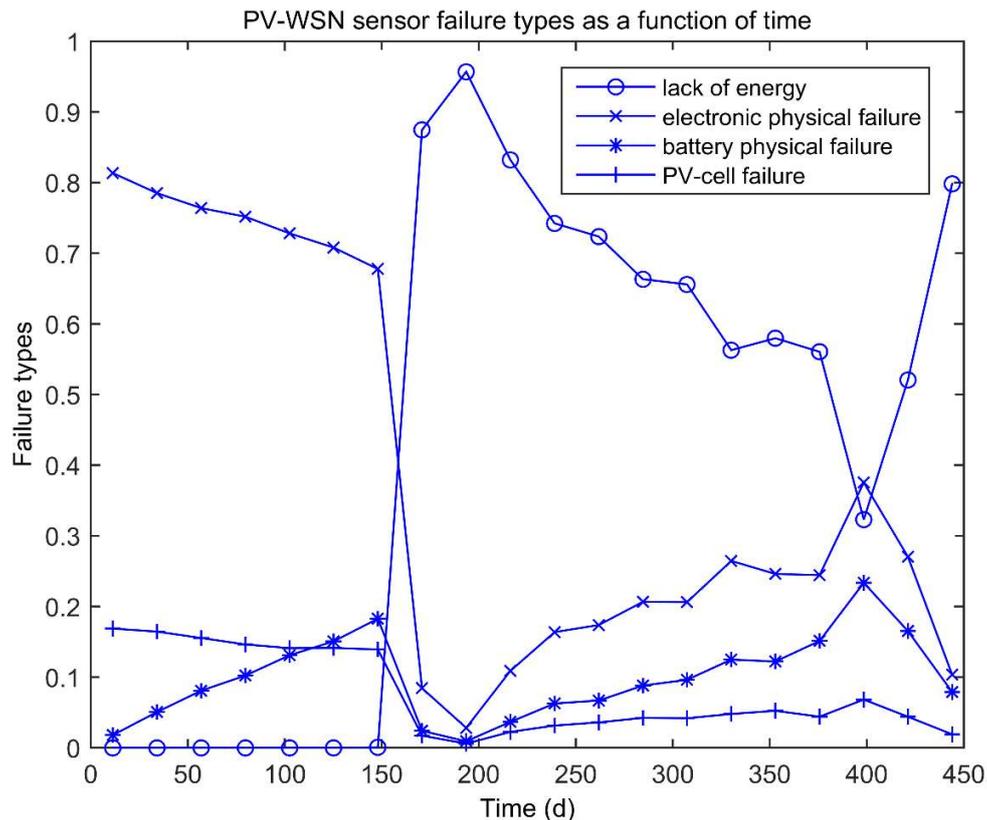


Figure 28 : Types de défaillances dans le cas de « clustered structure »

*Remarque : influence du nombre de capteurs*

L'évaluation de la fiabilité d'un réseau de capteurs pour le cas de « clustered structure » avec une distribution de nombre de capteurs inférieurs à celui utilisé dans la Figure 26 est proposé. La fiabilité d'un réseau de 100 nœuds de capteurs au cours du temps est représentée dans la Figure 29. Avec un nombre de capteurs réduit de 1/3 par rapport au cas de la Figure 26 (cas de 150 capteurs « clustered structure »), l'allure de l'évolution de la fiabilité reste très ressemblante à celle du Figure 26. Cependant,

comme cela était prévisible, la durée de vie du système diminue (MTTF de 287,5 j) avec une chute à 340 jours, valeur inférieure au cas avec un nombre de capteurs plus élevé (voir Figure 26) dont la durée maximale de fonctionnement est de 450 j (MTTF de 324,5 j). La réduction d'un tiers des capteurs a donc diminué sensiblement la durée de vie soit 12% de moins pour le MTTF et surtout la durée de vie maximale qui chute de 25%. En fonction des besoins de durée d'exploitation, des performances attendues et des coûts, le dimensionnement d'un WSN pourrait être étudié sur la base de ces simulations (cf. perspectives, § 6.4).

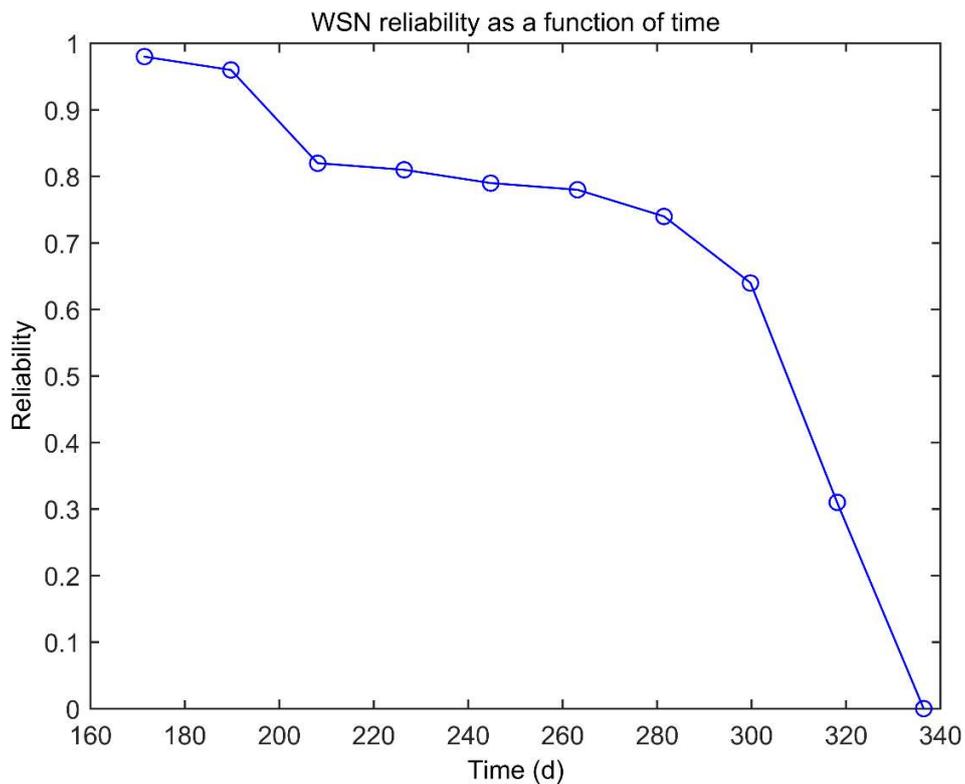


Figure 29 : fiabilité de système « clustered structure » (100 capteurs)

## 4.9. Conclusion

Dans ce chapitre, le modèle a été amélioré afin de prendre en considération des équipements disposant de mini-cellules PV plus adaptées pour la surveillance des changements des événements environnementaux. Le modèle de fiabilité a été aussi adapté afin de prendre en considération les changements apportés aux composants physiques des nœuds tel que l'ajout des mini-cellules PV et les batteries rechargeables. De plus, les aspects réseautiques ont été revus pour une meilleure considération afin de représenter des cas pratiques plus réalistes. Ces changements apportés au modèle initial du chapitre 2 sont également prévus pour intégrer et paramétrer de potentielles futures évolutions.

Le modèle a été appliqué afin d'étudier la fiabilité des WSN dans deux cas, l'un équipé de mini-cellules PV et l'autre sans PV. Les différents types de défaillances et leurs contributions à la défaillance globale de chaque cas de réseau ont également été analysés. La présence d'une source alternative d'énergie a augmenté considérablement la durée de vie du réseau. Cependant, le risque d'avoir une défaillance physique reste assez élevé. Cela met l'accent sur l'importance que peut avoir cette dernière dans l'évaluation de la fiabilité des réseaux et encourage à prendre d'autant plus en considération d'autres types de défaillance tels que la défaillance physique des batteries.

Le premier cas d'application proposé dans ce chapitre considère que le réseau demeure fiable s'il existe au moins un lien utilisable (par conséquent un nœud actif autre que le nœud « sink ») entre un nœud et le nœud « sink ». Cette hypothèse a joué un rôle significatif dans l'augmentation de la durée de vie du réseau de capteurs et par conséquent sur son niveau de fiabilité. Cependant, le deuxième cas d'application traite un plus grand nombre de nœuds de capteurs dans la même zone, avec deux structures « clustered » et « non-clustered » afin d'évaluer la fiabilité d'un WSN avec différentes structures. En effet, la structure « clustered » consiste à diviser le réseau en plusieurs clusters avec un seuil de couverture par sous-cluster (en fonction de la répartition géographique des nœuds) requis afin de garantir une meilleure qualité de supervision et donc un système de surveillance fiable et apte à détecter les événements dans la zone surveillée. Un nœud est considéré comme actif tant qu'il est non défaillant et qu'il possède au moins un chemin actif vers le nœud sink afin d'acheminer les informations récoltées. En revanche, la structure « non-clustered » considère la zone surveillée

comme un seul cluster avec un seuil de nombre de nœuds actifs dans la totalité de la zone indépendamment de la répartition géographique des nœuds de capteurs. Ces deux structures montrent bien l'impact que peut avoir les différents types de défaillances physiques sur la fiabilité du réseau et confirme l'importance de la considération de ces défaillances dans les travaux à venir, cela en relation avec les choix d'organisation des réseaux.

D'autres paramètres tels que le processus de détection voire suivi de propagation (par ex. pour les feux de forêts), des conditions environnementales comme la présence de végétations, etc., ainsi que l'amélioration de l'évaluation de la performance de cellules photovoltaïques seront illustrés dans le chapitre suivant afin d'évaluer la fiabilité des réseaux dans des circonstances exceptionnelles.

---

# Chapitre 5 : Modélisation avancée des PV-WSN et détection de feux de forêt

---



## 5. Modélisation avancée des PV-WSN et détection de feux de forêt

### 5.1. Introduction

La détection des incendies de forêt est une préoccupation majeure dans de nombreux pays. De nombreuses méthodes ont été utilisées pour surveiller les feux de forêt. L'une des méthodes les plus traditionnelles est l'utilisation de tours de surveillance situées en hauteur. Cependant, cette méthode présente de nombreuses limitations en raison du manque de fiabilité des observations humaines. Ainsi, d'autres techniques basées sur l'utilisation de la technologie ont été proposées, comme le système de surveillance vidéo automatique (Breejen et al. 2003) ou l'utilisation d'images satellites (NASA 2017). Malheureusement, la faible résolution spatiale et temporelle des images satellites peut provoquer un retard dans le processus de détection d'incendie.

De nouvelles recherches envisagent l'utilisation de WSNs pour surveiller et détecter des feux de forêt (Bahrepour et al. 2008). Les utilisations de plusieurs sources de capteurs et le déploiement des capteurs dans des zones non visibles par le satellite augmentent la probabilité d'avoir une détection plus précise et plus rapide des feux. Certaines implémentations de WSN en Australie, en Espagne, au Canada et aux États-Unis utilisent des systèmes de caméra vidéo pour surveiller les incendies de forêt. Cependant, ces solutions présentent des inconvénients liés à leur forte consommation d'énergie et de coût (voir Lloret et al. 2009).

La propagation des feux de forêt a un impact majeur sur les fonctions du WSN et sur sa durée de vie. Il faut savoir que dans de telles situations (où une zone de réseau détecte la présence d'un feu), le réseau devient très actif afin d'informer le nœud « sink » de la progression du feu et de son orientation, qui par la suite à son tour traite et transmet ces données aux centres locaux concernés (pompiers, policiers,...).

C'est pour ces raisons que ce chapitre traite des PV-WSN dans la détection et suivi de propagation de feux de forêt. Les travaux se concentrent plus particulièrement sur la fiabilité du réseau de capteurs dans de telles crises ainsi que l'étude de la variation de sa durée de vie.

Ce chapitre traite les trois points suivants :

- Le découpage du réseau en plusieurs mini-zones (amélioration de la détection en termes de localisation, important pour l'identification des départs de feux). Cela se traduit par une fiabilité des WSN dépendante de la limite de fiabilité tolérée par mini-zone au sein des réseaux, nécessaire pour une détection d'incendie ;
- Une évaluation plus réaliste de l'efficacité énergétique des cellules photovoltaïques avec la prise en compte des conditions opérationnelles des produits disponibles sur le marché (avec la considération d'un coût acceptable) ;
- L'évaluation de la fiabilité de détection des feux de forêt en considérant les contraintes listés avant ainsi que l'évaluation de l'efficacité des WSN après un incendie dans une zone donnée (suivi de propagation voire réutilisation ultérieure).

Comme indiqué ultérieurement, les WSN non structurés sont pris en compte lors de cette étude. Cependant, comme le coût peut présenter un problème, il faut utiliser une installation avec des cellules photovoltaïques appropriées dans le PV-WSN qui soient peu coûteuses (WSN avec mini-cellules photovoltaïques) (voir Kassan et al. 2016). De plus, comme montré dans le chapitre précédent, il est possible d'utiliser des composants électroniques dans le PV-WSN (c'est-à-dire les cellules PV et leurs parties apparentées) sensibles aux conditions de l'environnement naturel mais ne diminuant pas la fiabilité du système. Il est à noter que ces composants ne sont généralement pas redondants dans les nœuds des réseaux. Dans ce contexte, l'amélioration de la durée de vie du réseau utilisant des cellules photovoltaïques demeure certaine, même avec la faible utilisation des cellules-PV dans le système (10% de nœuds équipés de PV peuvent suffire comme indiqué au chapitre 4, § 4.7, cf. également Kassan et al. 2016).

Cependant, des améliorations sur les études de performances des cellules-PV sont nécessaires pour mener à bien l'étude des PV-WSN dans les conditions de milieu naturel et d'incendie. Ainsi, la dégradation d'une PV due à des facteurs environnementaux extrêmes, aux conditions météorologiques et à la détection des incendies de forêt est prise en compte dans ce chapitre. Les améliorations sur les évaluations de rendements de cellules-PV sont : l'orientation des cellules-PV par rapport au soleil i.e. l'inclinaison, les facteurs environnementaux (branches d'arbres, vents, cailloux, poussière, pluie, neige,...).

## 5.2. Problématiques étudiées et hypothèses

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, les problématiques étudiées sont l'évaluation du rendement des cellules-PV et l'intégration de cette nouvelle performance photovoltaïque dans le calcul de la récolte d'énergie. L'objectif est de modéliser le découpage du réseau en mini-zones et d'évaluer la fiabilité de celles-ci pour construire une évaluation complète de la fiabilité pour la détection des incendies de forêts. De plus, plusieurs scénarios de feux de forêts doivent être considérées (position du départ de feu, vitesse de propagation et orientation du feu) afin de mieux évaluer la fiabilité de détection des réseaux.

Plusieurs hypothèses ont ainsi été prises en compte dans le simulateur déjà développé (chapitre 4, § 4.7). Les hypothèses qui diffèrent des chapitres précédents (les autres hypothèses sont identiques à celles du chapitre précédent) sont :

1. Une distribution aléatoire des nœuds dans une zone géographique fixe de 1 km<sup>2</sup>.
2. La transmission/réception de paquets est considérée avec un taux de perte de paquets. La retransmission de paquets est considérée dans la simulation afin de maintenir un niveau de fiabilité acceptable dans la transmission/réception.
3. Le nœud « sink » est considéré comme atteignable par le feu de forêt et donc peut être détruit. La considération de nœud non destructibles et/ou non atteignables par le feu nécessite une structure spéciale et un dégagement de terrain afin d'éviter le feu. Ceci peut être considéré comme une source très coûteuse et à éviter dans cette solution qui ne tolère pas un excès de prix.
4. La propagation de feu de forêt a une forme elliptique et uniforme pour une vitesse de propagation donnée. Les hétérogénéités ne sont pas prises en compte car elles nécessitent le développement d'un modèle spécifique qui peut être assez complexe (cf. § 5.5, ainsi que les hypothèses 5 et 6)).
5. La végétation est considérée comme homogène avec les mêmes caractéristiques.
6. Les braises de propagation de feu ne sont pas prises en compte dans cette étude.
7. Les nœuds du réseau entier se mettent en mode actif, à la détection du feu de forêt, et pas uniquement la zone atteinte par le feu. Et donc la périodicité de transmission de données relatives à la propagation de feu augmente notablement (ex. si le réseau envoie les messages de données périodiquement

tous les (1) heure avant la détection des feux, alors après la détection la périodicité devient toutes les (5) secondes et ceci pour tous les capteurs dans le réseau indépendamment de leurs positions dans le réseau ou leurs distances du feu).

8. Un niveau global de fiabilité par zone est considéré.

D'autres hypothèses sont détaillées dans des paragraphes plus loin.

### 5.3. Modélisation du fonctionnement des PV-WSN avancé

Le mode de fonctionnement du réseau de capteurs équipé de cellules photovoltaïques génère dans ce chapitre une consommation énergétique similaire à celle du paragraphe 4.3 du chapitre 4. Cependant, certaines améliorations sont apportées au modèle afin de représenter au mieux les cas réels de distribution des nœuds et de la surveillance des forêts.

La première amélioration est fondée sur le principe de la division du réseau en zones (dans l'application proposée, on considère quatre zones : Nord-Est, Nord-Ouest, Sud-Est et Sud-Ouest). Alors, un seuil de disponibilité des nœuds est défini pour chaque zone du réseau. Cela permet de déterminer la fiabilité du système et assure un minimum de présence de capteurs opérationnels par zone. Ainsi, il faut attribuer à chaque nœud une zone spécifique selon sa position géographique. L'algorithme permettant de réaliser cette attribution est présentée en Figure 30.

Également, la perte de paquets de transmission est modélisée afin d'évaluer un niveau de fiabilité de transmission plus proche de la réalité. Cependant, vue la difficulté à caractériser les obstacles entre les nœuds suite à leur déploiement et les perturbations induites pour la transmission de paquets, le facteur  $f_p$  de perte de paquets est considéré aléatoirement pour chaque capteurs. Ce facteur précise le nombre de répétition d'envois de données pour chaque nœud. Alors, la consommation d'énergie  $E_{c,i}(t)$  de chaque nœud  $i$  au temps  $t$  est donc modifiée comme suit (comparativement à l'expression (4) du § 3.4 ou du chapitre 4.4, expression à établir) :

$$E_{c,i}(t) = (n_{dis}(t) \cdot E_{Ni} + n_{rout}(t) \cdot E_{Ri} + E_{hi}(t) + E_{di}(t)) \times f_p$$

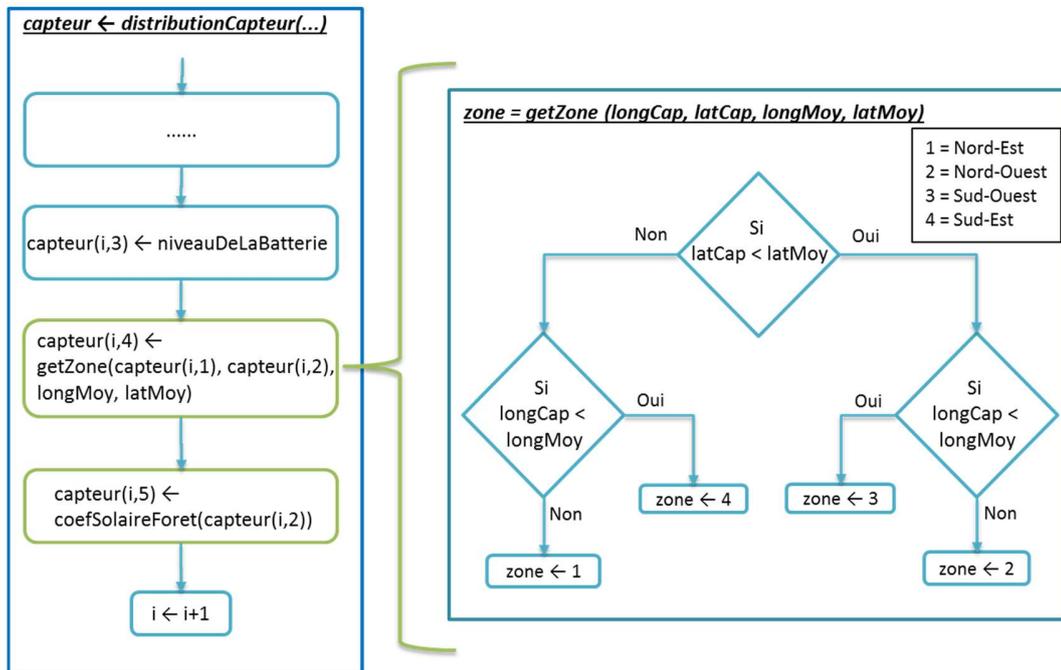


Figure 30 : Algorithme d’attributions des zones

Avec  $f_p$  le facteur de perte qui a une valeur supérieure à 1 (exemple : 1,2 = 20 % de perte et donc il consomme 20 % d’énergie en plus de la normale).  $n_{dis}(t)$  est le nombre de processus de découverte de voisinages,  $E_{Ni}$  est l’énergie consommée par le processus de découverte de voisinages,  $n_{rout}(t)$  le nombre de processus de routage,  $E_{Ri}$  est l’énergie consommée par le processus de routage,  $E_{hi}$  est l’énergie consommée par le processus d’envoi des messages « HELLO » et  $E_{di}$  est l’énergie consommée par le processus d’envoi des messages « données » pendant la période  $t$ .

Une troisième amélioration consiste à détailler le processus de détection du feu de forêt et d’alerte par le réseau de la présence du feu. Ceci fait l’objet du paragraphe 5.6.2.

## 5.4. Études d'efficacité des cellules photovoltaïques

L'énergie récoltée  $E_{H,i}$  pour un nœud de capteur donné  $i$  équipé d'une cellule PV dépend de nombreux paramètres tels que la surface PV ( $A_{PV}$ ), le rendement du panneau solaire  $r$ , le rayonnement solaire moyen annuel sur les panneaux inclinés  $H$  et le rapport de performance  $PR$ . Elle est donnée par la relation suivante (pour plus de détails voir le chapitre 3, section 3.5) :

$$E_{H,i} = A_{PV} \cdot r \cdot H \cdot PR$$

En effet, l'énergie récoltée sur la durée  $t$  (heures)  $E_{hr,i}$  pour un nœud  $i$  donné est obtenue en divisant l'énergie annuelle récoltée  $E_{H,i}$  par le nombre d'heures annuelles (cf. chapitre 3 section 3.4) :

$$E_{hr,i} = (E_{H,i} \times t) / (365.25 \times 24) = (E_{H,i} \times t) / 8766$$

S'ajoute l'absorption de lumière due à la canopée, aux branches d'arbres et aux troncs. De nombreux modèles (et logiciels associés) ont été développés pour évaluer les propriétés de la lumière en forêt et en particulier le coefficient d'absorption en fonction de l'orientation solaire et des caractéristiques des forêts (parmi les modèles les plus récents, on peut citer [Dan Binkley et al. 2013, David Forrester et al. 2014, David Forrester 2014]). Cependant, ces modèles présentent une complexité dans leur mise en application assez importante (en particulier l'absorption de la canopée et sa variation selon les espèces d'arbres, les nombreux paramètres associés à couvertures végétales, la répartition arbustive, etc.), d'où l'utilisation d'un modèle simplifié prenant en compte les principales caractéristiques d'absorption de la luminosité en milieu forestier. Ce modèle prend en compte les paramètres suivants (basé sur Federer 1971) :

- La latitude et l'angle zénithal solaire associé  $\theta = \pi/2 - \alpha$  (en radian),
- Le coefficient de l'espace de la couronne arbustive  $\alpha_c$  ( $m^{-1}$ ),
- L'épaisseur de l'espace de la couronne arbustive  $h_c$  (épaisseur équivalente moyenne en mètres),
- Le diamètre moyen d'un tronc  $D$  (m),
- La hauteur moyenne d'un tronc  $h_s$  (m),

- Le nombre de troncs  $n_t$  par unité de surface ( $m^{-2}$ ) dans l'unité de superficie considérée  $U$  ( $m^2$ ).

Le facteur de transmission  $T$  s'exprime par :

$$T = \exp\left(-\frac{\alpha_c \cdot h_c}{\cos \theta} - \frac{n_t \pi D^2}{4U} - \frac{D h_s}{U} \tan \theta\right) \cdot F - t_d \cdot (1 - F)$$

$$t_d = 2 \int_0^{\pi/2} \exp(-\alpha \cdot h_c / \cos \theta - P_s \tan \theta) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta$$

$$F = 1.5 - 0.5 \cdot I_0 \cos \theta / R$$

Avec  $I_0$  la constante solaire ( $1360,8 \text{ Wm}^{-2}$ ) et  $R$  un facteur expérimental (irradiation au-dessus de la canopée). En pratique, la valeur de la fraction de l'irradiation au-dessus de la canopée transmise  $F \approx 0.80$  est une bonne approximation (selon [Federer 1971]). Cette valeur a été considérée dans nos calculs.

La formule de transmission ci-dessus est utilisée pour évaluer la lumière moyenne transmise  $I_t(d_y)$  pour chaque jour  $d_y$  (date) de l'année à une latitude  $l$  donnée (selon la longueur du jour) :

$$I_t(d_y) = \frac{1}{s_s(d_y, l) - s_r(d_y, l)} \int_{s_r(d_y, l)}^{s_s(d_y, l)} T(t) I_0 \cos(\theta(t)) dt$$

où  $s_r(d_y, l)$  et  $s_s(d_y, l)$  sont respectivement les instants de lever et de coucher du soleil à une date  $d_y$  à la latitude  $l$ . Ensuite, le facteur de transmission moyen  $T_d$  par jour utilisé dans nos calculs est obtenu par :

$$T_d = \frac{1}{365} \sum_{d_y=1}^{365} \frac{I_t(d_y)}{I_0}$$

## 5.5. Modélisation de la propagation et de la détection de feux de forêt

La modélisation de la propagation des feux de forêt a été faite depuis de nombreuses décennies. Ainsi, de nombreux modèles ont été développés et plusieurs simulateurs sont disponibles prenant en compte un grand nombre de caractéristiques (vitesse et orientation du vent, pentes et nature du sol, caractéristiques de la végétation, caractéristiques climatiques telles que la température et l'humidité, etc.) (Voir Bahrepour et al. 2008).

Cependant, afin de disposer d'un modèle efficace pour la simulation des PV-WSN, un modèle de propagation simplifié est proposé. Celui-ci est intégré au modèle existant (chapitre 4) avec ses paramètres de réseau et les fiabilités physiques et logiques présentés précédemment. En effet, l'association du simulateur de PV-WSN avec ces fonctionnalités à un simulateur de feux de forêt conduirait à un modèle complexe très difficile à exploiter dans un contexte probabiliste (simulation Monte Carlo) exigeant en nombres d'occurrences (durées des simulations alors excessives interdisant une exploitation statistique exploitable).

Ainsi, le modèle proposé est basé sur le modèle elliptique classique (Richards 1990) en prenant en compte la vitesse du vent et son orientation, ainsi que les caractéristiques générales de la végétation (considérée homogène). La vitesse de propagation des feux de forêt est donc caractérisée par un paramètre  $v$  qui est supposé proportionnel à la vitesse du vent  $v_w$  et le coefficient  $c_v$  qui représente les caractéristiques de la végétation :

$$v = c_v \cdot v_w$$

L'orientation du vent est prise en compte en multipliant le coefficient  $c_v$  par  $k = a/b$  qui correspond à l'amplification de l'intensité du feu dans la direction du vent avec « $a$ » la longueur du demi-grand axe et « $b$ » le demi-petit axe, réglables en fonction des caractéristiques du vent et de la végétation et/ou la pente topographique. Dans ce chapitre uniquement la température effective est évaluée (on considère des capteurs de température) et donc cette ellipse est exploitée pour caractériser le front thermique du feu.

En fonction de la position du départ de feu, les coordonnées géographiques du front thermique du feu (longitude  $Fp_{Long}(i)$  et latitude  $Fp_{Lat}(i)$  du point  $i$  du front du feu) à l'instant  $t$  sont calculées selon les expressions :

$$Fp_{Long}(i) = FC_{Long} + \frac{a \times \cos(\theta_i)}{R \times \cos\left(\pi \times \frac{FC_{Lat}}{180}\right)} \times \frac{180}{\pi}$$

$$Fp_{Lat}(i) = FC_{Lat} + \frac{b \times \sin(\theta_i)}{R} \times \frac{180}{\pi}$$

$$\theta_i = \frac{2\pi}{n_t - 1} \cdot i, \quad i \in \{1, \dots, n_t\}$$

Avec  $FC_{Long}$  est la longitude du départ de feu et  $FC_{Lat}$  est latitude du départ de feu exprimés en degré, et  $R$  est le rayon de la terre qui est égal à 6378137 m. Le paramètre  $n_t$  correspond au nombre de points de discrétisation du front de température (par exemple,  $n_t = 629$  pour une discrétisation angulaire de 0,01 radians). Ensuite, la distance entre les nœuds et les points frontaux thermiques du feu est calculée afin d'évaluer le délai avant qu'un nœud détecte le feu (élévation de température) et éventuellement le temps avant sa destruction par le feu. Le temps minimal  $t_f$  pour que le front thermique atteigne un capteur est donc déterminé par la formule suivante :

$$t_f = \left( \min_{i,j} d_j(i,t) \right) / v$$

Où  $d_j(i,t)$  est la distance entre le capteur  $j$  et le point frontal thermique du feu  $i$  au temps  $t$ , et  $v$  la vitesse de propagation du feu. Quand un nœud de capteur est atteint par le front thermique du feu, il alerte le nœud « sink » de la présence du feu. Ce dernier met le réseau en état d'alerte générale (états actifs) et augmente la période d'échange de données relatives à la progression du feu et sa direction. Le délai entre la détection du feu par un nœud et la mort du nœud est considéré négligeable dans cette étude.

## 5.6. Fiabilité des PV-WSN avancés

### 5.6.1. Introduction

La fiabilité (ou disponibilité)  $A_S(t)$  du réseau PV-WSN est évaluée en utilisant la probabilité d'un événement détecté par le PV-WSN à l'instant  $t$  (début d'un incendie, c'est-à-dire détection de températures élevées) et en supposant que des actions de maintenance sont impraticables. Un événement est détecté si trois conditions sont vérifiées simultanément :

- Un seuil de sensibilité est atteint pour un ou plusieurs nœuds de capteurs;
- Les nœuds de capteurs contribuant au processus de détection sont disponibles au temps  $t$  (fiabilité « physique »  $a_i(t)$  et l'énergie restante associée);
- Les informations détectées envoyées par les capteurs doivent être validées (considérées comme exactes) selon l'une des deux méthodes suivantes : les mêmes informations détectées par d'autres nœuds ou mêmes informations détectées plusieurs fois par le même nœud dans un intervalle de temps consécutif. Ensuite, les informations valides peuvent être reçues par le nœud « sink » (en supposant que le nœud « sink » est dans un état de fonctionnement normal à l'instant  $t$  et en prenant en compte les fiabilités des nœuds intermédiaires).

### 5.6.2. Probabilité de détection

Pour chaque nœud de capteurs, la probabilité de détection  $P_{Di}(t)$  est définie par  $P_{Di}(t) = P(S_i(t) \geq S)$ , avec  $S$  comme seuil de sensibilité et  $S_i(t)$  la sensibilité du nœud de capteurs au temps  $t$ . Dans ce chapitre on considère un ensemble de capteurs  $Z_k$  dans une zone donnée, tel que  $Z_k = \{i_{1,k} \dots i_{n_k,k}\}$  avec  $k = 1 \dots N_Z$ , où  $N_Z$  étant le nombre de zones de détection et  $n_k$  le nombre de nœuds de capteurs nécessaires pour la détection d'incendie dans la  $k^{\text{ième}}$  zone (pas nécessairement la quantité totale de nœuds de capteurs dans cette zone).

Cette probabilité de détection peut être calculée sur la base du pourcentage de nœuds disponibles dans la zone de détection, la sensibilité de chaque nœud étant considérée identique. Dans la simulation,  $n_k$  (le nombre de nœuds de capteurs nécessaires pour la détection d'incendie) est supposé identique pour toutes les zones choisies pour simplifier l'analyse.

### 5.6.3. Fiabilité de la transmission de l'information

La transmission de l'information dépend de la disponibilité de nœuds transmetteurs et de la fiabilité des chemins des nœuds actifs  $i$  (ou d'un ensemble de nœuds  $Z_k$  pour une zone donnée de la forêt) vers le nœud « sink ». En effet, cette transmission peut être caractérisée par la probabilité  $P_{t,i}(t)$  de la réception de l'information par le nœud « sink » au temps  $t$  avec ( $i \in Z_k$ ), ou  $P_{t,zk}(t)$  pour un ensemble  $Z_k$ .  $P_{t,i}(t)$  est évaluée par la réunion des événements définis par les chemins disponibles des capteurs actifs  $i$  au nœud « sink » (la perte aléatoire des paquets est considérée dans cette approche comme expliqué au § 4.2, hypothèse 2).

Cependant, l'évaluation de  $P_{t,i}(t)$  présente certaines difficultés qui ont été discutées dans le chapitre 3 section 3.6.

### 5.6.4. Évaluation de la fiabilité du PV-WSN

La disponibilité  $A_S(t)$  tel qu'indiqué au § 4.6 peut être exprimée d'un point de vue général par (pour plus de détails voir section § 4.6) :

$$A_S(t) = A_0(t) \cdot \prod_{k=1}^{N_z} \sum_{\substack{i \in Z_k \\ j = \lfloor p.n_k \rfloor}}^{n_k} \binom{n_k}{j} a_i^j(t) (1 - a_i(t))^{n_k - j}$$

Avec  $j$  capteurs disponibles identiques parmi  $n_k$  nécessaires pour la détection dans une zone  $Z_k$ , et  $A_0(t)$  la probabilité qu'au moins un chemin atteigne le sink :

$$A_0(t) = \sum_{i=1}^{N_z n_k} a_i(t) P_{s,i}(t)$$

Ainsi que la disponibilité  $A_{n,S}(t)$  des  $n_S$  voisins du nœud « sink » est :

$$A_{n,S}(t) = 1 - \left(1 - e^{-\lambda_{n,S} t}\right)^{n_S} \geq A_S(t)$$

Avec  $\lambda_{n,S}$  est le taux de défaillance d'un voisin du nœud « sink ».

D'autres approches que la simulation que nous proposons peuvent être exploitées, en particulier dans le contexte de la « fiabilité dynamique ». Comme déjà indiqué au § 3.6, celles-ci restent limitées en particulier pour deux raisons principales :

- le grand nombre de composants en interaction dans un WSN ou PV-WSN,
- la complexité de l'interaction des processus interagissant comme la gestion des flux d'information, les défaillances physiques, la consommation d'énergie, ou encore l'influence de l'environnement voire du processus détecté comme le feu de forêt.

### 5.7. Cas d'application

Un système de PV-WSN est présenté dans cette section avec un seul cluster et un seul nœud « sink » par cluster. Ce système est soumis à un feu de forêt qui démarre suivant deux scénarios différents : après respectivement 21 jours et 365 jours de la mise en place du réseau. De plus, ce feu se propage dans la forêt suivant deux vitesses de propagation possibles et deux cas de localisation de départ de feu. La combinaison de ces différents cas possibles conduit à des scénarios (Tableau 4) permettant d'évaluer la fiabilité du réseau de capteurs en situation de feu de forêt ainsi que sa durée de vie. Les 8 scénarios possibles sont donc :

Numéro du scénario	Vitesse de propagation du feu (km/h)	Départ de feu (jours)	Position de départ de feu (voir figure 30)
1	1	365	P1
2	5	365	P1
3	1	365	P2
4	5	365	P2
5	1	21	P1
6	5	21	P1
7	1	21	P2
8	5	21	P2

Tableau 4 : Les 8 scénarios de simulations

Le simulateur a été amélioré afin de réaliser les travaux nécessaires. Les paramètres qui ont été utilisés dans cette simulation sont les mêmes que ceux de la section 3.6 avec

quelques modifications et des ajouts. Les paramètres qui ont été modifiés et/ou ajoutés sont :

- Le réseau est décomposé en 4 zones : Nord-Est, Nord-Ouest, Sud-Est et Sud-Ouest;
- La disponibilité du réseau par zone est prédéfinie à 10% et le réseau est considéré comme non fiable si le nombre de nœuds disponibles par zone est inférieur à 10%;
- 100% des nœuds sont équipés de cellule-PV avec une distribution des nœuds au sol suivant une densité de probabilité uniforme et une orientation aléatoire binaire équiprobable (pile ou face) ;
- La fréquence d'envoi de données est variable, soit entre 1 heure avant la détection du feu et 5 secondes après la détection.

Les résultats ont été obtenus à partir de 1500 simulations Monte Carlo à l'aide d'un PC, avec des temps de calcul maximum d'environ 24 heures par simulation pour chacun des scénarios de PV-WSN. Cette configuration PV-WSN proposée est relativement peu coûteuse, par rapport à un WSN classique.

## 5.8. Résultats et discussions

Dans le chapitre 4 le fait d'ajouter des cellules photovoltaïques sur le réseau WSN montre une amélioration importante de la fiabilité du réseau. La fiabilité de l'étude précédente est définie par l'existence d'au moins un chemin fiable de nœuds de frontière vers le nœud de « sink ». Cependant, une amélioration du modèle a été effectuée afin de prendre en considération les performances photovoltaïques, la division du réseau en plusieurs zones de surveillance avec un seuil de disponibilité par zone, la détection et la propagation de feu de forêt. Ceci permet d'obtenir une récolte d'énergie similaire au cas réel. De même, le seuil de fiabilité par zone a été modélisé afin d'avoir une évaluation de fiabilité plus réaliste des systèmes de surveillance de feux de forêts. Il est prévu que ces améliorations puissent avoir un impact important sur l'évaluation de la fiabilité globale du réseau PV-WSN.

En outre, la présence de feux de forêts est un facteur supplémentaire qui affecte la fiabilité du réseau de capteurs. L'analyse montre que le feu de forêt réduit la fiabilité du réseau selon deux facteurs principaux : l'augmentation de la consommation d'énergie due au changement de l'état de réseau après détection de feu de forêt (passage de

l'état normal à l'état actif) et l'augmentation des nœuds défectueux due à la présence et la propagation du feu (nœuds « brûlés »). Un type de défaillance supplémentaire «défaillance due au feu» a été ajouté dans le modèle afin d'avoir une vision claire de l'impact dû aux feux de forêts.

Les 8 scénarios expliqués au paragraphe 5.7 de ce chapitre sont illustrés par la Figure 31.

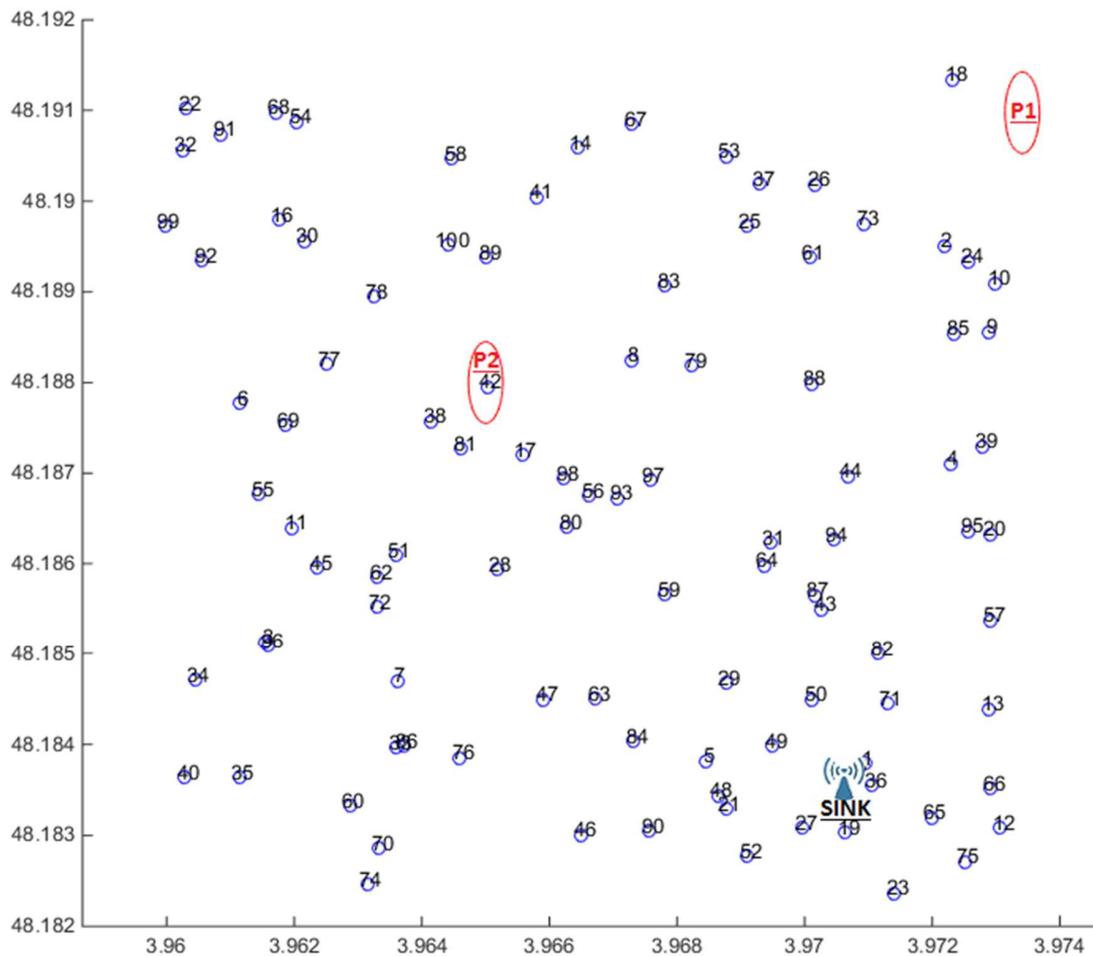


Figure 31 : Réseau de capteurs avec les positions de démarrage de feu de forêts (P1 et P2)

La Figure 31 illustre bien les scénarios 1, 2, 5 et 6 avec leur point commun de démarrage de feu P1 et la forme de propagation elliptique associée, et les quatre autres

scenarios 3, 4, 7 et 8 avec leur point commun de démarrage de feu P2 et leur forme de propagation elliptique.

Dans cette section, la description du résultat (discussion) sera regroupée en deux catégories principales en fonction de la date du début du feu. Cela se justifie par la similarité dans les résultats obtenus de tous les scénarios qui partagent la même date de démarrage de feu. En fait, la principale différence entre les scénarios partageant la même date de début de feu de forêts concerne la variation de la durée de vie du réseau due à la vitesse de propagation du feu, à l'orientation du feu et aux points de départ du feu. Cependant, la contribution de tous les types de défaillances, à l'exception des défaillances dues à l'incendie, est mineure et négligeable dans presque tous les scénarios similaires après l'apparition d'un incendie.

#### 5.8.1. Scénarios de 1 à 4 (départ de feu = 365 jours)

Les scénarios de 1 à 4 sont similaires en termes de distribution des types de défaillances comme en termes de fiabilité du réseau avant que le feu ne commence. En fait, la Figure 32 montre que les défaillances dues au manque d'énergie représentent environ 70% des défaillances dans les 180 premiers jours puis diminuent pour atteindre une moyenne de 13% entre 181 jours et jusqu'à 365 jours. Ceci est très ressemblant aux résultats trouvés dans le chapitre 4 section 4.7. Ainsi, cela s'explique par le fait qu'après déploiement du réseau certains nœuds peuvent être dans des positions géographiques critiques (très faible exposition au soleil, nœuds très favorables dans les chemins vers le sink, etc.) qui favorisent une consommation énergétique plus importante et par conséquent conduisant à la défaillance de nœuds. Ensuite, les défaillances physiques gagnent du terrain une fois que les nœuds critiques sont éliminés. En revanche, la défaillance physique de la batterie devient plus importante à partir de 180 jours pour atteindre 30% à 365 jours, ce qui reflète la forte contribution de ce type de défaillance dans la défaillance globale du réseau pendant cette période (365 jours). La défaillance des cellules PV augmente pour atteindre plus de 10% à 365 jours. Cela conduit à la conclusion que la défaillance des cellules PV, même avec sa faible contribution en termes de défaillance globale, doit être prise en compte afin d'avoir plus de précision dans l'évaluation de la fiabilité du réseau.

La plus courte durée de vie du réseau de capteurs PV-WSN est obtenue dans le deuxième scénario où la vitesse de propagation du feu est considérée comme étant la plus élevée (5 km/h) alors que la position de départ du feu est considérée comme étant en position P1. Cette courte durée en termes de vie du réseau est principalement due à la grande vitesse et la forme de la propagation du feu (voir Figure 31). En effet, ces deux paramètres conduisent à une atteinte rapide du seuil de fiabilité par zone du réseau vue qu'un départ de feu en P1 se concentre dans une zone spécifique tandis que celui en P2 touche plusieurs zones. De plus, avec un effet identique dû au feu dans les deux positions (c.-à-d. même nombre de nœuds défaillants), la vitesse de destruction d'une zone est beaucoup plus rapide dans le cas de P1 que pour P2.

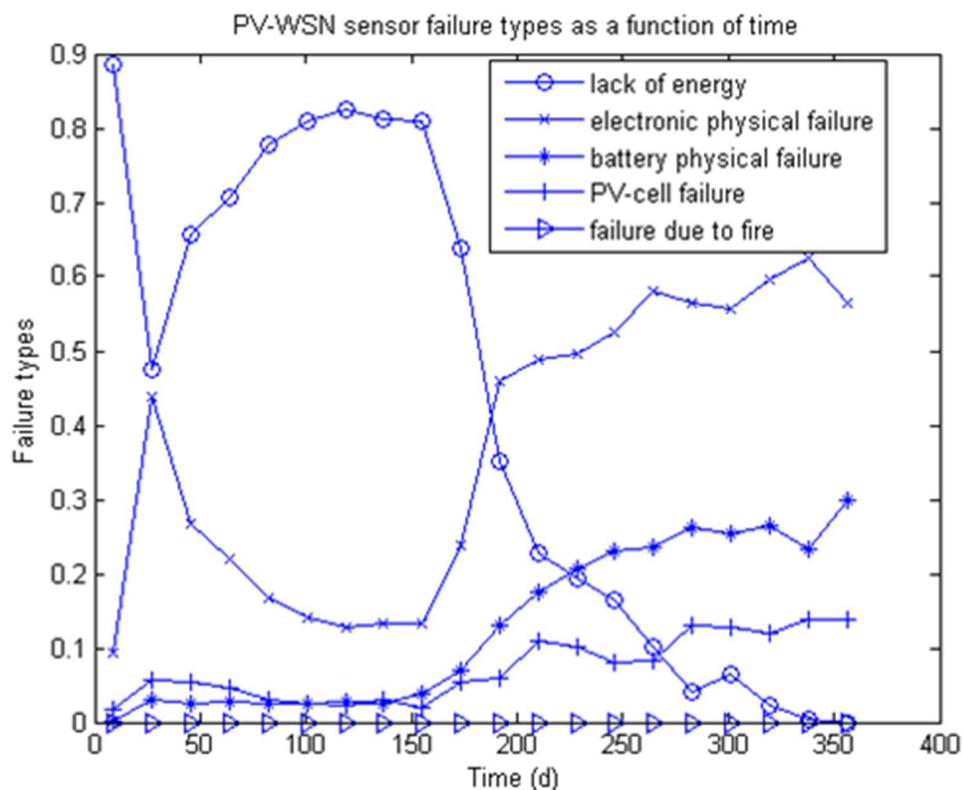


Figure 32 : Types de défaillances de nœud PV-WSN en fonction du temps jusqu'à 365 jours (scénarios 1 à 4)

En Figure 33, les résultats obtenus par la simulation montrent une courbe typique avec une forme de fonction de fiabilité s'effondrant après 365 jours. Cela s'explique par

la présence de feu de forêt (apparaissant après un an). Cependant, le réseau continu à fonctionner peu de temps après la présence du feu (moins de 16 jours), ce qui s'explique par la vitesse de propagation du feu définie à 5 km/h et la forme de propagation du feu comme précédemment expliquer. Tous les scénarios qui partagent la même date de démarrage de feu ont en Figure 33 une même variation de la fiabilité du réseau avant l'apparition de l'incendie (365 jours). Au contraire, après l'apparition du feu, le niveau de résistance au feu varie et dépend principalement de la position du feu et de sa vitesse de propagation. Donc, plus la vitesse est importante et la propagation du feu est concentrée dans une seule zone, plus le réseau est défaillants et moins résistant au feu. Également, plus la vitesse de propagation est faible plus le réseau devient résistant au feu et fiable.

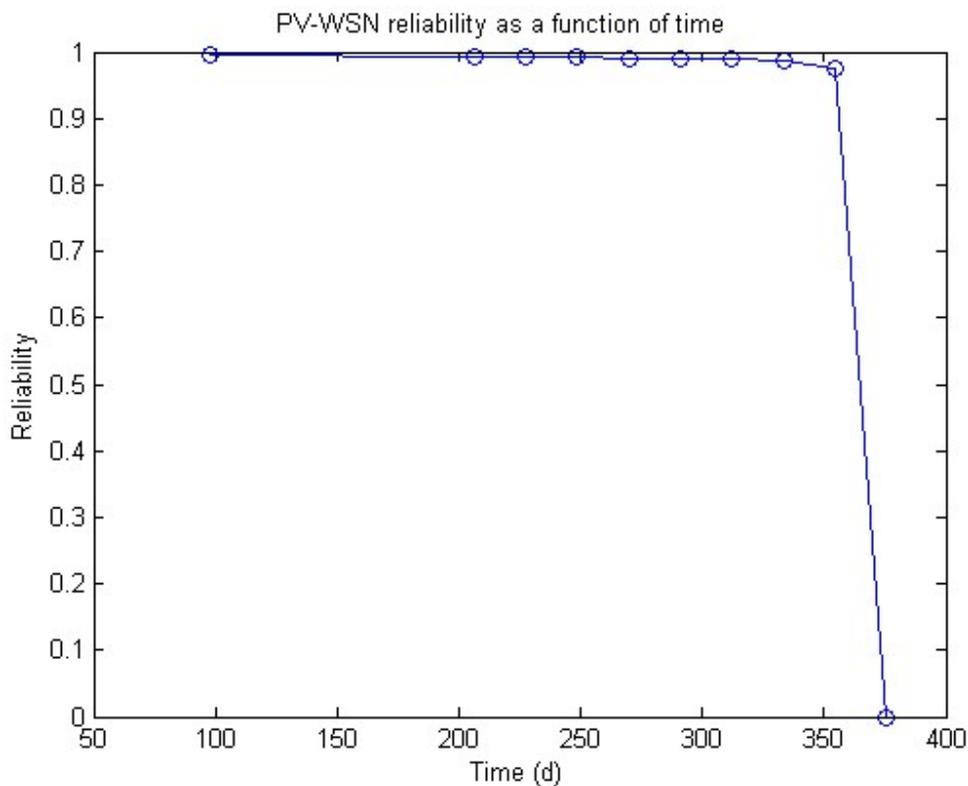


Figure 33 : Fiabilité du PV-WSN en fonction du temps (scénario 2)

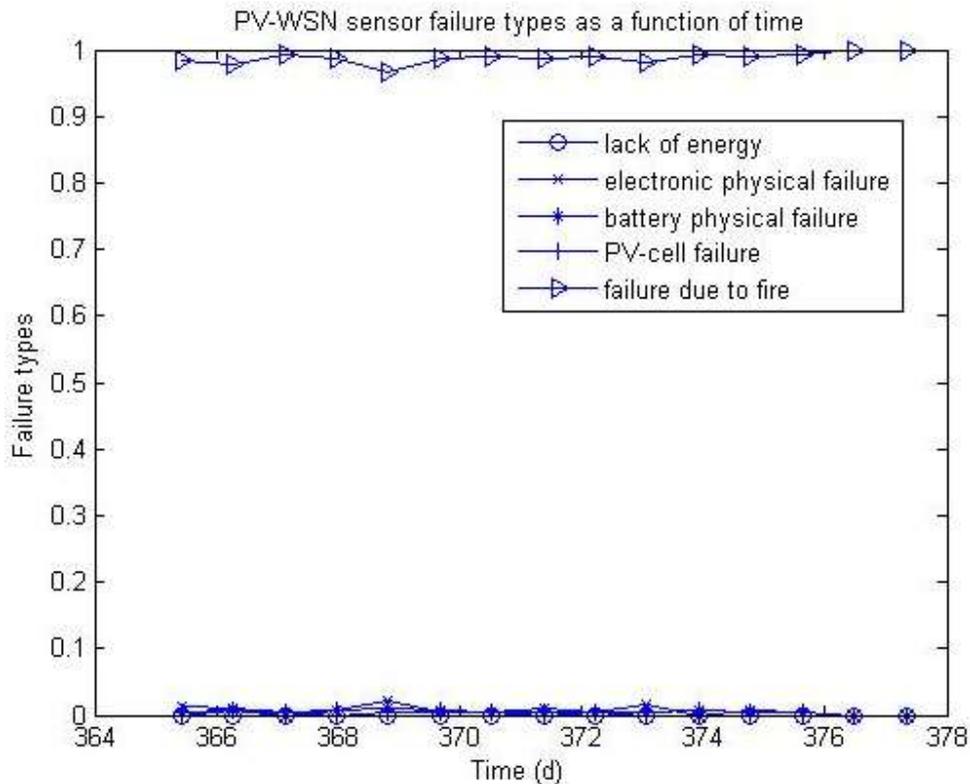


Figure 34 : Types de défaillances de nœud PV-WSN en fonction du temps (scénario 2)

La Figure 34 montre que la défaillance du réseau est principalement due au feu de forêt qui représente plus de 97%, puis augmente rapidement pour atteindre 100% à la fin de la durée de vie du réseau (380 jours). La courte durée de vie du réseau s'exprime clairement par la vitesse élevée de propagation des feux de forêt et la position de démarrage de feu de forêts. Les autres types de défaillances sont négligeables en termes de défaillances de réseau (moins de 3%).

La durée de vie du réseau la plus longue est atteinte dans le troisième scénario où la vitesse de propagation du feu est estimée à 1 km/h et la position du départ de feu est en P2 (voir Figure 31) qui est situé approximativement en milieu du réseau et par conséquent a un impact multizone sur le réseau. Les résultats obtenus par la simulation (voir Figure 35) montrent que le réseau continue de fonctionner pendant plus de 190 jours, même après la présence du feu. Cette extension dans la durée de vie du réseau s'explique par les faits suivants : la position du feu est presque au milieu du réseau, ce qui répartit les dégâts entre les zones et donc la limite de défaillance par zone (seuil de

fiabilité par zone) prend plus de temps pour être atteinte. La faible vitesse de propagation du feu ralentit la destruction des nœuds et donc augmente la durée de vie du réseau.

La contribution du feu de forêt à la défaillance du réseau est largement visible dans la Figure 36 qui montre que plus de 85% des défaillances sont dues au feu de forêt et ceci à partir de 365 jours (après le départ de feu). La courbe de défaillance due au feu augmente lentement pour atteindre 100% à la fin de la durée de vie du réseau (575 jours). De plus, la contribution des défaillances électroniques fluctue autour de 10% après le départ de feu puis diminue lentement pour atteindre 0% à la fin de vie du réseau. Les défaillances physiques des batteries ont eu moins de contribution à la défaillance du réseau, particulièrement après l'apparition du feu, qui fluctue à moins de 4% puis diminue lentement pour atteindre 0% à la fin de vie du réseau. La contribution des autres types de défaillances est de moins de 3% ce qui est considéré négligeable.

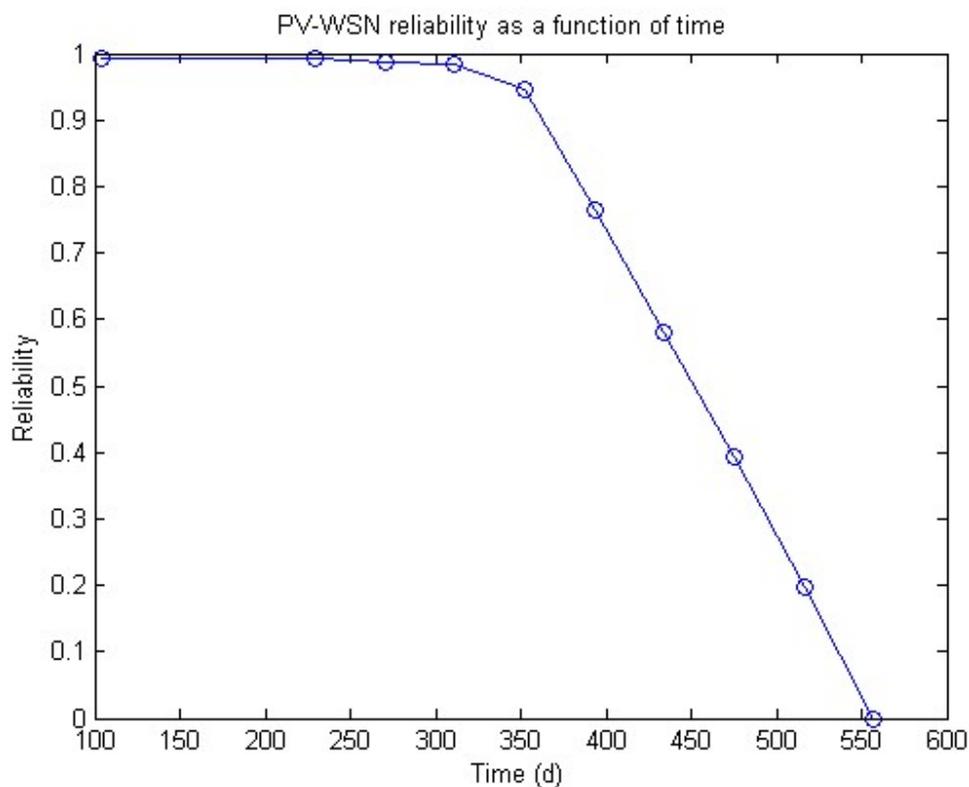


Figure 35 : Fiabilité du PV-WSN en fonction du temps (scénario 3)

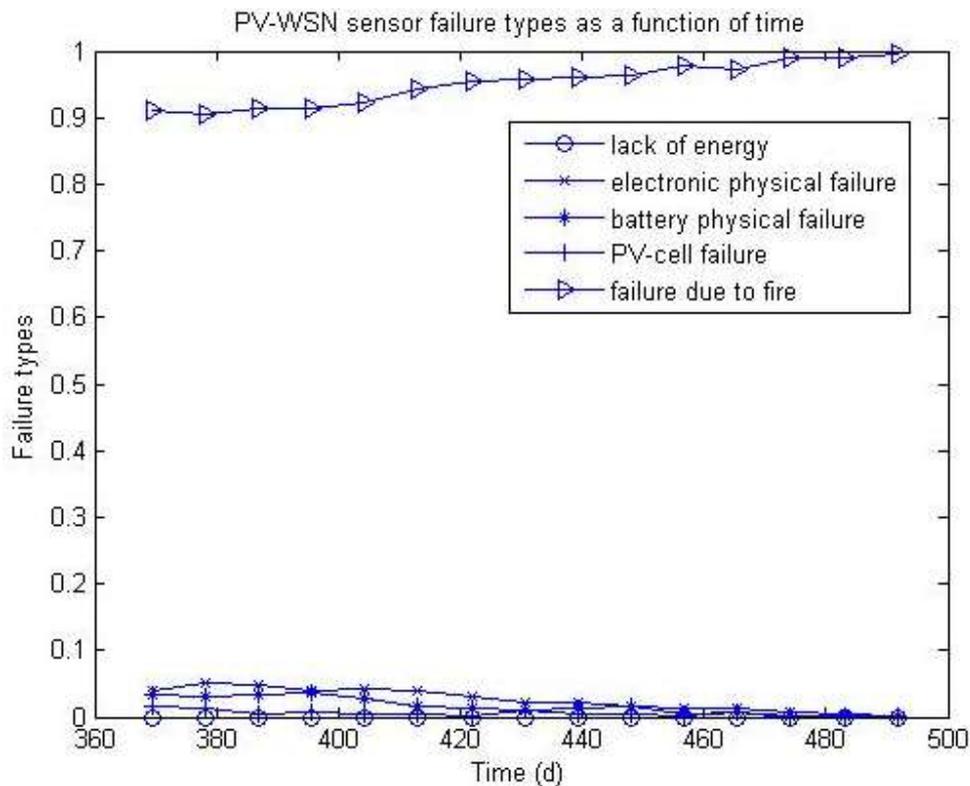


Figure 36 : Types de défaillances de nœud PV-WSN en fonction du temps (scénario 3)

### 5.8.2. Scénarios de 5 à 8 (départ de feu = 21 jours)

La présence d'un incendie presque immédiatement après le déploiement du réseau affecte considérablement la fiabilité du réseau. De plus, tous les scénarios de même date de départ de feu partagent la même distribution de types de défaillances ainsi que la fiabilité du réseau avant l'apparition du feu.

Alors, la défaillance due à l'insuffisance énergétique représente le pourcentage le plus élevé, par rapport aux autres défaillances, commençant à près de 98% puis diminuant pour atteindre 50% avant le départ de feu (21 jours) selon la Figure 37. Cela est très ressemblant à la section 5.8.1. De plus, les défaillances physiques électroniques augmentent pour atteindre 40% avant le départ de feu (21 jours). En effet, les conditions extrêmes choisies dans l'évaluation des calculs des défaillances physiques des composants amènent à une augmentation assez tôt de ce type de défaillance. De surcroît, la répartition des contributions des défaillances dans la figure 36 est liée au

nombre de nœuds défaillants par type pendant la période de temps concerné. Cela veut dire que, par exemple, si dans la période entre 0 et 5 jours il n'y a qu'un capteur défaillant par défaillance physique sur l'ensemble des simulations et que celles-ci est la seule observées quel que soit le type, la défaillance physique correspond alors à 100 % dans la période de 0 à 5 jours. Enfin, la défaillance des cellules PV augmente pour atteindre plus de 10% à 21 jours.

De la même façon que les scénarios précédents, le cas où le réseau a la plus courte durée de vie est le cas où la vitesse de propagation du feu est la plus élevée (5 km/h) et la position de départ du feu est en position P1 (voir Figure 31) pour le scénario 6 (cf. § 5.8.1 page 128). Ceci peut être expliqué par le fait que les dégâts liés au feu sont concentrés principalement dans une seule zone du réseau ce qui conduit à une atténuation plus rapide du seuil de fiabilité par zone (zone Sud-Est dans le cas de P1).

La Figure 38 reflète la brièveté de la durée de vie du réseau comme précisé précédemment et donc la courbe de fiabilité est quasi-linéaire s'effondrant juste après 21 jours (date de départ de feu). Cependant, le réseau continue à fonctionner 25 jours après la présence du feu.

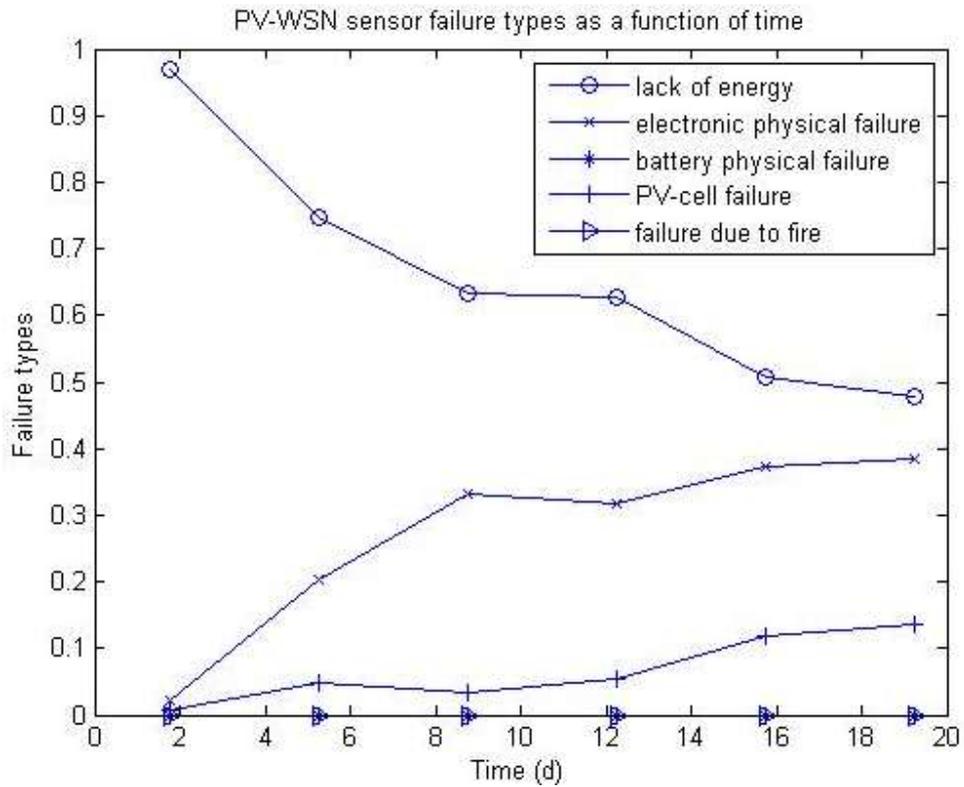


Figure 37 : Types de défaillances de nœud PV-WSN en fonction du temps jusqu'à 21 jours (scénarios 5 à 8)

Tous les scénarios qui partagent la même date de départ de feu ont la même courbe de fiabilité du réseau avant l'apparition de l'incendie (21 jours, Figure 38). Cependant, après le démarrage de feu, la durée de vie du réseau varie entre les scénarios car ceci dépend de la vitesse de propagation du feu et de la position de départ. Ainsi, les répartitions de contributions des types de défaillances sont très variables en fonction de ces paramètres.

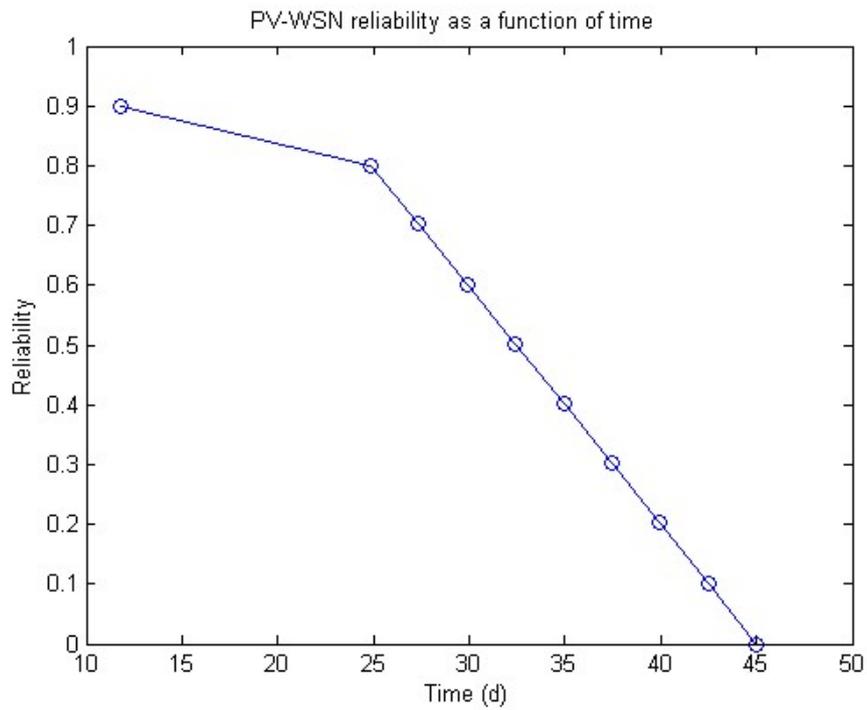


Figure 38 : Fiabilité du PV-WSN en fonction du temps (scénario 6)

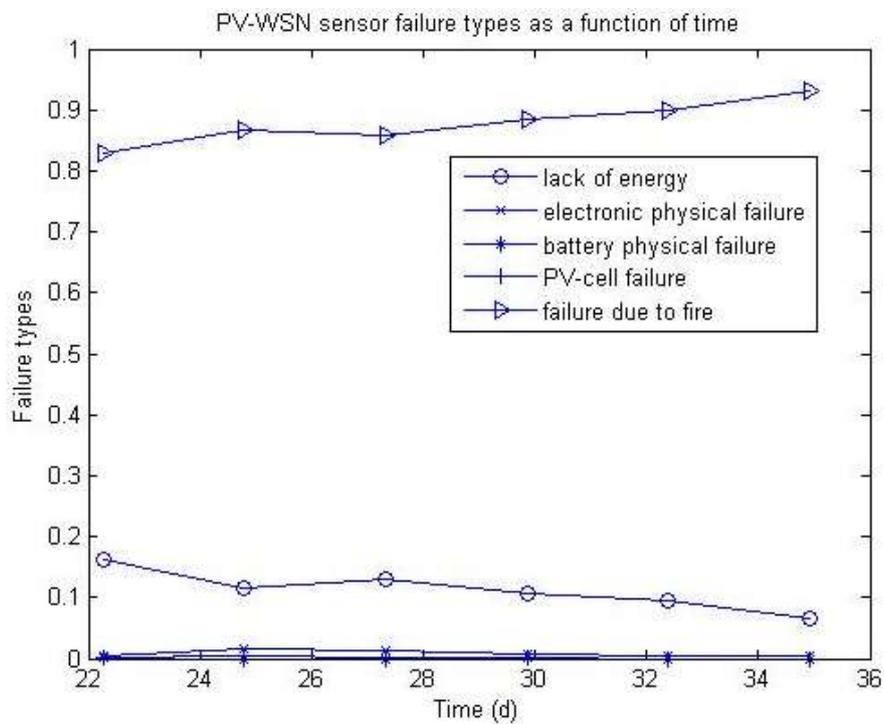


Figure 39 : Types de défaillance de nœud PV-WSN en fonction du temps (scénario 6)

La Figure 39 montre que la défaillance du réseau est principalement due au feu de forêt qui représente plus de 80%, puis augmente lentement pour atteindre moins de 85% à 36 jours. Ensuite, elle augmente rapidement pour atteindre  $\approx 100\%$  au cours des 10 derniers jours de la vie du réseau (46 jours). Cette faible durée de vie du réseau est clairement due à la grande vitesse de propagation des feux de forêt ainsi qu'à la position du départ de feu à la position P1 comme expliqué précédemment. Toutefois, la défaillance par manque d'énergie est un facteur pertinent qui représente une moyenne de 19% des défaillances à partir de la mise en place du réseau et jusqu'à 36 jours de la durée de vie du réseau. Ensuite, ce type de défaillance chute à près de 0% au cours des 10 derniers jours de la vie du réseau. Les autres défaillances sont négligeables vu leurs contributions qui représentent moins de 1%.

En outre, la meilleure durée de vie du réseau est atteinte par le septième scénario où la vitesse de propagation du feu est la plus faible (1 km/h) et la position de démarrage de feu est à la position P2 où les dégâts dus au feu sont répartis entre les 4 zones du réseau. Les résultats obtenus par la simulation montrent en Figure 40 que le réseau continue à fonctionner pendant plus de 245 jours, même après la présence du feu. Cette extension dans la durée de vie du réseau peut s'expliquer par :

- la position du feu, qui entre autres distribue les dommages entre les 4 zones du réseau, donc la limite de défaillance par zone (seuil de fiabilité par zone) prend plus de temps pour être atteinte;
- la faible vitesse de propagation du feu augmente la durée de vie du réseau.

Le manque d'énergie a une influence importante sur la défaillance du réseau comme le montre la Figure 41 avec une moyenne de 32% et ceci jusqu'à 150 jours de la vie du réseau. Puis, elle diminue lentement pour atteindre 0% à la fin de vie du réseau (271 jours). Cependant, les défaillances électroniques représentent 10% de la défaillance globale du réseau après le démarrage de feu à 21 jours. Ensuite, elle diminue légèrement pour atteindre 0% à la fin de vie du réseau. La défaillance due au feu représente une moyenne de 65% des défaillances et ceci est à partir de 21 jours (après le départ de feu). De plus, cette contribution augmente lentement pendant 151 jours pour atteindre 100% vers la fin de la vie du réseau (271 jours). Les autres défaillances peuvent être considérées comme négligeables vu qu'elles ne représentent combinées pas plus que 3% de défaillances générales du réseau.

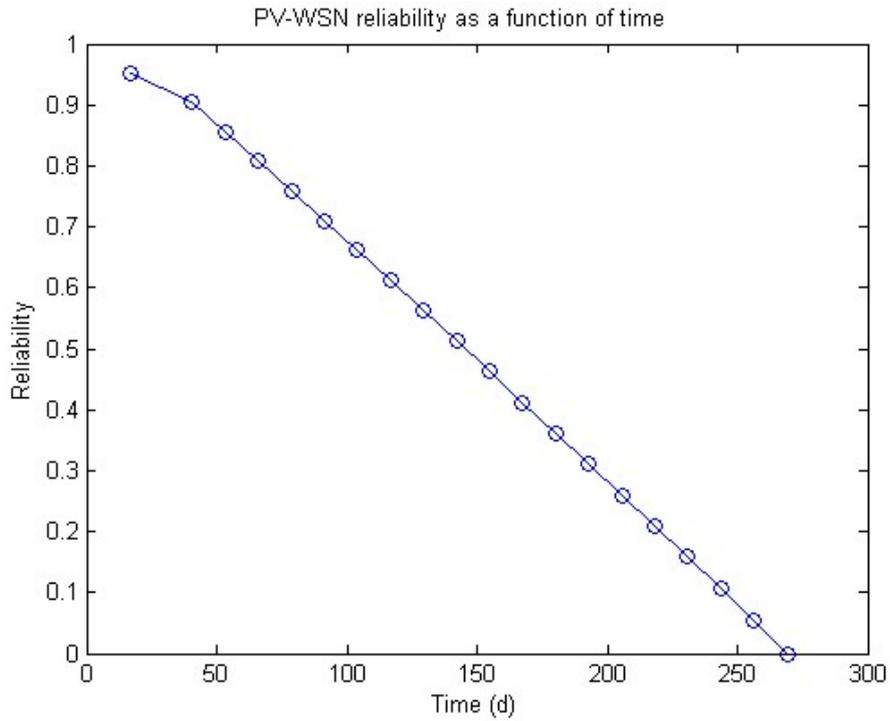


Figure 40 : Fiabilité du PV-WSN en fonction du temps (scénario 7)

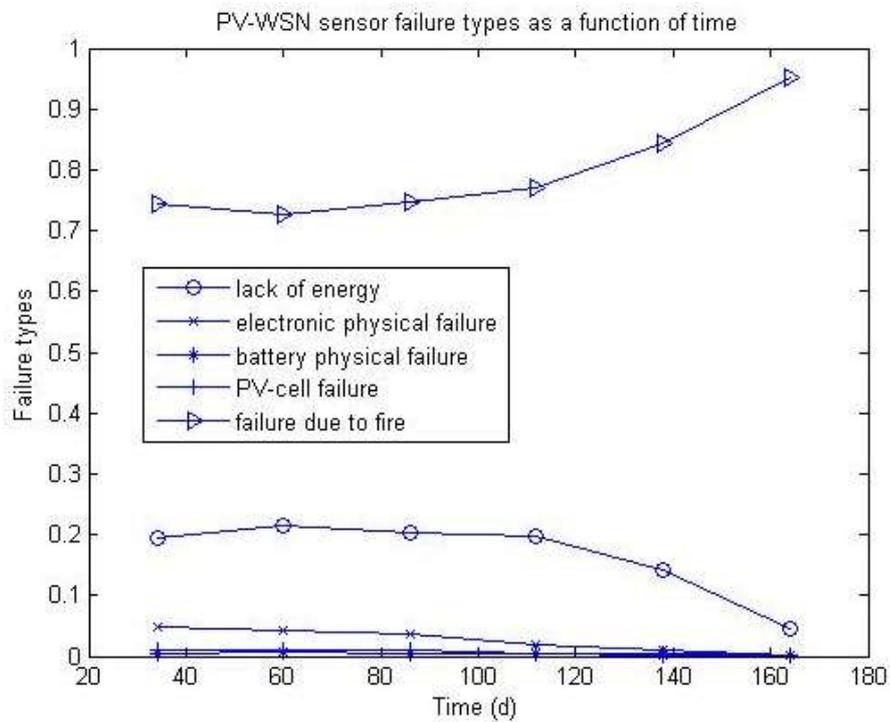


Figure 41 : Types de défaillances de nœud PV-WSN en fonction du temps (scénario 7)

En conclusion, le comportement des types de défaillance avant le démarrage de feu est semblable pour tous les scénarios ayant le même temps de démarrage de feu de forêt. Cependant, il se comporte différemment après le déclenchement du feu et ceci dépend de la vitesse de propagation du feu et la position de feu de forêts par rapport aux nœuds de capteurs. Ceci conduit à un système fiable malgré la présence de feu de forêt dans la plupart des scénarios, sauf dans le cas de conditions extrêmes (5 km/h comme vitesse de propagation du feu) qui diminue considérablement la durée de vie du réseau et par conséquent sa fiabilité.

## 5.9. Conclusion

Ce chapitre vise à évaluer la fiabilité des PV-WSN durant la détection et la propagation de feu de forêts. L'intérêt d'utiliser des cellules PV pour récolter de l'énergie et fournir une source alternative d'énergie au WSN était déjà montré au § 4.7 (Kassan et al. 2015). Des améliorations ont été apportées dans ce chapitre en termes de :

- Processus de détection à grande échelle, avec la prise en compte de zones de recouvrement,
- Les influences environnementales telles que : la variation de l'énergie solaire en fonction de la latitude géographique et de la durée de l'ensoleillement, de l'absorption de la lumière de la forêt, etc.,
- Interaction avec le processus naturel de détection d'événements (propagation des feux de forêt).

D'autres extensions sont également possibles pour cette étude. Par exemple, l'utilisation de multi-clusters pour le cas de grandes zones de détection, couplé à une simulation dynamique de processus. Ceci peut contribuer aux améliorations du protocole WSN pour détecter les changements des conditions environnementales sur de plus grandes distances.

Selon leurs caractéristiques, il semble que les méthodes UGFM et SPN hybrides puissent étudier les WSN, au moins partiellement ou avec des hypothèses simplifiées. Des études comparatives avec ces approches fourniront d'autres tests de l'efficacité du présent modèle et simulateur. Enfin, d'autres méthodes peuvent être proposées comme expliqué précédemment telles que l'utilisation de différents protocoles de routage, l'utilisation d'un système intelligent de récoltes et de transmissions des informations, etc.

---

# Chapitre 6 : Conclusion et perspectives

---



## 6. Conclusion et perspectives

### 6.1. Apport des modèles proposés

Plusieurs études ont traité de la fiabilité des réseaux de capteurs sans fils en utilisant différentes définitions (Tableau 1). Ces définitions relèvent plus de la qualité de service et de l'information que de la fiabilité complète du réseau (voir § 1.2.1). En particulier, cela est dû au fait qu'aucune de ces études ne traite de la fiabilité des composants physiques des nœuds de capteurs qui a une influence directe sur la durée de vie du réseau de capteurs, sa fiabilité et sa robustesse (voire résilience, terme parfois utilisé dans le domaine des réseaux). C'est pourquoi, cette étude porte une attention particulière au traitement de la fiabilité des composants physiques des nœuds ainsi que la qualité de l'information et de détection afin d'obtenir une étude assez complète sur la fiabilité des réseaux de capteurs. Ainsi, les solutions possibles afin d'augmenter sa durée de vie et par conséquent sa fiabilité peuvent être étudiées de manière plus réaliste.

Le photovoltaïque est considéré comme une solution possible qui augmente la disponibilité du WSN et simple à appliquer aux nœuds de capteurs tout en nécessitant peu ou pas de maintenance après son déploiement. De plus, il représente une source d'énergie renouvelable assez fiable et respectueuse de l'environnement. En effet, plusieurs méthodes de récoltes d'énergie solaire dans les réseaux de capteurs sans fils ont été développées. Cependant, la fiabilité des composants physiques associés dans les WSN n'a pas fait l'objet d'études jusqu'à maintenant. Cet aspect constitue l'un des objectifs de nos travaux et a nécessité une amélioration de l'évaluation de la fiabilité des réseaux de capteurs sans fils équipés de cellules photovoltaïques. Ainsi, il faut prendre en compte les défaillances de ces dernières combinées avec tous les autres éléments qui alors ensemble peuvent conduire à une défaillance total ou partielle du système PV-WSN. Alors, le modèle proposé et le simulateur associé permettent d'étudier la pertinence des PV-WSN pour la supervision et la surveillance des phénomènes naturels tels que les feux de forêts.

En effet, les travaux qui traitent de la détection et/ou de la propagation des feux de forêts ne cessent d'évoluer avec l'utilisation des techniques et des logiciels associées (voir § 2.4). Ainsi, de nombreux travaux sur l'utilisation des WSN pour la détection des feux de forêt ont été réalisés comme l'atteste l'état de l'art. Ainsi, en s'appuyant sur nos travaux pour l'évaluation de la fiabilité des WSN, le comportement des réseaux de

capteurs équipés de cellules photovoltaïques a été étudié dans le contexte de feux de forêt en prenant en compte les phénomènes environnementaux.

Enfin, les travaux relatifs à la détection de feux de forêts ainsi que sa propagation et ceux liés à la détermination de son type, n'ont pas considéré la fiabilité, ni l'effet des dégradations sur les capacités de détection ou la durée de vie des réseaux de capteurs dans des tels circonstances. En effet, la durée de vie de réseaux de capteurs ou leur fiabilité s'avèrent incontournables pour garantir le maintien de bon fonctionnement du réseau et sa continuité du service ainsi que mieux comprendre ses limites de performances tout au long de son usage y compris en cours voire après la propagation d'un incendie. Pour cette raison, nos travaux prenant en compte ces différents aspects sont particulièrement utiles afin de permettre le dimensionnement et le choix des caractéristiques de futurs réseaux de surveillance de feux de forêt, et plus largement pour surveiller le milieu naturel.

## 6.2. Synthèse sur le positionnement de nos travaux

Le tableau suivant (Tableau 5) synthétise les modèles existants et ceux proposés ou considérés lors de nos travaux.

<b>Modèles existants : Définition de la fiabilité</b>	<b>Modèles proposés</b>
La capacité de retransmissions de données perdues (Mahmood et al. 2015)	Retransmissions de données perdues (voir 4.7)
La capacité de correction des bits dans des messages corrompus (Mahmood et al. 2015)	Pas considéré
La disponibilité d'au moins un chemin entre un nœud et le sink (Xiao et al. 2009)	Prise en considération (voir 3.6, 4.7)
L'amélioration de la fiabilité de réseau par l'ajout d'un mécanisme de maintenance de chemins (Al-Habashneh et al. 2009)	Routage dynamique avec la capacité de maintenance de chemins (voir 3.3.4)
La fiabilité de la détection des événements (Bouabdallah et al. 2013)	Prise en considération (voir 3.5.2, 5.6)
La quantité d'énergie associée à la détection consommée (Bouabdallah et al. 2013)	Prise en considération (voir 3.5.2, 5.5, 5.6)
Influence de la position du sink sur la fiabilité	Prise en considération (voir 3.3.3)

(Hassan et al. 2014)	
fiabilité de deux-terminaux « 2TR » (définie par la probabilité de connectivité entre deux nœuds « source et destination ») et fiabilité de tout-terminal « ATR » (définie par la probabilité d'une communication réussie entre tous les nœuds) et la fiabilité de tous les nœuds opérationnels « AoTR » (définie par la probabilité que les nœuds opérationnels puissent communiquer) (Cook & Ramirez-Marquez 2008)	Prise en considération partielle (voir 3.6 et 4.7 pour le cas de 2TR et 4.8 pour le cas de AoTR)
	Étude de fiabilité des composants physiques (voir 3.5.1) <i>Kassan et al. (2015)</i>
	Étude de fiabilité des batteries (voir 3.5.4) <i>Kassan et al. (2016)</i>
	Étude de fiabilité des cellules PV (voir 4.6.1) <i>Kassan et al. (2016)</i>
	Étude de fiabilité dans le mode multi-clusters avec le k-couverture (voir 4.8) <i>Kassan et al. (2017)</i>
	Étude d'efficacité des cellules PV (voir 5.4) <i>Kassan et al. (2017)</i>
	Étude de la propagation de feu de forêt (voir 5.5) <i>Kassan et al. (2017)</i>
	Étude de la fiabilité de PV-WSN en mode feu de forêt (voir 5.7) <i>Kassan et al. (2017)</i>

Tableau 5 : Modèles existants et proposées

Un simulateur a été développé sur la base de différents modèles et prendre en considération les différentes hypothèses associées. L'avantage principal des modèles proposés s'appuie clairement sur la possibilité d'évaluer la fiabilité du WSN d'une manière complémentaire à celle existante et démontrer l'importante contribution que portent les défaillances des composants physiques sur la défaillance de l'ensemble du réseau. De plus, les modèles proposés sont adaptés à différents cas de figures afin de répondre au mieux aux conditions réelles d'utilisation dans les différents modes de

fonctionnement de WSN (l'évaluation de la consommation énergétique, routage, récolte et transmission de l'informations, support de PV, obstacles naturelles, dégradation dans la récoltes d'énergies liées à l'inclination et l'orientation des PV, propagation et détection des feux de forêt, couverture de réseau, couverture de réseau en mode multi-clusters etc.).

### 6.3. Principaux résultats de la thèse

Nos travaux présentent plusieurs cas d'applications permettant de mieux évaluer la fiabilité des réseaux de capteurs dont les capteurs sont distribués aléatoirement et dont la finalité est la supervision et la surveillance des événements naturels. Ils ont aussi pour but de comprendre la contribution des défaillances de composants physiques sur la défaillance totale des WSN.

En effet, le premier cas d'application considère un réseau de capteurs sans fils composé de 100 capteurs dont le nœud sink avec des caractéristiques de réseaux exposées au § 3.6. Les résultats obtenus montrent clairement que les défaillances électroniques aléatoires ne sont pas négligeables pour l'évaluation de la fiabilité des WSN. De plus, la contribution des défaillances physiques dans ce cas d'application (voir § 3.6) augmente au fils de temps en représentant approximativement 28 % de la défaillance globale du WSN. Ainsi, la fiabilité et par conséquent la durée de vie du WSN sont considérablement impactés par les défaillances électroniques aléatoires.

Le deuxième cas d'application (voir § 4.7) considère un réseau de capteurs équipé de mini-cellules photovoltaïques (PV-WSN) en le comparant en termes de contribution de défaillances physiques sur l'ensemble des défaillances d'un réseau WSN sans PV. Dans ce cas d'application on considère que le réseau demeure fiable s'il existe au moins un lien utilisable (par conséquent un nœud actif autre que le nœud « sink ») entre un nœud et le nœud « sink ». Cette hypothèse a joué un rôle significatif dans l'augmentation de la durée de vie du réseau de capteurs et par conséquent sur son niveau de fiabilité. Les caractéristiques réseautiques utilisées dans ce cas d'applications étaient une version améliorée de celles utilisées dans le cas d'application précédent (voir § 4.7). Ainsi, les résultats obtenus montrent bien l'importance de la contribution de défaillances des composants physiques sur la fiabilité du système.

Un troisième cas d'application (voir § 4.8) traite un plus grand nombre de nœuds de capteurs dans la même zone. Dans ce cas d'application l'étude consiste à évaluer la fiabilité du réseau PV-WSN dans deux structures « clustered » et « non-clustered ». En effet, la structure « clustered » consiste à diviser le réseau en plusieurs clusters avec un seuil de couverture par sous-cluster (en fonction de la répartition géographique des nœuds) requis afin de garantir une meilleure qualité de supervision et donc un système de surveillance fiable et apte à détecter les événements dans la zone surveillée. Un nœud est considéré comme actif tant qu'il est non défaillant et qu'il possède au moins un chemin actif vers le nœud sink afin d'acheminer les informations récoltées. En revanche, la structure « non-clustered » considère la zone surveillée comme un seul cluster avec un seuil de nombre de nœuds actifs dans la totalité de la zone indépendamment de la répartition géographique des nœuds de capteurs. Ces deux structures montrent bien l'impact que peut avoir les différents types de défaillances physiques sur la fiabilité du réseau et confirme l'importance de la considération de ces défaillances dans les travaux à venir, cela en relation avec les choix d'organisation des réseaux.

Le dernier cas d'application (voir § 5.7) vise à évaluer la fiabilité des PV-WSN durant la détection et la propagation de feu de forêts. Les caractéristiques utilisées dans ce cas d'application sont très ressemblant voire similaire à celle utilisé au § 4.7 avec comme différence que tous les nœuds de capteurs sont équipés de mini-cellules photovoltaïques. La propagation et la détection de feux de forêt ont été intégrées dans ce cas d'application afin de mettre en évidence leur effet sur la fiabilité de l'ensemble de réseau (toujours en prenant en compte la défaillance de composants physiques sur la fiabilité de WSN). Plusieurs scénarios ont été traités lors de ce cas d'applications afin de simuler différents cas de déclenchement de feu. Les résultats obtenus démontrent bien l'importance de la contribution de défaillance de composants physiques sur l'ensemble du réseaux et comment ceci impacte la fiabilité générale du réseau. De plus, on peut avoir une idée de la « résilience » du réseau au cours et après un incendie en vue de sa réutilisation et/ou son renouvellement partiel ou total.

## 6.4. Perspectives générales

Plusieurs améliorations sont possibles, d'un point de vue des modèles et des hypothèses prises en compte ainsi que des évolutions futures envisageables des WSN. En effet, les influences environnementales liées à la détermination de la fiabilité des composants physiques (électroniques, batteries, PV,...) ont été globalement prises en considération cependant elles peuvent être améliorées dans de futurs modèles. D'autres paramètres tels que le processus de détection voire suivi de propagation, des conditions environnementales liées aux forêts et la propagation de feux de forêt tel que la présence de végétations, l'inclinaison du sol, les effets de vents, etc., ainsi que l'amélioration de l'évaluation de la performance de cellules photovoltaïques déployées dans les forêts feront l'objet des futures travaux pour améliorer l'évaluation des performances des WSN et PV-WSN.

La formulation proposée dans nos travaux peut également être exprimée en utilisant différentes approches dans le cadre de fiabilité dynamique. Plus précisément, le problème peut être formulé en termes de processus stochastiques, en particulier comme un processus markovien hétérogène par morceaux (ou processus semi-markovien). De ce point de vue, une première approche a été proposée par Zhu et al. (2012). Néanmoins, la prise en compte des différents comportements d'un WSN et le nombre important de composants dans le réseau rendent son utilisation encore difficile, l'étude de propriétés asymptotiques pouvant toutefois être effectuée (voir de Saporta et al. 2015 ou Zhang et al. 2014 pour plus de détails).

D'autres approches basées sur des automates hybrides ou des réseaux de Petri stochastiques (SPN) peuvent être utilisées, et proposer une évaluation plus détaillée (en prenant plus d'hypothèses en compte) pour des réseaux (WSN ou PV-WSN) avec grand nombre de composants comparable à ceux que nous étudions (réseaux au moins une centaine de nœuds). Les travaux de Zhang et al. 2014, ou encore de Babykina et al. 2016 par exemple ont traité d'autres systèmes complexes et peuvent être approfondis pour effectuer des comparaisons avec nos études.

On identifie aussi le modèle de la fonction de génération universelle (UGFM) qui peut également être appliqué à ce type de problème (un grand nombre de composants), en particulier dans le cas des réseaux de nœuds (Yeh 2008). Cependant, le

comportement dynamique d'un WSN (changement de chemins en fonction des nœuds disponibles/défaillants) et les processus de consommation d'énergie associés (liés au calcul de chemins évolutifs) sont difficiles à prendre en compte dans l'UGFM même à l'aide d'algorithmes performants développés récemment (Yeh 2016, ou par « clusters », voir par ex. Liu et al. 2016).

On peut en conclure que les méthodes UGFM et SPN hybrides permettent d'étudier les WSN, au moins partiellement ou avec des hypothèses simplifiées. Des études comparatives avec ces approches fourniront d'autres tests de l'efficacité du présent modèle et simulateur.

Également, il serait possible de prendre en considération des améliorations récentes dans le mode de fonctionnement de réseau de capteurs telles que celle qui exploitent des solutions intelligentes. Par exemple, une solution consiste à mettre les nœuds qui ont un faible recueil d'énergie en mode « idle » pendant l'obscurité ou bien par temps couverts. Ceci réduit leur consommation d'énergie et préserve leurs stocks d'énergie, permettant leur fonctionnement quand le soleil est présent ou bien un événement est détecté.

Aussi, il serait intéressant de comparer différentes technologies et protocoles de communication (transmission par cumulation et concentration de données, transmission par déclenchement des événements,...) et/ou de routage (protocole de routage en faible consommation d'énergie,...) afin d'étudier les possibilités de prolonger la durée de vie des WSN et PV-WSN.

D'autres extensions sont également possibles par l'utilisation de multi-clusters pour le cas de grandes zones de détection, couplée à une simulation dynamique de processus. Ceci peut contribuer aux améliorations du protocole WSN pour détecter les changements des conditions environnementales sur de plus grandes distances. Ainsi il sera intéressant d'exploiter le modèle proposé dans notre étude à la surveillance de phénomènes en milieu naturel différents de feux de forêt tels que les pollutions, diffusions de gaz, inondation, croissance en agriculture, etc. et de voir les contributions de la fiabilité dans ces différents cas.

Une étude de résilience, dans le sens de retour à l'état actif des nœuds en pénurie d'énergie, pourrait être approfondie. En particulier, la présence de cellules photovoltaïques qui peuvent fournir l'énergie nécessaire à ces nœuds est un facteur de résilience en permettant un retour à l'activité et à un fonctionnement en présence du soleil. En effet, cet aspect n'était pas ou peu abordé dans le domaine de l'étude des réseaux où quand un nœud devient défaillant il nécessite une réparation ou plus souvent un remplacement.

Le modèle développé dans nos travaux peut être adapté puis exploité afin d'améliorer la distribution de nœuds dans la zone de supervision, ou bien le calcul des chemins des nœuds de capteurs vers le(s) sink(s), ou encore le nombre de capteurs équipés de cellules photovoltaïques, etc. Ce type d'amélioration permet ainsi d'obtenir un système plus adapté aux besoins grâce à des méthodes d'optimisation exploitant le simulateur développé dans ce travail. Dans ce contexte, l'optimisation basée sur des calculs fiabilistes avec l'utilisation des algorithmes génétiques (AG) peut être, par exemple, étudiée pour des réseaux à grand échelles avec multi-clusters et plusieurs nœuds sink reliés à un centre de traitement de données.

---

# Bibliographie

---



## Références bibliographiques

AboElFotouh H M F, ElMallah E S, Hassanein H S. On the reliability of wireless sensor networks. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'06)*, Istanbul, Turkey, 11-15 June 2006. Piscataway, NJ, USA, Vol. 8, 3455-3460.

AboElFotouh H M F, Iyengar S S, Chakrabarty K. Computing reliability and message delay for cooperative wireless distributed sensor networks subject to random failures. *IEEE Transactions on Reliability*, 2005; **54**(1): 145-155.

Ahsan M M, Hasanuzzaman M, Olabi A G, Hashmi M S J. Review of the Reliability and Connectivity of Wireless Sensor Technology, in *Comprehensive Materials Processing*, S. H. F. B. J. V. T. Yilbas, Ed. Oxford: Elsevier, 2014; **13**(23): 571–588.

Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey. *Computer. Networks* 2002; **38**(4): 393–422.

Al-Habashneh A A Y, Ahmed M H , Husain T. Adaptive MAC protocols for forest fire detection using wireless sensor networks, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering CCECE '09, Newfoundland, Canada, 3-6 mai 2009, 329 – 333.

Al-Habashneh A A Y, Ahmed M H, Husain, T. Reliability analysis of Wireless Sensor Networks for forest fire detection, in: *7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, Istanbul, Turquie, 4-8 juillet 2011, pp. 1630–1635.

Amouric Henri, Le feu à l'épreuve du temps, Aix-en-Provence, Narration, 1992, 255 p.

Aslan Y E, Korpeoglu I, Ulusoy Ö. A framework for use of wireless sensor networks in forest fire detection and monitoring. *Computers, Environment and Urban Systems*, Special Issue: Advances in Geocomputation 2012; **36**: 614–625.

Babykina G, Brinzei N, Aubry J F, Deleuze G. Modeling and simulation of a controlled steam generator in the context of dynamic reliability using a Stochastic Hybrid Automaton, *Reliability Engineering and System Safety* 2016; **152**: 115-136.

Bahrepour M, Meratnia N, Havinga P. Automatic fire detection: A survey from wireless sensor network perspective, Tech. Rep. TR-CTIT-08-73, Centre for Telematics and Information Technology University of Twente, Enschede, 2008.

Ballari D, Wachowicz M, Bregt A K, Manso-Callejo M. A mobility constraint model to infer sensor behaviour in forest fire risk monitoring. *Computers, Environment and Urban Systems* 2012; **36**: 81–95.

Basurra S S, De Vos M, Padget J, Ji Y, Lewis T, and Armour S. Energy efficient zone based routing protocol for MANETs. *Ad Hoc Networks* 2015; **25**(A): 16–37.

Bayo A, Antolin D, Medrano N, Calvo B, Celma S. Development of a Wireless Sensor Network System for Early Forest Fire Detection. *2010 European Workshop on Smart Objects: Systems, Technologies and Applications (RFID Sys Tech)*, Ciudad Real, Espagne, 15-16 June 2010, 1–7.

Bayo A, Antolín D, Medrano N, Calvo B, Celma S. Early detection and monitoring of forest fire with a wireless sensor network system. *Procedia Engineering*, Eurosensor XXIV Conference, Linz, Autriche, 5-8 Septembre 2010, 248–251.

Bazzi A M, Kim K A, Johnson B B, Krein Ph T, Dominguez-Garcia A. Fault Impacts on Solar Power Unit Reliability. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2011, Twenty-Sixth Annual IEEE, Fort Worth, Texas, USA, 6-11 March 2011, 1223 – 1231.

Bergonzini C, Brunelli D, Benini L. Algorithms for harvested energy prediction in batteryless wireless sensor networks. *Proc. of the 3rd International Workshop on Advances in sensors and Interfaces, IWASI, Trani (Bari), Italy*, 25-26 June 2009; 144–149.

Bhattacharjee S, Roy P, Ghosh S, Misra S, Obaidat M S. Wireless sensor network-based fire detection, alarming, monitoring and prevention system for Bord-and-Pillar coal mines. *Journal of Systems and Software*, Novel approaches in the design and implementation of systems/software architecture, 2012; **85**: 571–581.

Bianchini G, Denham M, Cortés A, Margalef T, Luque E. Wildland fire growth prediction method based on multiple overlapping solution. *J. Comput. Sci.* 2010; **1**: 229–237.

Bouabdallah F, Bouabdallah N, Boutaba R. Reliable and energy efficient cooperative detection in wireless sensor networks. *Computer Communications* 2013; **36**(5): 520–532.

Bouabdellah K, Nouredine H, Larbi S. Using Wireless Sensor Networks for Reliable Forest Fires Detection. *Procedia Computer Science*, The 4th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2013), the 3rd International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2013), Halifax, Nova Scotia, Canada, 25-28 June 2013, **19**: 794–801.

Breejen E D, Breuers M, Cremer F, Kemp R, Roos M, Schutte K, Vries J S D. Autonomous forest fire detection. *3rd International Conference on Forest Fire Research*, Luso, Portugal, 16-20 novembre 1998, Vol. 2, 2003–2012.

Cerotti D, Gribaudo M, Bobbio A. Markovian agents models for wireless sensor networks deployed in environmental protection. *Reliability Engineering & System Safety* 2014; **130**: 149–158.

Chen I R, Wang Y, Wang D C. Reliability of wireless sensors with code attestation for intrusion detection, *Information Processing Letters* 2010; **110**(17): 778–786.

Commercial online library of sound effects. Category: Fires / Subcategory: Forest Brush, URL:

<http://www.sounddogs.com/results.asp?Type=1,&CategoryID=1025&SubcategoryID=14>

Comparisons Corporation. FindSounds. Search for Fire Flame, URL: <http://www.findsounds.com/isapi/search.dll?keywords=fire+flame>

Comparisons Corporation. FindSounds. Search for Forest Fire, URL: <http://www.findsounds.com/isapi/search.dll?keywords=forest+fire>

Cook J L, Ramirez-Marquez J E. Reliability analysis of cluster-based ad-hoc networks. *Reliability Engineering & System Safety* 2008; **93**(10): 1512–1522.

Daniau A L. Variabilité des incendies en Europe de l'Ouest au cours du dernier cycle climatique: relations avec le climat et les populations paléolithiques. Étude des microcharbons préservés dans les carottes marines, Thèse de l'Université Bordeaux1, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2008; 240 pages.

Dempster A A generalization of bayesian inference, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (methodological)* 1968; **30**: 205 – 247.

Di Pietro R, Viejo A. Location privacy and resilience in wireless sensor networks querying. *Computer Communications, Special Issue of Computer Communications on Information and Future Communication Security* 2011; **34**: 515–523.

Díaz-Ramírez A, Tafoya L A, Atempa J A, Mejía-Alvarez P. Wireless Sensor Networks and Fusion Information Methods for Forest Fire Detection. *Procedia Technology, The 2012 Iberoamerican Conference on Electronics Engineering and Computer Science, Guadalajara, Mexico, 16-18 May 2012*, **3**: 69–79.

Dondi D, Bertacchini A, Brunelli D, Larcher L, Benini L. Modeling and Optimization of a Solar Energy Harvester System for Self-Powered Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2008; **55**: 2759–2766.

FIDES guide, 2013. <http://www.fides-reliability.org> [10 Février 2017]

Friginal J, de Andrés D, Ruiz J-C, Martínez M. A survey of evaluation platforms for ad hoc routing protocols: A resilience perspective. *Computer Networks* 2014; **75**, Part A: 395–413.

Gakkestad J, Hanssen L. Powering Wireless Sensor Networks Nodes in Northern Europe Using Solar Cell Panel for Energy Harvesting. *4th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS), Paris, France, 7-10 février 2011*; 1–5.

Goswami S, Chakraborty S, Ghosh S, Chakrabarti A, Chakraborty B. n.d. A review on application of data mining techniques to combat natural disasters. *Ain Shams Engineering Journal* 2016, sous presse, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2016.01.012>.

Hassan M M, Ramadan R A, Boghdadi H M E. Finding the Best Sink Location in WSNs with Reliability Route Analysis. *Procedia Computer Science* 2014; **32**: 1160–1167.

Honsberg C, Bowden S. [www.pveducation.org/pvcdrom](http://www.pveducation.org/pvcdrom), 6 mai 2016.

Jie, Z, Bo, Y. Design of Power Supply System for Field Wireless Sensor Network Nodes. *Proc. of Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, Harbin City, Heilongjiang, China, 08–10 December 2012; 39–43.

Johnson D, Hu Y, Maltz D. The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4. *Network Working Group RFC4728, The IETF Trust*, 2007.

JRC European Commission <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php> [10 Février 2017]

Kassan R, Châtelet E, El Hassan B, Sardouk. A. Reliability Assessment of Wireless Sensor Networks for Environmental Detection. *Proc. of European Safety and Reliability Conference, ESREL 2015, Safety and Reliability of Engineered Systems*, Padofilini et al. (Eds), Zürich, Suisse, 7-10 Septembre 2015; 1591-1598.

Kassan R, Châtelet E, El Hassan B. Photovoltaics in the Assessment of Wireless Sensor Network Reliability with Changing Environmental Conditions, *Quality and Reliability Engineering International*, soumis, 2016.

Khamukhin A A , Bertoldo S. Spectral analysis of forest fire noise for early detection using wireless sensor networks. *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Moscou, Russie, 12-14 mai 2016, 1–4.

Kini A V, Singhal N, Weber S. Broadcast capacity of a WSN under communication and information coordination. *Ad Hoc Networks* 2010; **8**(4): 439–455.

Kohvakka M, Suhonen J, Kuorilehto M, Kaseva V, Hännikäinen M, and Hämäläinen T D. Energy-efficient neighbor discovery protocol for mobile wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks* 2009; **7**(1): 24–41.

Laprie J C. Guide de la sûreté de fonctionnement, Cépadués – Éditions, 1996.

Li J, Pan Y, Xiao Y. Performance study of multiple route dynamic source routing protocols for mobile ad hoc networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing* 2005; **65**(2): 169–177.

Liu Q, Zhang H, Ma Y. Reliability Evaluation for Wireless Sensor Network Based on Weighted Voting System with Unreliable Links. *3rd International Conference on Information Science and Control Engineering, (ICISCE 2016)*, IEEE, Beijing, Chine, 8-10 juillet 2016, 1384-1388.

Lloret J, Garcia M, Bri D, Sendra S. A Wireless Sensor Network Deployment for Rural and Forest Fire Detection and Verification. *Sensors* 2009, **9**: 8722-8747

Mahmood M A, Seah W K G, Welch I. Reliability in wireless sensor networks: A survey and challenges ahead. *Computer Networks* 2015; **79**: 166-187.

Manufacturer datasheet for Tmote Sky :

<http://www.eecs.harvard.edu/~konrad/projects/shimmer/references/tmote-sky-datasheet.pdf> [10 Février 2017]

Méndez-Garabetti M, Bianchini G, Caymes-Scutari P, Tardivo M L. Increase in the quality of the prediction of a computational wildfire behavior method through the improvement of the internal metaheuristic. *Fire Safety Journal* 2016; **82**: 49–62.

MIL-HBk 217F. *Military Handbook: Reliability Prediction of Electronic Equipment*. Washington DC: Department of Defense, 1991.

Mišić J, Mišić V. Wireless sensor networks: Performance, reliability, security, and beyond. *Computer Communications*, 2006; **29**(13–14): 2447–2449.

Moshtaghi M, Leckie C, Karunasekera S, Rajasegarar S. An adaptive elliptical anomaly detection model for wireless sensor networks. *Computer Networks* 2014; **64**: 195–207.

Nakamura E F, Loureiro A A F, Frery A C. Information fusion for wireless sensor networks: Methods, models, and classifications, *ACM Computer Surveys* 2005; **39**(9): 1-55.

NASA, National environment satellite, <http://modis.gsfc.nasa.gov/> [18 février 2017]

Ndiaye A, Charki A, Kobi A, Kébé Ch M F, Ndiaye P A, Sambou V. Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. *Solar Energy* 2013; **96**: 140-151.

Orlinski M, Filer N. Neighbour discovery in opportunistic networks. *Ad Hoc Networks* 2015; **25**(B): 383–392.

Paillassa B, Yawut C, Dhaou R. Network awareness and dynamic routing: The ad hoc network case, *Computer Networks* 2011; **55**(9): 2315–2328.

Qian H, Sun P, Rong Y. Design Proposal of Self-Powered WSN Node for Battle Field Surveillance. Energy Procedia. *International Conference on Future Energy, Environment, and Materials, Hong Kong, China, 12-13 April 2012*; 16(Part B): 753–757.

Raya M, Hubaux J P. The security of vehicular ad hoc networks. In *Proc. the 3rd ACM Workshop on Security of Ad Hoc and Sensor Networks (SASN)*, Alexandria, VA, USA, November 2005, pp. 11-21.

Richards G D. An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. *International journal for numerical methods in engineering* 1990; **30**: 1163–1179.

Sabit H, Al-Anbuky A, GholamHosseini H. Wireless Sensor Network Based Wildfire Hazard Prediction System Modeling. *Procedia Computer Science*, The 2nd International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT-2011), The 8th International Conference on Mobile Web Information Systems (MobiWIS 2011), Niagara Falls, Ontario, Canada, 19-21 September 2011; **5**: 106–114.

Saleem M, Ullah I, Khayam S A, Farooq M. On the reliability of ad hoc routing protocols for loss-and-delay sensitive applications. *Ad Hoc Networks* 2011; **9**(3): 285–299.

Saporta (de) B, Dufour F, Zhang H. Numerical Methods for simulation and optimization of Piecewise Deterministic Markov Processes, *Wiley-ISTE*, 2015; 298 pages.

Sardouk A, Mansouri M, Merghem-Boulahia L, Gaiti D, Rahim-Amoud R. Crisis management using MAS-based wireless sensor networks. *Computer Networks* 2013; **57**: 29–45.

Shakshuki E M, Bouabdellah K, Nouredine H, Larbi S. Using Wireless Sensor Networks for Reliable Forest Fires Detection, The 4th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2013), the 3rd International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2013). *Procedia Computer Science* 2013; Halifax, Nova Scotia, Canada, 25-28 June 2013; **19**: 794–801.

Tarique M, Tepe K E. Minimum energy hierarchical dynamic source routing for Mobile Ad Hoc Networks. *Ad Hoc Networks* 2009; **7**(6): 1125–1135.

Thayananthan V, Alzranhi A. Enhancement of Energy Conservation Technologies in Wireless Sensor Network, *Procedia Computer Science*, 9th International Conference on Future Networks and Communications (FNC'14), 11th International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing (MobiSPC'14), Affiliated Workshops 2014; **34**: 79–86.

Velásquez-Villada C, Donoso Y. Multipath Routing Network Management Protocol for Resilient and Energy Efficient Wireless Sensor Networks. *Procedia Computer Science* 2013; **17**: 387–394.

Venkatesan L, Shanmugavel S, Subramaniam C. A Survey on Modeling and Enhancing Reliability of Wireless Sensor Network. *Wireless Sensor Network* 2013; **5**: 41-51.

Vijayalakshmi S R, Muruganand S. Real Time Monitoring of Wireless Fire Detection Node. *Procedia Technology*, International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology (ICETEST - 2015), 2016; Thrissur, Kerala, India, 09-11 December 2015; **24**: 1113–1119.

Vupputuri S, Rachuri K K, Siva Ram Murthy C. Using mobile data collectors to improve network lifetime of wireless sensor networks with reliability constraints. *Journal of Parallel and Distributed Computing* 2010; **70**(7): 767–778.

Vysochanskij D F, Petunin Y I. Justification of the 3s rule for unimodal distributions,

Theory Probab. *Math. Stat.* 1980; **21**: 25–36.

Wang C, Xing L, Vokkarane V M, Sun Y(L). Reliability and lifetime modeling of wireless sensor nodes. *Microelectronics Reliability* 2014; **54**(1): 160–166.

Wang M, Liu H, Chen F, Liu J. Forest Fire Warning System Based on GIS and WSNs. *2015 4th International Conference on Advanced Information Technology and Sensor Application (AITS)*, Harbin, Chine, 21-23 août 2015, 3–6.

White M, Bernstein J B. Microelectronics Reliability: Physics-of-Failure Based Modeling and Lifetime Evaluation. *National Aeronautics and Space Administration, JPL Publication* 2008.

Xiao Y, Chen S, Li X, Li Y. Reliability evaluation of wireless sensor networks using an enhanced OBDD algorithm. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications* 2009; **16**(5): 62–70.

Yeh W C. A simple universal generating function method for estimating the reliability of general multi-state node networks. *IIE Transactions* 2008; **41**(1): 3-11.

Yeh W C. Evaluation of the one-to-all-target-subsets reliability of a novel deterioration-effect acyclic multi-state information network. *Reliability Engineering and System Safety* 2016, sous presse, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2016.11.012>.

Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks* 2008; **52**(12): 2292–2330.

Zhang H, Innal F, Dufour F, Dutuit Y. Piecewise Deterministic Markov Processes based approach applied to an offshore oil production system. *Reliability Engineering and System Safety* 2014; **126**: 126-134.

Zhang L, Luo J, and Guo D. Neighbor discovery for wireless networks via compressed sensing, *Performance Evaluation* 2013; **70**(7–8): 457–471.

Zhu J, Tang L, Xi H, Zhang Z. Reliability Analysis of Wireless Sensor Networks Using Markovian Model, *Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics* 2012; Article ID 760359, 21 pages.

Zin Md S, Badrul Anuar N, Laiha Mat Kiah M, Khan Pathan A S. Routing protocol design for secure WSN: Review and open research issues. *Journal of Network and Computer Applications* 2014; **41**: 517–530.

## Liste de publications

Kassan R, Châtelet E, El Hassan B. Photovoltaics in the Assessment of Wireless Sensor Network Reliability with Changing Environmental Conditions, Quality and Reliability Engineering International, 2016 (en révision).

Kassan R, Châtelet E, El Hassan B, Sardouk A. Reliability Assessment of Wireless Sensor Networks for Environmental Detection. Proc. of European Safety and Reliability Conference, ESREL 2015, Safety and Reliability of Engineered Systems, Podofilini et al. (Eds), Zürich, Suisse, 7-10 September 2015; 1591-1598.

Kassan R, Châtelet E, El Hassan B, Soukieh J. Reliability Assessment of Wireless Sensor Networks Equipped with Photovoltaic Cells for the Detection of Changing Environmental Conditions. Proc. of European Safety and Reliability Conference, ESREL 2017, Safety and Reliability of Engineered Systems, Portoroz, Slovenia, 18-22 June 2017 (accepté).

# Rabih KASSAN

## Doctorat : Optimisation et Sûreté des Systèmes

### Année 2017

#### Évaluation de la fiabilité des réseaux de capteurs sans fils pour la détection en milieu naturel

L'objectif de la thèse est d'évaluer la fiabilité des réseaux de capteurs (WSN) en milieu naturel. L'évaluation prend en compte les composants physiques des nœuds de capteurs, les cellules photovoltaïques éventuelles (PV), les batteries rechargeables ou non, les protocoles de communications et d'échange de données ainsi que les éléments nécessaires pour une détection efficace, en particulier les feux de forêt.

L'étude traite d'abord du fonctionnement du réseau de capteur dans la nature en prenant en compte sa consommation d'énergie et les défaillances physiques et fonctionnelles pour évaluer sa fiabilité. Puis, la fiabilité est comparée entre un réseau sans PV (WSN) et avec PV (PV-WSN) dans des conditions d'échange de données difficiles. Enfin, l'évaluation de la fiabilité des PV-WSN est effectuée dans le cadre de la détection et de la propagation des feux de forêts avec les mêmes conditions d'échange de données.

Les principales hypothèses considérées sont : des distributions de capteurs aléatoires dans des réseaux avec un seul nœud « sink », des nœuds identiques, l'affaiblissement du signal radio dû aux obstacles naturels, une propagation de feu uniforme et elliptique, une végétation homogène, une perte possible de paquets de données ainsi que l'utilisation du protocole de routage « Dynamic Source Routing (DSR) ».

Un simulateur a été développé pour effectuer les différentes études. Les résultats obtenus montrent l'importance des défaillances physiques pour l'évaluation de la fiabilité et pour la prolongation de la durée de vie des WSN et PV-WSN.

**Mots clés :** réseaux de capteurs (technologie) - fiabilité - protocoles de réseaux d'ordinateurs - photopiles - Monte-Carlo, méthode de - forêts, incendies.

#### Assessment of the Reliability of Wireless Sensor Networks for Detection in Natural Environments

The objective of my thesis was to evaluate the reliability of wireless sensor networks (WSN) in natural settings. My evaluation takes into account the physical components of sensor nodes, photovoltaic (PV) cells, rechargeable and non-rechargeable batteries, communication and data transmission protocols, and elements necessary for effective detection, especially for the case of forest fires.

The study first deals with the functioning of a WSN in nature by taking into account its energy consumption, and physical and functional failures to assess its reliability. Reliability is then compared between a PV-free (WSN) and PV- (PV-WSN) network under complex data exchange conditions. Finally, the evaluation of the reliability of the PV-WSN is carried out in the context of the detection and propagation of forest fires under the same conditions of data exchange.

The main assumptions considered are: the WSN is structured randomly with one sink per cluster and identical sensors, environmental and orientation losses affect PV-cell recharge, the radio signal may be weakened by natural obstacles, fire propagation is uniform and elliptical, vegetation is homogeneous, and there is communication loss using the Dynamic Source Routing (DSR) protocol.

A simulator was developed to carry out these assessments. The results obtained show the importance of physical failures in assessing reliability and extending WSN and PV-WSN lifetime.

**Keywords:** sensor networks - reliability (engineering) - computer network protocols - photovoltaic cell - Monte Carlo method - forest fires.