



Capteur Communicant Autonome en Énergie pour l'IoT

Taoufik Bouguera

► To cite this version:

Taoufik Bouguera. Capteur Communicant Autonome en Énergie pour l'IoT. Electronique. Université de Nantes, 2019. Français. NNT: . tel-02092386

HAL Id: tel-02092386

<https://hal.science/tel-02092386>

Submitted on 8 Apr 2019

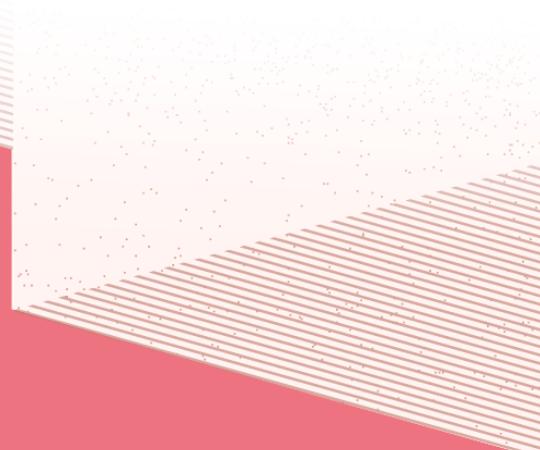
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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.

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE DE NANTES
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 601
*Mathématiques et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication*
Spécialité : *Électronique*



Par

Taoufik BOUGUERA

Capteur Communicant Autonome en Énergie pour l'IoT

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 28 Mars 2019

Unité de recherche : IETR UMR CNRS 6164

Rapporteurs avant soutenance :

Elie Lefevre
Yannis Pousset

Professeur des universités, Université de Paris-Sud
Professeur des universités, Université de Poitiers

Composition du Jury :

Président : Olivier Berder
Examinateurs : Jérôme Colin
Elie Lefevre
Anne-Marie Poussard
Yannis Pousset

Professeur des universités, Université de Rennes 1
Docteur, directeur innovation, éolane, Angers
Professeur des universités, Université de Paris-Sud
Maître de conférences, Université de Poitiers
Professeur des universités, Université de Poitiers

Dir. de thèse : Jean-François Diouris
Co- Encadrants : Guillaume Andrieux
Jean-Jacques Chaillout

Professeur des universités, Université de Nantes
Maître de conférences, HDR, Université de Nantes
Chef de projets, HDR, CEA-Leti/DSYS/DIR

Invité :
David Moussaud

Chef de projets, CEA Tech Nantes

Projet de thèse : Capteur Communicant Autonome en Énergie pour l’IoT

Cette thèse est principalement préparée au sein du laboratoire IETR (Institut d’Électronique et de Télécommunications de Rennes), UMR CNRS 6164 à l’École polytechnique de l’université de Nantes, avec des séjours réguliers aux CEA Tech à Nantes et au CEA Leti à Grenoble.

La thèse est financée par un projet de ressourcement CEA Leti/Tech en région Pays de la Loire, en partenariat avec l’entreprise éolane.

Dédicaces

J'ai appris que le souci de réaliser un dessein
me permet toujours d'arriver à mes fins
et malgré tous les obstacles que j'ai confrontés
j'ai pu terminer mon projet de thèse avec succès...

Je dédie ce travail à tous ceux qui m'ont donné la vie

à mes chers parents Ayachi et Adhriya
que ce travail soit l'expression pour leurs énormes efforts

A mon frère Habib, ma soeur Rim et mon beau-frère Fraj
pour leur soutien moral

à ma fiancée Randa
qui m'a beaucoup aidé pour réussir ce travail

à mon ami Sarh
mon deuxième frère

à tous ceux que j'aime...
Que Dieu les bénisse tous et leurs préserve la santé et le bonheur.

Remerciements

Au terme de ce mémoire de thèse, je m'adresse avec des vifs remerciements à ceux qui ont participé de loin ou de près à la réussite de ce travail.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers l'ensemble de mes encadrants pour leurs conseils et leur soutien permanent dont ils ont fait preuve durant ce projet de thèse. Mes remerciements s'adressent dans un premier temps à M. Jean-François Diouris, professeur à Polytechnique de Nantes, qui m'a aidé et m'a soutenu pour mener à bien ces travaux de thèse. Sa large expérience dans le domaine de la communication numérique, le traitement de signal et l'électronique, ses conseils pertinents et ses remarques précieuses m'ont été très bénéfiques.

J'adresse mes sincères grâcietudes à M. Jean-Jacques Chaillout, chef de projet CEA Leti, pour ses efforts, son aide et pour les discussions enrichissantes tant d'un point de vue scientifique qu'humain.

Je remercie également M. Guillaume Andrieux, maître de conférences à l'IUT de la Roche-sur-Yon et M. David Moussaud, chef de projet CEA Tech, pour leurs conseils avisés. Je les remercie beaucoup pour leurs disponibilités et pour les discussions intéressantes lors des réunions.

Mes profonds remerciements vont également à M. Jérôme Colin, directeur innovation et partenariats chez éolane, qui a pu suivre l'avancement du projet de thèse. Je le remercie beaucoup pour les échanges pertinents pendant les réunions d'avancement.

Je tiens à exprimer mes sincères grâcietudes à l'ensemble des membres du jury. Je commence tout d'abord par remercier M. Yannis Poussset, professeur à l'Université de Poitiers, et M. Elie Lefevre, professeur à l'Université de Paris-Sud, pour avoir accepté la responsabilité de rapporteur. J'exprime ma gratitude à MM. Anne-Marie Poussard, Maître de conférences à l'Université de Poitiers, d'avoir participé au jury de ma thèse. Je remercie également M. Olivier Berder, professeur à l'Université de Rennes 1, pour avoir endossé la mission de président du jury.

J'aimerais aussi exprimer toute ma reconnaissance envers les personnels de l'IETR de Nantes pour l'accueil chaleureux au sein du laboratoire et la sympathie qu'ils m'ont apportée tout au long de cette thèse. En particulier, je remercie MM. Sandrine Charlier, mon cher collègue de bureau M. Guillaume Lirzin et M. Marc Brunet pour leurs disponibilités et pour l'aide technique. Sans oublier bien sûr tous les doctorants que j'ai rencontrés

pendant ma thèse à l'IETR.

Je tiens à remercier tous les membres du CEA et bien particulièrement MM. Laurence Nizin, MM. Caroline Lefebvre et MM. Jenny Gresse qui m'ont facilité beaucoup de tâches administratives à travers leurs conseils pertinents. Je n'oublie pas non plus les autres personnes du CEA Tech, CEA Leti, CEA Chambéry et de l'INES. Mais je m'abstiendrai de les citer par peur d'en oublier.

Mes remerciements s'adressent particulièrement à ma fiancée Dr. Randa Jaouadi qui était toujours avec moi dans les moments de joie et de difficultés. Je n'oublie jamais sa patience et son soutien.

Je termine par remercier toute ma famille et mes amis pour l'aide, le soutien et la sympathie inestimable. Je voudrais qu'ils acceptent l'expression de tout mon respect, ma gratitude et mon amitié.

Un grand merci à vous tous !

Table des matières

Table des matières	v
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	x
Introduction générale	1
1 Contexte du projet et état de l'art	9
1 Introduction	9
2 Généralités sur les capteurs sans fil	9
2.1 Définition	9
2.2 Caractéristiques des capteurs sans fil	10
2.3 Composition matérielle d'un capteur communicant	10
2.3.1 Bloc capteur et convertisseur <i>AN</i>	11
2.3.2 Unité de traitement : micro-contrôleur et mémoire	11
2.3.3 Unité radio : transceiver	12
2.3.4 Unité d'alimentation du capteur	12
3 Système proposé	13
4 Récupération d'énergie	13
4.1 Besoin de la récupération d'énergie	13
4.2 Sources ambiantes d'énergie	14
4.2.1 Récupération d'énergie vibratoire	14
4.2.2 Récupération d'énergie thermique	15
4.2.3 Récupération des Rayonnements radio-fréquences	15
4.2.4 Récupération d'énergie solaire	15
4.2.5 Récupération d'énergie éolienne	16
4.2.6 Conclusion	16
5 Conversion et stockage de l'énergie récupérée	16
5.1 Supports de stockage de l'énergie	16
5.2 Conversion de l'énergie obtenue	17
6 Gestion d'énergie	17
6.1 Besoin du management d'énergie	17
6.2 Fonctionnement neutre en énergie	19
7 Conclusion	20

2 Modèle de consommation d'énergie pour les capteurs communicants avec LoRa et LoRaWAN	25
1 Introduction	25
2 État de l'art sur la consommation d'énergie	25
3 Conception du nœud capteur	27
4 Modèle de consommation d'énergie	27
4.1 Méthodologie et hypothèses	27
4.2 Modèle d'énergie proposé	28
5 Technologie LoRa/LoRaWAN	30
5.1 Généralités sur la technologie	30
5.2 Modulation LoRa	32
5.2.1 Caractéristiques de la modulation	32
5.2.2 Structure de la trame LoRa	33
5.2.3 Transmission avec accusé de réception, portée LoRaWAN et sensibilité	35
6 Résultats numériques et discussions	37
6.1 Scénario d'application envisagé	37
6.2 Modélisation de LoRa et LoRaWAN	38
6.2.1 Effet de SF et CR sur l'énergie consommée	38
6.2.2 Portée de communication LoRaWAN	40
6.2.3 Résultats de consommation d'énergie	42
6.2.4 Énergie consommée : Scénario 1	43
6.2.5 Énergie consommée : Scénario 2	44
6.2.6 Énergie consommée : Scénario 3	45
6.2.7 Comparaison entre les scénarios proposés	46
6.3 Effet du mode LoRaWAN sur l'autonomie du capteur	48
6.4 Effet de la fréquence du microcontrôleur sur la vie du capteur	49
7 Conclusion	49
3 Récupération d'énergie solaire pour les capteurs communicants	55
1 Introduction	55
2 Généralités	55
2.1 Besoin d'énergie solaire pour les capteurs communicants	55
2.2 Historique de la cellule photovoltaïque	56
2.3 Énergie solaire : c'est quoi?	56
2.4 Différentes technologies de conversion d'énergie solaire	57
2.4.1 Énergie solaire thermodynamique	57
2.4.2 Énergie solaire thermique	57
2.4.3 Énergie solaire photovoltaïque	58
3 Énergie solaire photovoltaïque : principe et caractéristiques	58
3.1 Effet photovoltaïque	58
3.2 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque	59
3.3 Influence de la température et de l'éclairement sur la cellule	59
3.3.1 Influence de la température	59
3.3.2 Influence de l'éclairement	60
3.4 Performances et caractéristiques des panneaux solaires	60

3.4.1	Définition	60
3.4.2	Zones de fonctionnement du panneau solaire	61
3.4.3	Influence de l'association des cellules en série	62
3.4.4	Influence de l'association en parallèle	62
3.4.5	Influence de l'association mixte	63
4	Modélisation de l'énergie solaire	63
4.1	Modèles existants	63
4.1.1	Modèle de cellule à trois paramètres	64
4.1.2	Modèle de cellule à quatre paramètres	64
4.1.3	Modèle de cellule à cinq paramètres	65
4.2	Modélisation du panneau solaire photovoltaïque	66
4.2.1	Modèle de la cellule photovoltaïque	66
4.2.2	Modèle courant-tension du panneau solaire	68
4.2.3	Modèle puissance-tension du panneau	68
4.3	Modélisation du contrôleur MPPT	68
5	Conversion et stockage de l'énergie récupérée	70
5.1	Convertisseur DC/DC	70
5.2	Stockage de l'énergie solaire récupérée	70
6	Caractérisation de l'énergie solaire récupérée	71
6.1	Étude de l'éclairement solaire	71
6.2	Caractérisation de l'énergie solaire récupérée	73
6.2.1	Caractéristiques $P_{pv} - V_{pv}$ et $I_{pv} - V_{pv}$ du panneau	73
6.2.2	Caractérisation de l'énergie solaire	73
6.2.3	Effet du contrôleur MPPT sur les caractéristiques du panneau	75
6.2.4	Résultats de conversion et de stockage de l'énergie récupérée	75
7	Résultats de mesures obtenus	76
8	Conclusion	77
4	Récupération d'énergie éolienne pour les capteurs communicants	81
1	Introduction	81
2	Généralités	81
2.1	Énergie éolienne pour les capteurs communicants	81
2.2	Historique de l'énergie éolienne	82
2.3	Composition et principe de fonctionnement d'une éolienne	83
2.4	Différents types d'éoliennes	83
2.4.1	Éoliennes à axe horizontal	84
2.4.2	Éoliennes à axe vertical	84
3	Modélisation de l'énergie éolienne	85
3.1	Modélisation du rotor	86
3.1.1	Puissance disponible : puissance du vent	86
3.1.2	Puissance mécanique : puissance du rotor	87
3.1.3	Couple mécanique du rotor	88
3.1.4	Puissance électrique de l'éolienne	89
3.1.5	Vitesses de démarrage et d'arrêt de l'éolienne	89
3.2	Modélisation de la génératrice	89

3.2.1	Différents types de génératrice	89
3.2.2	Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent	89
3.3	Modélisation du convertisseur AC/DC	90
4	Caractérisation de l'énergie éolienne récupérée	91
4.1	Étude du vent	91
4.1.1	Distribution du vent incident	91
4.1.2	Modélisation du vent	92
4.2	Caractérisation de l'énergie éolienne	93
4.2.1	Éolienne et caractéristiques	94
4.2.2	Effet du vent sur les caractéristiques de l'éolienne	96
5	Conclusion	97
5	Prédiction d'énergie pour les capteurs communicants	101
1	Introduction	101
2	État de l'art sur la prédiction d'énergie	101
3	Contributions	103
4	Modèle linéaire de prédiction d'énergie	103
4.1	Optimisation du paramètre α	104
4.2	Performances du prédicteur EWMA	105
5	Nouveau prédicteur temps réel d'énergie solaire : SEPCS	106
5.1	Version non-temps réel du SEPCS	106
5.1.1	Principe de fonctionnement	106
5.1.2	Résolution du système proposé	107
5.1.3	Performances de la version non-temps réel du SEPCS	108
5.2	Version temps réel du SEPCS	109
6	Évaluation de performances : EWMA vs. SEPCS	111
6.1	Prédiction à moyen terme	112
6.2	Prédiction à court terme	113
7	Conclusion	114
6	Gestion d'énergie pour les capteurs communicants	119
1	Introduction	119
2	État de l'art sur la gestion d'énergie	120
3	Contributions	121
4	Système de gestion d'énergie	122
5	Algorithme PMA-SEPCS et différentes méthodes	122
5.1	Méthode de concaténation de données	123
5.1.1	Principe	123
5.1.2	Puissance moyenne consommée	124
5.1.3	Évaluation de performances	125
5.2	Méthode de contrôle du rapport cyclique	126
5.2.1	Principe	126
5.2.2	Calcul de la période de mesure et de l'énergie stockée	127
5.2.3	Évaluation de performances	128
5.3	Algorithme de gestion d'énergie	128
6	Évaluation de performance du PMA-SEPCS	130
7	Méthodologie de conception de capteurs communicants autonomes	132

TABLE DES MATIÈRES

v

8 Conclusion	133
Conclusion & Perspectives	136
Liste des publications	140

Liste des tableaux

1.1	Comparaison de différentes sources d'énergie ambiantes.	14
1.2	Énergie vibratoire pour alimenter les capteurs communicants.	14
1.3	Énergie thermique pour alimenter les capteurs communicants.	15
1.4	Énergie solaire pour alimenter les capteurs communicants.	15
1.5	Stockage de l'énergie solaire pour alimenter les nœuds capteurs.	17
2.1	Comparaison entre les classes LoRaWAN.	32
2.2	Longueur du code chirp (bit) en fonction de SF.	33
2.3	Caractéristiques du transceiver LoRa <i>SX1272</i>	35
2.4	Caractéristiques principales de l'application.	37
2.5	Différents modes de transmissions pour le transceiver <i>SX1272</i>	38
2.6	Caractéristiques des tâches principales du nœud capteur.	42
2.7	Comparaison entre les différents scénarios.	47
2.8	Comparaison entre différents modes LoRaWAN (en utilisant le scénario 2).	48
2.9	Autonomie du système communicant (en mois) en utilisant différents scénarios et modes de transmission LoRa/LoRaWAN.	48
5.1	Différentes valeurs de α_{opt} pendant les saisons (cas d'étude : Nantes).	106
5.2	Valeurs de α_{opt} et de la RMSE dans différentes régions françaises.	106
5.3	Comparaison entre l'EWMA et le SEPCS en utilisant différentes métriques ; avec un pas de temps égal à une heure (cas d'étude : Nantes).	113
5.4	Erreurs de prédiction en (%) données par l'EWMA et le SEPCS dans différentes villes internationales ; avec un pas de temps égal à une heure.	113
5.5	Erreurs de prédiction en (%) données par l'EWMA et le SEPCS dans différentes villes nationales et internationales ; avec un pas de temps égal à 10 minutes.	114
6.1	Évaluation de performances de la méthode de concaténation de données (SF = 7 et $n = 55$).	125
6.2	Calcul de l'énergie stockée $E_S(n)$	127

Table des figures

1	Exemples d'applications de capteurs communicants.	2
2	Composition d'un capteur sans fil.	3
3	Architecture interne du système proposé et organisation du rapport.	4
1.1	Réseau de capteurs communicants.	10
1.2	Architecture interne d'un capteur sans fil.	11
1.3	Architecture interne du capteur communicant.	13
1.4	Apport de la récupération et la gestion d'énergie pour les capteurs communicants.	18
1.5	Principe du fonctionnement neutre en énergie.	19
1.6	Fonctionnement du capteur communicant sous la condition ENO.	19
2.1	Architecture du nœud capteur.	27
2.2	Scénario de fonctionnement du capteur.	28
2.3	(a) Architecture du réseau LoRaWAN ; et (b) Pile protocolaire LoRaWAN.	31
2.4	Différentes classes LoRaWAN.	31
2.5	Contenu d'une trame LoRa.	34
2.6	Contenu d'un accusé de réception en LoRa/LoRaWAN.	35
2.7	Capteur connecté : système de mesure d'accélération.	38
2.8	(a) Temps de transmission d'un paquet vs. charge utile pour différentes valeurs de SF ; et (b) Temps de transmission d'un paquet vs. charge utile pour différentes valeurs de CR.	39
2.9	(a) Effet de la variation de la charge utile et de SF sur l'énergie par bit utile, $CR = \frac{4}{5}$; et (b) Évolution de l'énergie par bit utile en fonction de SF.	39
2.10	Effet de la variation de CR sur l'énergie par bit utile, pour $SF = 7$ et $BW = 500$ KHz.	40
2.11	Puissance de transmission nécessaire vs. portée LoRaWAN.	40
2.12	Portée maximale LoRaWAN vs. SF.	41
2.13	(a) E_{bit} vs. Portée LoRaWAN pour différentes charges utiles ($P_{Tr} = 7$ dBm) ; et (b) E_{bit} vs. Portée LoRaWAN pour différentes charges utiles ($P_{Tr} = 13$ dBm).	42
2.14	Scénarios proposés (classes A LoRaWAN).	43
2.15	Énergie consommée par le nœud capteur : scénario 1.	44
2.16	Autonomie du nœud capteur : scénario 1.	44
2.17	Énergie consommée par le nœud capteur : scénario 2.	45
2.18	Autonomie du nœud capteur : scénario 2.	45
2.19	Énergie consommée par le nœud capteur : scénario 3.	46
2.20	Autonomie du nœud capteur : scénario 3.	46

2.21	Durée de vie de la pile vs. probabilité d'obtenir le scénario 3.	47
2.22	Effet de la fréquence du MCU sur la durée de vie du nœud capteur (Mode 3, Scénario 2).	49
3.1	Modules solaires thermodynamiques, structure parabolique.	57
3.2	Exemples de modules solaires thermiques.	58
3.3	Schéma représentatif d'une cellule solaire.	59
3.4	Influence de la température sur les caractéristiques de la cellule.	60
3.5	Influence de l'éclairement sur les caractéristiques de la cellule.	60
3.6	Le passage d'une cellule à un champ de panneau solaire.	61
3.7	Caractéristique courant-tension d'un panneau solaire ; Zones de fonctionnement.	61
3.8	Influence de l'association des cellules en série.	62
3.9	Influence de l'association des cellules en parallèle.	63
3.10	Modèle à trois paramètres.	64
3.11	Modèle à quatre paramètres.	65
3.12	Modèle à cinq paramètres.	65
3.13	Puissance optimale de la cellule.	67
3.14	Principe de fonctionnement du contrôleur MPPT.	69
3.15	Principe de fonctionnement de l'algorithme <i>PO</i>	69
3.16	Circuit équivalent du convertisseur DC/DC.	70
3.17	Circuit équivalent de la cellule d'une super-capacité.	71
3.18	Évolution de l'éclairement moyen pendant une année.	71
3.19	Évolution de l'éclairement pendant deux jours consécutifs de l'année (cas d'étude : Nantes).	72
3.20	Évolution de l'éclairement pendant des jours spécifiques de l'année (les solstices de l'été et de l'hiver et les équinoxes du printemps et de l'automne).	72
3.21	(a) Caractéristique $P_{pv} - V_{pv}$ du panneau ; et (b) Caractéristique $I_{pv} - V_{pv}$ du panneau.	73
3.22	Évolution de la puissance du module solaire pendant une année.	74
3.23	Énergie solaire récupérée par jour E_r pendant une année.	74
3.24	La probabilité où E_r dépasse une valeur donnée.	74
3.25	(a) Tension optimale du panneau solaire avec le <i>MPPT</i> ; et (b) Puissance optimale du panneau solaire.	75
3.26	Puissance à la sortie du convertisseur DC/DC.	75
3.27	Tension stockée dans le super-condensateur.	76
3.28	Mesure de la puissance P_{opt} du panneau solaire pendant la période du 12 au 17 décembre 2018, Polytech Nantes.	76
4.1	Historique d'évolution des éoliennes.	82
4.2	Composition d'une éolienne.	83
4.3	Différents types d'éoliennes.	84
4.4	Exemples d'éoliennes à axe horizontal.	84
4.5	Exemple d'éolienne à axe vertical.	85
4.6	Différentes formes d'énergies dans une éolienne.	85
4.7	Surface S balayée par les pales de l'éolienne	86
4.8	Coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ	88

4.9	C_p en fonction de λ pour différents angles d'orientation des pales.	88
4.10	Modèle d'une machine synchrone à aimant permanent.	90
4.11	Schéma équivalent du convertisseur AC/DC.	91
4.12	Distribution de la vitesse du vent (cas d'étude : Nantes).	92
4.13	Évolution du vent moyen pendant un an (cas d'étude : Nantes).	93
4.14	Distribution de la vitesse du vent (cas d'étude : Nantes).	93
4.15	Évolution du couple mécanique de la micro-turbine en Newton mètre (Nm). .	94
4.16	(a) Évolution de la puissance mécanique du rotor ; et (b) Évolution de la puissance électrique de la micro-turbine.	94
4.17	(a) Puissance mécanique en fonction de la vitesse d'air ; et (b) Puissance électrique en fonction de la vitesse d'air.	95
4.18	Puissance électrique de l'éolienne en fonction de la vitesse de rotation ω pour différentes vitesses d'air.	95
4.19	Puissance électrique de l'éolienne en fonction de la vitesse d'air pour différents rayons R des pales.	96
4.20	Évolution de la puissance éolienne récupérée pendant une année (site étudié : Nantes).	96
4.21	Évolution de l'énergie électrique récupérée pendant une année (site étudié : Nantes).	97
4.22	La probabilité où E_r atteint une valeur donnée.	97
5.1	Principe de fonctionnement de l'algorithme EWMA.	103
5.2	Évolution du RMSE en fonction du paramètre α (cas d'étude : Nantes). .	104
5.3	Prédiction d'énergie solaire avec l'EWMA ; $\alpha = 0.28$ (cas d'étude : Nantes). .	105
5.4	Principe de fonctionnement de l'algorithme SEPCS.	107
5.5	Prédiction d'énergie solaire en utilisant la version non-temps réel du SEPCS ; $N_J = 7$ et $N_H = 12$ (cas d'étude : Nantes).	109
5.6	Évolution de l'erreur quadratique moyenne en fonction de la mémoire du filtre γ (cas d'étude : Nantes).	110
5.7	Prédiction en temps réel d'énergie solaire pendant une semaine (cas d'étude : Nantes).	110
5.8	Prédiction en temps réel d'éclairement solaire pour deux semaines (cas d'étude : Nantes).	111
5.9	Évolution de l'erreur quadratique moyenne en fonction du nombre d'heures N_H et du nombre de jours N_J (cas d'étude : Nantes).	111
5.10	Prédiction à moyen terme d'énergie solaire en utilisant l'EWMA et le SEPCS ; avec un pas de temps égal à une heure (cas d'étude : Nantes).	112
5.11	Erreurs de prédiction données par l'EWMA et le SEPCS ; avec un pas de temps égal à une heure (cas d'étude : Nantes).	112
5.12	Prédiction à court terme d'énergie solaire en utilisant l'EWMA et le SEPCS ; avec un pas de temps égal à 10 minutes (cas d'étude : Nantes).	114
6.1	Système proposé de gestion d'énergie.	122
6.2	Exemple de concaténation de données ($n = 5$).	123
6.3	Puissance moyenne consommée en fonction du nombre de mesures par transmission.	124

6.4	Énergies consommées par les unités du nœud capteur en utilisant la concaténation de données.	125
6.5	Principe d'adaptation du rapport cyclique ; en utilisant une source d'énergie solaire.	126
6.6	Période de mesure en fonction de la puissance solaire récupérée.	128
6.7	Stratégie de gestion d'énergie pour les capteurs communicants.	129
6.8	Implémentation du PMA-SEPCS en utilisant des bases de données annuelles d'éclairement : évolution de la puissance solaire estimée par le SEPCS, de la période de mesure et de la puissance solaire stockée (cas d'étude : Nantes).	131
6.9	Évaluation de performances de l'algorithme PMA-SEPCS ; avec une période égale à cinq jours de récupération d'énergie (cas d'étude : Nantes).	132
6.10	Conception de capteurs sans fil pour les applications IoT.	132

Introduction générale

- **Contexte et objectifs de la thèse**

L'Internet des objets ou Internet of Things (IoT) est un domaine en pleine expansion depuis des années [1]. L'IoT est définie dans [2] comme étant un réseau mondial d'objets inter-connectés, basé sur l'utilisation de différents protocoles de communication. Ce concept a commencé à se développer vers la fin des années 1990 avec la technologie RFID (Radio Frequency IDentification), une technologie de communication sans fil qui a marqué le début des objets communicants. Ensuite, de très nombreux protocoles de communication sont apparus tels que Bluetooth, Zigbee, WiFi, Sigfox et LoRa [3-5]. Depuis, on assiste à une augmentation importante du nombre d'objets connectés avec des prévisions variables et très impressionnantes selon les différentes sources. Par exemple, l'entreprise Cisco évalue le nombre d'objets connectés en 2020 à 50 milliards dans [4], alors que dans [5] ce nombre est estimé à 28 milliards pour la même année.

Une grande partie des nouvelles générations d'objets connectés ne pourra se développer que s'il est possible de les rendre entièrement autonomes sur le plan énergétique. Même si l'utilisation de batteries ou de piles résout une partie de ce problème en assurant une autonomie qui peut-être importante avec des coûts relativement faibles, elle introduit non seulement des soucis de maintenance incompatibles avec certaines applications, mais aussi des problèmes environnementaux tels que la pollution. En effet, pour de nombreuses classes d'applications, les objets connectés sont déployés dans des environnements difficiles à atteindre par l'être humain. Le remplacement ou la maintenance des batteries devient alors compliqué voire impossible. De plus, un autre souci majeur est lié à la durée de vie limitée des batteries, ce qui rend l'autonomie de l'objet communicant totalement dépendante de sa source d'énergie. L'étude présentée dans [6] montre que la durée de vie d'un capteur connecté qui transmet 32 bits d'information toutes les 30 secondes est limitée à quelques années.

La récupération de l'énergie thermique, mécanique, électromagnétique, solaire ou éolienne présente dans l'environnement est une solution très prometteuse. Dans ce cas, la vie de l'objet connecté peut durer longtemps. Par contre, l'énergie récupérée dépend fortement des conditions au voisinage du dispositif et peut varier de façon périodique ou aléatoire. Il paraît donc important d'adapter le système (mesure et transmission d'information) aux contraintes de la récupération d'énergie.

L'objectif de la thèse est de proposer une solution de capteur autonome basée sur un système de récupération et de gestion multi-sources (par exemple énergies solaire et éolienne) et pouvant-être mis en œuvre pour différentes classes d'applications. On s'intéresse, dans un premier temps, à la modélisation et l'optimisation de ce système

de récupération multi-sources. Ensuite, on se focalise sur le management de puissance du système autonome afin de prolonger sa durée de vie. L'optimisation du bloc de communication est l'un des objectifs principaux de ce projet de thèse. Dans ce contexte, on se place dans le cas où la faible quantité d'énergie disponible ne permet pas d'utiliser les protocoles et les standards classiques de transmission. Le travail de modélisation et d'optimisation est validé par des réalisations expérimentales afin d'avoir un démonstrateur de Capteur Communicant Autonome en Énergie pour l'IoT.

- **Enjeu des capteurs communicants**

Les récents progrès des techniques de communication sans fil ont permis l'émergence des réseaux de capteurs communicants autonomes [6]. Ces réseaux sans fil sont constitués d'un ensemble de nœuds déployés dans un environnement quelconque pour mesurer ses données caractéristiques. Les données collectées sont ensuite transmises à un nœud central en utilisant le protocole de communication adéquat.

Le développement des capteurs communicants répond à un besoin grandissant de mesurer et de contrôler l'évolution des paramètres de l'environnement tels que le comportement des constructions civiles ou militaires (figure 1). Parmi les nombreux domaines d'application, on cite le domaine militaire qui en premier lieu s'est intéressé aux capteurs sans fil dans le but d'étudier les déplacements des ennemis, ou bien d'analyser un champ de bataille avant de s'y engager [7].



Figure 1 – Exemples d'applications de capteurs communicants.

La technologie des capteurs communicants fait l'objet de recherches dans le domaine environnemental pour détecter et prévenir des catastrophes naturelles tels que les incendies [7-8], ou encore dans le milieu agricole afin d'optimiser la gestion des sols [9]. Les capteurs sans fil sont également utilisés dans la surveillance des environnements hostiles ou d'ouvrages d'art tels que les ponts, les barrages et les tunnels.

Dans le domaine médical, on note l'implantation de capteurs autonomes dans le corps humain, permettant de récolter et d'enregistrer des données physiologiques et de les transmettre à un centre médical afin de surveiller à distance l'état de santé des patients [9-10].

- **Enjeu de la récupération et de la gestion d'énergie**

Un capteur communicant est composé de quatre unités principales : l'unité de mesure ou d'acquisition de données (le capteur), l'unité de traitement d'informations (le processeur), l'unité de transmission (l'émetteur-récepteur) et l'unité d'alimentation ou la source d'énergie [10-11] (figure 2). Suivant l'étude faite en [6], la consommation énergétique d'un nœud capteur dépend de plusieurs paramètres. Pour l'unité de mesure, cette consommation dépend de la période de mesure ainsi que de la durée d'acquisition de données. Au sein de l'unité processeur, cette consommation dépend principalement du mode de fonctionnement du micro-contrôleur choisi (sleep, idle ou actif). Quant à l'unité de communication, elle consomme plus ou moins selon plusieurs paramètres tels que le type de modulation, le débit et la distance de transmission.

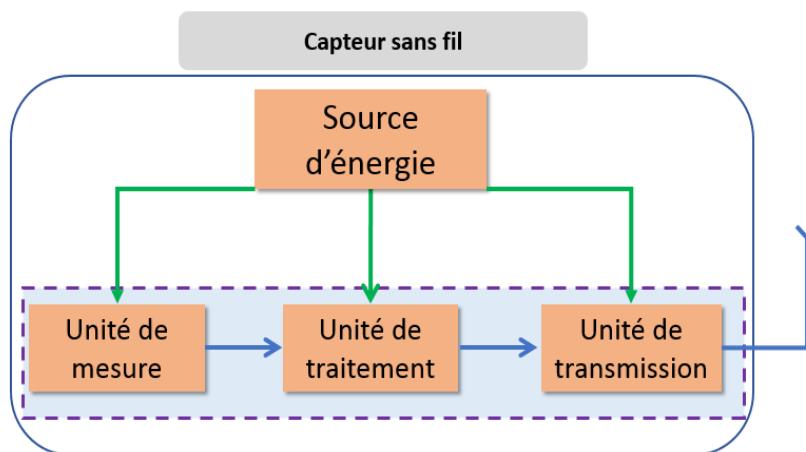


Figure 2 – Composition d'un capteur sans fil.

Sur le marché, la majorité des capteurs communicants sont alimentés par des piles ou des batteries dont la durée de vie est limitée à un certain nombre de cycles [6-8]. Lorsqu'ils sont dispersés dans des localisations parfois inaccessibles et dans des environnements difficiles, la maintenance de ces capteurs est difficile. Ainsi la clé du développement à grande échelle de cette technologie réside dans l'augmentation de leur autonomie. Dans ce but, plusieurs travaux de recherches visent à améliorer la gestion d'énergie au sein des nœuds capteurs pour augmenter leur durée de vie. On peut citer à titre d'exemple le travail fait dans [12], où Arms et al ont montré qu'il est possible de diminuer significativement la consommation d'un capteur sans fil en optimisant la consommation des blocs de traitement et de transmission. Cette étude a permis au système de fonctionner à une intensité de veille minimale.

En parallèle avec les recherches sur l'optimisation de la consommation énergétique des capteurs, se développent des systèmes qui exploitent l'énergie ambiante à partir des sources disponibles dans l'environnement telles que la chaleur, la lumière, les vibrations, le vent ou bien le soleil. Le principe consiste à récupérer cette énergie disponible et à la stocker dans des supports de stockage usuels à savoir les batteries et les super-condensateurs. Cette technique prometteuse permet d'améliorer la durée de vie des nœuds, sans nécessiter d'intervention humaine pour la maintenance.

- Système proposé et organisation du rapport

L'architecture interne du système proposé ainsi que l'organisation du rapport sont présentées à la figure 3. Il s'agit d'un capteur sans fil à base de récupération et de gestion multi-sources d'énergie.

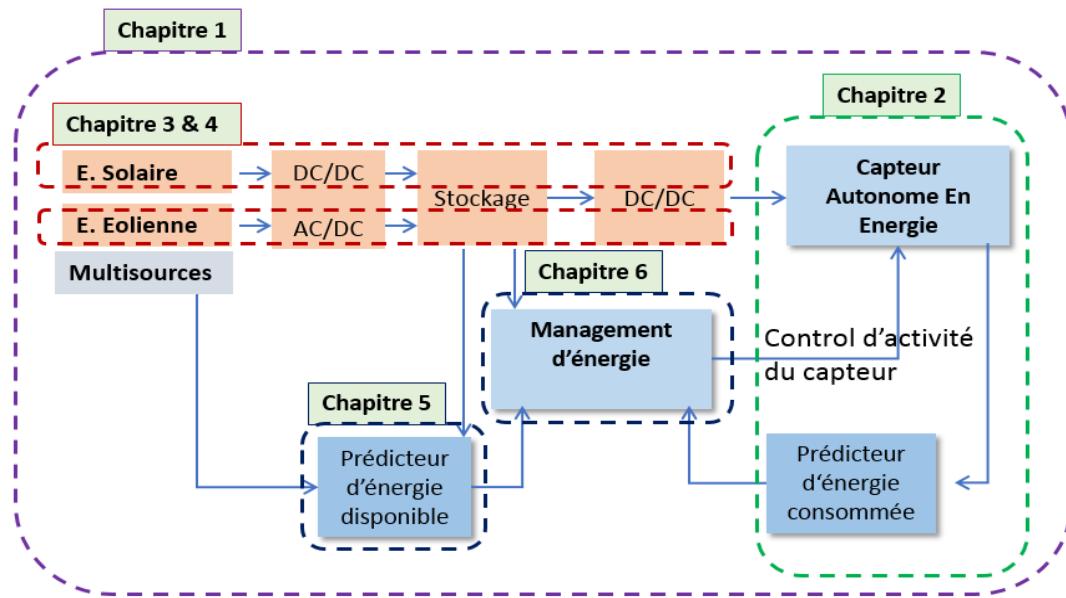


Figure 3 – Architecture interne du système proposé et organisation du rapport.

Le système est composé par une chaîne principale de récupération avec conversion et stockage des énergies solaire et éolienne. Le choix des deux sources d'énergie est justifié dans le chapitre 1. Cette chaîne de récupération d'énergie va remplacer l'unité d'alimentation usuelle (batterie) pour alimenter la plateforme du capteur communicant et prolonger sa durée de vie. En parallèle avec cette chaîne, il s'agit de faire le management de puissance du capteur communicant. Cette partie est le cœur du projet de thèse, il s'agit de configurer les activités du capteur communicant en fonction de la quantité d'énergie disponible afin de converger vers le fonctionnement neutre en énergie ou principe de neutralité énergétique (en anglais, Energy Neutral Operation (ENO), où il faut que l'énergie disponible soit toujours supérieure à l'énergie consommée par le capteur communicant afin de satisfaire ses besoins énergétiques). Ce bloc de gestion d'énergie est basé principalement sur des prédictions d'énergies disponibles (récupérée et stockée) et d'énergie consommée par le nœud capteur.

En s'appuyant sur la figure 3, le rapport de thèse est composé de six chapitres. Le premier chapitre présente le concept général, la problématique et les objectifs du travail effectué. Dans le chapitre 2, on décrit le choix d'un scénario d'application du nœud capteur. Puis, on présente le modèle de consommation d'énergie du capteur communicant à base de la technologie LoRa/LoRaWAN, dans ce contexte, une étude d'optimisation énergétique est réalisée. Les deux chapitres suivants (chapitres 3 et 4) apportent les modèles de récupération et de stockage des énergies solaire et éolienne. Le cinquième chapitre est consacré à la prédition d'énergie solaire, les performances du prédicteur proposé sont étudiées en utilisant différentes bases de données d'éclai-

rement. Dans le dernier chapitre (chapitre 6), on présente l'algorithme de gestion d'énergie développé.

Le contenu de chaque chapitre est détaillé dans les paragraphes qui suivent.

Chapitre 1 : L'objet de ce premier chapitre est de réaliser un état de l'art général sur les réseaux de capteurs communicants. Une étude détaillée sur le management d'énergie et l'optimisation de la consommation énergétique du capteur sans fil est abordée. On axe particulièrement notre réflexion sur la récupération et la gestion d'énergie pour alimenter les capteurs communicants. On essaye ainsi d'identifier l'impact des différentes sources d'énergie utilisées sur la durée de vie des objets communicants. Dans cet objectif, on présente dans un premier temps les caractéristiques principales d'un nœud capteur. Ensuite, on montre une étude de l'état de l'art sur le choix des sources d'énergies pour alimenter le système. Puis, on introduit notre conception du capteur intelligent à base d'un système de récupération et de gestion multi-sources d'énergie.

Chapitre 2 : Ce deuxième chapitre est dédié à l'étude de la consommation énergétique du capteur communicant en tenant compte du scénario d'application choisi, qui est le contrôle d'ouvrages d'art tels que les barrages, les ponts et les pylônes de réseaux électriques et télécommunications, etc. Le modèle de consommation d'énergie développé est basé sur la technologie LoRa. Dans ce contexte, on commence par décrire la classe d'application choisie. On détaille ensuite le modèle de consommation d'énergie proposé. Dans la deuxième partie du chapitre, on introduit les caractéristiques de LoRa/LoRaWAN, ainsi qu'une étude d'optimisation énergétique faite pour évaluer la durée de vie du noeud capteur en utilisant les sources d'alimentation standards (batteries ou piles). Cette étude montre la nécessité de récupérer l'énergie à partir de l'environnement pour alimenter le capteur communicant et prolonger sa durée de vie.

Chapitre 3 : Dans ce chapitre, nous présentons les différents aspects de la récupération d'énergie solaire pour alimenter un capteur communicant. Nous commençons par rappeler les différentes technologies de conversion d'énergie solaire ainsi que le principe de fonctionnement d'une cellule solaire. Dans la deuxième partie du chapitre, on s'intéresse à la modélisation du panneau solaire puis à celle de l'éclairement. Il s'agit de modéliser et d'estimer la quantité d'énergie solaire récupérée à travers la caractérisation des modules solaires photovoltaïques. Il est également nécessaire de connaître l'énergie incidente. Nous avons alors basé nos modèles développés sur des bases de données qui montrent les caractéristiques d'évolution de l'éclairement pendant un an dans différentes régions. Ces modèles sont ensuite validés par des simulations et des mesures d'énergie solaire. L'énergie récupérée est ensuite adaptée par des convertisseurs DC/DC pour être stockée dans des supports de stockage adéquats (super-capacités ou batteries).

Chapitre 4 : Ce chapitre est consacré à la technique de récupération d'énergie éolienne. Nous commençons par un rappel sur la composition d'un système éolien à savoir le rotor et la machine synchrone, ainsi que le principe de fonctionnement d'une éolienne. Nous présentons ensuite les différents types de turbines disponibles en expliquant brièvement l'influence de nombreux paramètres

tels que le vent et l'angle d'orientation des pales sur ses caractéristiques. La deuxième partie du chapitre est dédiée à la modélisation d'énergie éolienne puis à celle du vent. En effet, il s'agit de modéliser et d'estimer la quantité d'énergie éolienne récupérée à travers la caractérisation de la micro-turbine. Afin de quantifier l'énergie incidente, nos modèles de caractérisation sont basés sur des bases de données qui montrent l'évolution du vent en fonction du temps dans différentes régions françaises. Les modèles développés sont ensuite validés par des simulations et des mesures en utilisant une micro-turbine réalisée dans le laboratoire. L'énergie éolienne récupérée est ensuite adaptée par des convertisseurs AC/DC et DC/DC pour être stockée dans les supports de stockage usuels tels que les batteries ou les super-condensateurs.

Chapitre 5 : L'objectif principal de ce chapitre est d'estimer la quantité d'énergie récupérée par un panneau solaire ou une micro-éolienne. Pour ce faire, un prédicteur d'énergie solaire est développé en se basant sur un prédicteur de l'état de l'art dit EWMA (Exponentially Weighted Moving-Average), qui recourt à l'historique d'énergie récupérée pour estimer les prochaines quantités d'énergie solaire. Notre prédicteur est appelé SEPCS (Solar Energy Predictor for Communicating Sensor), qui utilise un historique plus large que l'EWMA. Les performances des deux prédicteurs sont comparées en utilisant des bases de données d'éclairement pour différentes villes françaises. Les résultats obtenus sont très satisfaisants : notre prédicteur s'adapte mieux aux changements climatiques que l'EWMA. En effet l'erreur de prédiction du SEPCS est plus faible que celle du EWMA. Le prédicteur est testé avec des bases de données d'éclairement à l'échelle internationale (on obtient toujours de meilleurs résultats de prédiction par rapport à l'EWMA).

Chapitre 6 : Ce dernier chapitre décrit le management d'énergie du système proposé. L'objectif de cette dernière partie est de pouvoir converger vers la condition ENO ou le principe de fonctionnement neutre en énergie du capteur. Pour cela, on a développé un algorithme de gestion d'énergie qui, suivant la quantité d'énergie disponible et celle prédictée par le SEPCS, va contrôler l'activité du capteur communicant en jouant sur le rapport cyclique par exemple. Dans ce cas, si la quantité d'énergie récupérée ne satisfait pas les besoins énergétiques du capteur, on pourra soit utiliser des modes appelés modes dégradés du capteur, soit traiter l'information à transmettre en urgence (on parle alors de priorité sur les données à transmettre). L'algorithme développé doit aussi gérer la chaîne de récupération d'énergie multi-sources (savoir à tous moments quelles sources d'énergie il peut utiliser pour alimenter le nœud capteur). À la fin de ce chapitre, une méthodologie de conception et de réalisation des capteurs communicants pour les application IoT appelée CCAE-IoT (Capteur Communicant Autonome en Énergie pour l'IoT) est proposée.

Enfin, dans la conclusion générale on récapitule les études, les caractéristiques et les performances des modèles qui ont été développés. Ce qui permet d'introduire les différentes perspectives pour ce travail de thèse.

- **Principales contributions de la thèse**

Dans ce paragraphe, on présente les contributions principales du projet de thèse :

- Développement d'un modèle de consommation d'énergie pour les nœuds capteurs. Le modèle peut-être appliqué à différentes classes d'applications IoT.
- Élaboration de modèles d'optimisation énergétique des capteurs communicants en LoRa/LoRaWAN.
- Développement d'un modèle de caractérisation d'énergie solaire basé sur des bases de données d'éclairement de différentes régions nationales et internationales. Ce modèle permet de caractériser la quantité d'énergie solaire récupérée.
- Développement d'un modèle de récupération d'énergie éolienne basé sur un ensemble de données de vent pour différentes régions. Le modèle proposé permet de caractériser la quantité d'énergie éolienne récupérée.
- Conception et développement d'un prédicteur temps réel d'énergie solaire appelé SEPCS. Le SEPCS donne de meilleurs résultats par rapport à l'état de l'art.
- Élaboration de deux nouvelles approches de gestion d'énergie. La première méthode s'agit de la concaténation de données avec la technologie LoRa. Cette approche permet de minimiser l'énergie consommée par le nœud capteur. Quant à la deuxième méthode, elle permet d'adapter le rapport cyclique du capteur communicant en fonction de l'énergie disponible.
- Conception et développement d'un algorithme de gestion d'énergie nommé PMA-SEPCS, qui est basé sur le prédicteur SEPCS. Cet algorithme permet de gérer toutes les composantes d'un capteur sans fil. Les performances du PMA-SEPCS sont évaluées en utilisant des données annuelles d'éclairement.

Chapitre 1

Contexte du projet et état de l'art

1 Introduction

L'objet de ce premier chapitre est de réaliser un état de l'art général sur la technologie des réseaux de capteurs communicants. Une étude détaillée sur le management d'énergie et l'optimisation de la consommation énergétique d'un nœud capteur est abordée. Nous axons particulièrement notre réflexion sur la récupération et la gestion d'énergie pour alimenter les capteurs sans fil. Nous essayons d'identifier l'impact des différentes sources d'énergie utilisées sur la durée de vie des objets communicants. Dans cet objectif, nous présentons dans un premier temps les caractéristiques principales d'un réseau de capteurs. Puis, nous introduisons notre conception du capteur communicant proposé à base d'un système de récupération multi-sources d'énergie.

Après avoir présenté l'architecture interne de ce système, nous étudions ces différentes unités. Le système proposé contient trois parties principales. La première partie concerne la récupération avec conversion et stockage des énergies solaire et éolienne. Dans la deuxième partie, nous détaillons le fonctionnement du bloc radio. Nous verrons que ce bloc consomme plus d'énergie que les autres blocs du système. Ensuite, dans la dernière partie, nous présentons les techniques de gestion d'énergie des nœuds capteurs. Il s'agit de faire le management d'énergie du capteur communicant. Pour cela, nous présentons notre stratégie envisagée afin de réaliser le fonctionnement neutre en énergie du capteur sans fil.

2 Généralités sur les capteurs sans fil

2.1 Définition

Un réseau de capteurs sans fil est constitué par un ensemble de nœuds capteurs déployés dans un contexte applicatif déterminé pour mesurer un stimulus physique [13]. Ces nœuds capteurs permettent de véhiculer l'information jusqu'à la station de base (figure 1.1). Chaque capteur est équipé d'une unité radio lui permettant de communiquer avec le reste du réseau.

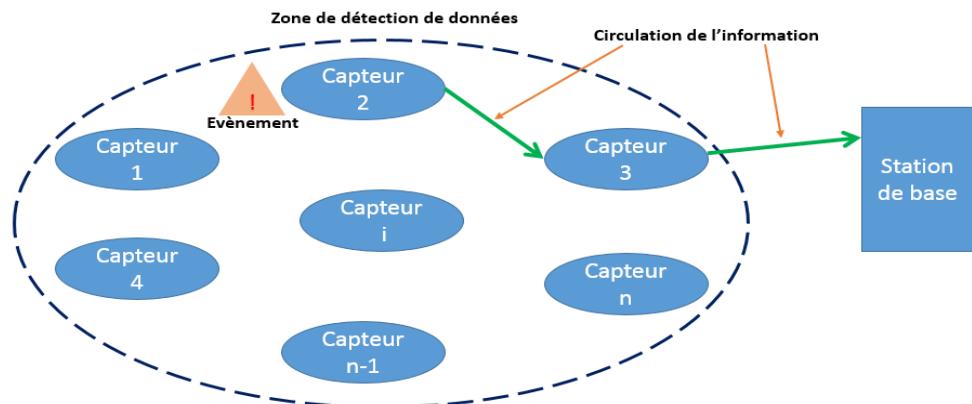


Figure 1.1 – Réseau de capteurs communicants.

2.2 Caractéristiques des capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs doivent répondre aux exigences principales suivantes [13-16] :

Consommation énergétique : une autonomie maximale du capteur est exigée par la plupart des classes d'applications. La minimisation de la consommation énergétique (matérielle et logicielle) est donc essentielle.

Durée de vie : il s'agit d'un point central pour les capteurs sans fil puisqu'ils sont alimentés par des piles ou des batteries. Les contraintes liées au changement des piles ou rechargement des batteries peuvent-être pénibles selon le déploiement des nœuds. Il est donc essentiel d'avoir une durée de vie du capteur la plus longue possible [13].

Coût : généralement, les réseaux de capteurs peuvent contenir un grand nombre de nœuds. Il est donc nécessaire d'avoir un coût unitaire par nœud le plus faible possible, sous peine d'obtenir un coût global du réseau trop élevé [13-14].

Complexité matérielle et logicielle : les fonctionnalités mises en œuvre par les parties matérielle et logicielle doivent être aussi simples que possible, car l'augmentation de la complexité de ces parties peut conduire à une augmentation de la consommation d'énergie disponible ainsi que l'augmentation du coût de réalisation et d'exploitation [14-15].

Ces caractéristiques entraînent des contraintes fortes lors de la conception de ces capteurs, dont une plus importante est certainement la gestion d'énergie. Pour notre cas, nous nous intéressons aux deux premières exigences. Dans une perspective industrielle, les aspects coût et complexité doivent également être pris en considération pour réaliser un système communicant et autonome en énergie.

2.3 Composition matérielle d'un capteur communicant

Un capteur communicant est un dispositif qui permet de mesurer des grandeurs physiques observées du côté de l'environnement (température, pression ou humidité, etc.) et de transmettre l'information obtenue à une station de base ou passerelle. L'architecture matérielle d'un nœud capteur est constituée de différents blocs, qui sont représentés sur la figure 1.2.

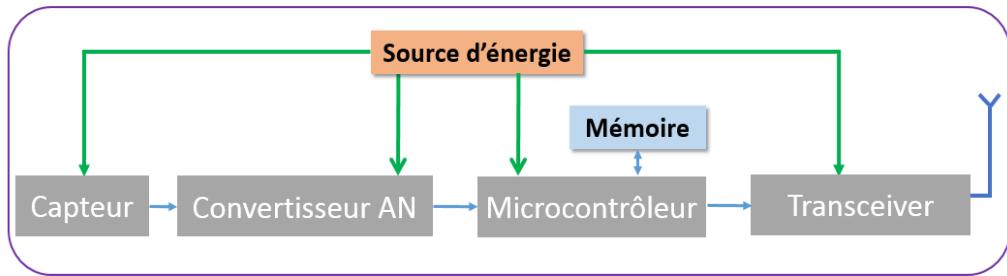


Figure 1.2 – Architecture interne d'un capteur sans fil.

La base de cette architecture repose sur l'alimentation du capteur à travers l'utilisation de piles ou de batteries. Cette alimentation assure le fonctionnement des autres blocs. Le rôle du convertisseur analogique numérique (AN) est de convertir les données mesurées par le capteur en données numériques. Ces dernières sont exploitables par la partie logicielle du noeud, qui est constituée d'un micro-contrôleur et d'une partie mémoire pour le stockage de données. Enfin, l'interface radio ou le transceiver permet de communiquer les informations acquises par le capteur communiquant à un autre noeud ou à une station de base. Le fonctionnement de chacun de ces blocs est décrit de façon plus précise dans les paragraphes suivants.

2.3.1 Bloc capteur et convertisseur AN

L'unité capteur (ou acquisition) est généralement composée de deux sous-parties : le capteur proprement dit (qui fait la mesure) et le convertisseur AN (qui convertit le signal analogique en un signal numérique). Le capteur fournit des signaux analogiques, basés sur le phénomène physique observé, au bloc de conversion AN. Les signaux numériques obtenus à la sortie de ce bloc sont compréhensibles par l'unité de traitement [17].

2.3.2 Unité de traitement : micro-contrôleur et mémoire

Partie micro-contrôleur

Cette partie représente le cœur de l'architecture matérielle du noeud capteur. Elle gère toutes les autres parties du système, ce qui permet la mise en œuvre des protocoles de communication. Son fonctionnement est simple, elle collecte les données provenant du bloc capteur, les traite et gère leur transmission par l'unité radio [13]. Elle traite éventuellement les données reçues de la part des autres noeuds capteurs et met en œuvre les algorithmes de la couche MAC (Media Access Control). Afin d'optimiser la consommation énergétique du capteur, on doit optimiser les calculs réalisés par cette unité qui peut fonctionner avec des modes à basse consommation.

Partie mémoire

Différents types de mémoires sont nécessaires au fonctionnement du capteur. Une mémoire de type RAM (Random Access Memory) est nécessaire pour stocker les données temporaires acquises par l'unité capteur. Une mémoire de type ROM (Read Only Memory) est essentielle pour stocker le code des programmes. La mémoire FLASH peut également

servir pour stocker temporairement les données provenant de la RAM en cas d'espace insuffisant de cette dernière [18].

2.3.3 Unité radio : transceiver

Caractéristique du bloc

Il s'agit de l'unité principale de communication du capteur sans fil. Elle permet de transmettre les données acquises par le capteur aux autres nœuds communicants ou à la station de base. Ses performances sont conditionnées par la couche physique implémentée (qui dépend de différents paramètres tels que la bande de fréquence utilisée, le niveau de puissance d'émission, la distance de transmission, le type de la modulation et la présence ou non de codes correcteurs d'erreurs) [13-16].

En réception, le seuil de sensibilité du transceiver spécifie la puissance minimale nécessaire pour recevoir correctement l'information [13-14]. En général, avec une bonne sensibilité du récepteur, il est possible d'augmenter la portée de transmission ou bien encore d'améliorer la qualité de transmission. La portée de transmission est quant à elle dépendante de la puissance maximale d'émission, des caractéristiques de l'antenne et de l'atténuation causée par l'environnement.

Pour un capteur communicant, l'unité qui consomme le plus (en instantané) est la partie radio. Comme indiqué dans [6], cette consommation dépend du débit de transmission, de la modulation et de la puissance d'émission. Généralement, plus la puissance d'émission est élevée, plus la partie radio consomme [13]. En moyenne, pour un transceiver LoRa (Long Range communication) l'unité radio consomme environ 28 mA sous 3.3 V (soit une puissance consommée au niveau de 92.4 mW) [6]. Cette constatation est essentielle pour la modélisation de la consommation énergétique des capteurs sans fil (chapitre 2).

2.3.4 Unité d'alimentation du capteur

L'alimentation des capteurs communicants est généralement assurée par les piles ou les batteries. Ces sources d'énergie doivent présenter de grandes capacités pour satisfaire les besoins énergétiques du nœud. La capacité d'une batterie doit être dimensionnée pour une classe d'applications spécifique. Dans ce contexte, le capteur communicant peut consommer différents niveaux de puissance selon son mode de fonctionnement. L'auto-décharge de la batterie doit bien entendu être la plus lente possible pour espérer une durée de vie maximale du capteur [13-15].

Suivant le déploiement des capteurs communicants, l'utilisation de batteries (ou de piles) engendre un certain nombre d'inconvénients. En effet, les batteries ou les piles sont des sources de pollution de l'environnement. D'autre part, certains cas d'applications exigent une autonomie importante (une durée de vie pratiquement illimitée du capteur). Ce qui n'est pas le cas pour les batteries ou les piles qui nécessitent des maintenances périodiques et coûteuses. En tenant compte de ces problèmes, nous proposons à travers cette thèse de réaliser un système de capteur communicant à base de récupération et de gestion multi-sources d'énergie, qui peut-être mis en œuvre dans différentes classes d'applications. L'architecture interne ainsi que les propriétés de notre système sont étudiées dans le reste de ce chapitre.

3 Système proposé

La composition interne du système proposé est présentée par la figure 1.3. Il s'agit d'un capteur communicant alimenté par un système multi-sources d'énergie.

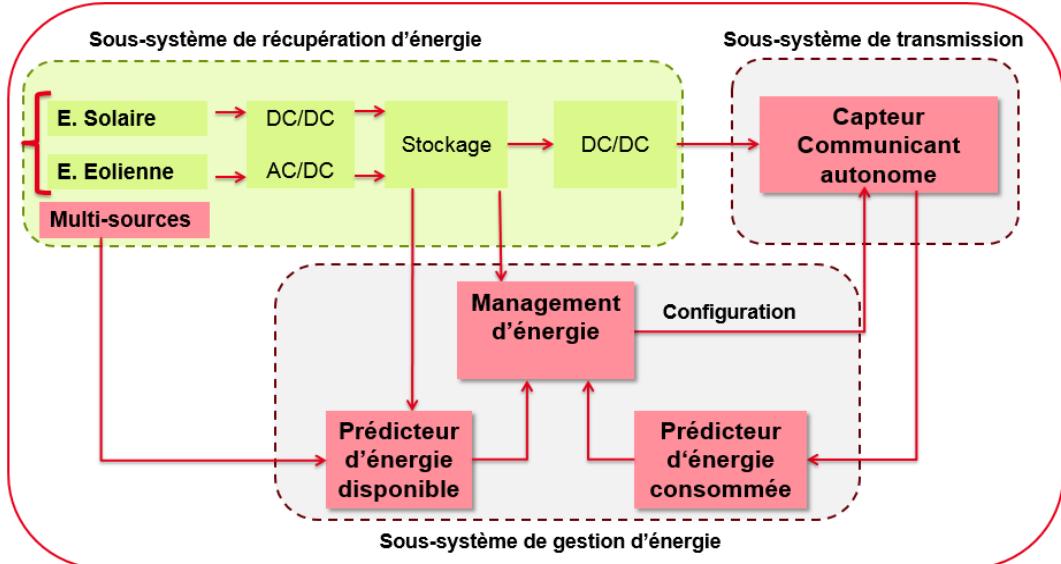


Figure 1.3 – Architecture interne du capteur communicant.

Le système est principalement composé de trois sous-systèmes dépendants. Le premier sous-système représente la source d'alimentation du nœud capteur qui se base sur une chaîne de récupération avec conversion et stockage des énergies solaire et éolienne. Quant au deuxième sous-système, il est basé sur le bloc de management d'énergie. L'objectif de cette partie est de réaliser le fonctionnement neutre en énergie du capteur afin de satisfaire ses besoins énergétiques. La gestion d'énergie recourt à des prédictions de l'énergie disponible et de l'énergie consommée par le nœud capteur pour contrôler et configurer ses paramètres tels que le débit, la puissance d'émission et le rapport cyclique. Le troisième sous-système présente l'unité radio du système global. Afin de minimiser sa consommation, cette unité est construite autour d'un transceiver LoRa/LoRaWAN.

4 Récupération d'énergie

4.1 Besoin de la récupération d'énergie

Comme indiqué précédemment, les différents problèmes causés par l'utilisation de piles ou de batteries tels que la pollution de l'environnement ont permis de chercher des solutions alternatives afin d'alimenter les capteurs communicants avec l'énergie disponible dans son environnement. Le principal avantage de la récupération d'énergie est la continuité de l'alimentation électrique. Théoriquement, elle dure tant qu'il y a de l'énergie dans l'environnement [19-21]. Dans les paragraphes suivants, nous décrivons différentes sources d'énergie disponibles dans l'environnement. Nous présentons ensuite les avantages offerts par la lumière (par exemple le soleil) et le vent pour alimenter les capteurs communicants.

4.2 Sources ambiantes d'énergie

Dans la littérature, différentes sources d'énergie se révèlent de plus en plus attractives. Nombreuses sont celles qui sont capables d'alimenter les systèmes communicants [21]. Parmi ces sources, on cite l'énergie vibratoire qui résulte de vibrations ou de chocs, l'énergie nucléaire, l'énergie électromagnétique, l'énergie thermique, l'énergie solaire photovoltaïque (indoor et outdoor) ou encore l'énergie éolienne [6-12].

On note que la comparaison de ces différentes sources est délicate car elle est dépendante de nombreux facteurs et de la classe d'application considérée. Cependant, des études comparatives dans [21-23] ont permis de comparer les densités de puissance de ces différentes sources. Les résultats de comparaison sont présentés dans le tableau 1.1.

Source d'énergie utilisée	Densité de puissance
Photovoltaïque en extérieur (cellule de rendement égal à 15%)	15 mW/cm^2
Photovoltaïque en intérieur (cellule de rendement égal à 6%)	$100 \cdot 10^{-3} \text{ mW/cm}^2$
Vibrations (four à micro-ondes)	$16 \cdot 10^{-3} \text{ mW/cm}^3$
Thermoélectrique (pour un gradient de 10°C)	$40 \cdot 10^{-3} \text{ mW/cm}^3$
Bruit acoustique (100 dB)	$0.96 \cdot 10^{-3} \text{ mW/cm}^3$

Table 1.1 – Comparaison de différentes sources d'énergie ambiante.

Ce tableau montre que la quantité d'énergie solaire récupérée en extérieur est plus élevée par rapport aux autres formes d'énergies récupérées. Cette constatation sera ensuite utile pour le choix des sources d'énergie afin d'alimenter notre système connecté.

4.2.1 Récupération d'énergie vibratoire

L'énergie vibratoire fait l'objet d'intenses travaux de recherches, car il s'agit d'une forme d'énergie qui est présente en quantité significative autour de toutes les activités qui se produisent dans l'environnement [20]. Dans ce cas, la puissance disponible varie fortement avec la proximité et la nature de la source de vibrations. Celle-ci est estimée à environ $10 \cdot 10^{-3}$ à $200 \cdot 10^{-3} \text{ mW/cm}^3$ dans [24]. Le tableau 1.2 présente des comparaisons entre des systèmes alimentés par l'énergie vibratoire.

Réf.	Dimension	Puissance récupérée	Descriptions et applications
[26]	400 cm^3	2,5 mW	Vibrations extrêmement amples (164 m.s^{-2} à 102 Hz).
[27]	700 cm^3	3 mW	Mesure de vibrations à l'aide d'éléments piézoélectriques. Réalisation d'un système communicant avec des essais à bord d'un navire.
[28]	-	1 mW	Développement et réalisation d'un nouveau prototype de surveillance des structures à base d'éléments piézoélectriques.

Table 1.2 – Énergie vibratoire pour alimenter les capteurs communicants.

4.2.2 Récupération d'énergie thermique

L'utilisation des gradients de température pour alimenter les capteurs communicants est essentiellement réservée aux applications exploitant l'énergie humaine ainsi que l'énergie provenant de machines [20-25]. Le travail de Starner et al. [29] est encore la référence pour l'estimation de la puissance récupérable sur un être humain (tableau 1.3). Dans ce type d'application, il est nécessaire de considérer l'écart de température Δ lors de la mesure du rendement de la cellule. En effet, une même cellule de rendement noté R donne au maximum une puissance P égale à $25 \text{ mW.K}^{-1}.cm^{-2}$ pour un écart de 70 Kelvin, et seulement $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ mW/cm}^3$ pour un écart de 5 Kelvin (c'est-à-dire $P = R \cdot \Delta^2$). On note alors une grande dégradation des performances du système de récupération à bas gradient de température [20-21].

Réf.	Puissance récupérée	Conditions et applications
[30]	$1.7 \cdot 10^{-3} \text{ mW/cm}^3$	Laboratoire en intérieur, $\Delta = 5$ kelvin.
[31]	$25 \text{ mW.K}^{-1}.cm^{-2}$	Laboratoire en intérieur, $\Delta = 70$ kelvin.
[32]	$40 \cdot 10^{-3} \text{ mW/cm}^3$	Laboratoire en intérieur, $\Delta = 10$ kelvin.

Table 1.3 – Énergie thermique pour alimenter les capteurs communicants.

4.2.3 Récupération des Rayonnements radio-fréquences

Actuellement, on cherche à alimenter les objets communicants en utilisant le rayonnement radio-fréquence à cause de la grande densité d'émetteurs présents au sol (2G, 3G, 4G, FM ou WiFi) [20-22, 25-28]. Cependant, la quantité d'énergie récupérée est souvent faible, sauf à proximité de la source. Pour remédier à ce problème, il faut utiliser des capteurs de grandes surfaces [20-21]. Un exemple de réalisation avec une source RF pour alimenter un capteur sans fil a été présenté par Mascarenas et al. [33]. Dans ce travail les auteurs ont réussi à récupérer 2,5 mW avec une distance source/récepteur qui ne dépasse pas 61 cm.

4.2.4 Récupération d'énergie solaire

L'exploitation des sources d'énergie solaire a suscité de nombreux travaux scientifiques [20-25]. En effet, depuis la découverte de l'effet photovoltaïque en 1839 par Antoine Becquerel puis son application à la production électrique en 1954, on assiste à des solutions commerciales pour exploiter cette source d'énergie [23-24]. Dans ce cas, les meilleurs rendements de conversion de l'énergie solaire vont jusqu'à 20% [34]. Le tableau 1.4 montre des données caractéristiques sur la récupération d'énergie solaire.

Réf.	Rendement de la cellule	Puissance moyenne	Conditions
[35]	20 %	$11 \text{ à } 19 \text{ mW.cm}^{-2}$	Soleil sans nuages en extérieur.
[36]	15 %	$5.6 \text{ à } 6.7 \text{ mW.cm}^{-2}$	Région tempérée.
[32]	5 %	3.5 mW.cm^{-2}	Journée ensoleillée.
[38]	20 %	49 mW.cm^{-2}	Journée ensoleillée.

Table 1.4 – Énergie solaire pour alimenter les capteurs communicants.

4.2.5 Récupération d'énergie éolienne

Dans la littérature [37-39], on retrouve des travaux de recherches faits sur des éoliennes de différentes dimensions. Ces éoliennes permettent de donner des puissances allant de quelques milliwatts à quelques dizaines de Watts [38]. Ces micro-turbines sont destinées à la production de l'énergie pour des domaines spécifiques tels que celui des objets communicants. Ainsi, un support scientifique et technique important a permis d'améliorer le fonctionnement de ces petites éoliennes afin d'augmenter leurs performances pour alimenter les capteurs sans fil [39]. On note que l'énergie éolienne permet d'avoir des quantités d'énergie comparables à celles données par le soleil. De plus, comme indiqué dans [44-45], le vent peut-être considérée comme une source complémentaire au soleil.

4.2.6 Conclusion

D'après les données fournies dans les paragraphes précédents, nous remarquons que les quantités d'énergies offertes par les vibrations, la chaleur ou les rayonnements radiofréquences sont assez faibles pour réaliser l'autonomie des capteurs communicants, pour un certain nombre d'applications qui demande une quantité d'énergie élevée. Nous avons montré ensuite l'importance du soleil et du vent pour fournir des quantités d'énergie comparables et complémentaires à l'extérieur. Comme on le verra dans le chapitre suivant, ces quantités d'énergie sont suffisantes pour satisfaire les besoins énergétiques d'un nœud capteur qui consomme environ 92 mW pour transmettre l'information avec un module LoRa.

Afin de conclure, il s'agit de réaliser un capteur communicant qui soit autonome en énergie. Cette autonomie d'énergie va se baser principalement sur la récupération d'énergie solaire, comme étant la source principale d'énergie. La deuxième source d'énergie choisie, permettant d'avoir une quantité d'énergie complémentaire voire même comparable à celle offerte par le soleil, est l'énergie éolienne. Nous présentons alors dans ce qui suit les différentes techniques de conversion et de stockage de ces énergies.

5 Conversion et stockage de l'énergie récupérée

5.1 Supports de stockage de l'énergie

La majorité des capteurs communicants existants utilise des supports de stockage afin d'accumuler l'énergie récupérée. En effet, les travaux de recherches tentent de réduire le rapport cyclique de fonctionnement des capteurs afin d'en limiter leur consommation. Dans ce cas, le nœud capteur n'est pas maintenu en activité en permanence, et lorsqu'il est en veille, l'énergie récupérée doit être accumulée dans un support de stockage adéquat [20]. Un autre cas de figure, qui impose l'intégration d'un bloc de stockage pour concevoir un capteur communicant, est celui où la puissance récupérée est variable dans le temps. Un exemple simple illustre cette situation : les capteurs en extérieur tirant leur énergie du rayonnement solaire ou du vent et dont le fonctionnement doit être continu (jour et nuit, beau ou mauvais temps) doivent stocker l'énergie pendant les phases favorables (jour et beau temps) pour pallier le manque d'énergie lors des phases défavorables (nuit ou mauvais temps) [20-22].

Parmi les supports de stockage utilisés, on note l'utilisation des piles, qui sont non-rechargeables (exemple pile $Ni - MH$) ou des batteries qui ne supportent qu'un nombre limité de cycles de charge et de décharge (environ 1000 cycles) [21]. Une autre solution pertinente est d'utiliser les super-condensateurs pour stocker l'énergie récupérée. Malgré leurs auto-décharges importantes, ces éléments peuvent endurer des milliers de cycles sans perte notable de capacité. Le tableau 1.5 montre la liste de quelques systèmes de récupération d'énergie solaire avec les surfaces de panneaux solaires utilisés ainsi que les supports de stockage correspondants :

Réf.	Puissance solaire	Surface du panneau	Source de stockage
[40]	24 mA @ 5 V	220 cm ²	Piles $Ni - MH$
[41]	13 mA @ 5 V	185 cm ²	Piles $Ni - MH$
[42]	10 mA @ 5 V	30 cm ²	Super-condensateurs

Table 1.5 – Stockage de l'énergie solaire pour alimenter les nœuds capteurs.

5.2 Conversion de l'énergie obtenue

La conversion de l'énergie récupérée est une étape nécessaire pour exploiter l'énergie de l'environnement. En effet, dans la plupart des cas on utilise les convertisseurs électriques pour adapter l'énergie obtenue aux supports de stockage usuels. Dans notre cas (figure 1.3), on vise l'utilisation d'un convertisseur DC/DC pour adapter l'énergie solaire récupérée au support de stockage utilisé (batterie ou super-condensateur). On note que les convertisseurs DC/DC sont de deux types selon la valeur de la tension voulue. Si on veut augmenter la valeur de la tension obtenue, on utilise des convertisseurs dits élévateurs de tension. Dans le cas contraire, on recourt à des convertisseurs abaisseurs pour diminuer la valeur de tension obtenue [48].

Afin de convertir l'énergie éolienne, on va utiliser un convertisseur AC/DC afin d'avoir un signal continu susceptible d'être stocké dans un support de stockage adéquat. Ensuite, un autre convertisseur DC/DC placé après le bloc de stockage d'énergie est nécessaire pour avoir une tension de sortie adaptée à la plateforme du capteur communicant (par exemple une tension égale à 3.3 V).

6 Gestion d'énergie

6.1 Besoin du management d'énergie

Les techniques de récupération d'énergie pour les nœuds capteurs donnent différents degrés de liberté pour la conception et le développement des protocoles de communication et des techniques de gestion d'énergie (ou power management) [43]. L'objectif principal de la technologie des capteurs sans fil avec récupération d'énergie est de prolonger la durée de vie du nœud capteur, avec comme contrainte le budget énergétique qui est fixé par les capacités du système de récupération et de stockage de l'énergie obtenue. Les méthodes de power management doivent minimiser la consommation d'énergie tout au long de la durée de vie du capteur et en même temps satisfaire les contraintes applicatives du capteur

telles que le débit de transmission et l'urgence sur les données à transmettre. La figure 1.4 présente une situation standard qui montre le principe du management d'énergie.

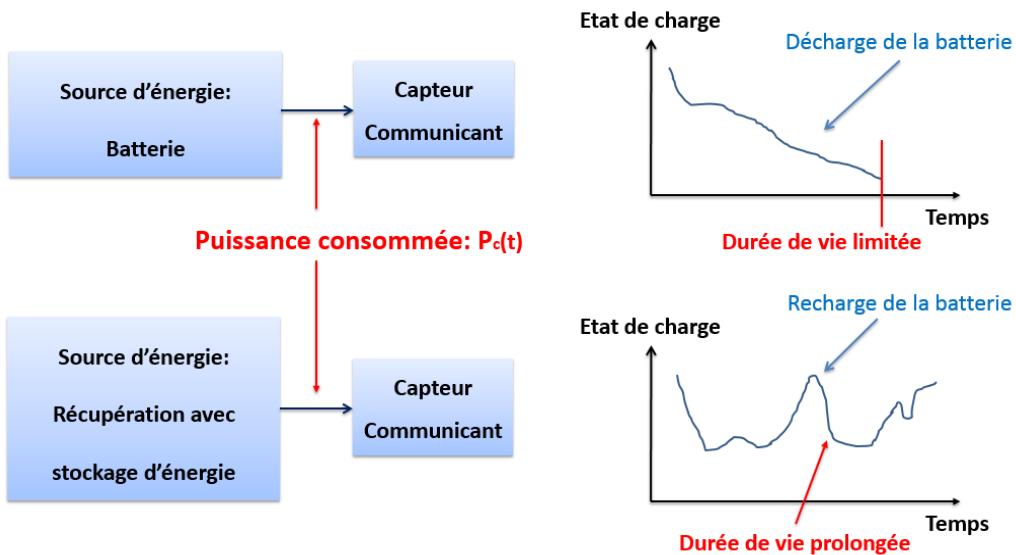


Figure 1.4 – Apport de la récupération et la gestion d'énergie pour les capteurs communicants.

Cette figure montre une comparaison simplifiée entre l'utilisation des batteries et la récupération d'énergie pour alimenter un capteur communicant. Dans les deux cas, le nœud capteur consomme une puissance variable dans le temps notée $P_c(t)$. Généralement, la batterie est caractérisée par des valeurs maximale et minimale de charge disponible. Quant au système de récupération d'énergie, il est considéré comme un élément qui fournit une puissance variable dans le temps, permettant de recharger un support de stockage comme les batteries ou les condensateurs. Dans le premier cas où le capteur est alimenté uniquement par une batterie, l'état de charge de cette dernière est une fonction monotone et décroissante avec le temps [42-43]. L'objectif de la gestion d'énergie pour ce type de système est de minimiser la puissance consommée $P_c(t)$ ainsi que les pertes d'énergie dans le système afin de maximiser sa durée de vie.

Dans le deuxième cas de figure, avec récupération et gestion d'énergie, l'état de charge n'est pas une fonction monotone décroissante du temps. En effet, quand la puissance récupérée dépasse celle consommée $P_c(t)$, la batterie se recharge et l'état de charge augmente de nouveau. La différence entre les deux types de systèmes est, qu'avec la récupération d'énergie, le système peut fonctionner en équilibre énergétique (signifie que l'énergie disponible est égale à $P_c(t)$) ou en surplus d'énergie (l'énergie disponible est supérieure à $P_c(t)$), tandis qu'un système alimenté par une batterie ne fonctionne qu'en déficit d'énergie [43]. Pour conclure, cette figure montre que la gestion d'énergie dans le contexte des capteurs sans fil avec récupération d'énergie est essentielle pour optimiser la consommation énergétique des nœuds. On note aussi que la gestion d'énergie permet de contrôler différents paramètres du capteur qui affectent la consommation de la puissance, comme par exemple la période de réveil et la puissance d'émission.

6.2 Fonctionnement neutre en énergie

L'objectif du management de puissance dans le cadre des réseaux de capteurs sans fil avec récupération d'énergie est de réaliser la condition de fonctionnement neutre en énergie du capteur ou neutralité énergétique, en anglais (Energy Neutral Operation : ENO). Cette condition signifie que l'énergie disponible (ensemble des énergies récupérée et stockée) doit être supérieure ou égale à l'énergie totale consommée par le nœud capteur. En d'autres termes, l'ENO permet de satisfaire les besoins énergétiques du capteur en assurant une bonne qualité de service en fonction de l'énergie disponible [44-47]. La figure 1.5 décrit le principe de neutralité énergétique.

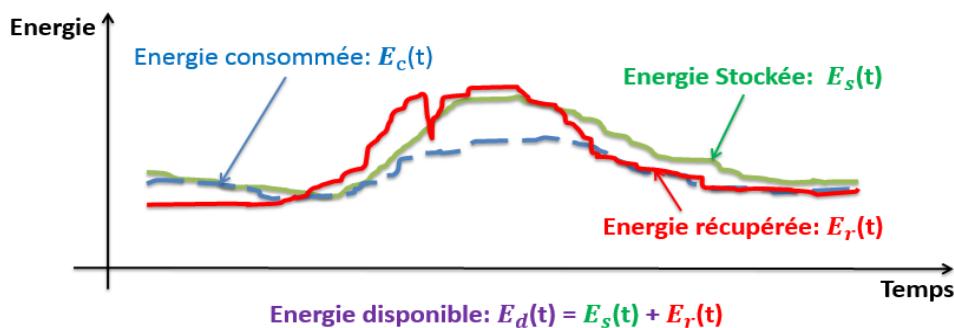


Figure 1.5 – Principe du fonctionnement neutre en énergie.

En appliquant la condition ENO pour chaque intervalle de temps, on a trois cas de figure concernant le fonctionnement du système (figure 1.6) :

- Pendant les intervalles de non-récupération d'énergie (ou également ceux où il y a une quantité faible d'énergie disponible), c'est-à-dire l'énergie consommée dépasse celle disponible, alors le système commence à stocker de l'énergie sans fournir des services pendant ces intervalles [48-49].
- Pendant les intervalles où on assiste à un équilibre énergétique entre $E_c(t)$ et $E_d(t)$. Dans ce cas, le capteur commence à transmettre l'information avant de stocker l'énergie.
- Si $E_d(t)$ dépasse $E_c(t)$ alors le nœud capteur continue à transmettre les données mesurées en stockant de l'énergie pour les prochains intervalles de temps.

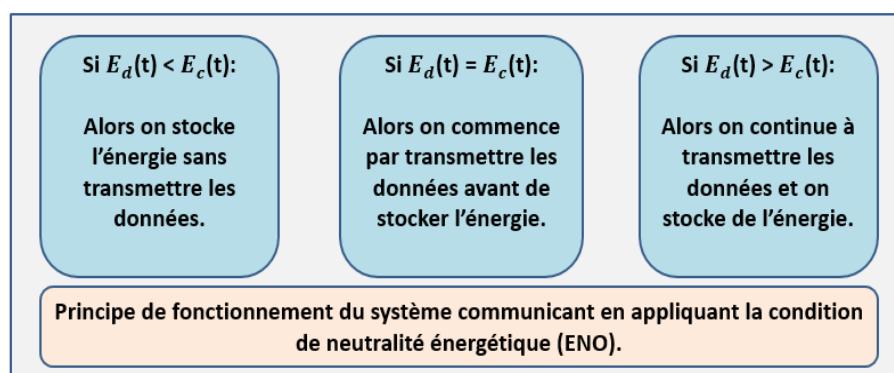


Figure 1.6 – Fonctionnement du capteur communicant sous la condition ENO.

7 Conclusion

Ce chapitre présente un état de l'art sur la récupération et la gestion d'énergie pour les capteurs communicants. Nous avons présenté tout d'abord les caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil. Puis, nous avons introduit les différentes unités constituant un noeud capteur. Ensuite, nous avons proposé l'architecture interne du capteur communicant voulu. Il s'agit d'un système autonome à base de récupération et de gestion multi-sources d'énergie.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous avons commencé par présenter un état de l'art sur les différentes sources d'énergie présentes dans l'environnement. Vu les avantages offerts par le soleil et le vent, nous avons choisi ces deux sources d'énergie pour alimenter notre capteur communicant. Le choix de ces sources est basé sur deux critères essentiels qui sont la complémentarité temporelle et le niveau des quantités d'énergies offertes par les deux sources.

Enfin, dans la dernière partie du chapitre, nous avons décrit le principe de la gestion d'énergie du capteur. Puis, nous avons montré la nécessité de faire le management d'énergie. Pour cela, nous avons rappelé le principe du fonctionnement neutre en énergie. Notre objectif est de proposer alors un système de gestion d'énergie multi-sources (solaire et éolienne), qui soit basé sur des prédictions à court et à long termes des énergies disponibles et de celle consommée par le noeud capteur.

Le chapitre suivant s'intéresse à la modélisation de la consommation d'énergie d'un capteur communicant en utilisant la technologie LoRa/LoRaWAN. Cette modélisation permet de connaître les besoins énergétiques du noeud capteur pour mesurer et transmettre l'information. Le modèle de consommation proposé fournira aussi les informations nécessaires pour modéliser et adapter le système de récupération d'énergie multi-sources.

Bibliographie : introduction générale et chapitre 1

- [1] M. Vallérain, rapport de thèse : une infrastructure flexible de collecte et de traitement de données d'un réseau de capteurs urbain mutualisé, université de Lyon, juin 2016.
- [2] L. Atzori, A. Iera and G. Morabito. The Internet of Things : A survey. Computer Networks, vol. 54, no. 15, pages 2787-2805, 2010.
- [3] IEEE 802.15.4k : Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), Amendment 5 : Physical Layer Specifications for Low Energy, Critical Infrastructure Monitoring Networks, october 2012.
- [4] D. Evans. The Internet of Things : How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything. Cisco White paper, Avril 2011.
- [5] D. Lund, C. MacGillivray, V. Turner and M. Morales. Worldwide and Regional Internet of Things (IoT) 2014-2020 Forecast : A Virtuous Circle of Proven Value and Demand. IDC Analyze the Future, May 2014.
- [6] T. Bouguera, J.-F. Diouris, J.-J. Chaillout, Randa Jaouadi and G. Andrieux. Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN. Sensors, MDPI, 2018, 18 (7), pp.2104.
- [7] G. Simon, M. Maroti, A. Ledeczi, A. Nadas, B. Kusy, J. Sallai, G. Pap and K. Frampton. Sensor Network-Based Countersniper System. The 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, 2004.
- [8] P. Sikka, P. Corke and L. Overs. Wireless sensor devices for animal tracking and control. 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, pages 446-454, 2004.
- [9] J. McCulloch, P. McCarthy, S. M. Guru, W. Peng, D. Hugo and A. Terhorst. Wireless sensor network deployment for water use efficiency in irrigation. In workshop on Real-world wireless sensor networks, pages 46-50, 2008.
- [10] G. Virone and N. Noury. Télé-Surveillance Automatique de l'activité dans un Habitat Intelligent pour la Santé. In JFIM2002, Congrès Francophone informatique Médicale, 2002.
- [11] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. Computer Networks, 38(4), pages 393-422, March 2002.
- [12] S. W. Arms, C. P. Townsend, D. L. Churchill, J. H. Galbreath and H. Lane. Power Management for Energy Harvesting Wireless Sensors. In SPIE, number March, pages 1-9, 2005.
- [13] D. Dessales, rapport de thèse : conception d'un réseau de capteurs sans fil, faible consommation, dédié au diagnostic in-situ des performances des bâtiments en exploitation, université de Poitiers, Aout 2006.
- [14] G.J. Pottie and W.J. Kaiser. Wireless Integrated Network Sensors. Communications of the ACM, 43(5), pages 51-58, 2000.
- [15] J.M. Rabaey, M.J. Ammer, J.L. da Silva Jr, D. Patel and S. Roundy. PicoRadio Supports Ad hoc Ultra-Low Power Wireless Networking. Computer, 33(7), 42-48, 2000.
- [16] E.H. Callaway. Wireless Sensor Networks : Architectures and Protocols, volume 3. CRC press, 2004.
- [17] F. Abdelfatah, rapport de master 2 : développement d'une bibliothèque de capteurs communicants, université de Montpellier 2, 2008.

- [18] Q. Wang, Y. Zhu and L. Cheng. Reprogramming Wireless Sensor Networks : Challenges and Approaches. *IEEE Network*, 20(3), pages 48-55, 2006.
- [19] O. Landsiedel, K. Wehrle and S. Gotz. Accurate Prediction of Power Consumption in Sensor Networks. In Proceedings of the Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNetS-II), 2005.
- [20] H. Durou, rapport de thèse : Vers l'autonomie énergétique des réseaux de capteurs embarqués : conception et intégration d'un générateur piézo-électrique et d'un micro dispositif de stockage capacitif en technologie silicium, université Paul Sabatier, Toulouse III, 2010.
- [21] S. J. Roundy, Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, 2003.
- [22] C. Mathuna, T. Donnell, R. V. Martinez-Catala, J. Rohan, and B. O. Flynn. Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks, *Talanta*, vol. 75, no. 3, pp. 613-623, Mai 2008.
- [23] S. Beeby and N. White. Energy harvesting for autonomous systems. Artech House, 2010.
- [24] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes and T. C. Green, Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices, *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 9, pp. 1457-1486, 2008.
- [25] G. Park, T. Rosing, M. D. Todd, C. R. Farrar, and W. Hodgkiss, Energy Harvesting for Structural Health Monitoring Sensor Networks, *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 64-79, Mars 2008.
- [26] E. P. James, An investigation of self-powered systems for condition monitoring applications, *Sensors and Actuators*, vol. 110, no. 1, pp. 171-176, 2004.
- [27] F. M. Discenzo, D. Chung and K. A. Loparo. Pump condition monitoring using self-powered wireless sensors, *Sound and Vibration*, vol. 40, no. 5, pp. 12-15, 2006.
- [28] J. Kim, L. Grisso, S. Ha and J. Inman, An All-Digital Low-Power Structural Health Monitoring System. *IEEE Conference on Technologies for Homeland Security*, 2007.
- [29] T. Starner and J. A. Paradiso, Human generated power for mobile electronics, *Low-power electronics design*, 2004.
- [30] K. A. Cook-Chennault, N. Thambi and A. M. Sastry, Powering MEMS portable devices a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems, *Smart Materials and Structures*, vol. 17, 2008.
- [31] R. Vullers, R. van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, and R. Mertens, Micropower energy harvesting, *Solid-State Electronics*, vol. 53, no. 7, pp. 684-693, Jul. 2009.
- [32] C. Mathuna, T. Donnell, R. V. Martinez-Catala, J. Rohan, and B. O, Flynn, Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks, *Talanta*, vol. 75, no. 3, pp. 613-623, May. 2008.
- [33] D. L. Mascarenas, M. D. Todd, G. Park, and C. R. Farrar, Development of an impedance-based wireless sensor node for structural health monitoring, *Smart Materials and Structures*, vol. 16, p. 2137, 2007.
- [34] mzentgraf, world record : Efficiency reached for multi-junction solar cells at Fraunhofer ISE Fraunhofer ISE. [Online]. [Accessed : 05-septembre-2018].
- [35] K. A. Cook-Chennault, N. Thambi and A. M. Sastry, Powering MEMS portable devices a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special

emphasis on piezoelectric energy harvesting systems, Smart Materials and Structures, vol. 17, 2008.

[36] J. Gilbert and F. Balouchi, Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks, International Journal of Automation and Computing, vol. 5, no. 4, pp. 334-347, Oct. 2008.

[37] J. A. Paradiso and T. Starner, Energy scavenging for mobile and wireless electronics, IEEE Pervasive computing, vol. 4, no. 1, pp. 18-27, 2005.

[38] J.-D. Langlois, Modélisation et étude des performances des systèmes éoliens hors réseaux, Montréal, avril 2006.

[39] S. Drouilhet, E. Muljadi, R. Holz, and V. Gevorgian, Optimizing small wind turbine performance in battery charging applications. In Annual conference and exhibition on wind power (25th), United States.

[40] V. Kyriatzis, N. S. Samaras, P. Stavroulakis, H. Takruri-Rizk and S. Tzortzios, Enviromote : A New Solar-Harvesting Platform Prototype for Wireless Sensor Networks, in IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC, pp. 1-5, 2007.

[41] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman and M. Srivastava, Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems, the 4th international symposium on Information processing in sensor networks, p. 64, 2005.

[42] A. Hande, T. Polk, W. Walker and D. Bhatia, Indoor solar energy harvesting for sensor network router nodes, Microprocessors and Microsystems, vol. 31, no. 6, pp. 420-432, 2007.

[43] A. Castagnetti, rapport de thèse : étude de la gestion de l'autonomie en énergie d'objets communicants sans fil, université de Nice, Octobre 2012.

[44] N. Ferry, S. Ducloyer, N. Julien and D. Jutel. Power energy estimator for designing WSN nodes with ambient energy harvesting feature. EURASIP J. Embedded Syst., January 2011.

[45] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, and M.B. Srivastava. Power management in energy harvesting sensor networks. ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS), 6(4), 2007.

[46] C.M. Vigorito, D. Ganesan and A.G. Barto. Adaptive control of duty cycling in energy-harvesting wireless sensor networks. In Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. SECON 07. 4th Annual IEEE Communications Society Conference, pages 21-30. 2007.

[47] C. Moser, L. Thiele, D. Brunelli and L. Benini. Adaptive power management in energy harvesting systems. In Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition, page 145. IEEE, 2007.

[48] A. Kansal, J. Hsu, M. Srivastava and V. Raghunathan. Harvesting aware power management for sensor networks. The 43rd annual Design Automation Conference, DAC 06, pages 651-656, New York, USA, 2006.

[49] N. Ferry, S. Ducloyer, N. Julien and D. Jutel. Power energy estimator for designing WSN nodes with ambient energy harvesting feature. EURASIP J. Embedded Syst., 2011, pages 1-6, January 2011.

Chapitre 2

Modèle de consommation d'énergie pour les capteurs communicants avec LoRa et LoRaWAN

1 Introduction

Ce deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la consommation énergétique d'un nœud capteur. Cette modélisation tient compte d'un scénario applicatif réel, qui est le contrôle d'ouvrages d'art tels que les ponts, les barrages et les pylônes de réseaux électriques et télécommunications, etc. Notre modèle de consommation développé est basé sur la technologie LoRa/LoRaWAN (Long Range Communication, Wide Area Network), qui est une technologie de communication sans fil à basse consommation et à longue distance. Pour cela, nous commençons par présenter la structure interne du capteur communicant. Puis, nous décrivons la classe d'application choisie avec les différentes contraintes imposées par l'utilisateur. Notre modèle de consommation d'énergie est ensuite détaillé. Il s'agit d'un modèle générique qui peut-être appliqué pour différentes classes d'applications.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous introduisons rapidement les caractéristiques de LoRa/LoRaWAN. Ensuite, nous proposons une étude d'optimisation énergétique faite pour évaluer la durée de vie du capteur en utilisant les sources d'alimentation standards (batteries ou piles). Cette étude montre que la durée de vie du capteur est limitée suivant les contraintes de l'application. Dans ce contexte, nous devons récupérer l'énergie à partir de l'environnement pour prolonger la durée de vie du nœud capteur.

2 État de l'art sur la consommation d'énergie

La technologie LoRa/LoRaWAN est une norme relativement récente [2-3, 6-7]. La plupart des recherches basées sur LoRa et LoRaWAN se sont concentrées sur l'étude des paramètres de cette technologie tels que le temps de transmission, la portée, le débit et la capacité du réseau [8-13]. Depuis l'utilisation de la modulation LoRa pour les applications de capteurs sans fil, plusieurs références ont étudié la consommation énergétique des systèmes communicants utilisant cette nouvelle technologie.

S. C. Phui et al. ont proposé une comparaison expérimentale des classes LoRa et leurs

consommations d'énergie dans [17]. L'objectif de cette étude est de vérifier les niveaux de courants consommés avec différents modes de fonctionnement d'un système LoRa. Cependant, les auteurs n'ont pas étudié l'effet de différents paramètres LoRa tels que le taux de codage, la portée de communication et le niveau de la puissance de transmission sur l'énergie totale consommée.

De nombreux autres travaux ont permis d'estimer la consommation énergétique des noeuds capteurs avec LoRa et LoRaWAN. Cependant, la plupart des valeurs trouvées ont été obtenues à partir des fiches techniques [18-20], sans développer des modèles énergétiques capables d'estimer et d'optimiser la consommation des capteurs sans fil. L. Casals et al. ont développé des modèles de courants permettant de caractériser la durée de vie et le coût énergétique des dispositifs LoRa [21]. Les modèles proposés sont très importants et ils sont déduits à partir d'une démarche expérimentale. Mais les auteurs n'ont pas modélisé la consommation d'énergie des unités de mesure et de traitement dans cette étude. Dans notre travail, nous avons modélisé ces unités pour un scénario d'application réel de capteur connecté. Ensuite, le modèle proposé est basé sur une étude d'optimisation énergétique des paramètres LoRa/LoRaWAN tels que le facteur d'étalement SF, le taux de codage CR, la bande passante BW, la charge utile et la portée de communication.

On note aussi que d'autres travaux de recherche n'ont pas intégré la technologie LoRa dans leurs études. G. Terrasson et al. ont présenté des modèles de consommation d'énergie pour les noeuds capteurs dans [1, 4, 14-15]. Dans ces travaux, les auteurs ont présenté l'architecture interne d'un capteur sans fil pour des applications dédiées aux parkings. Cependant, le module radio utilisé dans ces études est le transceiver CC1100 (un dispositif à courte portée) qui n'inclue pas la technologie LoRa. Un autre modèle d'estimation d'énergie est proposé dans [16]. Le but de ce travail est de réduire la consommation d'énergie des capteurs communicants. Pour économiser l'énergie, S. Mare et al. ont proposé de mettre le module de communication et le microcontrôleur en état de veille (en *idle*) le plus longtemps possible lorsqu'ils ne sont pas actifs. Le travail présente des résultats intéressants, mais la technologie LoRa/LoRaWAN n'est pas intégrée dans cette étude.

Les travaux précédents ont été proposés pour estimer la quantité d'énergie consommée par un capteur communicant. Une grande partie de ces études n'a pas intégré la technologie LoRa dans les modèles énergétiques proposés, elles ont donc utilisé différents émetteurs-récepteurs RF qui sont principalement dédiés à la communication à courte portée. D'autres travaux n'ont pas étudié l'optimisation énergétique des noeuds capteurs. En fait, l'optimisation des paramètres LoRa et LoRaWAN est très intéressante pour réduire la consommation d'énergie du capteur sans fil, ce qui permet d'augmenter sa durée de vie.

Pour estimer et optimiser la quantité d'énergie consommée par le nœud capteur, nous proposons un modèle de consommation d'énergie avec la technologie LoRa/LoRaWAN. Le modèle proposé est basé sur la classe A, la classe qui consomme le moins en LoRa [3]. Notre modèle prend en compte la modélisation de toutes les unités du capteur pour un scénario applicatif réel. Ensuite, différents modes de transmission LoRaWAN sont étudiés pour choisir le mode adapté permettant d'optimiser la consommation d'énergie. Puis, une étude d'optimisation des paramètres LoRa/LoRaWAN (tels que le facteur d'étalement, le taux de codage, la portée de communication et la puissance de transmission) est présentée pour prolonger la durée de vie du capteur. Notre modèle énergétique prend en considération l'accusé de réception et son coût de consommation d'énergie en utilisant différents scénarios LoRaWAN.

3 Conception du nœud capteur

La conception du capteur sans fil est proposée à la figure 2.1. Dans cette étude, on considère un capteur connecté pour le suivi d'ouvrages d'art (mesures de déplacement des pylônes de réseaux électriques et télécommunications). Le capteur peut transmettre les données mesurées à un point d'accès à l'aide d'un module LoRa/LoRaWAN. Afin d'accomplir ses différentes tâches (mesures, traitement et stockage de données, gestion d'énergie et transmission de données mesurées), le capteur est alimenté par une pile [21-22]. On note que la mémoire interne intégrée au microcontrôleur est suffisante pour ce type d'application (on n'utilise pas une mémoire externe).

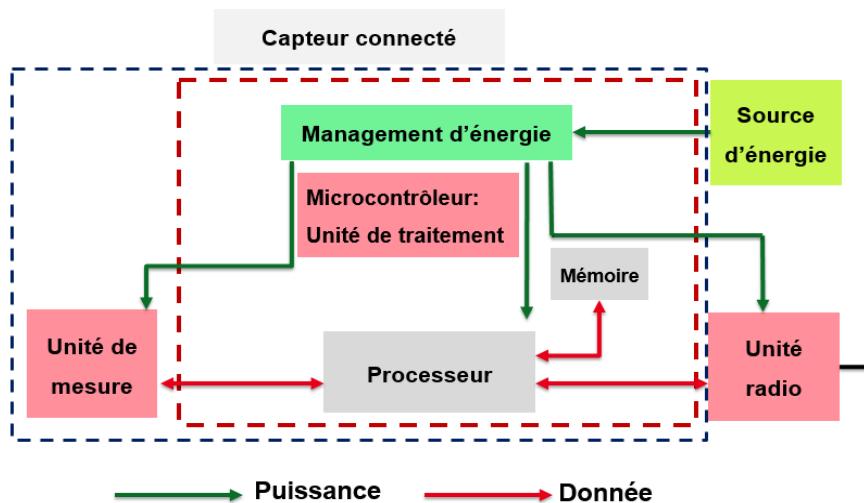


Figure 2.1 – Architecture du noeud capteur.

Dans la littérature [11-12], les trois unités principales qui consomment l'énergie sont respectivement l'unité de mesure, l'unité de traitement et le bloc radio. La consommation de l'unité de mesure est liée à la période de mesure ainsi qu'à la durée de détection de données. Pour la partie de traitement, la dissipation de l'énergie est principalement liée au mode et à la fréquence de fonctionnement du microcontrôleur. Enfin, la consommation de la partie radio est déterminée par les paramètres du protocole LoRa tels que la portée de communication, le facteur d'étalement et le niveau de la puissance de transmission.

4 Modèle de consommation d'énergie

Pour étudier l'autonomie d'un noeud capteur, il est nécessaire de modéliser la consommation de chaque unité du nœud. Dans cette section, nous présentons différents modes de fonctionnement du capteur communicant. Ensuite, l'énergie consommée de chaque mode est calculée, ce qui permet enfin de déduire le modèle final de consommation d'énergie.

4.1 Méthodologie et hypothèses

La figure 2.2 montre un scénario de fonctionnement possible du capteur et permet de définir ses différents modes, qui sont gérés par l'unité de traitement. En effet, afin de

mesurer et transmettre l'information, on commence par réveiller le système de son état d'hibernation. Puis, le capteur fait des mesures périodiques de l'accélération pour vérifier le déplacement de la structure. Ensuite, il fait le traitement nécessaire des données mesurées. Ce traitement dépend principalement de la fréquence du microcontrôleur, qui est égale à 4 MHz dans cette étude. Enfin, le module LoRa est réveillé afin d'émettre l'information et recevoir un acquittement de réception pour vérifier la bonne transmission des données. Afin de minimiser la consommation du nœud capteur, le microcontrôleur est mis en état de veille à la fin du cycle de fonctionnement.

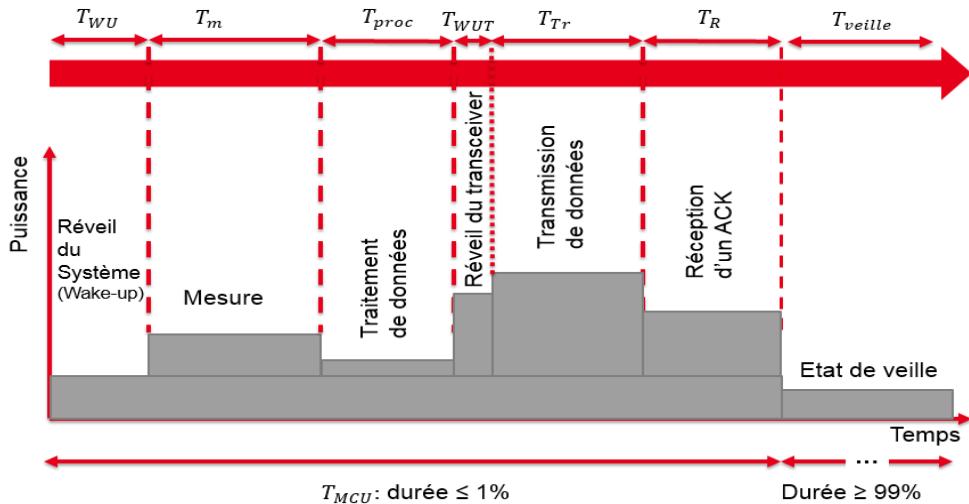


Figure 2.2 – Scénario de fonctionnement du capteur.

Notre modèle de consommation d'énergie repose sur les hypothèses suivantes :

- Comme indiqué dans [1,4,14,15], l'unité de traitement est en état actif tout au long du cycle de fonctionnement pour gérer les différentes parties du système.
- Chaque étape de la séquence de fonctionnement du capteur est caractérisée par une durée constante.
- Le module radio transmet un paquet de données à un niveau de puissance de transmission constant.
- On ne considère pas le stockage local de données dans ce modèle (les transmissions de données mesurées sont faites en temps réel).

4.2 Modèle d'énergie proposé

Pour définir et modéliser les différents modes de fonctionnement du capteur communicant, une première approche consiste à considérer tous ses éléments actifs pendant une durée de temps déterminée et inactifs pendant le reste du cycle. La plupart du temps, le capteur sans fil est en état de veille. Il est donc nécessaire de prendre en compte la consommation de ce mode dans la conception de notre modèle. On note que dans cette étude, tous les périphériques sont alimentés avec la même tension égale à 3.3 V, à l'exception de l'unité capteur qui est alimentée par une tension égale à 2 V. Ainsi, l'énergie totale consommée par le nœud capteur pour un cycle de fonctionnement E_{Totale} est donnée par

l'équation (2.1) :

$$E_{Total} = E_{Veille} + E_{Active}, \quad (2.1)$$

avec E_{Veille} et E_{Active} , respectivement, l'énergie consommée par le capteur durant l'état de veille et l'énergie totale consommée pendant le temps actif du microcontrôleur. E_{Veille} est calculée dans l'équation suivante :

$$E_{Veille} = P_{Veille} \cdot T_{Veille}, \quad (2.2)$$

telles que P_{Veille} et T_{Veille} sont, respectivement, la puissance dissipée et la durée de l'état de veille. Quant à l'énergie E_{Active} , elle correspond à la somme de la consommation énergétique de chaque unité du nœud capteur. Elle est donnée par l'équation (2.3) :

$$E_{Active} = E_{WU} + E_m + E_{proc} + E_{WUT} + E_{Tr} + E_R, \quad (2.3)$$

avec E_{WU} , E_m , E_{proc} , E_{WUT} , E_{Tr} et E_R , respectivement, les énergies consommées pour le réveil de tout le système, la mesure de données, le traitement des données mesurées, le réveil de l'émetteur-récepteur LoRa, le mode de transmission et le mode de réception d'un acquittement ACK.

Ensuite, avant d'effectuer les mesures, le système communicant est réveillé de son état d'hibernation. L'énergie consommée E_{WU} pendant cette phase est donnée par :

$$E_{WU} = P_{ON}(f_{MCU}) \cdot T_{WU}, \quad (2.4)$$

où $P_{ON}(f_{MCU})$ et T_{WU} sont la puissance consommée par le microcontrôleur (qui dépend de la fréquence du microcontrôleur f_{MCU}) et la durée de réveil du capteur. Après l'étape de réveil, le nœud capteur réalise des mesures périodiques de l'accélération. L'équation (2.5) présente la quantité d'énergie E_m consommée pendant cette phase :

$$E_m = (P_{ON}(f_{MCU}) + P_m) \cdot T_m, \quad (2.5)$$

telles que P_m et T_m sont, respectivement, la puissance dissipée et la durée de mesure correspondante. Puis, le microcontrôleur procède au traitement de données mesurées. La durée de traitement $T_{proc}(f_{MCU})$ dépend de la fréquence de fonctionnement du microcontrôleur et du nombre d'instructions noté N_{inst} (soit $T_{proc}(f_{MCU}) = \frac{N_{inst}}{f_{MCU}}$). L'énergie consommée par l'unité de traitement est exprimée dans l'équation (2.6) (on suppose qu'on a une instruction par période d'horloge) :

$$E_{proc} = P_{ON}(f_{MCU}) \cdot T_{proc}(f_{MCU}) \quad (2.6)$$

L'énergie consommée E_{WUT} lors de la période de réveil de l'émetteur-récepteur T_{WUT} est donnée par :

$$E_{WUT} = (P_{ON}(f_{MCU}) + P_{WUT}) \cdot T_{WUT}, \quad (2.7)$$

avec P_{WUT} la puissance consommée pendant le réveil du transceiver LoRa. Puis, l'énergie consommée E_{Tr} par le mode de transmission est donnée par :

$$E_{Tr} = (P_{ON}(f_{MCU}) + P_{Tr}) \cdot T_{Tr}, \quad (2.8)$$

telle que P_{Tr} est la puissance consommée par le mode de transmission et T_{Tr} est sa durée correspondante. Cette durée peut-être calculée par l'équation (2.9) :

$$T_{Tr} = N_{bit} \cdot T_{bit}, \quad (2.9)$$

où N_{bit} et T_{bit} sont, respectivement, le nombre de bits transmis et la durée de transmission d'un bit d'information.

Dans le cas d'une transmission avec accusé de réception, la puissance dissipée par le capteur notée E_R peut-être calculée en utilisant l'équation suivante :

$$E_R = (P_{ON}(f_{MCU}) + P_R).T_R, \quad (2.10)$$

telle que P_R est la puissance consommée par le mode de réception d'un ACK et T_R est le temps correspondant. De plus, l'énergie consommée par l'état actif du microcontrôleur E_{MCU} est estimée par l'équation (2.11) :

$$E_{MCU} = P_{ON}(f_{MCU}).T_{MCU}(f_{MCU}), \quad (2.11)$$

avec $T_{MCU}(f_{MCU})$ la durée de fonctionnement du microcontrôleur. Elle dépend du temps de fonctionnement de toutes les unités du capteur. $T_{MCU}(f_{MCU})$ s'exprime comme suit :

$$T_{MCU}(f_{MCU}) = T_{WU} + T_m + T_{proc}(f_{MCU}) + T_{WUT} + T_{Tr} + T_R, \quad (2.12)$$

Après avoir développé notre modèle énergétique, la section suivante présente les caractéristiques du lien de communication entre le capteur communicant et la station de base.

5 Technologie LoRa/LoRaWAN

5.1 Généralités sur la technologie

LoRa/LoRaWAN est une technologie de communication à longue portée et à faible consommation d'énergie qui utilise la bande de fréquence ISM (Industrial, Scientific and Medical band). L'objectif de cette technologie est de pouvoir augmenter la portée de communication en minimisant la consommation énergétique des systèmes communicants [23]. LoRa utilise la modulation CSS (Chirp Spread Spectrum) qui est basée sur l'étalement de spectre (une méthode de transmission dans laquelle un signal est transmis sur une largeur spectrale plus grande que l'ensemble des fréquences qui composent le signal original) [9]. LoRaWAN est le protocole de communication sans fil mis au point par l'association LoRa Alliance afin de répondre à différents défis posés par la communication à longue portée et à basse consommation dans les applications IoT [3].

La figure 2.3(a) présente l'architecture du réseau LoRaWAN. Les équipements terminaux ou End-devices en anglais (différents types de noeuds capteurs) communiquent avec la station de base (ou la gateway en anglais) via l'interface RF LoRa/LoRaWAN. La station de base transmet les trames de données au serveur via un réseau non-LoRaWAN tel qu'Ethernet, 3G/4G, Wi-Fi, etc. [24]. La figure 2.3(b) montre la pile de communication du protocole LoRaWAN. Comme on peut le constater, la couche physique définit la bande de fréquence ISM (868 MHz en Europe) [25]. La modulation CSS a été mise en oeuvre par l'entreprise Semtech dans la couche de modulation LoRa. Ensuite, les spécifications du protocole de communication LoRaWAN ont été définies dans la couche MAC du protocole [26].

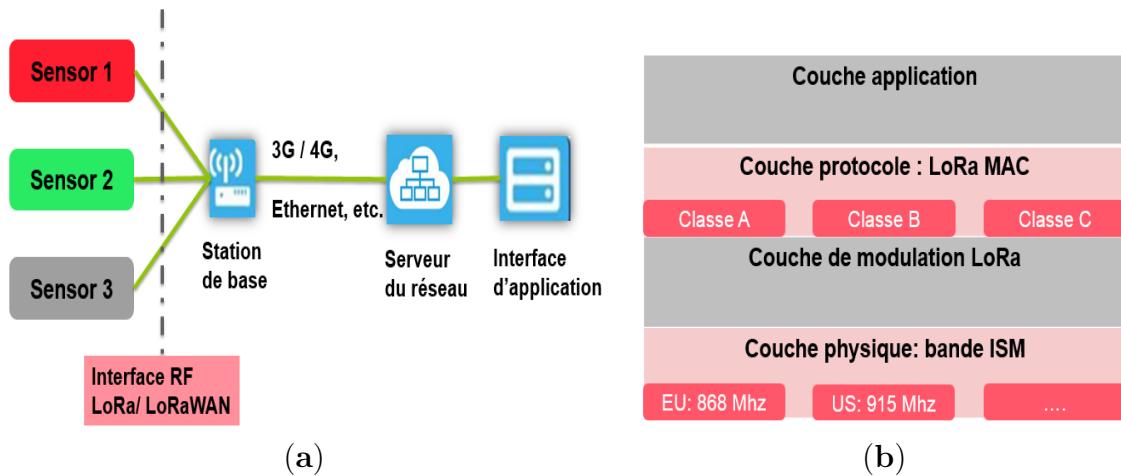


Figure 2.3 – (a) Architecture du réseau LoRaWAN ; et (b) Pile protocolaire LoRaWAN.

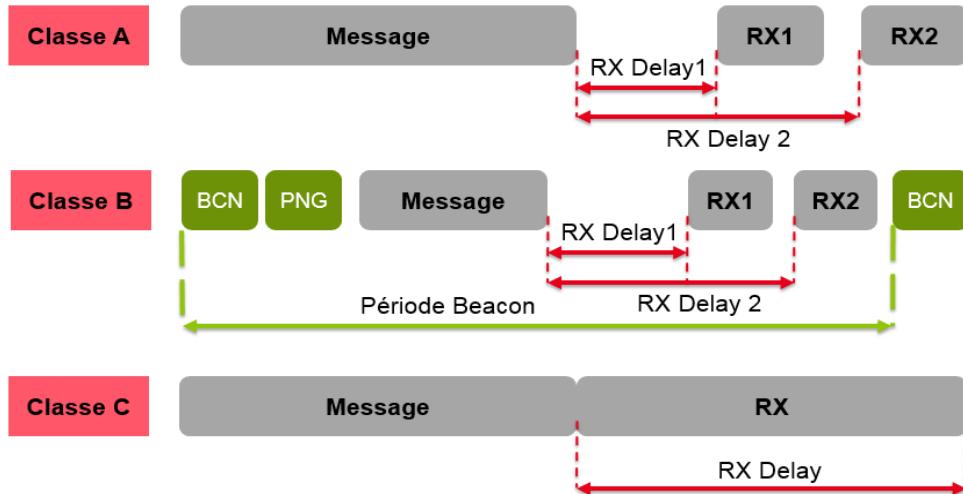


Figure 2.4 – Différentes classes LoRaWAN.

La spécification LoRaWAN définit trois classes d'équipements pour les applications IoT avec des besoins distincts. Ces classes sont présentées à la figure 2.4 et elles peuvent-être brièvement décrites comme suit :

1. Classe A : Dans ce cas, il s'agit d'une communication bi-directionnelle où le nœud capteur peut initier la communication. Après l'envoi d'une trame de données (Message) en lien montant (uplink), le périphérique reçoit deux fenêtres de réception (RX1 et RX2) en lien descendant (downlink) de la part de la passerelle. Ces deux fenêtres RX1 et RX2 permettent de s'assurer de la bonne transmission du message uplink. On note que la classe A a la plus faible consommation d'énergie en LoRa [3, 26-27].
2. Classe B : Le fonctionnement de cette classe est le même que pour la classe A avec l'ajout de messages programmés (ping slot : PNG) en plus des deux fenêtres RX1 et RX2. La communication est permise à travers l'envoi d'une trame beacon de synchronisation par la station de base. Dans ce cas, l'énergie consommée est plus élevée que celle de la classe A [27-28].

3. Classe C : Les périphériques de cette classe ont des fenêtres de réception (RX) ouvertes en permanence, c'est pourquoi les capteurs de cette classe utilisent plus d'énergie que ceux des classes A et B. Ce mode de fonctionnement est réservé aux périphériques qui n'ont pas de contraintes sur la consommation d'énergie. La classe C offre la latence la plus faible en LoRa [27].

Le tableau 2.1 résume les caractéristiques des classes LoRaWAN. Comme indiqué précédemment, toutes les communications sont initiées par le nœud capteur dans le cas de la classe A, alors que la station de base ne peut transmettre que deux fenêtres de réception en liaison descendante [17]. Ces deux fenêtres de réception RX1 et RX2 peuvent-être considérées comme des acquittements de réception [3]. Ensuite, le récepteur radio du nœud capteur reste actif jusqu'à ce que le premier message RX1 soit démodulé. Si ce message est destiné à cet appareil après les vérifications d'adresse et du MIC (Message Integrity Code), le capteur communicant ne démodulera pas la deuxième fenêtre de réception RX2. De plus, la classe A a un impact minimal sur la durée de vie de la batterie du capteur. Pour toutes ces raisons, cette classe est choisie pour notre scénario applicatif où le capteur sans fil va initier la communication avec la passerelle en émettant les valeurs mesurées de l'accélération.

Classe	Description	Consommation d'énergie
Classe A	Le capteur initie la communication, avec deux messages reçus RX1 et RX2	Plus faible consommation d'énergie
Classe B	Même principe que la classe A, avec des trames beacon et des messages PNG	Consommation d'énergie moyenne
Classe C	Les capteurs écoutent en permanence, avec la latence la plus faible pour les liens descendants	Consommation la plus élevée

Table 2.1 – Comparaison entre les classes LoRaWAN.

5.2 Modulation LoRa

5.2.1 Caractéristiques de la modulation

La modulation LoRa a différents paramètres de configuration tels que la fréquence porteuse (Carrier Frequency : CF), le facteur d'étalement (Spreading Factor : SF), la bande passante (Bandwidth : BW) et le taux de codage (Coding Rate : CR) [9-10]. La combinaison de ces paramètres définit différents niveaux de consommation d'énergie et différentes portées de transmission :

- Fréquence porteuse (CF) : CF est la fréquence centrale utilisée lors de la transmission. Pour l'émetteur-récepteur LoRa *SX1272*, CF est comprise entre 863 et 870 MHz en Europe.
- Facteur d'étalement (SF) : c'est le nombre de bits par symbole. Sa valeur est un nombre entier entre 7 et 12. Plus la valeur de SF est grande, plus le récepteur est capable de recevoir à faible rapport signal sur bruit. Ainsi, plus SF est grand, plus le temps de transmission est long.

- Bande passante (BW) : elle représente la plage de fréquences dans la bande de transmission [16]. BW ne peut-être choisie que parmi trois options : 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz. Si une transmission rapide est requise, une valeur de 500 kHz est préférable. Cependant, si une longue portée est nécessaire pour l'application, une valeur de 125 kHz doit être préférée.
- Taux de codage (CR) : l'expression du taux de codage est $CR = \frac{4}{4+n}$, avec n est un entier de 1 à 4. Ce qui signifie que tous les 4 bits utiles sont codés par 5, 6, 7 ou 8 bits. On note que, plus le taux de codage est faible, plus le temps de transmission d'un paquet LoRa est élevé.

En utilisant les valeurs de la BW, du SF et du CR, l'expression du débit binaire (en bit par seconde) noté R_{bit} est donnée par l'équation suivante :

$$R_{bit} = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot CR, \quad (2.13)$$

Le tableau 2.2 présente le calcul de la longueur du code chirp LoRa en utilisant le paramètre SF. Modifier le paramètre SF permet d'avoir un compromis entre l'augmentation de la portée de communication et la diminution du débit binaire. Chaque symbole est étalé par un code chirp ayant une longueur égale à 2^{SF} [3].

Facteur d'étalement (SF)	Longueur du code chirp (bit)
7	128
8	256
9	512
10	1024
11	2048
12	4096

Table 2.2 – Longueur du code chirp (bit) en fonction de SF.

5.2.2 Structure de la trame LoRa

Cette partie présente la définition de la trame LoRa. Cette trame commence par un préambule utilisé pour la synchronisation entre le nœud capteur et la passerelle [9-11]. Après le préambule, un en-tête optionnel indique la taille de la charge utile (appelée payload en anglais, il s'agit des données utiles à transmettre dans la trame LoRa) et quelques informations sur les paramètres LoRa. Cet en-tête est toujours codé avec un $CR = \frac{4}{8}$. Quant à la charge utile, elle est codée avec un CR variable. Ensuite, le contrôle de redondance cyclique (ou Cyclic Redundancy Check : CRC) est envoyé à la fin de la trame. La figure 2.5 montre le contenu de la trame LoRa.

Pour calculer le temps de transmission d'un paquet LoRa (ou time on air en anglais), on commence par le calcul de la taille de la charge utile [3, 22]. Pour une charge utile notée PL (en octet), un facteur d'étalement SF et un taux de codage CR, le nombre de symbole $N_{Payload}$ contenu dans la trame LoRa est donnée par l'équation (2.14) :

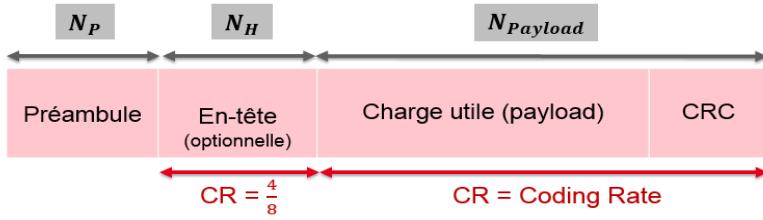


Figure 2.5 – Contenu d'une trame LoRa.

$$N_{Payload} = 8 + \max \left(\text{ceil} \left(\frac{\Theta(PL, SF)}{\Gamma(SF)} \right) \cdot \frac{1}{CR}, 0 \right), \quad (2.14)$$

où ceil est une fonction qui permet d'arrondir au nombre entier supérieur, $\Theta(PL, SF) = 8.PL - 4.SF + 16 + 28 - 20.H$; tels que $H = 0$ quand l'en-tête est activé et $H = 1$ quand l'en-tête est désactivé et $\Gamma(SF) = SF - 2.DE$; tels que DE est un paramètre qui renseigne sur le niveau de SF, c'est-à-dire $DE = 1$ lorsque SF est faible ($SF = 7, 8$ ou 9) et $DE = 0$ lorsque SF est égal à $10, 11$ ou 12 .

Si l'en-tête est désactivé, la durée de transmission d'un paquet LoRa notée T_{Paquet} est la somme des durées du préambule et de la charge utile, soit :

$$T_{Paquet} = T_{Preamble} + T_{Payload}, \quad (2.15)$$

avec $T_{Preamble}$ et $T_{Payload}$, respectivement, la durée du préambule et la durée de la charge utile. $T_{Preamble}$ est donnée par l'équation suivante :

$$T_{Preamble} = (4.25 + N_P).T_{Symbole}, \quad (2.16)$$

où N_P est le nombre de symboles dans le préambule et $T_{Symbole}$ est la période du symbole qui représente le temps pris pour envoyer 2^{SF} chips ((2.17)) :

$$T_{Symbole} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.17)$$

La durée de la charge utile est définie dans l'équation (2.18) :

$$T_{Payload} = N_{Payload}.T_{Symbole} \quad (2.18)$$

Dans ce travail, on introduit l'énergie par bit utile notée E_{bit} , qui est une métrique importante afin d'évaluer la consommation énergétique du nœud capteur. L'expression de E_{bit} est donnée dans l'équation suivante :

$$E_{bit} = \frac{E_{Totale}}{8.PL} = \frac{P_{cons}(P_{Tr}).T_{Paquet}}{8.PL}, \quad (2.19)$$

telles que PL , E_{Totale} et $P_{cons}(P_{Tr})$ sont, respectivement, la taille de la charge utile, l'énergie totale consommée et la puissance totale consommée qui dépend de la puissance de transmission.

En utilisant les équations (2.15), (2.16) et (2.18), l'expression de l'énergie par bit utile est réécrite dans l'équation suivante :

$$E_{bit} = \frac{P_{cons}(P_{Tr}).T_{Paquet}}{8.PL} = \frac{P_{cons}(P_{Tr}).(N_{Payload} + N_P + 4.25).T_{Symbole}}{8.PL} \quad (2.20)$$

En remplaçant $T_{Symbole}$ par son expression dans (2.17), l'énergie E_{bit} peut-être exprimée en fonction de SF comme suit :

$$E_{bit} = \frac{P_{cons}(P_{Tr}).(N_{Payload} + N_P + 4.25).2^{SF}}{8.PL.BW} \quad (2.21)$$

Le tableau 2.3 présente différents niveaux de puissance de transmission et la consommation de puissance correspondante pour le transceiver *SX1272* [29].

Puissance de transmission (dBm)	Puissance consommée (mW)
20	412.5
17	297
13	92.4
7	59.4

Table 2.3 – Caractéristiques du transceiver LoRa *SX1272*.

5.2.3 Transmission avec accusé de réception, portée LoRaWAN et sensibilité

Dans le cas d'une transmission avec accusé de réception, le nœud capteur transmet une trame de données à la passerelle, puis il reçoit deux messages RX1 et RX2 en utilisant la classe A (figure 2.4). Le premier message RX1 est reçu avec un délai (RX Delay 1) égal à 1s pour l'émetteur-récepteur *SX1272*. La deuxième fenêtre de réception RX2 est reçue avec un délai (RX Delay 2) égal à 2s pour le même transceiver [30-31]. Ces deux messages RX1 et RX2 peuvent-être considérés comme des accusés de réception (ACK) [3]. La structure interne d'un message ACK en LoRa/LoRaWAN est décrite à la figure 2.6. On note que l'ACK se termine par le code d'intégrité MIC qui sert à protéger les données transmises.

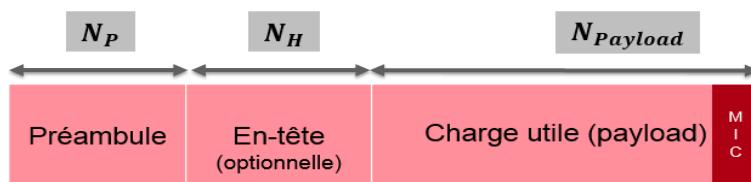


Figure 2.6 – Contenu d'un accusé de réception en LoRa/LoRaWAN.

Dans la littérature, différentes sources indiquent que la portée maximale LoRaWAN peut atteindre des dizaines de kilomètres suivant le transceiver utilisé [27]. La distance de communication d'un système LoRaWAN notée d peut-être calculée à partir de l'expression de l'affaiblissement de propagation (path-loss en anglais) L_{path} :

$$L_{path} = \left(\frac{4\pi f}{c}\right)^2 \cdot d^n, \quad (2.22)$$

où f est la fréquence utilisée, c est la célérité de la lumière et n est l'exposant des pertes par trajet, n est égale à 2 (pour l'espace libre), 3 (pour les zones urbaines) et 6 (pour les zones avec de nombreux obstacles).

Ensuite, pour estimer la portée LoRaWAN, on utilise l'expression du bilan de liaison L_{budget} :

$$L_{budget} = \frac{P_{Tr}}{S_R(SF, BW)}, \quad (2.23)$$

telles que P_{Tr} et $S_R(SF, BW)$ sont, respectivement, la puissance de transmission et la sensibilité du récepteur LoRa qui dépend du facteur d'étalement et de la bande passante. Cette sensibilité est définie comme étant la puissance minimale reçue nécessaire pour détecter le signal émis. Elle peut-être obtenue pour un rapport signal à bruit minimum (Signal to Noise Ratio : SNR) égal à $\frac{E_b}{N_0}$, avec E_b l'énergie par bit utile et N_0 la densité spectrale de puissance du bruit. Soit SNR_0 égal à ce minimum :

$$SNR_0 = \frac{E_b}{N_0} \quad (2.24)$$

On peut écrire $E_b = S_r \cdot T_{bit}$, telles que S_r est la puissance reçue et T_{bit} est la durée de transmission d'un bit. La relation entre T_{bit} et T_{chirp} est $T_{bit} = T_{chirp} \cdot 2^{SF}$. En supposant que $T_{chirp} = \frac{1}{BW}$, l'équation (2.24) peut-être réécrite :

$$SNR_0 = \frac{S_r \cdot 2^{SF}}{NF \cdot k \cdot T \cdot BW} \quad (2.25)$$

En utilisant l'équation (2.25) et en faisant le calcul nécessaire, l'équation (2.26) présente l'expression de la puissance reçue :

$$S_r = \frac{SNR_0 \cdot N \cdot k \cdot T \cdot BW}{2^{SF}} \quad (2.26)$$

Ensuite, la sensibilité de l'émetteur-récepteur SX1272 peut-être définie dans l'équation suivante [29] :

$$S_R(SF, BW) = SNR(SF) \cdot N_0 = SNR(SF) \cdot NF \cdot k \cdot T \cdot BW, \quad (2.27)$$

avec NF, k, T et $SNR(SF)$, respectivement, le facteur de bruit du récepteur, la constante de Boltzmann, la température en Kelvin et le rapport signal à bruit. En comparant les équations (2.26) et (2.27), on peut exprimer l'expression du $SNR(SF)$ par l'équation suivante :

$$SNR(SF) = \frac{SNR_0}{2^{SF}} \quad (2.28)$$

Pour le SX1272 le rapport SNR_0 est égal à 15 dB [29].

Puis, pour avoir la portée de communication maximale d'un système LoRaWAN, on suppose qu'il n'y a pas de gain d'antenne et on égalise les expressions de L_{path} et de L_{budget} dans (2.22) et (2.23). L'équation (2.29) présente la nouvelle expression de L_{path} en fonction du facteur d'étalement SF et de la puissance de transmission P_{Tr} :

$$L_{path} = \frac{P_{Tr}}{S_R(SF, BW)} = \frac{P_{Tr}}{SNR(SF) \cdot NF \cdot k \cdot T \cdot BW} = \frac{P_{Tr} \cdot 2^{SF}}{SNR_0 \cdot NF \cdot k \cdot T \cdot BW} \quad (2.29)$$

En utilisant les équations (2.22), (2.23), (2.27) et (2.29), la portée maximale LoRaWAN notée d peut-être estimée au moyen de l'équation suivante :

$$d = \left(\frac{L_{path}}{\left(\frac{4\pi f}{c} \right)^2} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\left(\frac{c}{4\pi f} \right)^2 \cdot \frac{P_{Tr} \cdot 2^{SF}}{SNR_0 \cdot NF \cdot k \cdot T \cdot BW} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.30)$$

On remarque que cette portée est une fonction croissante du facteur d'étalement SF. Ce qui signifie qu'il faut utiliser des valeurs élevées de SF afin d'atteindre de longues portées avec un système LoRaWAN. Cette portée est aussi une fonction croissante de la puissance de transmission de l'émetteur P_{Tr} .

6 Résultats numériques et discussions

Dans cette section, on commence par décrire le scénario d'application de notre modèle de consommation d'énergie. Ensuite, les résultats de modélisation de LoRa/LoRaWAN sont présentés. Après, on discute les performances de notre modèle énergétique en utilisant différents modes et scénarios LoRaWAN.

6.1 Scénario d'application envisagé

Comme indiqué précédemment, la classe d'application envisagée dans cette étude est la surveillance des ouvrages d'art tels que les ponts, les barrages et les pylônes de réseaux électriques et télécommunications. Pour évaluer les performances de notre modèle développé, on se place dans le cas du contrôle de mouvement des pylônes de réseaux électriques et télécommunications. Le but de ce scénario est de mesurer les valeurs d'accélérations du pylône afin d'éviter sa chute. Le système de mesure correspondant est présenté à la figure 2.7. Dans ce cas, le système est alimenté par une pile de capacité égale à 950 mAh. L'unité de détection est composée d'un accéléromètre numérique à trois axes qui permet de mesurer le déplacement du pylône et envoie les données mesurées (valeurs de l'accélération suivant les trois axes) à l'unité de traitement. Cette dernière récupère les mesures de l'accélération et effectue le traitement nécessaire. Ensuite, l'émetteur-récepteur *SX1272* transmet ces données traitées à la passerelle correspondante. Le tableau 2.4 présente les paramètres principaux de cette application :

Paramètre	Valeur
Nombre de symboles à transmettre	4 (32 bits)
Capacité de la pile	950 mAh
Courant de décharge de la pile	7.5×10^{-3} mA
Puissance de transmission	13 dBm
Tension d'alimentation (MCU, <i>SX1272</i>)	3.3 Volts

Table 2.4 – Caractéristiques principales de l'application.

Pour résumer, le capteur connecté réalise des mesures périodiques de l'accélération. Après la phase de détection, les données mesurées sont traitées puis envoyées au point d'accès à l'aide du transceiver *SX1272*. On note que pour cette application, on transmet 4 symboles à la passerelle (3 symboles qui indiquent les valeurs d'accélération sur les trois axes et 1 symbole qui renseigne l'utilisateur sur l'état général du système).

Le reste du chapitre est dédié à la modélisation de la consommation d'énergie en utilisant la classe A de la technologie LoRa/LoRaWAN. Cette modélisation prend en compte la transmission de données avec des accusés de réception.

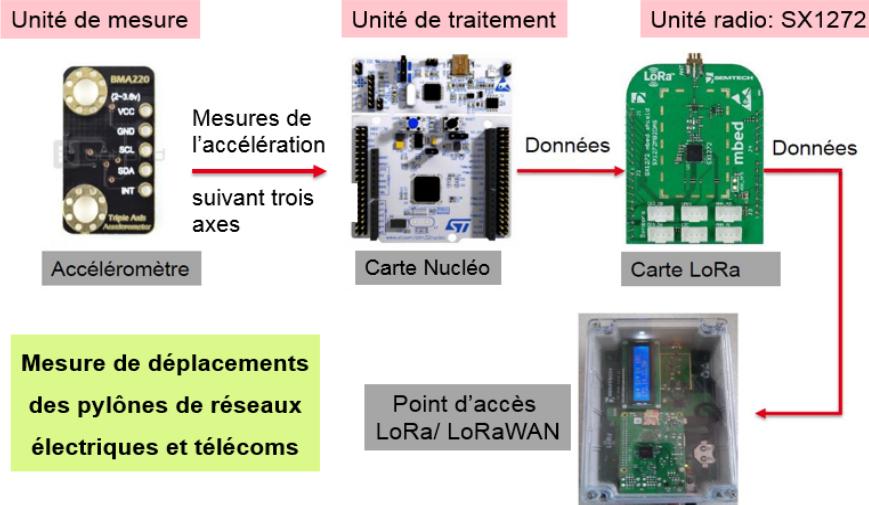


Figure 2.7 – Capteur connecté : système de mesure d'accélération.

6.2 Modélisation de LoRa et LoRaWAN

Dans cette partie, on présente les résultats de modélisation de la modulation LoRa et du protocole LoRaWAN en faisant varier le facteur d'étalement SF, le taux de codage CR et la bande passante BW. L'optimisation de ces paramètres permet de régler la consommation du nœud capteur [22]. Le tableau 2.5 récapitule les caractéristiques de trois modes LoRaWAN pouvant-être utilisés avec l'émetteur-récepteur *SX1272*.

Mode	Caractéristique	Description
Mode 1	$BW = 250 \text{ kHz}$, $SF = 12$, $CR = \frac{4}{5}$	Ce mode permet d'avoir de longues distances de communications avec des débits binaires moyens
Mode 2	$BW = 250 \text{ kHz}$, $SF = 10$, $CR = \frac{4}{5}$	Mode intermédiaire
Mode 3	$BW = 500 \text{ kHz}$, $SF = 7$, $CR = \frac{4}{5}$	Ce mode permet d'avoir des débits binaires élevés mais avec des portées LoRaWAN minimales

Table 2.5 – Différents modes de transmissions pour le transceiver *SX1272*.

6.2.1 Effet de SF et CR sur l'énergie consommée

En utilisant l'équation (2.15), la figure 2.8 montre l'évolution du temps de transmission d'un paquet T_{Paquet} en fonction de la taille de la charge utile pour différentes valeurs de SF et de CR. Dans ce cas, la valeur de la bande passante est fixée à 500 kHz. On remarque que le temps d'émission augmente avec l'augmentation de la valeur de SF, (figure 2.8(a)), ce qui signifie que le nœud capteur consomme plus d'énergie pour transmettre les données

avec des valeurs élevées de SF. L'effet du taux de codage CR sur T_{Paquet} est présenté à la figure 2.8(b). On note que l'augmentation du nombre de bits de codage entraîne une augmentation du temps de transmission du paquet, ce qui se traduit également par une consommation plus élevée du module radio.

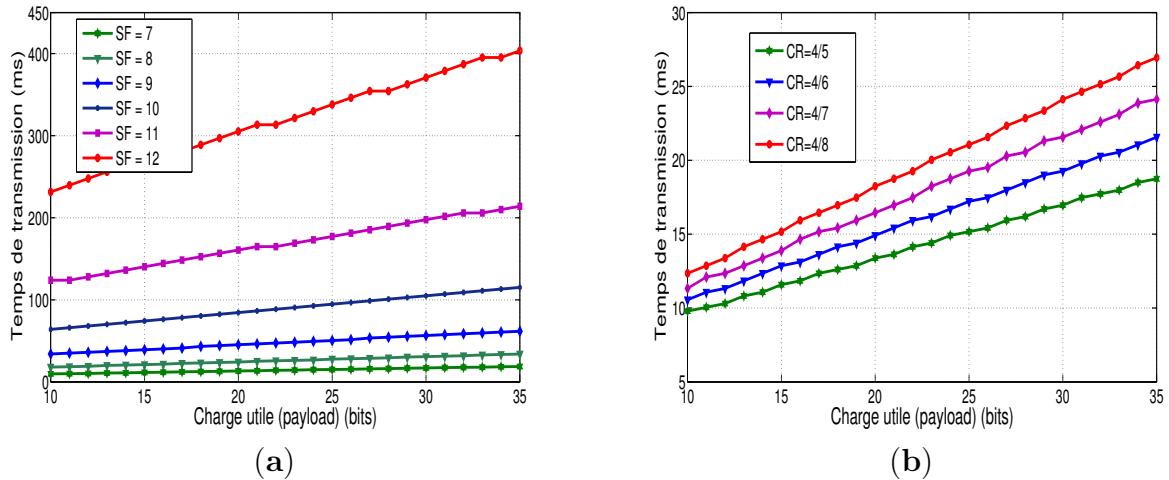


Figure 2.8 – (a) Temps de transmission d'un paquet vs. charge utile pour différentes valeurs de SF ; et (b) Temps de transmission d'un paquet vs. charge utile pour différentes valeurs de CR.

La figure 2.9(a) présente l'évolution de l'énergie par bit utile en fonction de la charge utile pour différentes valeurs de SF. En regardant l'équation (2.21), on note que cette énergie diminue avec l'augmentation du nombre de bits utiles. Ce résultat est illustré par la figure 2.9(b), qui représente l'évolution de l'énergie par bit utile en fonction de SF pour une charge utile constante (égale à 32 bits). Comme indiqué précédemment, plus la valeur de SF est grande, plus le temps nécessaire pour envoyer un paquet est long, plus il faut d'énergie consommée pour transmettre les données.

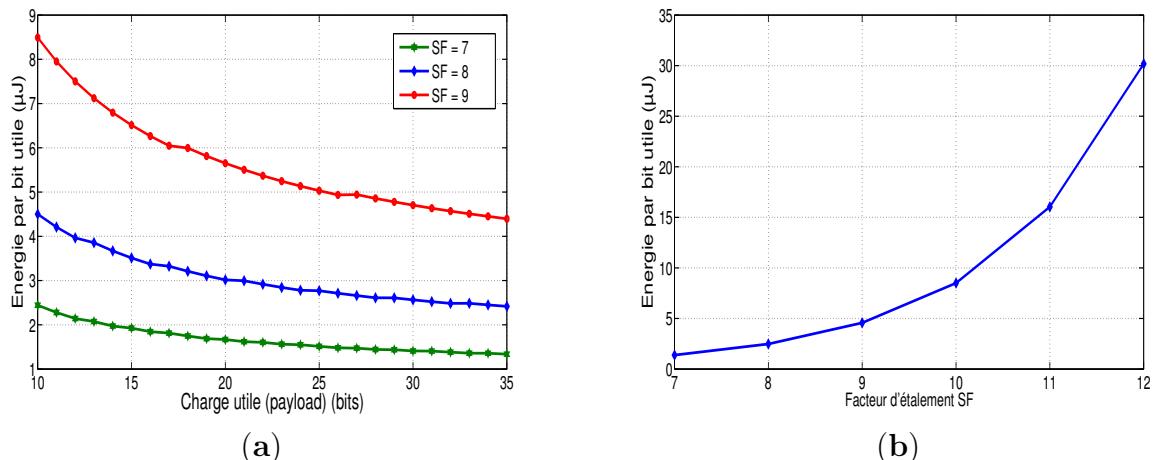


Figure 2.9 – (a) Effet de la variation de la charge utile et de SF sur l'énergie par bit utile, $CR = \frac{4}{5}$; et (b) Évolution de l'énergie par bit utile en fonction de SF.

L'effet du taux de codage CR sur l'énergie par bit utile est donné à la figure 2.10. Lorsque le taux de codage diminue (signifie qu'on augmente le nombre de bits de codage), le temps de transmission d'un paquet et l'énergie consommée augmentent. Ces résultats présentés aux figures 2.8-2.10 montrent que l'optimisation des paramètres LoRa tels que SF, CR et la taille de la charge utile est un élément clé pour réduire l'énergie consommée par le capteur communicant.

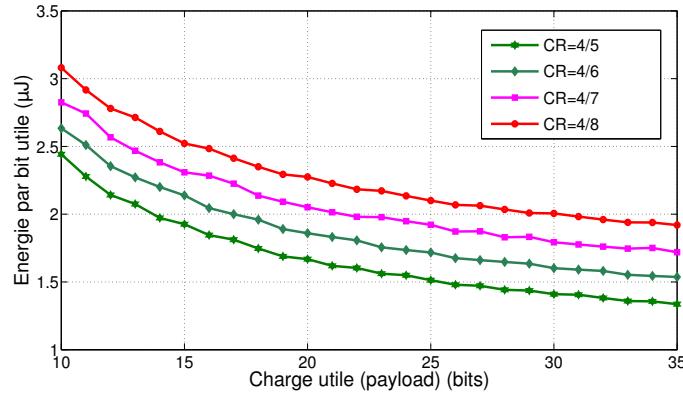


Figure 2.10 – Effet de la variation de CR sur l'énergie par bit utile, pour $SF = 7$ et $BW = 500$ KHz.

6.2.2 Portée de communication LoRaWAN

En se basant sur l'équation (2.30), la figure 2.11 présente la puissance de transmission nécessaire pour émettre les données en fonction de la portée de communication LoRaWAN pour différents facteurs d'étalement SF. Dans ce contexte, on suppose que l'exposant des pertes par trajet n est égal à 3. On note qu'avec le protocole LoRaWAN, la portée maximale théorique pouvant-être atteinte à un niveau de puissance déterminé est obtenue pour un facteur SF égal à 12.

De plus, en regardant la figure 2.11, avec un SF égal à 12 le noeud capteur a besoin d'une puissance de 10 dBm pour transmettre les données à une distance de 5 km par exemple. Cependant, pour un facteur SF égal à 7, le capteur a besoin d'une puissance de 25 dBm pour transmettre les données à la même distance de 5 km.

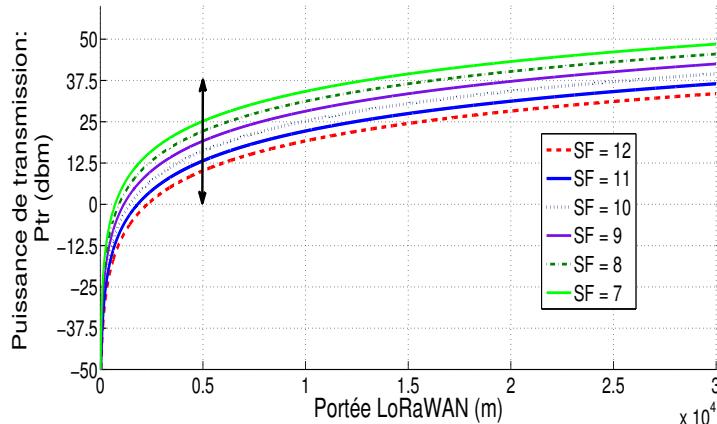


Figure 2.11 – Puissance de transmission nécessaire vs. portée LoRaWAN.

En utilisant l'équation (2.30), l'évolution de la distance de communication maximale LoRaWAN en fonction du facteur d'étalement SF pour différentes puissances de transmission P_{Tr} , pour le SX1272, est présentée à la figure 2.12. On remarque que si SF augmente, la portée LoRaWAN augmente. Pour une valeur constante de SF, cette distance augmente avec l'augmentation de la puissance de transmission. En fait, pour atteindre une distance de communication de 4 km avec SF égal à 9, on peut utiliser deux niveaux de puissance de transmission, qui sont 17 et 20 dBm. Cependant, pour des distances de communication élevées (supérieures à 10 km par exemple), la puissance de transmission doit être fixée à 20 dBm avec SF égal à 12.

On note que toutes ces observations sont très importantes pour la conception de notre modèle énergétique. En effet, dans le cas de notre application, en fixant la distance de transmission maximale et en utilisant les résultats trouvés dans les figures 2.11 et 2.12, on peut connaître le niveau de la puissance de sortie optimale et la valeur du facteur d'étalement à utiliser pour cette application. En fait, il est intéressant de trouver les valeurs de ces deux paramètres permettant de minimiser l'énergie consommée pour une distance de transmission donnée.

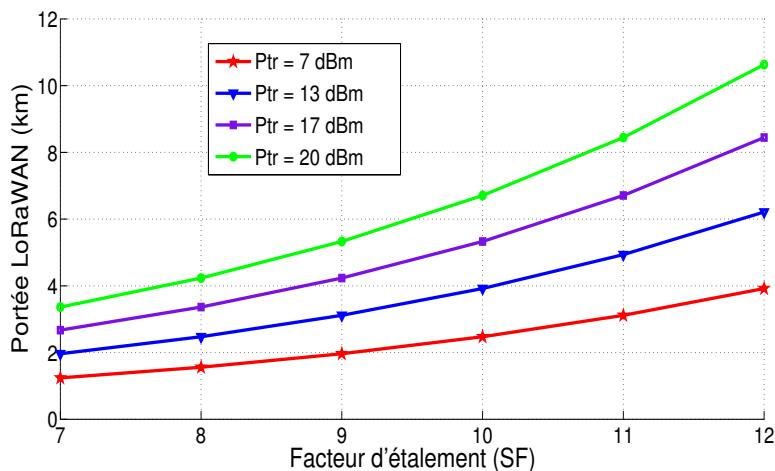


Figure 2.12 – Portée maximale LoRaWAN vs. SF.

En utilisant les équations (2.21) et (2.30), la figure 2.13 montre l'évolution de l'énergie par bit utile en fonction de la portée maximale pour différentes charges utiles et pour deux niveaux de puissance de transmission 7 et 13 dBm. Dans les deux cas, on remarque que la portée maximale est toujours obtenue avec la plus grande valeur de SF = 12. En effet, pour SF égal à 12, on peut atteindre une distance de 4 km avec une puissance de 7 dBm (Figure 2.13(a)) et 6,1 km avec une puissance égale à 13 dBm (Figure 2.13(b)). On constate aussi que si la taille de la charge utile augmente, l'énergie par bit utile diminue pour les valeurs élevées de SF (pour les faibles valeurs de SF, la variation de la charge utile n'a pas trop d'effet sur l'énergie par bit utile). Ensuite, pour atteindre une distance de 3 km avec une charge utile égale à 4 octets, on doit fixer SF égale à 11 avec une puissance de transmission de 7 dBm. Dans ce cas, le capteur consomme 0,21 mJ/bit. Cependant, avec une puissance de transmission de 13 dBm, nous pouvons utiliser SF égal à 9 pour atteindre la même distance de 3 km avec une consommation d'énergie de 0,08 mJ/bit.

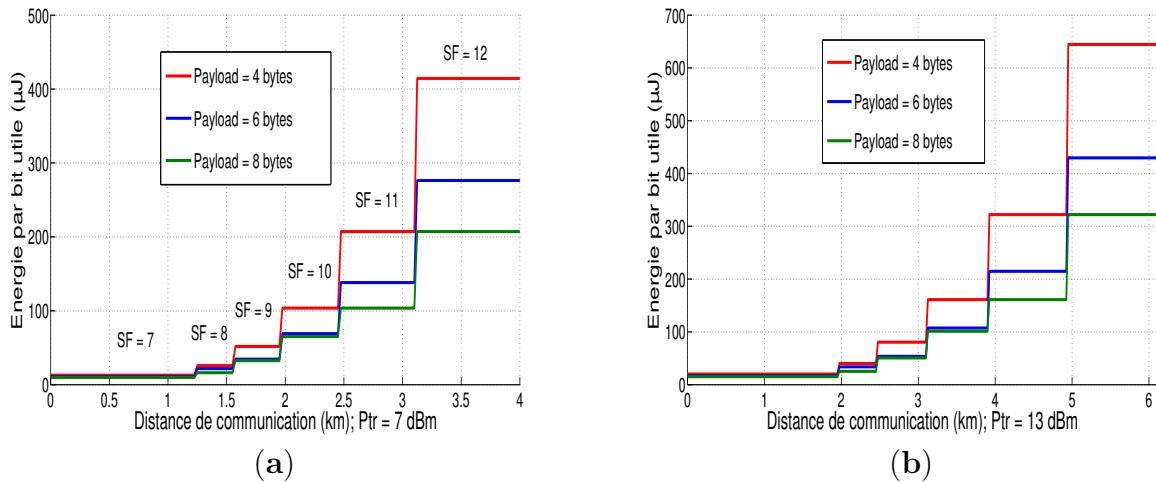


Figure 2.13 – (a) E_{bit} vs. Portée LoRaWAN pour différentes charges utiles ($P_{Tr} = 7 \text{ dBm}$); et **(b)** E_{bit} vs. Portée LoRaWAN pour différentes charges utiles ($P_{Tr} = 13 \text{ dBm}$).

Pour conclure, en utilisant les résultats trouvés aux figures 2.11-2.13, on constate qu'il existe un compromis entre la portée de communication LoRaWAN, le facteur d'étalement SF et la puissance de transmission P_{Tr} . Dans ce cas, l'augmentation de la puissance de transmission est plus intéressante en termes d'énergie consommée que l'augmentation du facteur d'étalement. Ce constat est essentiel pour la suite des travaux, car on peut se référer à ces résultats pour trouver les valeurs optimales des paramètres LoRa/LoRaWAN. Ces valeurs permettent ensuite d'optimiser la consommation énergétique du capteur sans fil et prolonger sa durée de vie.

6.2.3 Résultats de consommation d'énergie

Dans cette partie, on évalue les performances du modèle de consommation d'énergie développé en utilisant le mode 3 du protocole LoRaWAN (Tableau 2.5) car la portée de communication fournie par ce mode est suffisante pour notre cas d'application. De plus, ce mode permet d'économiser l'utilisation de la pile. Ainsi, pour valider le modèle développé, on propose le scénario suivant :

Le capteur communicant réalise des mesures périodiques de l'accélération et transmet les données mesurées toutes les 30s. On note que la fréquence de fonctionnement du microcontrôleur dans cette étude est égale à 4 MHz. Le tableau 2.6 indique les paramètres principaux utilisés pour le modèle. Ces paramètres de puissance et de durée sont donnés dans les fiches techniques de l'accéléromètre numérique *BMA220*, du microcontrôleur *STM32L073* et du transceiver *SX1272* [29,32-33].

Tâche	Durée (ms)	Puissance consommée (mW)
Unité de mesure (<i>BMA220</i>)	25	10.5
Unité de transmission (<i>SX1272</i>)	6.5	92.4
Unité de réception (<i>SX1272</i>)	2.75	33
MCU <i>STM32L073</i> (4 MHz)	33.5	1.8

Table 2.6 – Caractéristiques des tâches principales du nœud capteur.

La figure 2.14 décrit trois scénarios de fonctionnement possibles du capteur sans fil en utilisant la classe A du protocole LoRaWAN :

- Scénario 1 : il consiste à transmettre les données mesurées à la passerelle sans recevoir les deux accusés de réception RX1 et RX2.
- Scénario 2 : pour ce scénario, on transmet les données de l'accélération et on reçoit le premier message RX1 sans recevoir le deuxième message RX2.
- Scénario 3 : il consiste à transmettre les données mesurées et à démoduler le message RX1 (on suppose que RX1 contient des erreurs de transmission). Dans ce cas, le capteur communicant doit démoduler le message RX2 pour s'assurer de la bonne transmission des données mesurées.

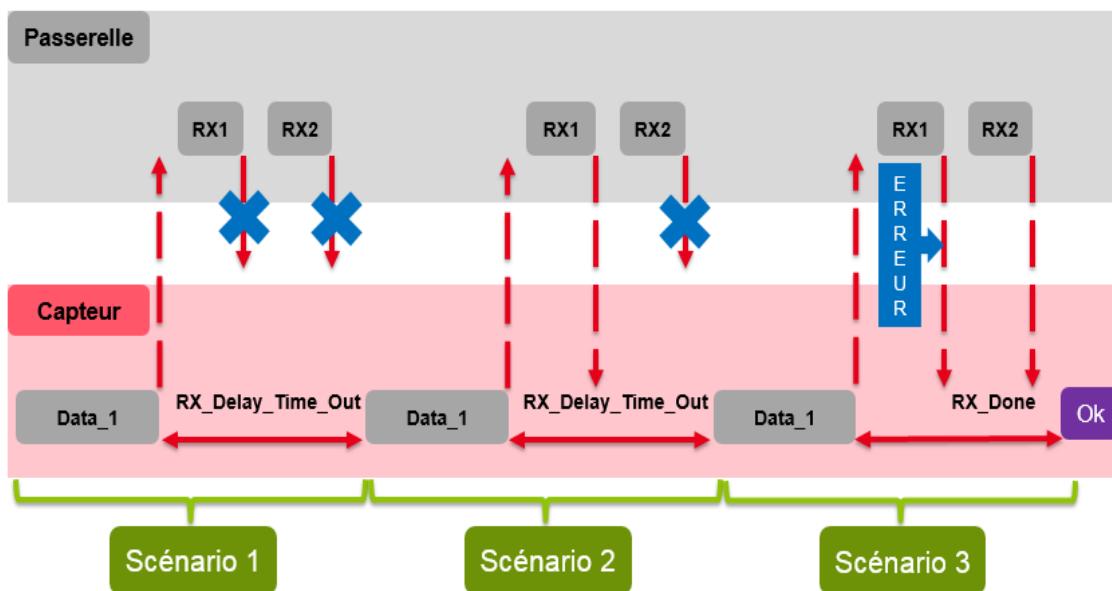


Figure 2.14 – Scénarios proposés (classes A LoRaWAN).

6.2.4 Énergie consommée : Scénario 1

La figure 2.15 présente la quantité de l'énergie consommée pour chaque tâche du capteur communicant. Comme indiqué précédemment, les principaux consommateurs d'énergie sont le microcontrôleur ($E_{MCU} = 0,061 \text{ mJ}$), l'unité capteur ($E_m = 0,26 \text{ mJ}$) et l'unité radio ($E_{Tr} = 0,59 \text{ mJ}$). On note que le bloc émetteur-récepteur LoRa/LoRaWAN est le principal consommateur d'énergie dans le noeud capteur.

Dans ce premier cas (émission d'une trame sans réception d'accusés de réception), la trame de données doit être retransmise par le capteur sans fil. Comme indiqué dans la référence [34], si l'accusé de réception est perdu pour une raison quelconque, la technologie LoRa/LoRaWAN permet de retransmettre la trame huit fois au maximum.

La figure 2.16 montre l'évolution de la durée de vie de la pile en fonction de la période de mesure. Avec une capacité de 950 mAh et une tension d'alimentation au niveau de 3,3 V, l'autonomie du capteur communicant est estimée à 5 ans, 1 mois et 24 jours (61,8 mois) lorsque la période de mesure est égale à 30s.

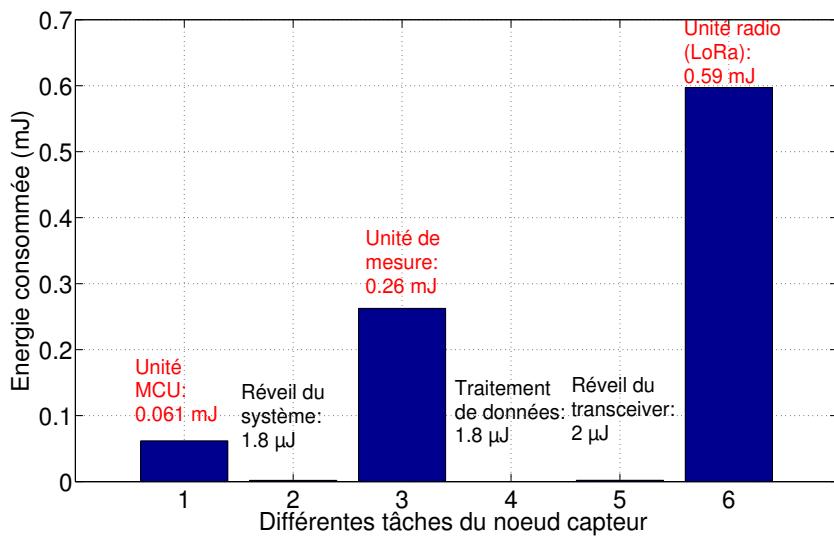


Figure 2.15 – Énergie consommée par le noeud capteur : scénario 1.

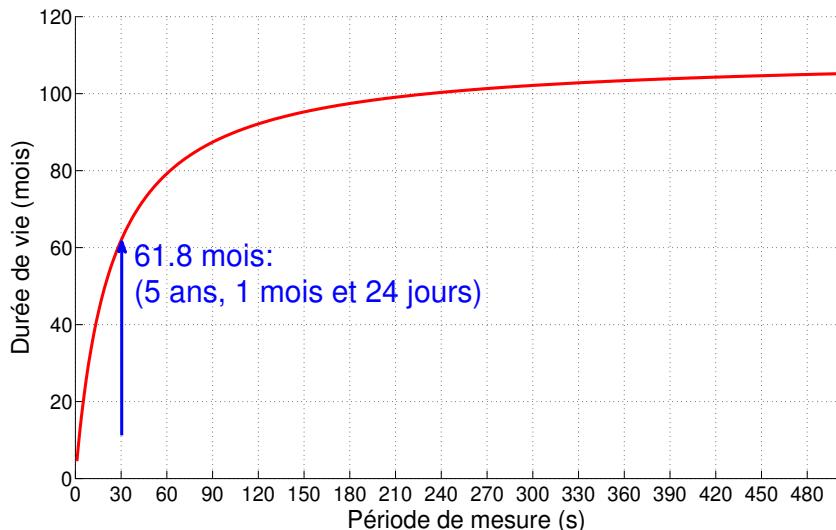


Figure 2.16 – Autonomie du noeud capteur : scénario 1.

6.2.5 Énergie consommée : Scénario 2

Pour ce scénario, on suppose que le capteur communicant transmet les données mesurées à la passerelle, puis il reçoit le premier accusé de réception RX1 pour confirmer la bonne transmission de données (dans ce cas, le noeud capteur ne démodule pas le deuxième accusé de réception RX2).

La consommation d'énergie du capteur communicant est donnée à la figure 2.17. Comme on peut le constater, la différence par rapport au scénario 1 réside dans l'énergie dissipée par le récepteur LoRa/LoRaWAN (avec $E_R = 0,27 \text{ mJ}$) et par l'unité MCU qui reste active pendant le temps de réception du message RX1.

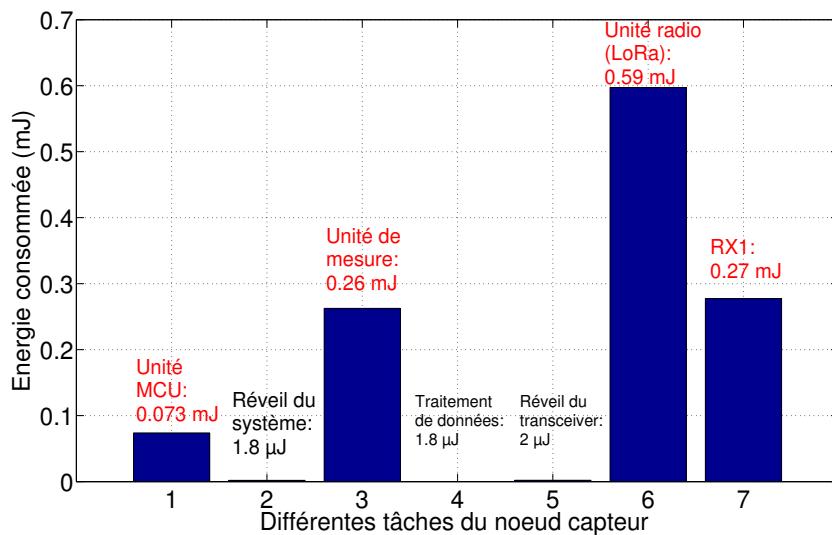


Figure 2.17 – Énergie consommée par le noeud capteur : scénario 2.

La figure 2.18 présente la durée de vie du noeud capteur en utilisant les mêmes caractéristiques de la pile (la capacité est égale à 950 mAh et la tension d'alimentation est au niveau de 3,3 V). L'autonomie du capteur est estimée à 4 ans, 6 mois et 12 jours (54,4 mois) pour la même période de mesure de 30s, soit 7,4 mois de moins que le scénario 1 (c'est-à-dire qu'on a une perte égale à 12 % de la durée de vie de la source d'alimentation par rapport au scénario 1).

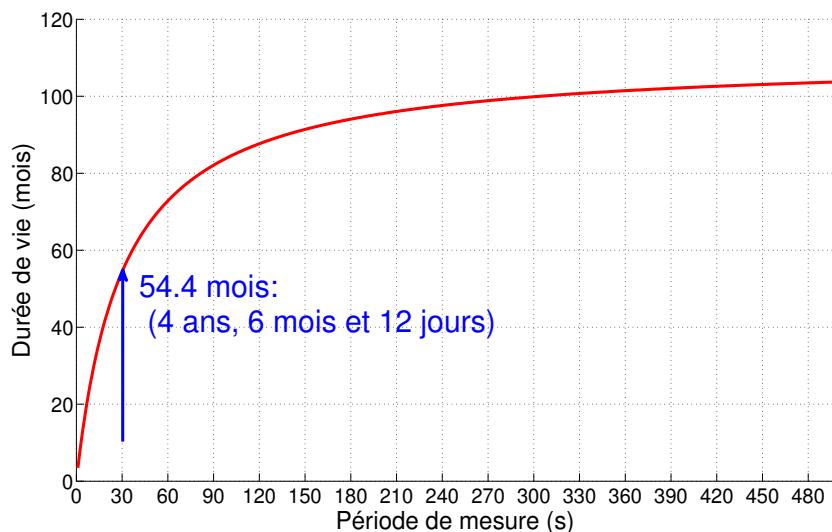


Figure 2.18 – Autonomie du noeud capteur : scénario 2.

6.2.6 Énergie consommée : Scénario 3

Pour ce scénario, le capteur communiquant transmet les données de l'accélération à la station de base et reçoit le premier accusé de réception RX1 qui contient des erreurs de transmission par exemple. Le noeud capteur doit alors recevoir et démoduler le deuxième

accusé de réception RX2 pour vérifier la bonne transmission de données (ce qui signifie qu'il consomme plus d'énergie que le scénario 2).

L'énergie dissipée par le capteur communicant dans ce cas est donnée à la figure 2.19. On remarque que l'énergie consommée par le récepteur LoRa/LoRaWAN est le double de celle donnée dans le scénario 2 ($E_R = 0,54 \text{ mJ}$).

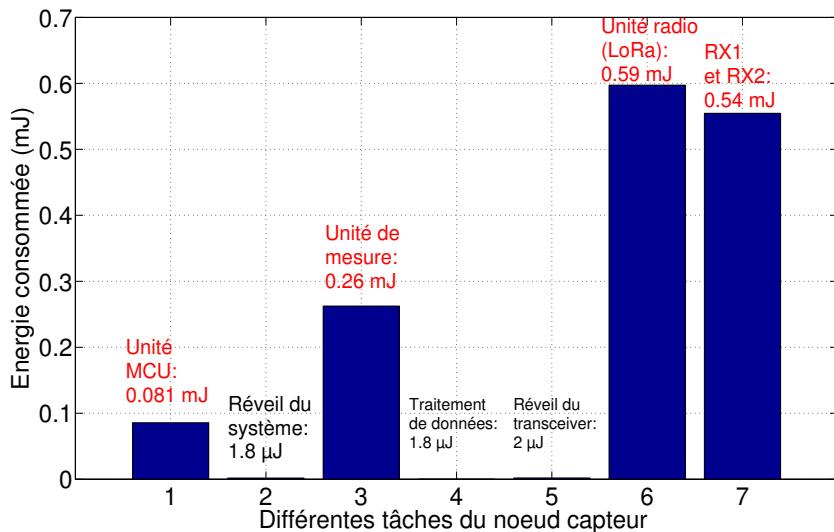


Figure 2.19 – Énergie consommée par le noeud capteur : scénario 3.

La durée de vie du noeud capteur pour ce scénario est donnée à la figure 2.20. L'autonomie du noeud est estimée à 4 ans et 21 jours (48,7 mois) pour ce cas de figure (c'est-à-dire qu'on a une perte égale à 22,2 % de la vie du système par rapport au scénario 1).

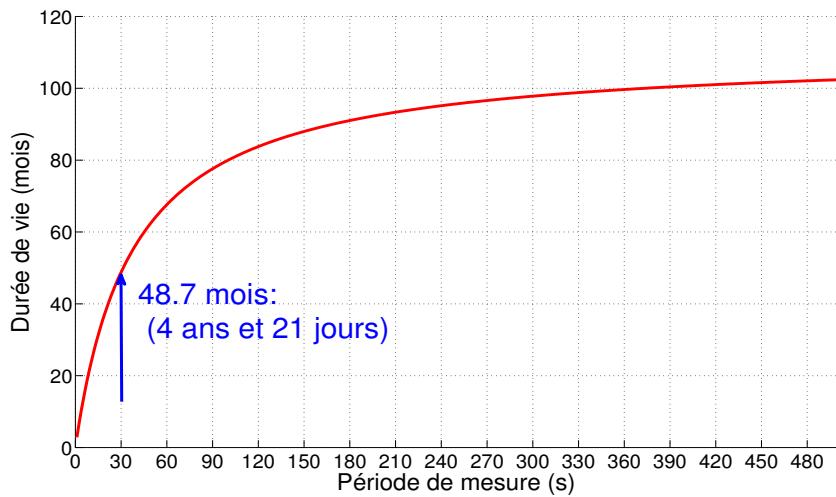


Figure 2.20 – Autonomie du noeud capteur : scénario 3.

6.2.7 Comparaison entre les scénarios proposés

Le tableau 2.7 présente les résultats de comparaison entre les trois scénarios proposés. On constate que la durée de vie du capteur communicant dans le cas du scénario 1 est

supérieure à celle des scénarios 2 et 3. Ces résultats montrent le coût de la consommation énergétique lié à la réception d'un message (un accusé de réception par exemple) de la part de la station de base.

Scénario	Différentes caractéristiques	Consommation d'énergie, unité RF (mJ)	Autonomie (mois)
Scénario 1	TX; RX1 et RX2 not done	$E_{Tr} = 0.59 ; E_R = 0$	61.8
Scénario 2	TX; RX1 done; RX2 not done	$E_{Tr} = 0.59 ; E_R = 0.27$	54.4
Scénario 3	TX; RX1 not done; RX2 done	$E_{Tr} = 0.59 ; E_R = 0.54$	48.7

Table 2.7 – Comparaison entre les différents scénarios.

L'équation (2.31) montre l'expression de l'énergie totale consommée E_{total} en fonction de la probabilité d'obtenir le scénario 3 notée p :

$$E_{total} = (1 - p).E_{scenario2} + p.E_{scenario3}, \quad (2.31)$$

telles que $E_{scenario2}$ et $E_{scenario3}$ sont, respectivement, les énergies totales consommées pour les scénarios 2 et 3.

En utilisant les résultats obtenus dans les sections 6.2.5 et 6.2.6, l'autonomie du capteur sans fil en fonction de la probabilité p est donnée à la figure 2.21. On voit bien que la durée de vie du capteur diminue de 54,4 mois lorsque $p = 0$ (probabilité d'avoir le scénario 2) à 48,7 mois lorsque $p = 1$ (probabilité d'avoir le scénario 3).

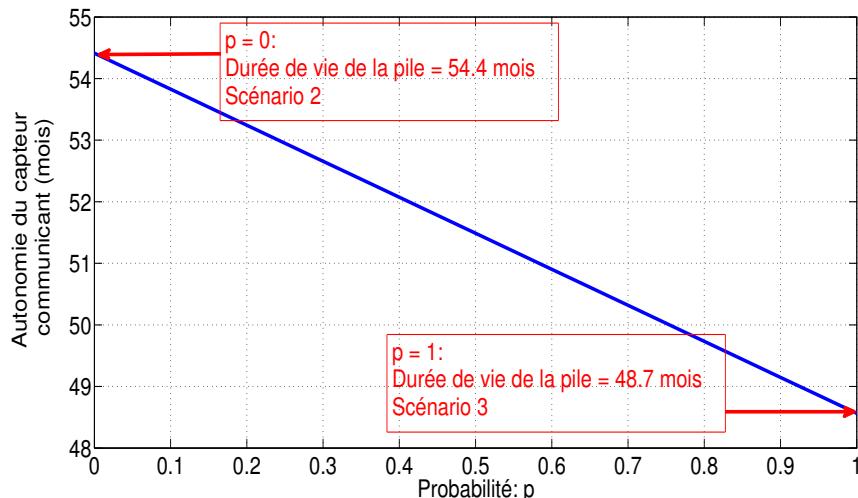


Figure 2.21 – Durée de vie de la pile vs. probabilité d'obtenir le scénario 3.

On note que dans le cas idéal (transmission de données mesurées avec accusé de réception et sans erreurs de transmission), le scénario 2 est le plus fréquent (ce qui signifie que la probabilité p est proche de 0). Ainsi, le scénario 2 est sélectionné pour le reste de cette étude.

6.3 Effet du mode LoRaWAN sur l'autonomie du capteur

Le tableau 2.8 montre l'effet de différents modes LoRaWAN sur l'autonomie du capteur communicant. Comme défini dans le tableau 2.5, le mode 3 permet d'avoir des portées LoRaWAN minimales avec des débits binaires élevés. Ce mode est utilisé dans le cas où l'utilisateur dispose de la passerelle (transmission de données à l'échelle d'un bâtiment). On remarque que le mode 3 a un impact minimal sur la vie du système communicant (l'autonomie du noeud capteur peut atteindre 4 ans, 6 mois et 12 jours).

Cependant, pour transmettre l'information à des distances très élevées (le cas où on doit passer par une passerelle qui est installée chez un opérateur de télécommunications), l'utilisateur doit utiliser le mode 1. Ce mode donne la durée de vie la plus courte du système (2 mois et 6 jours) en raison de la valeur élevée de SF (le capteur communicant consomme trop d'énergie dans ce cas).

Mode	Énergie totale consommée par transmission (mJ)	Autonomie du nœud capteur (mois)
Mode 1	115	2.2 (2 mois et 6 jours)
Mode 2	14.7	8.2 (8 mois et 6 jours)
Mode 3	1.2	54.4 (4 ans, 6 mois et 12 jours)

Table 2.8 – Comparaison entre différents modes LoRaWAN (en utilisant le scénario 2).

Pour résumer les résultats précédents, on utilise le tableau 2.9 qui présente la durée de vie du capteur communicant (en mois) en utilisant les trois scénarios de fonctionnement (figure 2.14) et les trois modes de transmission LoRa/LoRaWAN (tableau 2.4).

Mode/scénario	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Mode 1	3.2	2.2	1.6
Mode 2	11	8.2	6.3
Mode 3	61.8	54.4	48.5

Table 2.9 – Autonomie du système communicant (en mois) en utilisant différents scénarios et modes de transmission LoRa/LoRaWAN.

Dans un premier temps, on remarque que le scénario 1 donne les durées de vie les plus élevées par rapport aux autres scénarios en utilisant les trois modes de transmission. Cela est expliqué par la non-réception d'un accusé de réception en utilisant ce scénario, ce qui minimise la quantité d'énergie totale consommée et permet d'augmenter l'autonomie du système. Ce scénario n'est pas réaliste car, en utilisant la classe A, le capteur communicant doit recevoir au moins un accusé de réception de la part de la passerelle pour s'assurer de la bonne transmission des données envoyées.

Ensuite, on voit bien que le scénario 2 (transmission d'un message avec réception d'un seul accusé de réception RX1) permet d'obtenir des durées de vie plus élevées par rapport au scénario 3 (transmission d'un message avec réception de deux accusés de réception RX1 et RX2) en utilisant les trois modes de transmission.

6.4 Effet de la fréquence du microcontrôleur sur la vie du capteur

Pour montrer l'effet de la fréquence de fonctionnement du microcontrôleur f_{MCU} sur l'autonomie du nœud capteur, regardons la figure 2.22. On rappelle que la tension d'alimentation est égale à 3,3V dans ce cas. On note que la consommation d'énergie du capteur sans fil dépend de la vitesse du microcontrôleur (elle augmente avec la fréquence). En fait, plus la fréquence du microcontrôleur est élevée, plus le temps de traitement est court (c'est-à-dire que le temps de traitement $T_{proc}(f_{MCU})$ diminue) ce qui entraîne la diminution de la durée de fonctionnement du microcontrôleur $T_{MCU}(f_{MCU})$. Cependant, le niveau de la puissance dissipée par le MCU notée $P_{ON}(f_{MCU})$ augmente plus proportionnellement à la fréquence. Par conséquent, l'énergie totale consommée par l'unité de traitement augmente avec l'augmentation de la fréquence du MCU. Dans ce contexte, la durée de vie du capteur diminue.

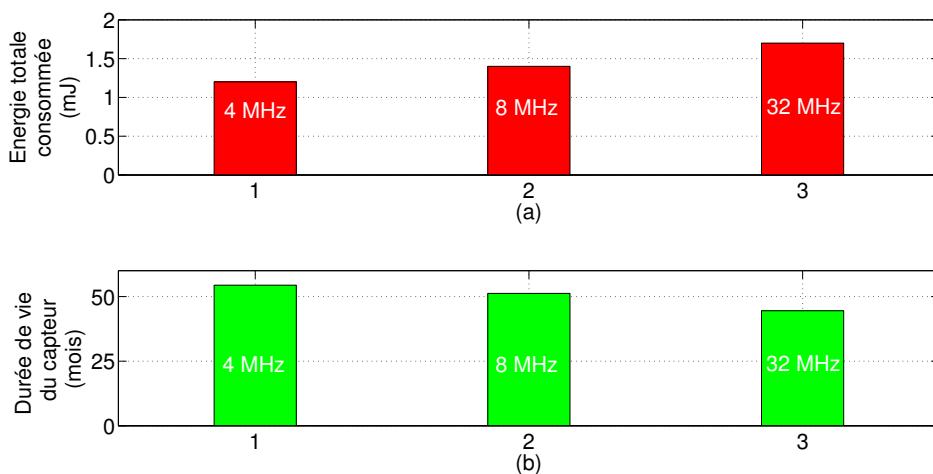


Figure 2.22 – Effet de la fréquence du MCU sur la durée de vie du nœud capteur (Mode 3, Scénario 2).

7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle de consommation d'énergie pour les nœuds capteurs en utilisant la technologie LoRa/LoRaWAN. Ce modèle, qui est basé sur la classe A, est validé par différents modes et scénarios LoRaWAN pour une classe d'application dédiée à l'IoT. En effet, pour évaluer la consommation d'énergie du nœud capteur, nous avons proposé trois scénarios LoRaWAN. Nous avons conclu par la suite que la réception d'un accusé de réception consomme une quantité considérable d'énergie, ce qui réduit la durée de vie du capteur. Ensuite, le modèle d'énergie proposé est évalué en utilisant différents modes LoRaWAN. Le mode à utiliser doit être bien choisi suivant les contraintes applicatives afin de minimiser l'énergie dissipée par le capteur communicant.

Le modèle développé permet également d'étudier l'impact des choix matériels et logiciels sur l'autonomie des capteurs communicants. Nous avons montré à travers les résultats numériques que l'énergie consommée change avec différents paramètres LoRa/LoRaWAN

tels que le facteur d'étalement, le taux de codage, la charge utile et la bande passante. L'optimisation de ces paramètres est vitale pour réduire la consommation d'énergie du capteur.

Ensuite, nous avons montré à travers ce chapitre que la fréquence de fonctionnement du microcontrôleur joue un rôle important dans l'optimisation de la durée de vie du nœud capteur. L'augmentation de la fréquence du microcontrôleur cause la diminution de l'énergie consommée, ce qui réduit l'autonomie du nœud capteur.

Puis, les travaux d'optimisation énergétique ont abouti à un compromis entre la portée de communication, le facteur d'étalement et la puissance de transmission. Cette étude d'optimisation est très intéressante pour choisir et configurer les paramètres LoRa. En fait, dans notre cas d'application, l'augmentation de la puissance de transmission est plus intéressante en termes d'énergie consommée par bit utile que l'augmentation du facteur d'étalement.

Enfin, pour appliquer le modèle énergétique proposé, nous avons développé un capteur connecté pour les applications IoT. Cette étude traite une application spécifique dédiée à la surveillance des pylônes de réseaux électriques et télécommunications. Le modèle développé permet d'estimer la quantité d'énergie consommée ainsi que la durée de vie du système communicant. Nous avons montré que cette durée de vie est limitée à quelques années voire même quelques mois suivant le scénario et le mode de transmission utilisé. Pour remédier à ce problème de limitation de vies des nœuds capteurs, nous allons envisager un système de récupération et de gestion multi-sources d'énergie dans le reste de ce rapport.

Bibliographie : chapitre 2

- [1] G. Terrasson, R. Brianda, S. Basrourb and O. Arrijuriaa. Energy Model for the Design of Ultra-Low Power Nodes forWireless Sensor Networks. Procedia Chem. 2009, 1, 1195-1198.
- [2] N.O. Moises, G. Arturo, M. Mickael and D. Andrzej. Evaluating LoRa Energy Efficiency for Adaptive Networks : From Star to Mesh Topologies. In Proceedings of the IEEE 13th International Conference onWireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Rome, Italy, 9-11 October 2017.
- [3] T. Bouguera, J.-F. Diouris, J.-J. Chaillout, R. Jaouadi and G. Andrieux. Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN. Sensors 2018, 18(7) ; pp.2104.
- [4] V. Dupe, G. Terrasson, I. Estevez and R. Briand. Autonomy constraint in micro-sensor design : From decision making to energy optimization. In Proceedings of the IEEE International Conference on Green Computing and Communications, Besancon, France, 20-23 November 2012 ; pp. 647-650.
- [5] M. Lossec, Micro-kinetic generator : Modeling, energy conversion optimization and design considerations. In Proceedings of the 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Valletta, Malta, 25-28 April 2010 ; pp. 1513-1521.
- [6] R. Oliveira, L. Guardalben and S. Sargento. Long Range Communications in Urban and Rural Environments. In Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications Conference (ISCC), Heraklion, Greece, 3-6 July 2017.
- [7] M. Elodie, M. Mickael, G. Roberto and D. Andrzej. Comparison of the Device Lifetime inWireless Networks for the Internet of Things. IEEE Access 2017, 5, 7097-7113.
- [8] B. Martin and R. Utz. LoRa Transmission Parameter Selection. In Proceedings of the 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, Ottawa, ON, Canada, 5-7 June 2017 ; pp. 27-34.
- [9] K. Oratile, I. Bassey and M. Adnan. IoT Devices and Applications based on LoRa. In Proceedings of the IEEE Industrial Eletronics Society, IECON, Beijing, China, 29 October-1 November 2017 ; pp. 6107-6112.
- [10] B. Talha, A. Mehmet and A. Muhammed. LoRaWAN as an e-Health Communication Technology. In Proceedings of the IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference, Turin, Italy, 4-8 July 2017 ; pp. 310-314.
- [11] A. Augustin, J. Yi and T. Clausen. A study of LoRa : Long range low power networks for the Internet of Things. Sensors 2016, 16, 1466.
- [12] J. Haxhibeqiri, F. Van den Abeele, I. Moerman and J. Hoebeke. LoRa Scalability : A Simulation Model Based on Interference Measurements. Sensors 2017, 17, 1193.
- [13] K.E. Nolan, W. Guibene and M.Y. Kelly. An evaluation of low power wide area network technologies for the Internet of Things. In Proceedings of the IEEE International ofWireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Paphos, Cyprus, 5-9 September 2016 ; pp. 440-444.
- [14] G. Terrasson, A. Liaria and R. Briand. System Level Dimensioning of Low Power Biomedical Body Sensor Networks. In Proceedings of the Faible Tension Faible Consommation Conference (FTFC), Monaco, France, 4-6 May 2014.
- [15] G. Terrasson, R. Briand, S. Basrourb and V. Dupea. A Top-Down Approach for the Design of Low-Power Microsensor Nodes for Wireless Sensor Network. In Proceedings

of the 2009 Forum on Specification, Design Languages (FDL), Sophia Antipolis, France, 22-24 September 2009.

[16] S. Mare, D. Vladimir and G. Cvetan. Energy Consumption Estimation of Wireless Sensor Networks in Greenhouse Crop Production. In Proceedings of the IEEE EUROCON 17th International Conference on Smart Technologies, Ohrid, Macedonia, 6-8 July 2017; pp. 870-874.

[17] S.C. Phui, B. Johan, H. Chris and F. Jeroen. Comparison of LoRaWAN Classes and their Power Consumption. In Proceedings of the IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology (SCVT), Leuven, Belgium, 14 November 2017.

[18] P. Neumann, J. Montavont and T. Noël. Indoor deployment of low-power wide area networks (LPWAN) : A LoRaWAN case study. In Proceedings of the IEEE 12th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), New York, NY, USA, 17-19 October 2016; pp. 2-9.

[19] K. Mikhaylov and J.Petajajarvi. Design and implementation of the plug-play enabled flexible modular wireless sensor and actuator network platform. Asian J. Control 2017, 19, 1393-1411.

[20] G. Johnny, V.T. Patrick, V. Jo and R. Hendrik. LoRa Mobile-To-Base-Station Channel Characterization in the Antarctic. Sensors 2017, 17, 1903.

[21] L. Casals, B. Mir, V. Vidal and C. Gomez, Modeling the Energy Performance of LoRaWAN. Sensors 2017, 17, 2364.

[22] T. Bouguera, J.-F. Diouris, J.-J. Chaillout and G. Andrieux. Energy consumption modeling for communicating sensors using LoRa technology. In Proceedings of the IEEE CAMA Conference, Västerås, Sweden, 3-6 September 2018; pp. 1-4.

[23] J. Wixted, P. Kinnaird, H. Larijani, A. Tait, A. Ahmadinia and N. Strachan. Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks. In Proceedings of the IEEE SENSORS, Orlando, FL, USA, 30 October-3 November 2016; pp. 1-3.

[24] V. Nuttakit, T. Panwit and P. Chotipat. Experimental Performance Evaluation of LoRaWAN : A Case Study in Bangkok. In Proceedings of the IEEE 14th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE), Nakhon Si Thammarat, Thailand, 12-14 July 2017; pp. 1-4.

[25] AN1200.22 LoRa Modulation Basics ; SEMTECH Document. Available online : <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf> (accessed on 23 october 2018).

[26] L. Alexandru and P. Valentin. A LoRaWAN : Long Range Wide Area Networks Study. In Proceedings of the International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN), Iasi, Romania, 11-13 October 2017; pp. 417-420.

[27] P. Albert and H. Florian. Practical Limitations for Deployment of LoRa Gateways. In Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Society, Naples, Italy, 27-29 September 2017; pp. 1-5.

[28] S. Jonathan, P. Joel and C. Rodrigues. LoRaWAN : A Low Power WAN Protocol for Internet of Things : A Review and Opportunities. In Proceedings of the Computer and Energy Science (SpliTech), Split, Croatia, 12-14 July 2017; pp. 1-5.

[29] SX1272 Development Kit User Guide ; SEMTECH Document. Available online : <https://www.semtech.com/uploads/documents/sx1272ska-userguide.pdf> (accessed on 23 october 2018).

[30] LoRa Specifications ; LoRa Alliance. Available online : (accessed on 23 october

2018).

[31] Wasp mote LoRa 868MHz 915MHz SX1272 Networking Guide. Available online : (accessed on 29 June 2018).

[32] BMA220 Digital, Triaxial Acceleration Sensor Data Sheet. Available online : <http://image.dfrobot.com/image/data/SEN0168/BMA220%20datasheet.pdf> (accessed on 23 october 2018).

[33] STM32L073x8 STM32L073xB STM32L073xZ Data Sheet ; ST Microelectronics Document. Online : <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l073v8.pdf> (accessed on 23 october 2018).

[34] I.P. Alexandru, R. Usman, K. Parag and S. Mahesh. Does Bidirectional Traffic Do More Harm Than Good in LoRaWAN Based LPWA Networks ? In Proceedings of the IEEE GLOBECOM, Singapore, 4-8 December 2017 ; pp. 3-5.

Chapitre 3

Récupération d'énergie solaire pour les capteurs communicants

1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différents aspects de la récupération d'énergie solaire pour alimenter les capteurs communicants. Nous commençons, dans la première partie, par rappeler les différentes technologies de conversion d'énergie solaire. Nous décrivons ensuite le principe de fonctionnement d'une cellule solaire en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque et l'influence sur ses caractéristiques de différents paramètres tels que la température et l'éclairement. Puis, nous décrivons les différentes performances d'un panneau solaire (ou générateur photovoltaïque) à savoir l'influence de la mise en série et en parallèle des cellules photovoltaïques sur les paramètres courant-tension et puissance-tension du panneau.

Dans la deuxième partie du chapitre, on s'intéresse à la modélisation du panneau solaire puis à celle de l'éclairement. En effet, il s'agit de modéliser et d'estimer la quantité d'énergie solaire récupérée à travers la caractérisation des modules solaires photovoltaïques. Il est également nécessaire de connaître l'énergie incidente. Nous avons alors basé nos modèles de caractérisation sur des bases de données qui montrent l'évolution de l'éclairement en fonction du temps dans différentes régions françaises. Les modèles développés sont ensuite validés par des simulations et des mesures d'énergie solaire. L'énergie récupérée est adaptée par des convertisseurs DC/DC pour être stockée dans des super-capacités ou des batteries.

2 Généralités

2.1 Besoin d'énergie solaire pour les capteurs communicants

Au cours des dernières décennies, la réduction de la consommation énergétique des objets connectés est devenue un élément clé dans le domaine de l'IoT. Cela a pour but de fournir suffisamment d'énergie aux systèmes communicants afin de prolonger leur durée de vie [1]. Afin de s'affranchir de l'utilisation des batteries, qui ont une durée de vie limitée et qui sont sources de pollution, la technologie des réseaux de capteurs sans fil exploite les avantages offerts par la récupération d'énergie sous différentes formes (solaire, éolienne,

thermique et vibratoire) [2-3]. En effet, lorsqu'une batterie ou une pile est déchargée, elle est soit rechargée (dans ce cas le coût de la maintenance est élevé), soit jetée pour un certains nombre d'applications ce qui cause la pollution de l'environnement.

Pour toutes ces raisons, la récupération d'énergie constitue une solution efficace pour réaliser l'autonomie des systèmes sans fil. Cette solution permet d'élargir l'utilisation de ces systèmes autonomes dans de nombreux domaines d'applications. Notre projet s'inscrit dans le cadre de la récupération d'énergie multi-sources (solaire et éolienne) pour avoir un capteur communicant autonome en énergie à déployer dans différents contextes d'applications.

2.2 Historique de la cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, ensuite c'est seulement environ un siècle plus tard, en 1916, que Robert Millikan est le premier à produire de l'électricité à travers l'utilisation d'une cellule solaire [4]. Mais cette découverte n'est à l'époque qu'anecdote vu le rendement énergétique assez faible pour transformer la lumière du soleil en énergie. C'est l'industrie spatiale qui a remis la technologie au-devant de la scène, dans les années 50 où les panneaux solaires étaient le seul moyen non nucléaire pour alimenter les satellites [5].

Après, le choc pétrolier dans les années 70, la découverte de la méthode pour trouver le MPPT (Maximum Power Point Tracker) ainsi que les efforts technologiques pour réduire le coût des panneaux solaires ont favorisé la commercialisation de cette énergie renouvelable et l'évolution des recherches dans ce domaine. C'est en 1973 que la première maison alimentée par des panneaux solaires est construite [6].

De nos jours, des centrales solaires sont en construction dans le monde entier, la production d'énergie solaire constitue un défi de grande importance pour les années à venir. On note également l'utilisation de cette énergie dans différents domaines tels que celui des réseaux de capteurs où des recherches approfondies et avancées sont en train de se développer [7-8]. Ces recherches ont pour but d'alimenter les capteurs communicants afin de prolonger leur durée de vie et de s'affranchir de l'utilisation des batteries qui sont sources de pollution.

2.3 Énergie solaire : c'est quoi ?

L'énergie solaire photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin [8]. Le mot "photovoltaïque" vient du grecque, il est composé de "Photo" qui signifie lumière et de "Voltaïque" qui tire son origine du nom du physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a contribué à la découverte de l'électricité [9]. Le photovoltaïque indique littérairement "la lumière et l'électricité" c'est-à-dire avoir de l'électricité à partir de la lumière.

Le phénomène de conversion de la lumière en électricité, appelé effet photovoltaïque, peut s'effectuer par le biais d'un capteur solaire. Un tel capteur est composé d'un ensemble de cellules dites cellules photovoltaïques [10].

La quantité d'énergie électrique ainsi produite peut varier en fonction du matériau utilisé et des paramètres géométriques du capteur [11]. L'association possible de plusieurs cellules en série et/ou en parallèle permet d'adapter les caractéristiques de l'énergie pho-

tovoltaïque à la demande. Ces associations constituent un générateur photovoltaïque (ou panneau solaire) avec des caractéristiques courant-tension spécifiques qui présentent des points de puissance maximale.

Les caractéristiques du module solaire dépendent du niveau d'éclairement solaire (ou ensoleillement) et de la température de la cellule qui constitue le panneau. Afin d'obtenir le maximum de la puissance récupérée, on utilise le contrôleur de puissance MPPT qui peut fonctionner selon le principe de perturbation et d'observation [13].

2.4 Différentes technologies de conversion d'énergie solaire

Pour choisir la technologie adéquate aux besoins de notre projet, nous présentons dans cette partie un état de l'art des différentes technologies de conversion d'énergie solaire. En fait, il existe trois façons d'exploiter l'énergie solaire à savoir le solaire thermodynamique, le solaire thermique et le solaire photovoltaïque [14].

2.4.1 Énergie solaire thermodynamique

L'énergie solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs permettant de concentrer l'énergie solaire vers un tube contenant du fluide qui s'échauffe jusqu'à une température égale à 500 °C (figure 3.1). La chaleur obtenue est transférée ensuite à un circuit d'eau et la vapeur produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité [15]. L'avantage de cette technologie provient du fait que la chaleur produite peut-être stockée, ce qui permet aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit [16].

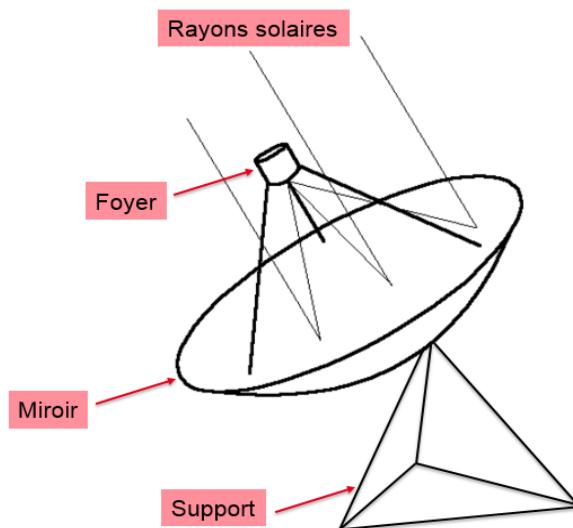


Figure 3.1 – Modules solaires thermodynamiques, structure parabolique.

2.4.2 Énergie solaire thermique

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil (figure 3.2). Cette forme de conversion d'énergie est dite directe dans le cas de chauffage

de l'eau sanitaire. Par contre, pour avoir l'électricité, il faut utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique obtenue en énergie électrique [14-17].

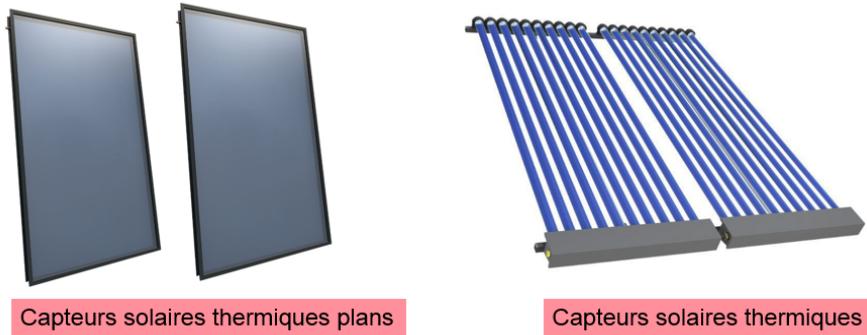


Figure 3.2 – Exemples de modules solaires thermiques.

2.4.3 Énergie solaire photovoltaïque

Contrairement à l'énergie solaire thermique qui utilise le soleil comme une source de chaleur, l'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme une source de lumière en transformant l'énergie des photons arrivant à la surface de la terre en énergie électrique [14-17]. La lumière solaire (ou les photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans le semi-conducteur qui constitue la cellule photovoltaïque. Cette transformation qui s'effectue en silence (sans bruit), sans pollution et sans combustible permet d'obtenir l'électricité pour satisfaire les besoins énergétiques des capteurs communicants.

C'est pourquoi la première source d'énergie envisagée pour alimenter le noeud capteur est l'énergie solaire photovoltaïque. Dans la suite de ce chapitre, nous présentons les différentes caractéristiques de l'énergie solaire photovoltaïque, ainsi que toute une nouvelle démarche détaillée permettant de caractériser l'énergie solaire récupérée.

3 Énergie solaire photovoltaïque : principe et caractéristiques

3.1 Effet photovoltaïque

Le rayonnement émis par le soleil est un ensemble de photons qui transportent de l'énergie [8]. Ces photons sont absorbés par la cellule solaire, qui génère en réponse une tension électrique dépendante des caractéristiques suivantes :

- c : Célérité de la lumière.
- λ : Longueur d'onde.
- h : Constante de Planck.

Puisque h et c sont des constantes alors l'énergie transportée par un photon est inversément proportionnelle à sa longueur d'onde (équation 3.1) :

$$E_{ph} = \frac{h.c}{\lambda} \quad (3.1)$$

En absorbant les photons, les cellules solaires produisent des électrons et des trous qui sont porteurs de charge. Ce déplacement d'électrons et de trous crée une différence de potentiel aux deux bornes du module photovoltaïque, ce qui permet de générer l'électricité (cela devient assimilable à une pile) [8-10].

3.2 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre lié aux matériaux semi-conducteurs. Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est ainsi basé sur les propriétés électroniques acquises principalement par le silicium dopé par des atomes étrangers (des impuretés). Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium (le matériau contiendra des électrons libres en excès), il est alors dit de type N [18]. Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau est déficitaire en électrons et il est dit de type P.

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en couches fines de type P ou N. Une cellule solaire est alors composée d'une jonction de deux zones de type opposé (appelée jonction PN). Au niveau de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives [19]. La cellule comporte ensuite des contacts métalliques (contacts avant et arrière) en formes de grille (figure 3.3) :

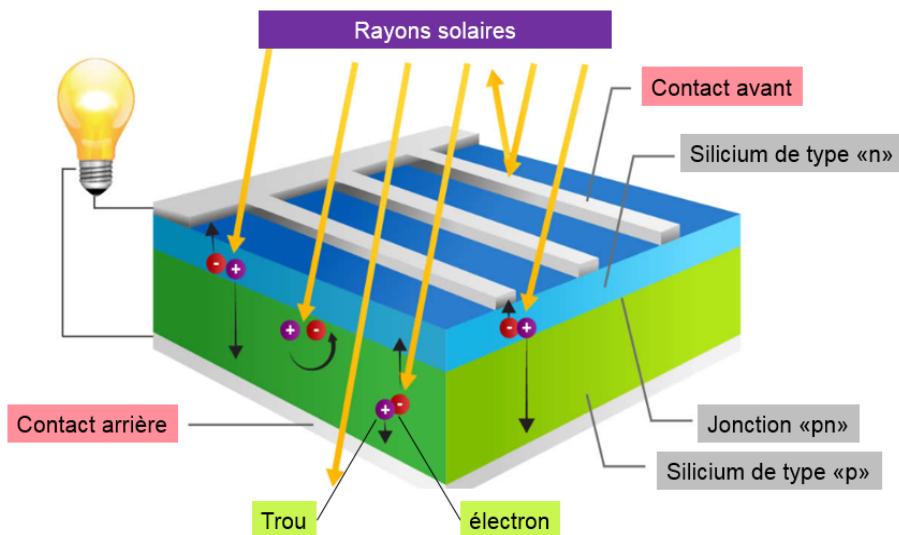


Figure 3.3 – Schéma représentatif d'une cellule solaire.

3.3 Influence de la température et de l'éclairement sur la cellule

3.3.1 Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules solaires [4]. En effet, si la température de la cellule augmente, le courant circulant dans tout le module reste invariable. Cependant, cette augmentation de température engendre la diminution de la tension du circuit-ouvert V_{co} . Cette augmentation de température se traduit donc par la diminution de la puissance maximale disponible [20].

La figure 3.4 présente l'effet de variation de la température sur les caractéristiques d'une cellule solaire pour un éclairement égal à 1000 W/m^2 :

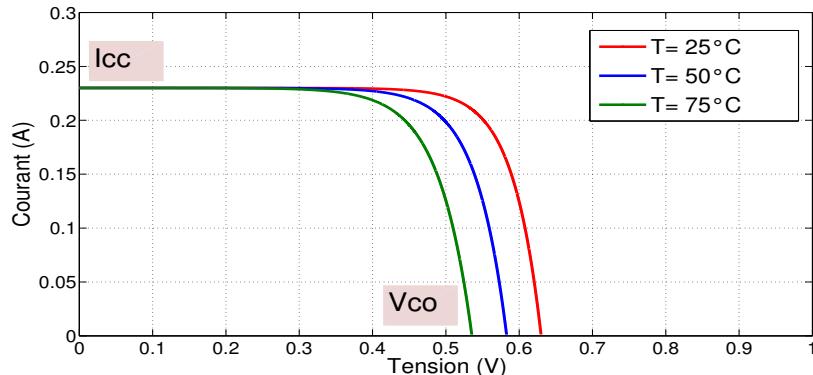


Figure 3.4 – Influence de la température sur les caractéristiques de la cellule.

3.3.2 Influence de l'éclairement

Le courant généré par la cellule solaire est proportionnel à l'ensoleillement [14, 21]. La figure 3.5 présente la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque à une température maintenue constante et sous diverses valeurs d'ensoleillement. On a alors pour chacune des valeurs du flux lumineux une valeur de puissance électrique maximale que pourrait fournir la cellule solaire. On note aussi que si l'éclairement augmente la tension du circuit-ouvert augmente légèrement [22].

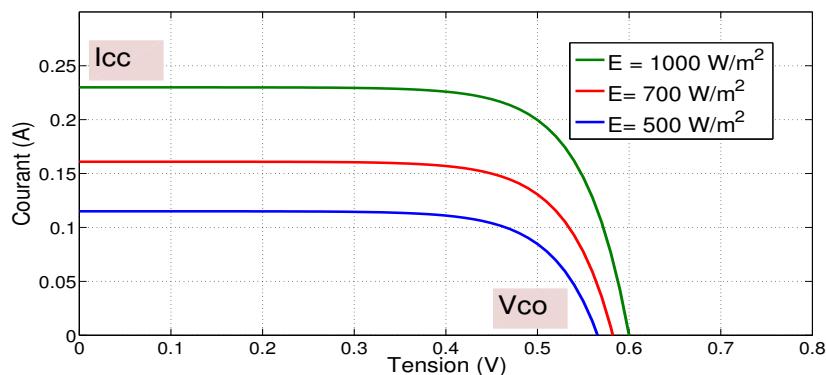


Figure 3.5 – Influence de l'éclairement sur les caractéristiques de la cellule.

3.4 Performances et caractéristiques des panneaux solaires

3.4.1 Définition

Le panneau solaire est un ensemble d'éléments mis en place afin d'exploiter l'énergie photovoltaïque pour satisfaire les besoins énergétiques des utilisateurs [18]. En fonction de la puissance désirée pour les différentes applications, les modules photovoltaïques (ensembles de cellules) peuvent-être assemblés en panneaux solaires, voire même en champs photovoltaïques (figure 3.6).

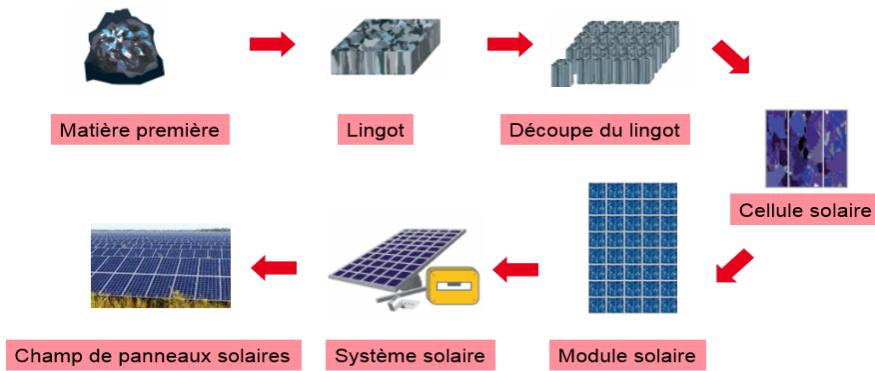


Figure 3.6 – Le passage d'une cellule à un champ de panneau solaire.

En se basant sur cette figure, un module photovoltaïque est défini comme étant un ensemble de cellules élémentaires montées en série et/ou en parallèle [19]. Le panneau solaire est constitué à son tour par un ou plusieurs modules solaires. En effet, en associant les cellules en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur photovoltaïque selon les besoins de l'application visée [18-19].

Pour un nombre N_s de cellules en série et un nombre N_p de cellules en parallèle, la puissance disponible en sortie d'un panneau solaire est donnée par l'équation (3.2) :

$$P_{pv} = N_s \cdot V \cdot N_p \cdot I, \quad (3.2)$$

tels que :

- P_{pv} : Puissance obtenue à la sortie du panneau solaire
- V : Tension de sortie d'une cellule solaire
- I : Courant de sortie d'une cellule solaire

3.4.2 Zones de fonctionnement du panneau solaire

Les caractéristiques électriques d'un panneau solaire constitué de plusieurs cellules ont généralement la même forme que celles d'une cellule élémentaire (dans les mêmes conditions d'éclairement et de température) [14]. Par exemple la caractéristique courant-tension $I - V$ d'un module photovoltaïque dans les conditions normales de température (25°C) et d'éclairement (1000 W/m^2) est présentée par la figure 3.7 :

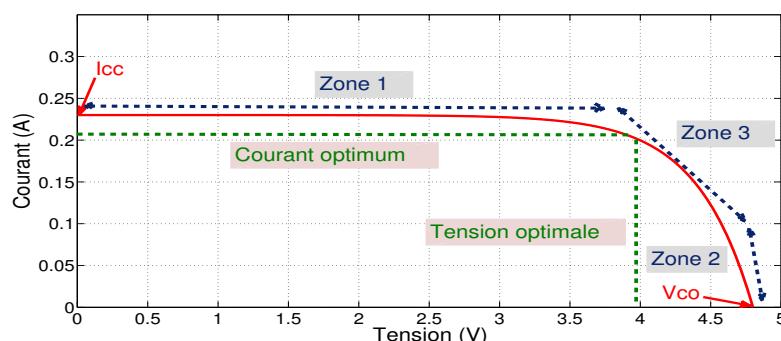


Figure 3.7 – Caractéristique courant-tension d'un panneau solaire ; Zones de fonctionnement.

À l'aide de cette figure, on peut déterminer les différentes zones de fonctionnement du panneau solaire. Nous pouvons ainsi décomposer la caractéristique $I - V$ en 3 parties principales :

- + Zone 1 : C'est la zone où le panneau solaire joue le rôle d'un générateur de courant I_{cc} .
- + Zone 2 : Le panneau solaire joue le rôle d'un générateur de tension V_{co} .
- + Zone 3 : C'est la zone où se place le point de fonctionnement à puissance optimale (où on peut récupérer le maximum d'énergie).

3.4.3 Influence de l'association des cellules en série

Comme indiqué précédemment, une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du panneau solaire (figure 3.8). Dans ce cas, les cellules sont traversées par le même courant, alors que la tension est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule [18, 23]. L'équation (3.3) montre le résultat d'une association de N_s cellules en série :

$$V_{co}(\text{panneau}) = N_s \cdot V_{co}(\text{cellule}) \quad (3.3)$$

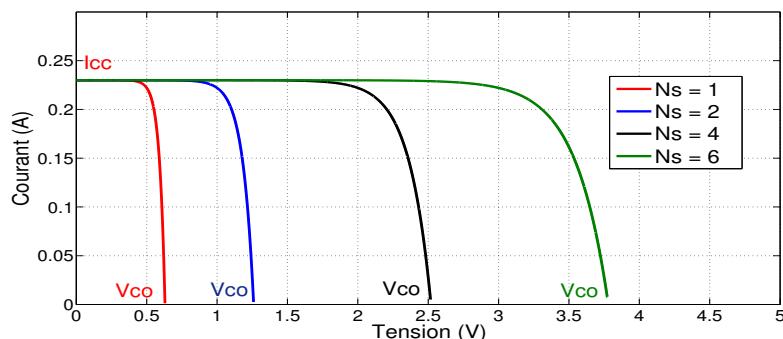


Figure 3.8 – Influence de l'association des cellules en série.

Ce système d'association est le plus utilisé pour les modules photovoltaïques industriels. En effet, comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique des semi-conducteurs, alors que sa tension reste toujours assez faible [24]. L'association en série permet donc d'augmenter cette tension et d'accroître la puissance optimale du panneau solaire.

3.4.4 Influence de l'association en parallèle

L'association en parallèle d'un nombre N_p de cellules permet d'accroître le courant de sortie du panneau solaire [18, 25]. Un groupement de cellules identiques connectées en parallèle donne la même tension de sortie, la caractéristique résultante de l'ensemble est obtenue par l'addition des courants (figure 3.9). L'équation (3.4) montre les caractéristiques électriques d'une association de N_p cellules en parallèle :

$$I_{cc}(\text{panneau}) = N_p \cdot I_{cc}(\text{cellule}) \quad (3.4)$$

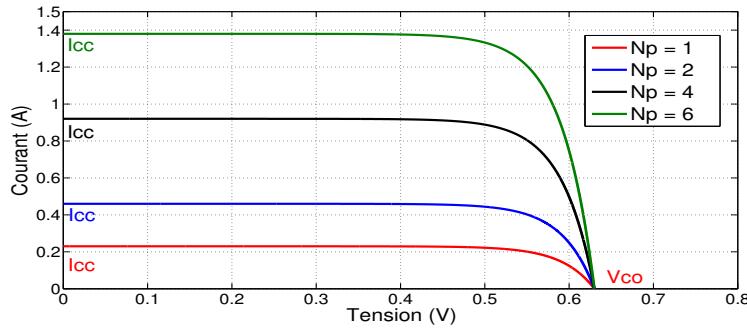


Figure 3.9 – Influence de l'association des cellules en parallèle.

3.4.5 Influence de l'association mixte

Pour obtenir un panneau solaire ayant un courant de sortie plus intense avec une tension plus élevée, on associe électriquement en série puis en parallèle plusieurs modules de caractéristiques identiques. La puissance de sortie du panneau sera ainsi maximale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale P_{max} [23-25]. Dans la suite du chapitre, afin d'avoir une tension de travail égale à 3.3 V (tension nécessaire pour alimenter le capteur communicant), nous utilisons la configuration présentée dans la section 3.4.3 (c'est-à-dire que le panneau solaire est composé d'un nombre N_s de cellules en série avec un nombre N_p égale à 1).

4 Modélisation de l'énergie solaire

Dans cette partie, on s'intéresse à la caractérisation de la récupération d'énergie solaire à travers la modélisation d'un module solaire qui se compose d'un ensemble de N_s cellules en série (le nombre de cellule en parallèle N_p est égal à 1). Nous commençons tout d'abord par la présentation des différents modèles de panneaux solaires existants dans la littérature. Nous présentons ensuite notre modèle proposé pour alimenter le capteur communicant et déterminer son autonomie énergétique. Le modèle développé est ensuite validé par différentes simulations et mesures.

4.1 Modèles existants

Dans la littérature [14, 26-27], modéliser électriquement un panneau solaire revient à modéliser le comportement des cellules photovoltaïques qui le composent. Cette modélisation passe nécessairement par un choix judicieux des modèles électriques qui présentent les différents éléments de la cellule. Le modèle de la cellule obtenu est ensuite généralisé afin d'avoir le modèle souhaité du panneau solaire.

Plusieurs modèles mathématiques de générateur photovoltaïque ont été développés pour représenter son comportement non linéaire [14, 26]. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres utilisés pour le calcul des caractéristiques du module photovoltaïque. Cependant, tous les modèles proposés se basent sur l'utilisation de l'équation de Shockley :

$$I_d = I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right), \quad (3.5)$$

avec :

- I_d : Courant circulant dans la diode.
- I_{sat} : Courant de saturation inverse de la diode.
- V_d : Potentiel aux bornes de la diode.
- V_T : Potentiel thermodynamique ($V_T = \frac{nKT}{q}$),

tels que n , K , T et q sont respectivement le facteur d'idéalité de la diode, la constante de Boltzmann, la température de la jonction PN et la charge de l'électron.

4.1.1 Modèle de cellule à trois paramètres

Pour ce premier cas, la cellule solaire est décrite d'une manière simple comme une source idéale de courant qui débite un courant noté I_{ph} proportionnel à l'ensoleillement (figure 3.10). Cette source est mise en parallèle avec une diode qui correspond à la jonction PN de la cellule décrite dans le paragraphe 3.2 [14, 27].

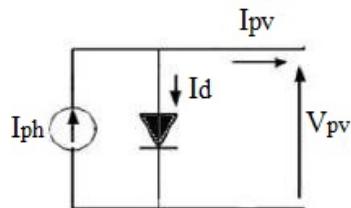


Figure 3.10 – Modèle à trois paramètres.

Dans ce cas, la caractéristique courant-tension ($I_{pv} - V_{pv}$) du module photovoltaïque est donnée par la relation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{N_s \cdot V_T}\right) - 1 \right), \quad (3.6)$$

Les trois paramètres de ce modèle sont respectivement le photo-courant de la cellule I_{ph} , le courant de saturation de la diode I_{sat} et le nombre de cellules en série N_s . Ce modèle reste théorique car il ne prend pas en compte le comportement de la cellule photovoltaïque dans les conditions réelles (non prise en compte des pertes de tension et du courant de fuite) [27].

4.1.2 Modèle de cellule à quatre paramètres

Ce modèle est largement utilisé car il traite la cellule photovoltaïque comme étant une source de courant qui est dépendante de l'ensoleillement. Une telle source est connectée en parallèle avec une diode qui modélise la jonction PN et en série avec une résistance R_s (figure 3.11) [14, 28].

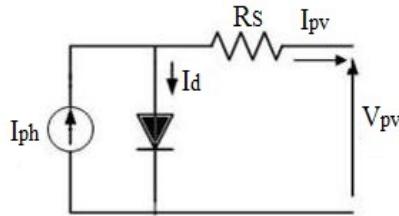


Figure 3.11 – Modèle à quatre paramètres.

L'équation (3.7) présente la caractéristique courant-tension ($I_{pv} - V_{pv}$) du module solaire, dont les quatre paramètres sont respectivement le photo-courant I_{ph} , le courant de saturation de la diode I_{sat} , la résistance en série R_s et le nombre de cellule en série N_s :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{N_s \cdot V_T}\right) + \frac{R_s \cdot I_{pv}}{V_T}\right) - 1 \quad (3.7)$$

4.1.3 Modèle de cellule à cinq paramètres

Pour ce modèle, qui est connu sous le nom de *L5P* (Lumped, 1 Mechanism, 5 Parameters), le circuit électrique de la cellule photovoltaïque se compose d'une source de courant qui modélise l'ensoleillement et d'une résistance shunt R_{sh} ainsi qu'une résistance en série R_s pour modéliser les pertes (figure 3.12). Le modèle fait donc intervenir les cinq paramètres suivants : les deux courants I_{ph} et I_{sat} , les deux résistances R_s et R_{sh} et le nombre de cellule en série N_s , [14, 29].

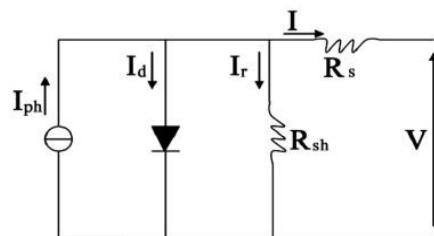


Figure 3.12 – Modèle à cinq paramètres.

Dans ce cas, l'équation caractéristique du module photovoltaïque est déduite d'une manière directe à partir des deux lois de Kirchhoff et de Shockley :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{N_s \cdot V_T}\right) + \frac{R_s \cdot I_{pv}}{V_T}\right) - 1 - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (3.8)$$

Ce modèle est plus proche de la réalité car il rend compte du comportement de la cellule photovoltaïque dans les conditions réelles par la prise en considération des pertes de tension et du courant de fuite. En effet, la résistance en série R_s caractérise les pertes par effet Joule dans le semi-conducteur. Quant à la résistance en parallèle R_{sh} , elle permet de modéliser les pertes par re-combinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau [29-30]. Ce dernier modèle est utilisé dans le reste du chapitre pour aboutir à notre modèle final caractérisant l'énergie solaire pour les capteurs communicants.

4.2 Modélisation du panneau solaire photovoltaïque

4.2.1 Modèle de la cellule photovoltaïque

En se basant sur la figure 3.12 et en utilisant les lois de Kirchhoff et de Shockley, le courant délivré par la cellule photovoltaïque a comme expression :

$$I = I_{ph} - I_d - I_r, \quad (3.9)$$

avec :

- I_{ph} est le photo-courant de la cellule qui est proportionnel à l'ensoleillement E . Il est également proportionnel au courant de court-circuit I_{cc} , ce dernier étant atteint lorsque l'ensoleillement E atteint la valeur maximale (1000 W/m^2) [18]. On a alors :

$$I_{ph} = I_{cc} \cdot \frac{E}{1000} \quad (3.10)$$

- I_d est le courant qui circule dans la diode, il s'exprime de la façon suivante :

$$I_d = I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (3.11)$$

Sachant que le potentiel thermodynamique V_T a comme expression :

$$V_T = \frac{nKT}{q} \quad (3.12)$$

L'expression finale du courant I_d peut s'écrire :

$$I_d = I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{(V + R_s \cdot I)}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (3.13)$$

- I_r est le courant qui traverse la résistance en parallèle R_{sh} , il suit la formule suivante :

$$I_r = \frac{V_d}{R_{sh}} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (3.14)$$

À partir des équations (3.9), (3.10), (3.13) et (3.14), on obtient l'expression du courant délivré par une cellule photovoltaïque en fonction de sa tension ainsi que sa caractéristique courant-tension :

$$I = I_{cc} \cdot \frac{E}{1000} - I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{(V + R_s \cdot I)}{V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}}, \quad (3.15)$$

tels que :

- I : Courant de la cellule.
- V : Tension de la cellule.
- I_{cc} : Courant de court-circuit de la cellule.
- I_{sat} : Courant de saturation inverse de la diode.
- $V_T = \frac{nKT}{q}$: Potentiel thermodynamique.
- q : Charge de l'électron.
- K : Constante de Boltzmann.
- n : Facteur d'idéalité de la diode ($n=1$ dans le cas d'une diode idéale).
- T : Température de la jonction : en Kelvin.

Courant de court-circuit de la cellule

Le courant de court-circuit I_{cc} est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule est nulle. C'est la plus grande valeur de courant que la cellule peut fournir [14, 31]. En utilisant l'équation (3.15) on peut déduire l'expression du courant I_{cc} en fonction des différents paramètres de la cellule :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{(R_s \cdot I_{cc})}{V_T}\right) - 1 \right) - \frac{R_s \cdot I_{cc}}{R_{sh}} \quad (3.16)$$

Pour la plupart des cellules dont la résistance série est faible, on néglige le terme en exponentielle devant le photo-courant I_{ph} . On obtient alors l'expression approchée suivante du courant de court-circuit :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (3.17)$$

Tension de circuit-ouvert de la cellule

La tension de circuit-ouvert est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'un générateur photovoltaïque) [14, 32]. Cette tension est obtenue lorsque la cellule n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge infinie :

$$V_{co} = V_T \cdot \ln\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_{sat}}\right) \quad (3.18)$$

Puissance optimale de la cellule

Cette puissance, qui s'exprime en Watts-crête, représente la puissance que peut fournir la cellule lorsqu'elle est fermée sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement standard E de 1000 W/m² et à une température égale à 25 °C (figure 3.13).

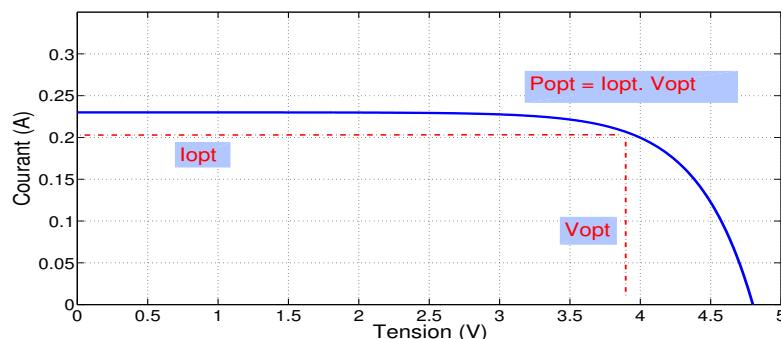


Figure 3.13 – Puissance optimale de la cellule.

Facteur de forme

Le facteur de forme (Fill Factor noté FF) est déterminé à partir de la caractéristique courant-tension et il permet de qualifier la qualité de la cellule [31]. Ce facteur représente

le rapport entre la puissance maximale de la cellule P_{max} et le produit de puissance $I_{cc} \cdot V_{co}$ ((3.19)). Ainsi, plus la valeur du FF est grande, plus la puissance exploitable est grande :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (3.19)$$

Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale P_{max} et la puissance solaire incidente P_{in} ((3.20)). Il reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par le panneau solaire [14, 32] :

$$r = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{P_{in}} \quad (3.20)$$

Pour conclure, le rendement énergétique et le facteur de forme sont liés par la formule (3.21) :

$$r = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (3.21)$$

4.2.2 Modèle courant-tension du panneau solaire

Comme expliqué précédemment, un module solaire n'est autre qu'un ensemble de cellules photovoltaïques montées en série et/ou en parallèle. En se référant à la section 3.4, on peut alors déterminer la caractéristique courant-tension du panneau solaire qui est constitué de N_s cellules en série ($N_p = 1$). Le modèle courant-tension du panneau solaire est donné par l'équation (3.22) :

$$I_{pv} = N_p \cdot I_{cc} \cdot \frac{E}{1000} - N_p \cdot I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{N_s \cdot V_T} + \frac{R_s \cdot I_{pv}}{N_p \cdot V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (3.22)$$

4.2.3 Modèle puissance-tension du panneau

La caractéristique puissance-tension du panneau solaire est présentée par l'équation (3.23).

$$P_{pv} = I_{pv} \cdot N_s \cdot V = \left[N_p \cdot I_{cc} \cdot \frac{E}{1000} - N_p \cdot I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{N_s \cdot V_T} + \frac{R_s \cdot I_{pv}}{N_p \cdot V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \right] \cdot N_s \cdot V, \quad (3.23)$$

tels que P_{pv} , V_{pv} , I_{pv} et V sont, respectivement, la puissance, la tension et le courant du panneau solaire ainsi que la tension de la cellule solaire.

4.3 Modélisation du contrôleur MPPT

Pour obtenir la puissance maximale de sortie d'un panneau solaire qui varie avec les conditions météorologiques (ensoleillement et température), on peut utiliser le contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracker) qui permet d'extraire le maximum de la puissance solaire en agissant sur la tension ou le courant du panneau. La figure 3.14 présente

le principe de fonctionnement du MPPT en utilisant la caractéristique puissance-tension d'un panneau solaire qui donne une puissance maximale égale à 800 mW.

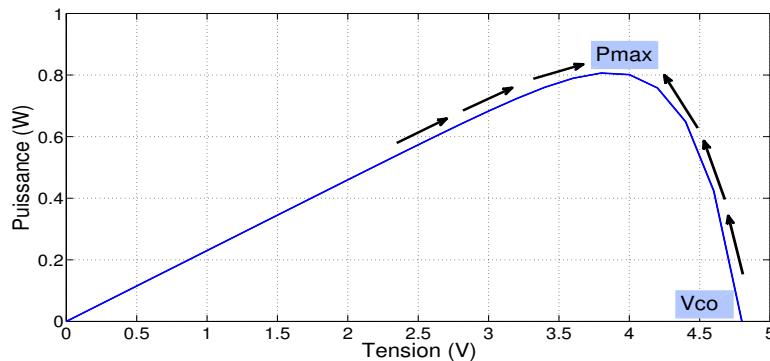


Figure 3.14 – Principe de fonctionnement du contrôleur MPPT.

Cette méthode est basée sur l'algorithme de perturbation et d'observation PO qui fonctionne par la perturbation périodique du courant et de la tension du système photovoltaïque [33-35]. Dans ce cas, on note $I(K)$ et $V(K)$ les éléments obtenus de courant et de tension (figure 3.15).

La méthode PO commence par comparer la puissance de sortie du présent cycle $P(K) = I(K).V(K)$ à celle du cycle précédent $P(K-1)$. Pour converger vers la valeur maximale de la puissance, l'algorithme contrôle le sens de la perturbation (c'est-à-dire le signe de $P(K) - P(K-1)$). Dans ce cas, si la puissance augmente alors la perturbation continue dans le même sens pendant le cycle suivant $K + 1$, sinon la direction de la perturbation est inversée pour trouver la valeur optimale souhaitée [34-35].

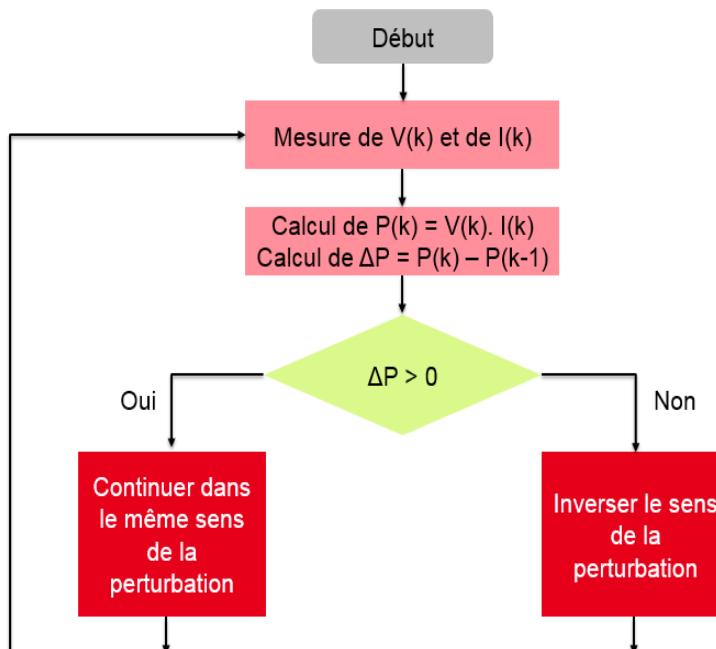


Figure 3.15 – Principe de fonctionnement de l'algorithme PO.

5 Conversion et stockage de l'énergie récupérée

5.1 Convertisseur DC/DC

L'énergie solaire récupérée peut-être adaptée en utilisant un convertisseur DC/DC. Le rôle de ce dernier est d'assurer l'adaptation de la tension solaire reçue aux éléments de stockage tels que les batteries et les super-capacités [38]. Dans ce cas, nous avons utilisé un convertisseur élévateur de tension (Boost en anglais) qui est présenté par la figure 3.16.

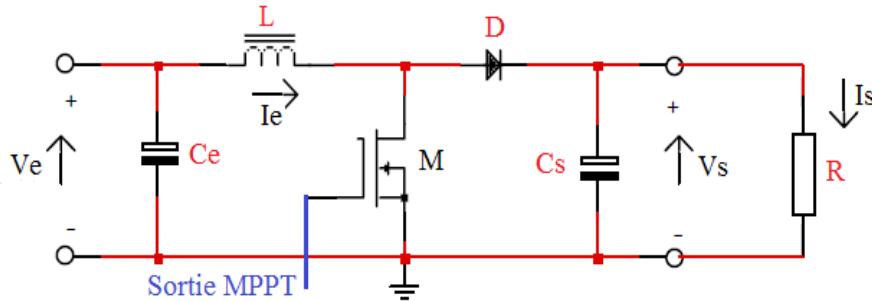


Figure 3.16 – Circuit équivalent du convertisseur DC/DC.

Ce hacheur parallèle convertit une tension d'entrée continue notée V_e en une autre tension de sortie continue de plus forte valeur notée V_s . La relation entre V_s et V_e est la suivante :

$$V_s = \frac{V_e}{1 - \alpha}, \quad (3.24)$$

tel que α est le rapport cyclique qui est compris entre 0 et 1. Dans ce cas, on constate que la tension de sortie V_s du convertisseur ne dépend que de la tension d'entrée V_e et du rapport cyclique α . En utilisant l'équation 3.24, on vérifie bien que ce convertisseur est toujours élévateur de tension.

Pour ce type de convertisseur, il faut bien choisir la valeur de la capacité de sortie C_s [39]. L'équation 3.25 montre l'expression de C_s en fonction du rapport cyclique α :

$$C_s = \frac{I_s \cdot \alpha \cdot T}{\delta V_s}, \quad (3.25)$$

avec I_s , T et δV_s , respectivement, le courant de sortie, la période de temps et l'onulation de la tension de sortie. Ensuite, pour évaluer les performances du DC/DC, on peut calculer son rendement en puissance noté ρ qui a comme expression :

$$\rho = \frac{P_s}{P_e}, \quad (3.26)$$

telles que P_e et P_s sont, respectivement, la puissance d'entrée et la puissance de sortie du convertisseur.

5.2 Stockage de l'énergie solaire récupérée

Afin de stocker l'énergie solaire récupérée, on peut utiliser différents supports de stockage tels que les super-condensateurs et les batteries. Dans cette étude, on utilise les

super-condensateurs comme éléments principaux de stockage. Composé de plusieurs cellules montées en série et/ou en parallèle, un super-condensateur permet de restituer une quantité d'énergie plus rapidement que les batteries [40]. Le modèle d'une cellule de la super-capacité utilisée est présenté par la figure 3.17. Dans ce cas, la cellule est modélisée par une capacité de stockage C , une résistance de pertes R et une résistance de charge R_{ch} .

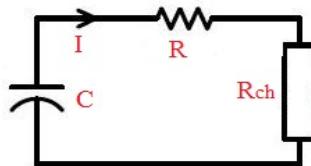


Figure 3.17 – Circuit équivalent de la cellule d'une super-capacité.

L'énergie totale stockée dans le super-condensateur est donnée par la relation suivante :

$$E_s = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_c^2, \quad (3.27)$$

avec V_c la tension aux bornes de la capacité C . Sur le marché, la tension maximale que l'on peut stockée dans la super-capacité reste relativement faible (par exemple 2.7 V) [40].

6 Caractérisation de l'énergie solaire récupérée

6.1 Étude de l'éclairement solaire

Pour étudier l'évolution de l'éclairement en fonction du temps, nous avons utilisé des bases de données qui présentent l'évolution de l'ensoleillement pendant un an dans différentes régions françaises. Ces bases de données sont obtenues grâce au logiciel Météonorm qui extrapole des données mesurées provenant de différentes stations météorologiques pendant la période standard 1991-2010 [36-37]. La figure 3.18 montre la variation de l'éclairement moyen pendant un an en commençant par le mois de janvier pour un site à Nantes. On remarque que l'éclairement maximal pour ce site est égal à 1000 W/m^2 .

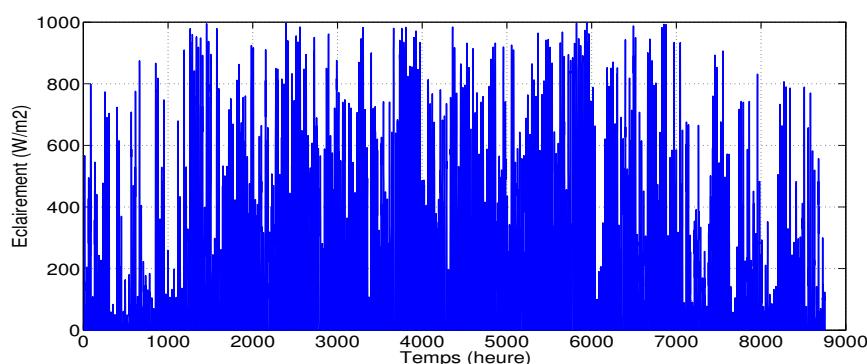


Figure 3.18 – Évolution de l'éclairement moyen pendant une année.

Afin de déterminer les caractéristiques de l'ensoleillement, on peut utiliser la figure 3.19 qui montre l'évolution de l'éclairement pendant deux jours consécutifs pour les quatre saisons. Dans ce cas, on note que l'éclairement atteint des valeurs maximales pendant l'été (où on peut se rapprocher de sa valeur maximale de 1000 W/m^2) et qu'il diminue et atteint des valeurs minimales durant l'hiver.

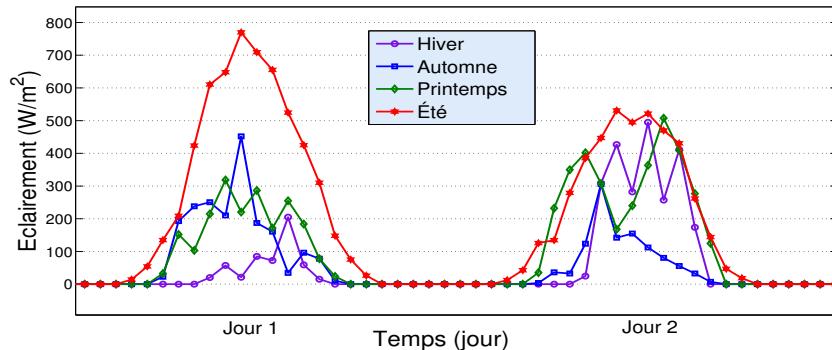


Figure 3.19 – Évolution de l'éclairement pendant deux jours consécutifs de l'année (cas d'étude : Nantes).

La figure 3.20 présente l'évolution de l'éclairement pour quatre jours spécifiques de l'année (les deux solstices d'été et d'hiver et les deux équinoxes de printemps et de l'automne). On constate que l'éclairement pendant la période estivale est plus élevé que celui enregistré pour la période hivernale. On note aussi que la journée pendant l'été s'étale sur 16h en moyenne. Alors qu'elle est beaucoup plus courte en hiver (environ 8h).

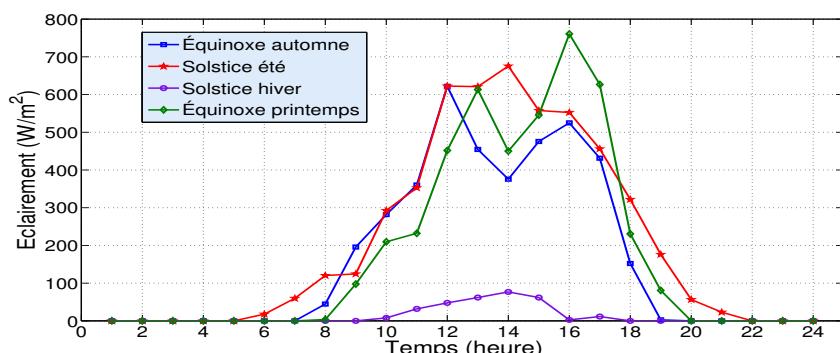


Figure 3.20 – Évolution de l'éclairement pendant des jours spécifiques de l'année (les solstices de l'été et de l'hiver et les équinoxes du printemps et de l'automne).

Toutes ces informations relatives à l'éclairement sont ensuite utiles pour quantifier et prédire la quantité d'énergie que l'on peut récupérer à court et à long terme. Ceci permet d'établir des modèles de prédictions des énergies disponibles afin de converger vers le fonctionnement neutre en énergie et satisfaire les besoins énergétiques du capteur.

6.2 Caractérisation de l'énergie solaire récupérée

Pour caractériser la quantité de l'énergie solaire récupérée et afin d'avoir les caractéristiques puissance-tension $P_{pv} - V_{pv}$ et courant-tension $I_{pv} - V_{pv}$ du module solaire, nous avons utilisé un panneau solaire donnant une puissance maximale égale à 800 mW à un éclairement égal à 1000 W/m^2 . Cette puissance est suffisante pour alimenter le capteur communicant et satisfaire ses besoins énergétiques. Le panneau utilisé est composé de 8 cellules en série (c'est-à-dire $N_s = 8$ et $N_p = 1$), il a respectivement les caractéristiques électriques de P_{max} , I_{opt} , I_{cc} , V_{opt} et V_{co} suivantes : 800 mW, 0.21 A, 0.23 A, 3.85 V et 4.8 V. On note que les simulations sont faites dans les conditions standards de températures (25°C) et d'éclairement (1000 W/m^2).

Afin d'évaluer les performances du panneau solaire utilisé, nous avons développé un modèle de panneau solaire avec Matlab/Simulink en utilisant le circuit électrique équivalent de la cellule solaire (figure 3.12). Le même modèle peut-être implémenté avec un script *Matlab* en utilisant les équations (3.22) et (3.23).

6.2.1 Caractéristiques $P_{pv} - V_{pv}$ et $I_{pv} - V_{pv}$ du panneau

La figure 3.21 montre les caractéristiques puissance-tension (figure 3.21(a)) et courant-tension (figure 3.21(b)) du panneau solaire utilisé. On remarque que l'on retrouve les caractéristiques constructeur du module solaire : la puissance maximale est au niveau de 800 mW, la tension de circuit-ouvert est égale à 4.8 V et le courant de court-circuit est égal à 0.23 A.

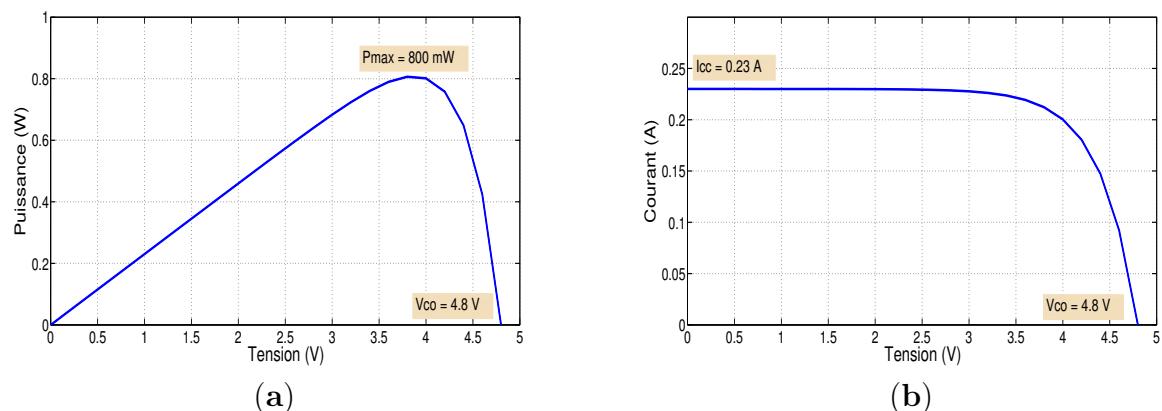


Figure 3.21 – (a) Caractéristique $P_{pv} - V_{pv}$ du panneau ; et **(b)** Caractéristique $I_{pv} - V_{pv}$ du panneau.

6.2.2 Caractérisation de l'énergie solaire

Comme expliqué dans la section 3.3.2, les caractéristiques de la cellule photovoltaïque sont directement liées à la variation de l'éclairement. La figure 3.22 montre l'effet de cette variation sur la puissance du module utilisé à une température maintenue constante égale à 25°C . En se basant sur les données de mesure de l'éclairement (figure 3.18), on vérifie bien que l'évolution de la puissance est liée à l'évolution de l'ensoleillement pendant une année. En effet, on obtient la puissance maximale du panneau (800 mW) si l'éclairement est maximal (1000 W/m^2).

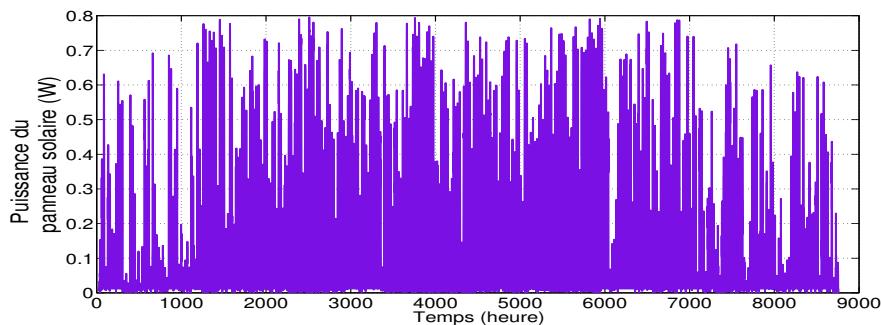


Figure 3.22 – Évolution de la puissance du module solaire pendant une année.

Les résultats de caractérisation de l'énergie solaire récupérée E_r sont présentés par la figure 3.23. Cette figure montre l'évolution de la quantité d'énergie solaire récupérée par jour pendant la même année (en commençant par le mois de janvier). On vérifie bien que cette énergie est maximale pendant l'été où l'éclairement atteint ses valeurs maximales (E_{rmax} est égale à 6 Wh/jour), alors qu'elle est minimale en hiver (E_{rmin} est égale à 0.3 Wh/jour). La valeur moyenne de l'énergie solaire récupérée est au niveau de 3 Wh/jour.

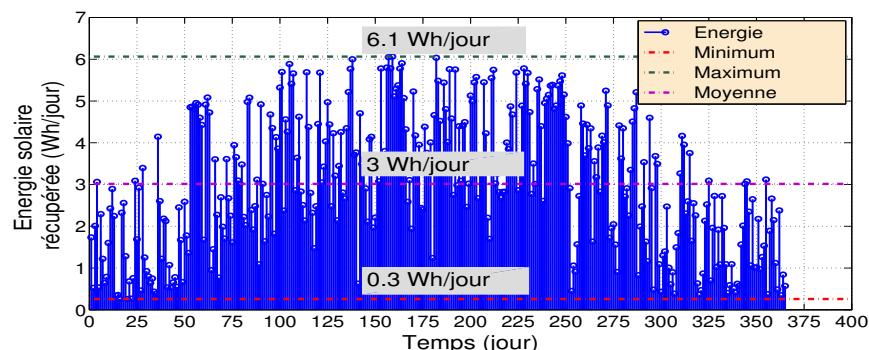


Figure 3.23 – Énergie solaire récupérée par jour E_r pendant une année.

En se basant sur les résultats précédents, la figure 3.24 présente la variation de la probabilité où l'énergie solaire récupérée par jour notée E_r dépasse une certaine valeur donnée x , soit $P(E_r > x)$ cette probabilité. On note que dans 70% des cas, cette énergie dépasse la valeur 2.4 Wh/jour. Toutes ces informations sont utiles pour faire la gestion d'énergie du capteur communicant afin de satisfaire ses besoins énergétiques.

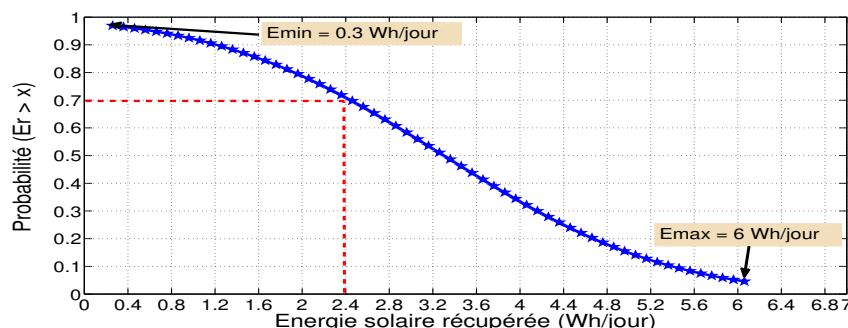


Figure 3.24 – La probabilité où E_r dépasse une valeur donnée.

6.2.3 Effet du contrôleur MPPT sur les caractéristiques du panneau

En appliquant le contrôleur MPPT à la sortie du panneau solaire, on retrouve les caractéristiques optimales du module photovoltaïque utilisé. La figure 3.25 présente la tension et la puissance optimale du panneau. On remarque qu'après 200 ms, on peut obtenir les valeurs optimales de tension (3.85 V) et de puissance (800 mW) données par la fiche technique du module solaire utilisé.

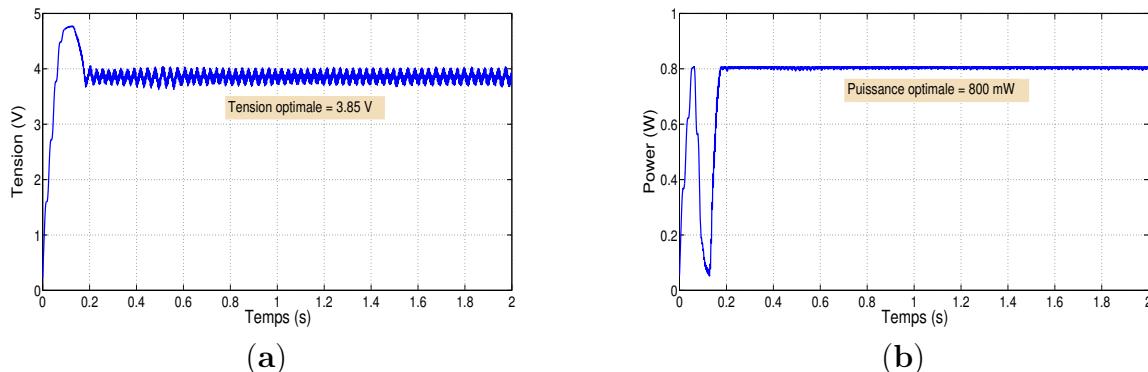


Figure 3.25 – (a) Tension optimale du panneau solaire avec le *MPPT*; et (b) Puissance optimale du panneau solaire.

6.2.4 Résultats de conversion et de stockage de l'énergie récupérée

La figure 3.26 montre l'évolution de la puissance obtenue à la sortie du DC/DC. La puissance maximale obtenue est égale à 750 mW. Le rendement de puissance ρ du DC/DC est au niveau de 93.7% (ce qui présente un bon rendement comparé aux DC/DC disponibles sur le marché).

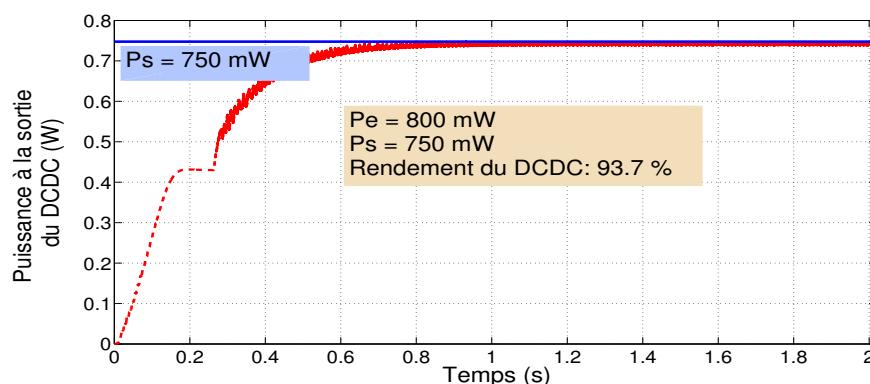


Figure 3.26 – Puissance à la sortie du convertisseur DC/DC.

Pour stocker l'énergie récupérée, nous avons utilisé deux cellules de super-capacité en série avec une capacité C égale à 2 mF. La figure 3.27 montre l'évolution de la tension stockée aux bornes du super-condensateur. Dans ce cas, on note que la tension maximale stockée atteint la valeur 5.4 V (sachant que la tension d'entrée est égale 3.85 V, qui est la tension optimale donnée par le panneau solaire en utilisant le contrôleur MPPT).

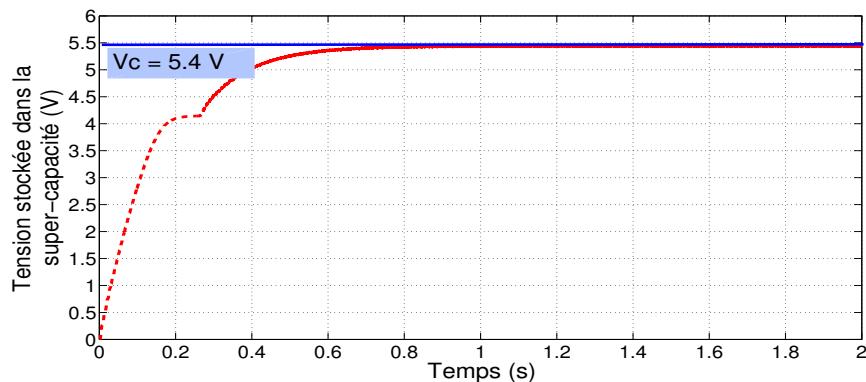


Figure 3.27 – Tension stockée dans le super-condensateur.

7 Résultats de mesures obtenus

Pour une meilleure résolution temporelle que celle présentée par les bases de données (avoir un pas de temps plus court) et pour faire des prédictions à court terme, nous avons caractérisé la récupération de l'énergie solaire à travers un ensemble de mesures instantanées. Nous présentons dans cette partie les résultats obtenus en utilisant le même panneau solaire qui donne une puissance maximale égale à 800 mW. Ce panneau a été placé derrière une vitre dans une salle éclairée durant la période du 12 au 17 décembre 2018 à Polytech Nantes.

La figure 3.28 montre l'évolution de la puissance optimale du panneau solaire en fonction du temps. On voit bien que les quantités d'énergies récupérées sont faibles pendant l'hiver (la puissance maximale récupérée est égale à 67 mW pour la journée du 12 décembre). Nous remarquons aussi que cette puissance atteint des valeurs maximales vers midi où l'irradiation est maximale. Alors qu'elle décroît vers la fin de la journée où l'éclairement est minimum. Ensuite, on constate que la longueur de la journée pendant cette période hivernale est égale à 8h, ce qui consolide les résultats trouvés à la figure 3.20.

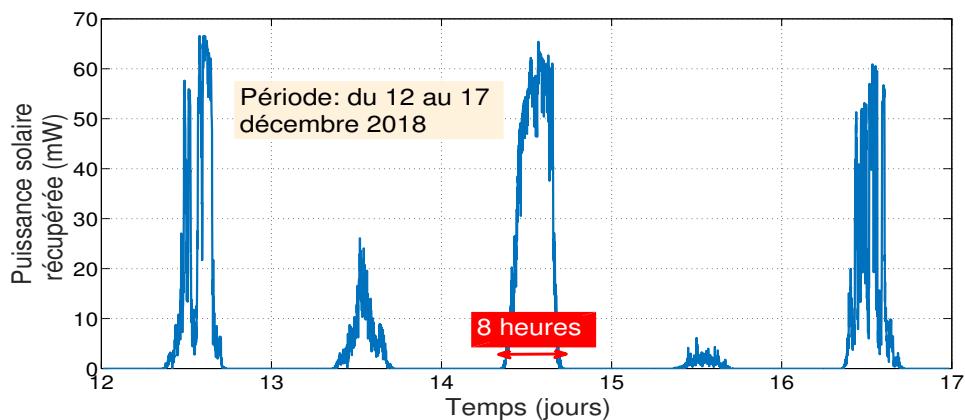


Figure 3.28 – Mesure de la puissance P_{opt} du panneau solaire pendant la période du 12 au 17 décembre 2018, Polytech Nantes.

8 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la technique de récupération d'énergie solaire pour les objets communicants. Afin de remplacer les batteries et de prolonger la durée de vie des capteurs sans fil, nous proposons des modèles de caractérisation d'énergie solaire. Cette caractérisation s'appuie sur des équations mathématiques permettant d'évaluer la puissance solaire récupérée.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté une étude permettant la modélisation de l'éclairement et du panneau solaire. Pour cela, nous avons commencé par un rappel sur les techniques de récupération d'énergie solaire ainsi que les différents paramètres de la cellule photovoltaïque. Nous avons décrit ensuite les différentes caractéristiques du panneau solaire telles que ses caractéristiques courant-tension, puissance-tension et puissance optimale. Puis, nous avons proposé un modèle de panneau solaire qui permet d'avoir une puissance maximale égale à 800 mW, en accord avec les datasheets du panneau. Ce module solaire est capable d'alimenter le noeud capteur et de satisfaire ses besoins énergétiques.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous avons montré le fonctionnement du contrôleur MPPT ainsi que le principe de conversion et de stockage de l'énergie solaire récupérée. Les modèles développés sont ensuite testés en utilisant des bases de données qui présentent l'évolution de l'éclairement pendant une année. Ensuite, en utilisant le modèle proposé du panneau solaire, nous avons caractérisé la quantité de l'énergie solaire que l'on peut récupérer par jour. Enfin, les modèles proposés sont validés par des mesures d'énergie solaire.

Afin de s'affranchir de la non disponibilité temporaire du soleil et de son caractère intermittent, nous allons alors étudier la récupération de l'énergie éolienne dans le chapitre suivant.

Bibliographie : chapitre 3

- [1] L. Mainetti, L. Patrono and A. Vilei. Evolution of wireless sensor networks towards the internet of things : A survey. In International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2011.
- [2] D. Christin, A. Reinhardt, P. S. Mogre and R. Steinmetz. Wireless sensor networks and the internet of things : selected challenges. Proceedings of GI/ITG KuVS Fachgespräch Drahtlose Sensornetze, 2009.
- [3] D. Dondi, A. Bertacchini, D. Brunelli, L. Larcher and L. Benini. Modeling and Optimization of a Solar Energy Harvester System for Self-Powered Wireless Sensor Networks Industrial Electronics, IEEE Transactions on Vol. 55, No. 7, July 2008.
- [4] T. Bouguera, J.-F. Diouris, G. Andrieux and J.-J. Chaillout. Caractérisation de la récupération de l'énergie solaire pour les capteurs communicants. URSI France, 2017.
- [5] S. Thangavel and Y. Sanavullah. Maximum Energy Extraction in Wind Solar Hybrid Energy Conversion System P. Aravindan, European Journal of Scientific Research ISSN, Vol.63 No.1, 2011, pp. 90-98.
- [6] T.V. Bhuvaneswari, R. Balakumar, V. Vaidehi and P. Balamuralidhar. Solar Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, July 2009.
- [7] D. Niyato, E. Hossain and A. Fallahi. Analysis of Different Sleep and Wakeup Strategies in Solar Powered Wireless Sensor Networks Communications, IEEE International Conference, June 2006.
- [8] V. Benamara, rapport de master, Étude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique de stockage, Montréal, septembre 2012.
- [9] T. Wark, P. Corke, P. Sikka and L. Klingbeil, Y. Guo, C. Crossman and G. Bishop-Hurley. Transforming Agriculture through Pervasive Wireless Sensor Networks Pervasive Computing, IEEE Vol. 6, No.2, June 2007.
- [10] J.-S. Lin and C.-Z. Liu. A monitoring system based on wireless sensor network and an SoC platform in precision agriculture Communication Technology. 11th IEEE International Conference on 10-12 Nov. 2008.
- [11] K. Katsalis, A. Xenakis, P. Kikiras and G. Stamoulis. Topology Optimization in Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture Applications Sensor Technologies and Applications. SensorComm. International Conference on 14-20 Oct. 2007.
- [12] A. Oi, Thesis, Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2005.
- [13] Wa. Yang, H. Liusheng, W. Junmin and X. Hongli. Wireless Sensor Networks for Intensive Irrigated Agriculture, IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC, Jan. 2007.
- [14] H. Kamelia, rapport de master, Modélisation d'une cellule photovoltaïque, juin 2012. Algérie.
- [15] R. Vijay, S. Curt, P. Sung and S. Mani B. Energy-Aware Wireless Microsensor Networks .IEEE Signal Processing Magazine (S I053-5888), 2002.
- [16] C. Alippi, C. Galperti. An Adaptive System for Optimal Solar Energy Harvesting in Wireless Sensor Network Nodes. IEEE Transactions on CIRC UITS AND SYSTEMS Vol. 55, No. 6, July 2008.

- [17] G. A. Piccard, Quelles sources d'énergie pour les vingt prochaines années ?, Alexandra Catana, 2009.
- [18] B. Wafa, rapport de master, Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT, 2012.
- [19] F. Chekired. Étude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA, mémoire de magister, École Nationale Polytechnique, Algérie, 2008.
- [20] J. K. Chaplot and J. K. Maherchandani. Modeling and Simulation of Wind-PV Hybrid Power System using MATLAB/Simulink, IEEE Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, 2012.
- [21] Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire éolien. Université de Batna Faculté des Sciences de l'ingénieur, Algérie.
- [22] Z. A. Eu, H. P. Tan, and W. K. G. Seah. Design and performance analysis of MAC schemes for Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting.
- [23] K. Kassmi, M. Hamdaoui and F. Olivié. Conception et Modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT, revue des Energies Renouvelables, Vol. 10. No. 4, 2007, pp. 451-462.
- [24] C. Boisvineau, M. Nougaret and J. Terard. Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque : Asservissement extrémal de la puissance, Revue de Physique Appliquée Vol. 17, 1982, pp. 329- 336.
- [25] A. Luque and S. Hegedus. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2003, John Wiley Sons Ltd.
- [26] D. Sera, R. Teodorescu and T. Kerekes. Teaching Maximum Power Point Trackers Using a Photovoltaic Array Model with Graphical User Interface, Aalborg University, Denmark, December 2008.
- [27] A. Chaudhari. Automatic Peak Power Tracker for Solar Pv Modules using Dspace Software, Thesis, Energ Centre Deemed University, 2005.
- [28] A. Pastor, rapport de thèse : conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques électroniques, INSA Toulouse, 2006.
- [29] T.U. Townsned. A method for estimating the long term performance of direct coupled-photovoltaic system, Thesis, University of Wisconsin, Madison, 1989.
- [30] O. Gergaud and B. Multon. Analysis and exprimental validation of various photovoltaic system model, 7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal, 2002.
- [31] R. Chenni, M. Makhlouf, T. Kerbache and A. Bouzid. A detailed modeling method for photovoltaic cells, Science Direct, Energy 32, 2007.
- [32] Y. Jautard and T. Boudol, L'électricité photovoltaïque, site Internet, Architecture et énergies renouvelables, 2000.
- [33] D. Sera, R. Teodorescu and T. Kerekes. Teaching Maximum Power Point Trackers Using a Photovoltaic Array Model with Graphical User Interface, Institute of Energy Technology, Denmark, December 2008.
- [34] Angel Cid Pastor, Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques électroniques, Thèse de Doctorat, INSA Toulouse, 2006.
- [35] K. Kassmi, M. Hamdaoui and F. Olivié, Conception et Modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT, revue des Energies Renouvelables, Vol. 10. N. 4 (2007) pp. 451-462.
- [36] F. Neupveu ; Calcul du rayonnement global sur une surface inclinée à partir des données sur une surface horizontale, 02/03/2015. CEA Tech Nantes.

- [37] A. Osamede, S. James and P. Christo. Correlating the power conversion of a PV panel to the solar irradiance obtained from Meteonorm. IEEE Conf. on Industrial Technology (ICIT), South Africa, 2013, pp. 684-688.
- [38] A. Sarafianos and M. Steyaert. Fully Integrated Wide Input Voltage Range Capacitive DC-DC Converters : The Folding Dickson Converter. IEEE journal of solid-state circuits, Vol. 50, No. 7, July 2015.
- [39] A. Rufer and P. Barrade. Cours d'électronique de puissance, conversion DC/DC. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. 2017.
- [40] W. Jiang and S. Hashimoto. Analysis and Design of Power Management Scheme for an On-board Solar Energy Storage System. The International Power Electronics Conference, 2014.

Chapitre 4

Récupération d'énergie éolienne pour les capteurs communicants

1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la technique de récupération d'énergie éolienne que l'on a choisie comme deuxième source d'énergie. Pour cela, nous commençons par un rappel sur la composition d'un système éolien à savoir le rotor et la machine synchrone, ainsi que le principe de fonctionnement d'une éolienne. Nous présentons ensuite les différents types de turbines disponibles en expliquant brièvement l'influence des paramètres extérieurs tels que le vent et l'angle d'orientation des pales sur ses caractéristiques.

La deuxième partie du chapitre est dédiée à la modélisation de l'énergie éolienne puis à celle du vent. En effet, il s'agit de modéliser et d'estimer la quantité d'énergie éolienne récupérée à travers la caractérisation de la micro-turbine. Afin de quantifier l'énergie incidente, nos modèles de caractérisation sont basés sur des bases de données qui montrent l'évolution du vent en fonction du temps pendant un an dans différentes régions françaises. Les modèles développés sont ensuite validés par des simulations en utilisant un exemple de micro-turbine de caractéristiques connues. L'énergie éolienne récupérée est enfin adaptée par des convertisseurs AC/DC pour être stockée dans les supports de stockage usuels tels que les batteries ou les super-condensateurs.

2 Généralités

2.1 Énergie éolienne pour les capteurs communicants

La récupération d'énergie éolienne a connu un essor important ces dernières décennies [1]. La recherche dans ce domaine se fait principalement du côté des grandes éoliennes avec des pales qui dépassent les dizaines de mètres et des puissances de l'ordre du Mégawatt [2-3]. À l'opposé, on retrouve des éoliennes de petites dimensions dites micro-turbines permettant de donner des puissances allant de quelques Watts à quelques dizaines de kilowatts [1-2]. Ces micro-turbines sont destinées à la production de l'énergie pour des domaines spécifiques tel que celui des objets communicants. En effet, les recherches avancées dans le domaine des basses énergies rendent de plus en plus accessible la production de l'électricité à partir du vent afin d'alimenter les capteurs communicants. Ainsi, un effort

scientifique et technique important à travers le développement d'outils de conception, de simulation et de tests a permis d'améliorer le fonctionnement de ces petites éoliennes afin d'augmenter leurs performances [1, 3-4].

Comme indiqué dans les chapitres précédents, il s'agit de réaliser un capteur communiquant qui soit autonome en énergie. Cette autonomie d'énergie se base principalement sur la récupération d'énergie solaire comme étant la source principale d'énergie. La deuxième source d'énergie choisie, permettant d'avoir une quantité d'énergie comparable en niveaux voire même complémentaire dans le temps, est l'énergie éolienne. Nous présentons à travers ce chapitre les différents aspects de cette technologie, ainsi qu'un modèle de caractérisation d'énergie éolienne. Ce modèle est basé sur l'utilisation d'un ensemble de données qui fournissent l'évolution du vent moyen pendant un an.

2.2 Historique de l'énergie éolienne

Depuis longtemps, l'être humain a compris l'intérêt de l'utilisation du vent. C'est ainsi que cette énergie renouvelable est utilisée pour divers usages et dans différents domaines depuis de nombreux siècles [5].

Depuis l'an 600, des moulins à vent produisant de l'énergie mécanique à partir du vent ont été exploités (figure 4.1). Ces moulins sont les ancêtres des éoliennes actuelles (au lieu de broyer des grains de blé, les éoliennes modernes produisent de l'énergie électrique) [5]. Les premières éoliennes étaient utilisées dans des endroits non-connectés au réseau électrique. Dans ce cas, l'énergie récupérée n'était pas stockée. Cependant, la maîtrise du stockage de l'énergie récupérée en utilisant les batteries a permis ensuite une utilisation plus performante des éoliennes [5-6].

Les années 1970 à 2000 ont vu une évolution importante dans ce domaine, bénéficiant des progrès technologiques et scientifiques de l'aérodynamique, des matériaux et de l'électronique. En effet, l'accroissement de nos besoins énergétiques suscite le développement et la mise en œuvre d'éoliennes possédant différentes caractéristiques électriques [7].

Aujourd'hui, on note la production de petites éoliennes qui sont utilisées dans de nombreux domaines de la vie quotidienne. Ces éoliennes servent à produire un courant électrique permettant de charger des objets connectés tels que les smartphones, elles sont alors devenues des sources prometteuses d'énergie qui couvrent les besoins énergétiques des objets communicants.



Moulins à vent



Eolienne à axe horizontal



Eolienne à axe vertical



Eolienne sans pâles

Figure 4.1 – Historique d'évolution des éoliennes.

2.3 Composition et principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est un générateur d'électricité qui fonctionne grâce à la vitesse du vent. Elle permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation. Cette rotation est ensuite convertie en énergie électrique par un générateur ou une machine électrique [8]. L'éolienne se compose de deux parties principales (figure 4.2) :

- Partie mécanique (rotor et pales de l'éolienne) : les éoliennes sont composées d'un nombre d'ailes ou de pales qui tournent autour d'un rotor à axe horizontal ou vertical.

- Partie électrique : l'hélice de l'éolienne fait tourner son générateur électrique qui se trouve dans la nacelle. Entre l'hélice et le générateur électrique se trouve généralement un multiplicateur de vitesse, car l'hélice de l'éolienne tourne à des vitesses d'environ 10 à 60 tours/min alors qu'un générateur électrique doit être entraîné à environ 1000 à 1500 tours/min [9].

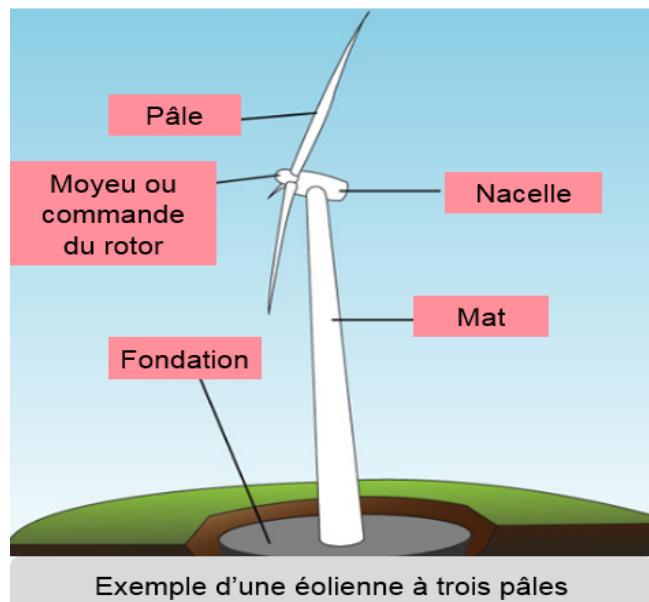


Figure 4.2 – Composition d'une éolienne.

Pour résumer, l'éolienne permet de convertir, à travers l'utilisation d'un système mécanique, l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Son rotor est mis en mouvement à partir d'une vitesse de vent minimale appelée vitesse de démarrage. Ensuite, l'éolienne monte progressivement en régime pour fonctionner à pleine puissance entre 50 et 90 km/h, vitesse limite à laquelle elle est arrêtée et mise en sécurité [10].

2.4 Différents types d'éoliennes

Sur le marché, il existe différents types d'éoliennes pour produire l'électricité. Parmi ces éoliennes, on cite les éoliennes classiques à axe horizontal qui ont généralement trois pales (numéro (1) sur la figure 4.3), parfois une ou deux pales (2). Il existe également des éoliennes à axe vertical telles que les éoliennes de Darrieus (3) et les éoliennes de Savonius (4) [5, 10-11].



Figure 4.3 – Différents types d'éoliennes.

2.4.1 Éoliennes à axe horizontal

Ces éoliennes sont constituées d'un rotor de type hélice qui est monté sur un axe horizontal. Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes en bois ont été remplacées par des pales ressemblant fortement à des ailes d'avion [7]. Dans la littérature [12], deux types de configuration peuvent-être rencontrés. Il s'agit dans le premier cas d'éolienne dite "en amont" où les pales sont situées du côté de la tour exposé au vent. Cette configuration est la plus adoptée aux turbines modernes. La deuxième configuration définie des éoliennes dites "en aval". Dans ce cas, le vent souffle sur l'arrière des pales (figure 4.4). Cette configuration est utilisée dans le cas des petites éoliennes de maison qui présentent des pales moins solides que celles des grandes éoliennes industrielles "en amont" [12-13].

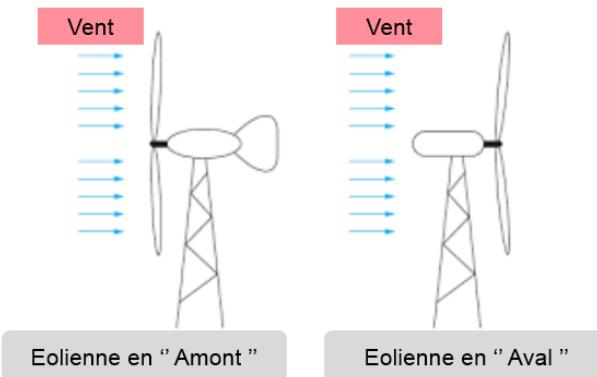


Figure 4.4 – Exemples d'éoliennes à axe horizontal.

2.4.2 Éoliennes à axe vertical

Le principe de mise en mouvement de ces éoliennes est basé sur les efforts exercés par le vent sur chacune des faces de l'éolienne. Ces efforts permettent de créer des intensités différentes [7-8]. Il en résulte ainsi un couple moteur que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique. Une illustration courante de ce type d'éolienne est le rotor de Savonius où la circulation de l'air entre les demi-cylindres augmente le couple moteur (figure 4.5). Avant le démarrage, les cylindres sont orientés par rapport au vent de manière

à obtenir un couple résultant nul (l'éolienne ne pourra donc pas démarrer spontanément). Pour remédier à ce problème, on superpose plusieurs rotors identiques, mais décalés d'un certain angle les uns par rapport aux autres, ce qui permet d'entraîner l'éolienne avec une vitesse de démarrage minimale [12-13].

Le principal avantage de ces machines par rapport aux turbines à axe horizontal, est que l'éolienne ne nécessite pas un système d'orientation par rapport à la direction du vent. Afin de produire de l'électricité, le dispositif de génération électrique de ces éoliennes nécessite l'édification d'une tour comme pour les éoliennes à axes horizontaux.

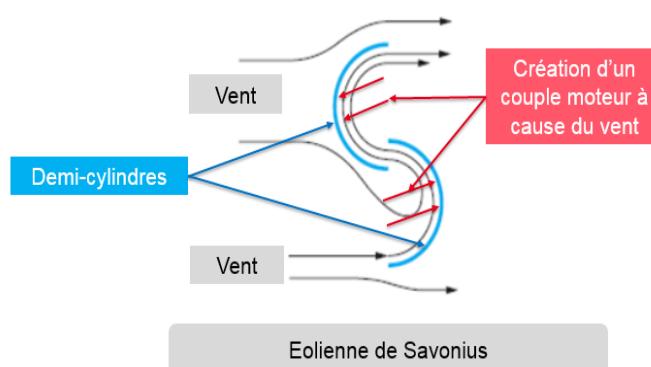


Figure 4.5 – Exemple d'éolienne à axe vertical.

3 Modélisation de l'énergie éolienne

Comme indiqué précédemment, les micro-turbines sont composées principalement par un rotor et une génératrice qui est généralement à aimant permanent [13]. Pour modéliser ces micro-turbines, on se réfère à la figure 4.6 qui montre les principales étapes de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis électrique.

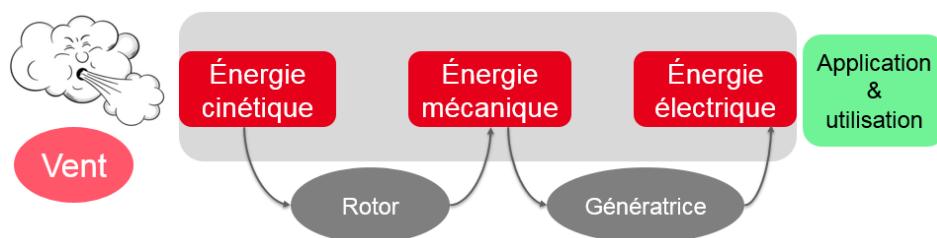


Figure 4.6 – Différentes formes d'énergies dans une éolienne.

Afin d'évaluer les performances d'un système éolien, nous allons étudier séparément ses composants. Les deux parties principales à modéliser sont le rotor et l'alternateur (ou la génératrice). Pour chacune de ces composantes, nous allons faire tout d'abord une revue plus générale. Ce qui permet d'étudier ensuite son principe de fonctionnement afin d'élaborer un modèle mathématique final qui modélise tout le système.

3.1 Modélisation du rotor

Le rotor est la composante mécanique de l'éolienne qui permet de convertir une partie de l'énergie cinétique de la masse d'air qui est en déplacement en énergie mécanique [1, 13-14]. Le rotor doit permettre d'obtenir une puissance mécanique ou un couple mécanique qui est transmis à l'arbre de la génératrice pour produire un courant alternatif.

3.1.1 Puissance disponible : puissance du vent

Pour modéliser le rotor, nous commençons par le calcul de la puissance du vent qui traverse une surface notée S (S est la surface balayée par les différentes pales de l'éolienne). La figure 4.7 représente cette section balayée par le rotor.

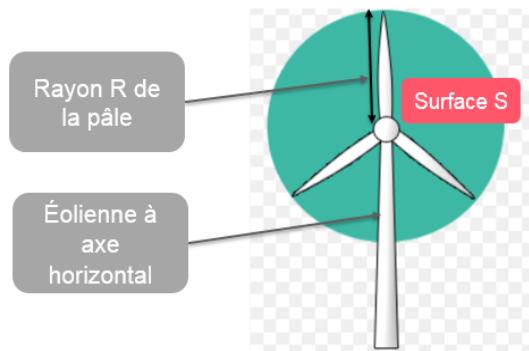


Figure 4.7 – Surface S balayée par les pales de l'éolienne

L'énergie cinétique du vent notée E_c (en Joules) est donnée par la relation (4.1) :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_{air}^2, \quad (4.1)$$

telles que m et V_{air} sont respectivement la masse (en kg) et la vitesse (en m/s) du vent. La masse de la quantité d'air en déplacement peut s'écrire sous la forme suivante :

$$m = \rho \cdot V_{vol}, \quad (4.2)$$

avec ρ et V_{vol} , respectivement, la masse volumique (en kg/m^3) et le volume (en m^3) de l'air. Ensuite, si on considère un dispositif de récupération de cette énergie E_c , alors le volume d'air qui traverse cette surface en une seconde, avec une vitesse V_{air} (supposée identique à chaque point de cette surface), s'écrit :

$$V_{vol} = V_{air} \cdot S \quad (4.3)$$

En utilisant les équations (4.1), (4.2) et (4.3) la puissance du vent, notée P_v , qui est disponible au niveau de la surface S s'exprime comme le suivant :

$$P_v = P_{in} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_{air}^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{vol} \cdot V_{air}^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{air} \cdot S \cdot V_{air}^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{air}^3, \quad (4.4)$$

avec, P_{in} , ρ et V_{air} , respectivement, la puissance, la masse volumique et la vitesse du vent.

3.1.2 Puissance mécanique : puissance du rotor

La puissance mécanique P_{mec} à la sortie du rotor est donnée par la relation suivante :

$$P_{mec} = C_p \cdot P_v = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{air}^3, \quad (4.5)$$

tel que C_p est le coefficient de puissance du rotor qui renseigne sur le rendement de conversion de la micro-turbine. Ce coefficient est défini comme étant le pourcentage de la puissance du vent qui est convertie par le rotor en puissance mécanique.

Coefficient de puissance du rotor C_p

Le calcul du coefficient de puissance C_p du rotor (ou coefficient de performance de l'éolienne) est basé sur la géométrie et les dimensions du rotor. En effet, en connaissant le nombre de pales ainsi que leurs caractéristiques géométriques (longueur, largeur et épaisseur), il est possible de déterminer le coefficient C_p du rotor [1-3]. Dans la littérature, la courbe du coefficient C_p est donnée en fonction d'une vitesse spécifique notée λ . Cette vitesse spécifique est définie par la relation (4.6) :

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V_{air}}, \quad (4.6)$$

où R , V_{air} et ω , respectivement, la longueur de la pale (en m), la vitesse du vent (en m/s) et la vitesse angulaire mécanique du rotor (en rad/s). Cette dernière peut-être calculée en utilisant la formule suivante :

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (4.7)$$

telle que n est la vitesse angulaire mécanique du rotor (en $tour/min$).

Pour conclure, le coefficient de puissance C_p peut-être calculé en utilisant l'équation (4.8) :

$$C_p = C_1 \cdot \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \cdot \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \cdot \lambda, \quad (4.8)$$

tels que C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , C_6 et β sont respectivement six coefficients relatifs aux caractéristiques géométriques du rotor et l'angle d'orientation des pales [15]. Le rapport $\frac{1}{\lambda_i}$ peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (4.9)$$

De façon intuitive, il est difficile, voire même impossible, de collecter un pourcentage égale à 100% de la puissance du vent [1, 14-15]. En effet, on montre à travers la figure 4.8 que le pourcentage maximum théorique du coefficient C_p ne dépasse pas un certain maximum noté C_{pmax} .

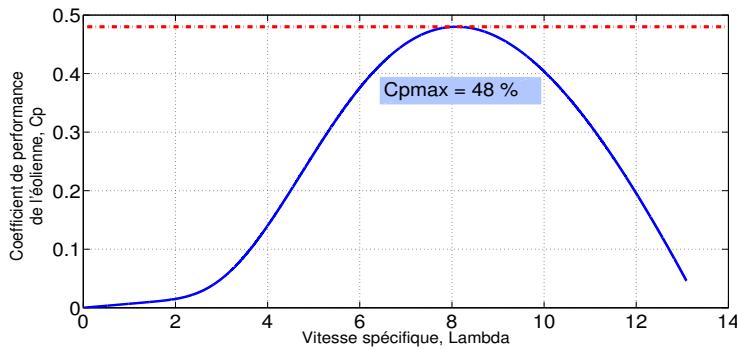


Figure 4.8 – Coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ .

La figure 4.9 présente l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ pour différents angles d'orientation des pales. On note que l'orientation des pales influe sur les performances de la micro-turbine. En effet si cet angle augmente, les performances de l'éolienne diminuent.

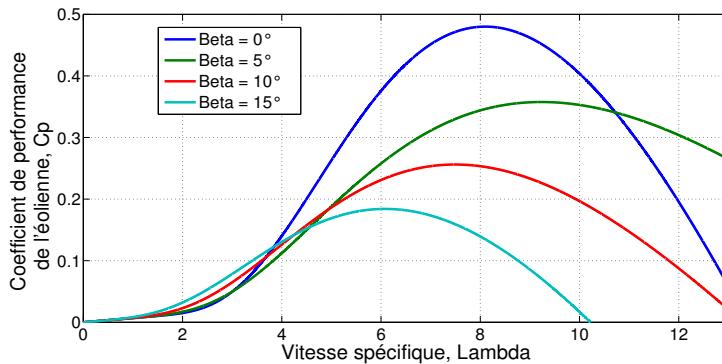


Figure 4.9 – C_p en fonction de λ pour différents angles d'orientation des pales.

Théorie de Betz

Le physicien Allemand Albert Betz (1885-1968) a démontré en 1919 que la puissance électrique maximale P_{max} récupérable par la turbine est donnée par la relation (4.10) [16] :

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot P_{in} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{air}^3 \quad (4.10)$$

Ceci signifie que le rendement théorique maximum d'une éolienne est égale à $\frac{16}{27}$, soit environ 59%. Ce rendement ne tient pas compte des pertes d'énergie lors de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique par la génératrice [17].

3.1.3 Couple mécanique du rotor

Pour trouver l'expression du couple mécanique appliqué à l'arbre de rotation du rotor, on utilise l'équation (4.11) :

$$T_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega} = \frac{30 \cdot P_{mec}}{\pi \cdot n}, \quad (4.11)$$

avec T_{mec} , P_{mec} et ω , respectivement, le couple mécanique (en N/m), la puissance mécanique (en W) et la vitesse angulaire mécanique du rotor (en rad/s).

3.1.4 Puissance électrique de l'éolienne

La puissance électrique de l'éolienne notée P_{elec} s'écrit sous la forme suivante :

$$P_{elec} = \rho_m \cdot P_{mec}, \quad (4.12)$$

avec ρ_m le rendement de la machine électrique.

3.1.5 Vitesses de démarrage et d'arrêt de l'éolienne

La vitesse de démarrage de la turbine est la vitesse à laquelle le rotor commence à tourner à faible vitesse pour produire l'énergie. Alors que, la vitesse maximale d'arrêt de la turbine est définie comme étant la vitesse maximale du vent à partir de laquelle l'éolienne est arrêtée pour des raisons de sécurité, c'est à dire qu'au delà de cette vitesse l'éolienne risque d'être détruite [18].

3.2 Modélisation de la génératrice

3.2.1 Différents types de génératrice

Dans la littérature [1-3, 17-19], les machines tournantes peuvent fonctionner en deux modes différents. Le premier mode est appelé mode moteur : ce mode permet de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Le deuxième mode, dit mode génératrice, permet de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique [19-20]. Comme montré dans [17-19], il existe deux types de machines tournantes :

- A. Machines asynchrones
- B. Machines synchrones

La machine asynchrone fournit une tension alternative à ses bornes. Elle est robuste et moins coûteuse que la machine synchrone. Cependant, pour fonctionner, elle doit être reliée au réseau de distribution afin de créer le champ tournant. Elle n'est donc pas adaptée à priori aux systèmes autonomes. Ce type de machine est plus utilisé pour les éoliennes de grandes dimensions [20].

Quant à la génératrice synchrone, elle fournit également une tension alternative à ses bornes. Par contre, elle ne nécessite pas le réseau de distribution pour magnétiser le rotor [21]. Ce sont des génératrices que l'on utilise dans la plupart des travaux de capteurs communicants qui présentent de faibles consommations d'énergie.

Afin de modéliser la partie électrique de l'éolienne, nous avons choisi la machine synchrone pour l'étude qui suit.

3.2.2 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

Le modèle de la machine synchrone à aimant permanent MSAP est dérivé d'un système ou repère à deux axes noté $d - q$. Le repère $d - q$ permet de modéliser la partie tournante, dite rotor, de la machine. Dans ce cas, le premier axe noté q doit être en avance de phase d'un angle de 90 degrés par rapport au deuxième axe noté d . La deuxième partie fixe de la

machine, dite stator, est un système fixe à trois axes *ABC* [22-23]. La figure 4.10 montre les différentes parties de la machine synchrone où θ (angle entre l'axe *d* du rotor et l'axe *A* du stator) est l'angle mécanique de rotation.

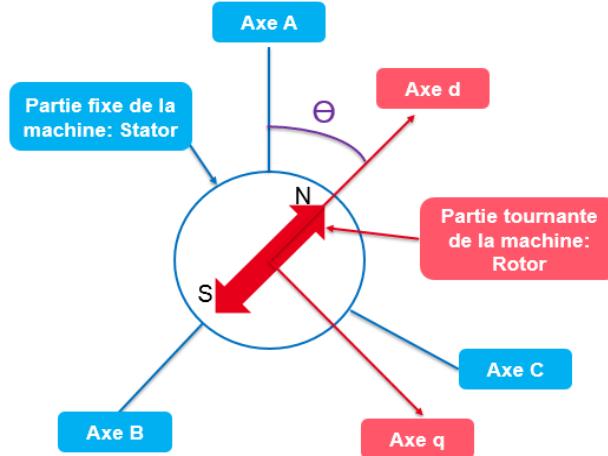


Figure 4.10 – Modèle d'une machine synchrone à aimant permanent.

Afin de modéliser la machine synchrone MSAP, on se base sur les hypothèses suivantes [22-24] :

- L'enroulement du stator est symétrique.
- Les capacités de tous les enroulements sont négligées.
- Les résistances internes sont constantes, ce qui signifie que les pertes de puissance sont considérées constantes.

Dans la littérature, modéliser la génératrice MSAP revient à calculer sa vitesse de rotation électrique ainsi que son couple électromagnétique [23-24]. Ainsi, la vitesse de rotation électrique de la génératrice notée ω_e (en rad/s) est définie par l'équation suivante :

$$\omega_e = n_g \cdot \omega_g, \quad (4.13)$$

tel que n_g et ω_g sont respectivement le nombre de paires de pôles de la machine et la vitesse de rotation mécanique du rotor. Quant au couple électromagnétique de la génératrice, il peut-être calculé en utilisant l'équation (4.14) :

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot n_g \cdot [(L_{ds} - L_{ls}) \cdot i_d \cdot i_q + i_q \cdot \epsilon_f], \quad (4.14)$$

avec, L_{ds} , L_{ls} , i_d , i_q et ϵ_f , respectivement, l'inductance des deux axes *q* et *d* du rotor, l'inductance modélisant les pertes dans la génératrice, les valeurs des courants créés par les deux axes *d* et *q* du rotor et le flux magnétique permanent.

3.3 Modélisation du convertisseur AC/DC

Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif/continu (AC/DC), est un convertisseur destiné à alimenter une charge quelconque par une tension ou un courant continu à partir d'une source alternative [30]. Dans la littérature, on distingue deux familles de convertisseurs AC/DC :

- Redresseurs simple alternance : ces redresseurs admettent les tensions positives et annulent les tensions négatives. Une simple diode en série avec la charge suffit à réaliser cette opération [30-31].
- Redresseurs double alternance : ces redresseurs commutent de manière à transformer les tensions négatives en tensions positives [30-31]. Dans ce cas, le convertisseur le plus utilisé pour redresser le signal alternatif à la sortie de l'éolienne est le pont de quatre diodes (ou pont de Graetz).

On note que la majorité des machines synchrones à aimant permanent, utilisées pour construire les éoliennes de petites tailles, sont des génératrices triphasées [32]. Pour cela, nous présentons dans la suite l'exemple d'un redresseur double alternance triphasé. Ce convertisseur est modélisé en utilisant un montage en pont de Graetz avec six diodes (figure 4.11).

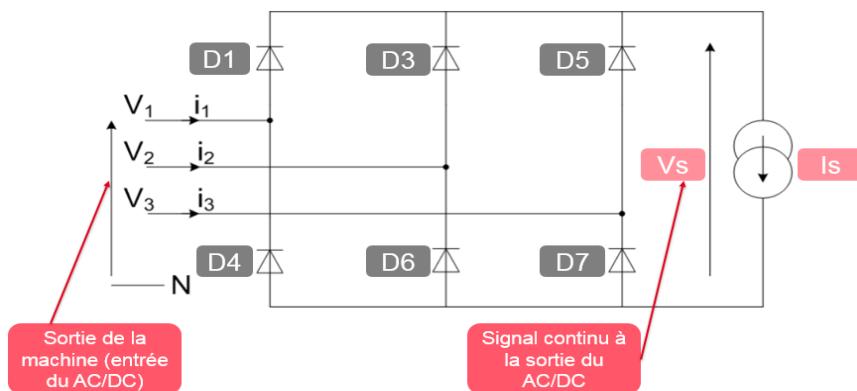


Figure 4.11 – Schéma équivalent du convertisseur AC/DC.

Telles que les tensions V_1 , V_2 et V_3 sont les trois tensions de phase par rapport au neutre. Ces tensions ont une valeur efficace notée V . Les diodes utilisées dans cette étude sont des diodes de Schottky ayant une tension de seuil faible (environ 0.3 V). La sortie du convertisseur est caractérisé par un signal continu de tension notée V_s . Cette tension sera stockée dans un support de stockage usuel tels que les batteries ou les super-condensateurs pour alimenter le capteur communicant.

4 Caractérisation de l'énergie éolienne récupérée

4.1 Étude du vent

4.1.1 Distribution du vent incident

Le vent est une source d'énergie intermittente dont la force varie en permanence. Pour prévoir la production de l'énergie d'une éolienne, il est intéressant de connaître la force et la fréquence d'apparition exactes du vent [25]. En mesurant la vitesse moyenne du vent avec un anémomètre, on peut alors répartir les valeurs obtenues en différentes classes variant d'une vitesse de 1 m/s par exemple [25-26]. On peut ainsi exprimer le potentiel énergétique d'un site donné en fonction de la fréquence d'apparition des différentes classes de vitesses.

Dans ce cas, la distribution de *Weibull* permet d'avoir une bonne approximation de la distribution de la vitesse du vent [26]. Il s'agit d'une fonction de densité de probabilité qui s'exprime sous la forme suivante :

$$f(V_{air}) = \left(\frac{K}{C}\right) \cdot \left(\frac{V_{air}}{C}\right)^{K-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{V_{air}}{C}\right)^K\right), \quad (4.15)$$

où $f(V_{air})$, K et C , respectivement, la densité de probabilité de la vitesse V_{air} , le facteur de forme de Weibull qui donne la forme de la distribution du vent (plus la valeur de K est faible plus la vitesse du vent est variable, tandis qu'une valeur élevée de K indique que la vitesse du vent est constante) et le facteur d'échelle de Weibull (en m/s), il permet d'exprimer la chronologie de la vitesse caractéristique de l'air. Ce facteur C est proportionnel à la vitesse moyenne du vent [27].

Pour des raisons de simplification, l'équation (4.15) peut-être réécrite sous la forme suivante :

$$f(V) = K \cdot C^{-K} \cdot V_{air}^{K-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{V_{air}}{C}\right)^K\right), \quad (4.16)$$

La vitesse moyenne du vent V_{moy} est obtenue en intégrant la fonction de la densité de probabilité $f(V_{air})$, soit donc la formule suivante :

$$V_{moy} = \int V_{air} \cdot f(V_{air}) \cdot dV_{air} \quad (4.17)$$

La figure 4.12 présente un exemple de la distribution de Weibull pour un site à Nantes. Le facteur de forme K est égal à 3 (si K est égale à 2, on parle de la distribution de Rayleigh) et le facteur d'échelle C est choisi égal à la vitesse moyenne du vent.

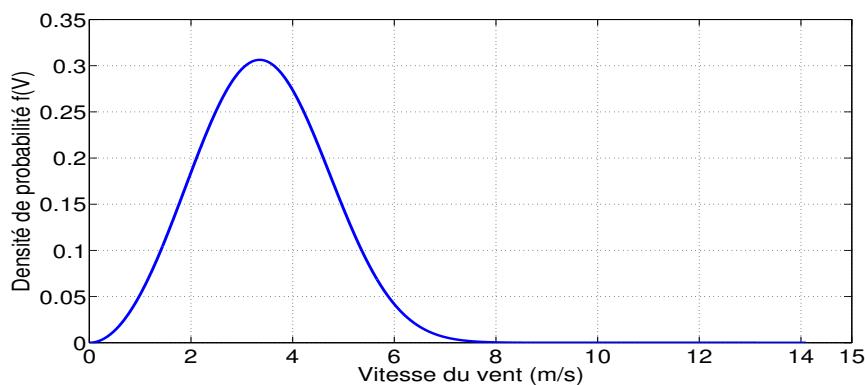


Figure 4.12 – Distribution de la vitesse du vent (cas d'étude : Nantes).

4.1.2 Modélisation du vent

Afin d'étudier la variation des caractéristiques du vent en fonction du temps et de voir son effet sur la puissance de la micro-turbine, nous présentons dans ce paragraphe les résultats de mesure du vent sur un site particulier à Nantes en utilisant le logiciel Météonorm. Dans ce cas, nous avons utilisé des bases de données qui présentent des mesures de vent toutes les heures pendant une vingtaine d'années (on a pris Nantes comme

étant un cas d'étude) [28-29]. La figure 4.13 montre l'évolution du vent moyen pendant une année en commençant par le mois de janvier. On remarque que le vent maximum est égal à 14.1 m/s pour ce site, avec une valeur moyenne égale à 4 m/s.

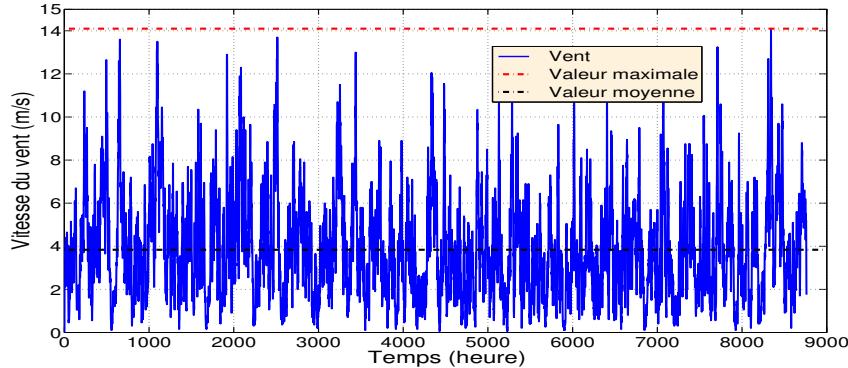


Figure 4.13 – Évolution du vent moyen pendant un an (cas d'étude : Nantes).

Afin de retrouver les caractéristiques du vent pour le site étudié, on trace la fréquence d'apparition du vent à la figure 4.14. Dans un premier temps, on vérifie à travers cet histogramme que le vent moyen mesuré pendant toute une année présente une certaine similitude avec la distribution de Weibull. Ensuite, on remarque que la vitesse du vent est principalement comprise entre 1 et 6 m/s pour ce site.

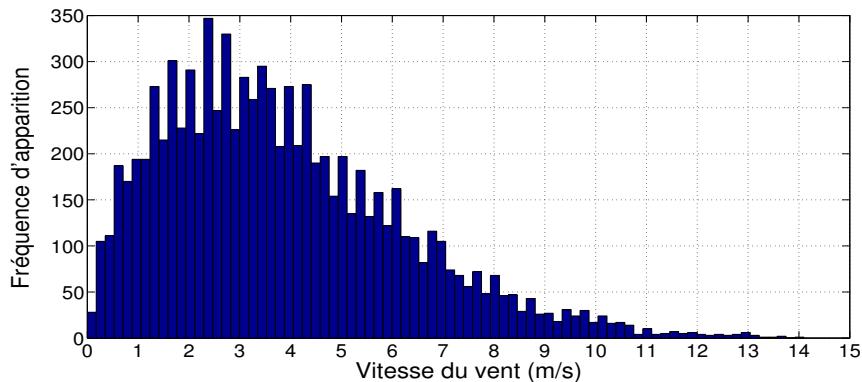


Figure 4.14 – Distribution de la vitesse du vent (cas d'étude : Nantes).

Cette étude qui montre l'évolution du vent en fonction du temps est très intéressante pour caractériser la quantité d'énergie éolienne que l'on peut récupérer à court et à long termes. Elle est aussi utile afin d'établir des modèles de prédiction d'énergie éolienne pour faire la gestion d'énergie du capteur communicant.

4.2 Caractérisation de l'énergie éolienne

Pour étudier les caractéristiques de la micro-turbine et voir l'effet de la variation du vent sur la puissance mécanique du rotor et la puissance électrique de sortie de l'éolienne, nous avons développé un modèle générique de récupération d'énergie éolienne. Ce modèle de micro-turbine peut-être appliqué aux deux types d'éoliennes (éoliennes à axe vertical

et horizontal). On note que les caractéristiques principales de l'éolienne sont le rayon R (longueur de la pale), la puissance mécanique du rotor et la puissance électrique de sortie de l'éolienne.

4.2.1 Éolienne et caractéristiques

Afin de valider le modèle développé, nous avons utilisé les caractéristiques d'une éolienne à axe horizontal avec un rayon R égal à 10 cm. Cette éolienne est capable de fournir une puissance électrique égale à 10 W pour une vitesse d'air égale à 12 m/s. La figure 4.15 montre l'évolution du couple mécanique de la micro-turbine en fonction de la vitesse de rotation de son rotor ω . On remarque que ce couple est maximal lorsque la vitesse ω est égale à 800 rad/s.

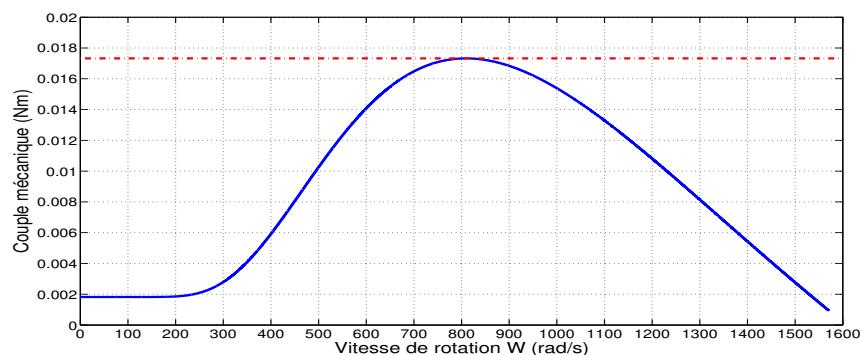


Figure 4.15 – Évolution du couple mécanique de la micro-turbine en Newton mètre (Nm).

L'évolution de la puissance mécanique du rotor et de la puissance électrique de la micro-turbine en fonction de la vitesse de rotation du rotor ω est présentée par la figure 4.16. Dans ce cas, la puissance mécanique donnée par l'éolienne est obtenue pour une vitesse de rotation du rotor ω égale à 975 rad/s (figure 4.16(a)). La figure 4.16(b) permet de retrouver la puissance maximale de l'éolienne qui est égale à 10 W pour la même vitesse de rotation ω du rotor (975 rad/s). Cette puissance est obtenue pour une vitesse d'air égale à 12 m/s.

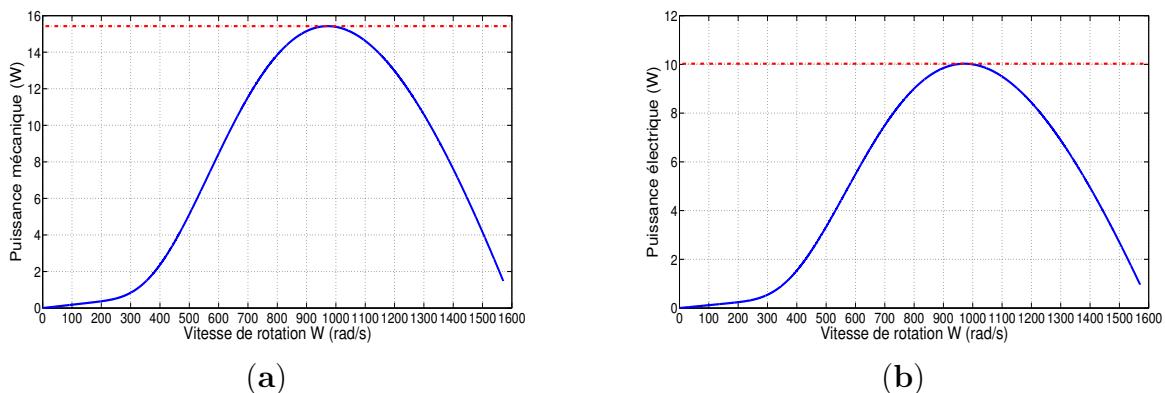


Figure 4.16 – (a) Évolution de la puissance mécanique du rotor ; et (b) Évolution de la puissance électrique de la micro-turbine.

La figure 4.17 montre l'évolution de la puissance mécanique du rotor et de la puissance électrique de l'éolienne en fonction de la vitesse d'air. On remarque que si cette vitesse augmente, alors les deux puissances augmentent simultanément. On retrouve ainsi les valeurs maximales de la puissance mécanique (15.4 W) et de la puissance électrique (10 W), pour une vitesse d'air égale à 12 m/s.

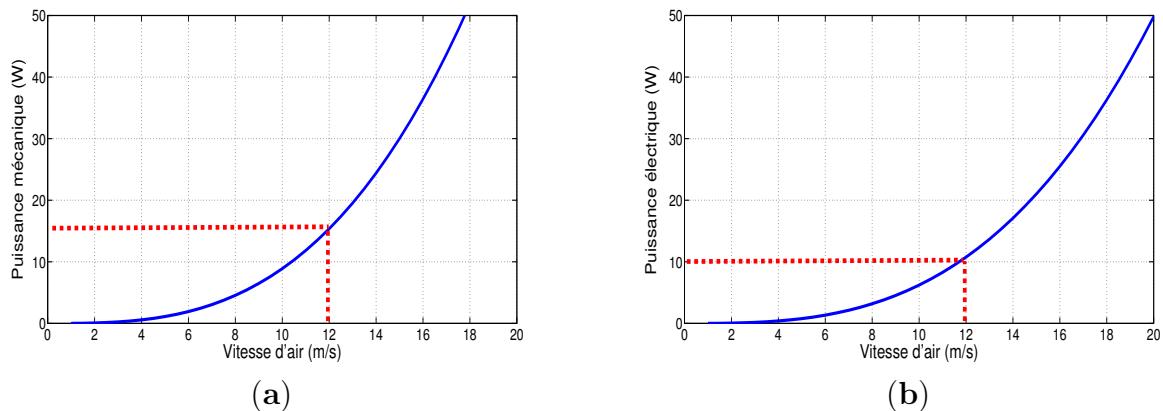


Figure 4.17 – (a) Puissance mécanique en fonction de la vitesse d'air ; et **(b)** Puissance électrique en fonction de la vitesse d'air.

La figure 4.18 présente l'évolution de la puissance électrique de l'éolienne en fonction de la vitesse du rotor ω pour différentes vitesses d'air V_{air} . On remarque que si V_{air} augmente alors la puissance électrique maximale de la turbine augmente. Pour V_{air} égale à 12 m/s, on retrouve la puissance maximale obtenue par l'éolienne qui est égale à 10 W.

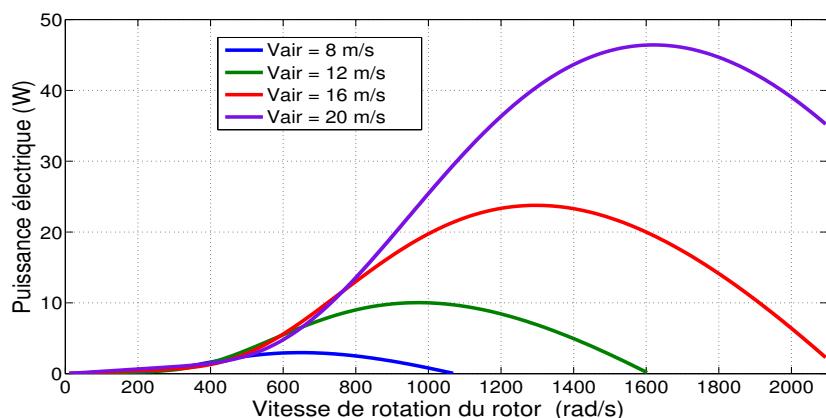


Figure 4.18 – Puissance électrique de l'éolienne en fonction de la vitesse de rotation ω pour différentes vitesses d'air.

La figure 4.19 montre l'évolution de la puissance électrique de l'éolienne en fonction de la vitesse d'air pour différentes valeurs du rayon R des pales. On remarque que, pour une vitesse d'air constante (12 m/s par exemple), si R augmente la puissance éolienne obtenue augmente.

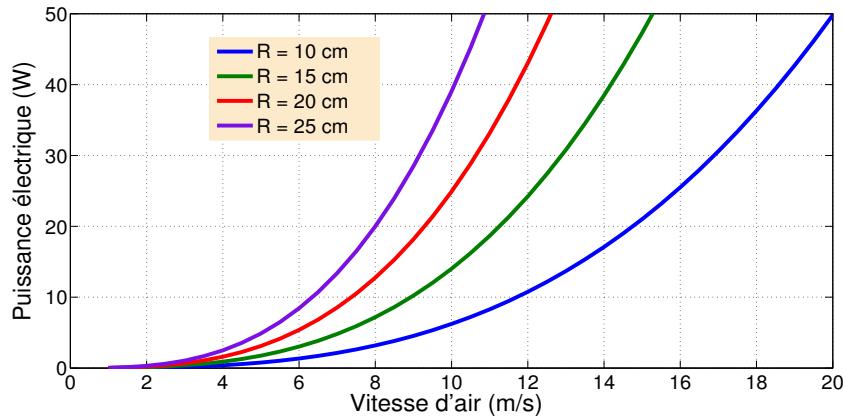


Figure 4.19 – Puissance électrique de l'éolienne en fonction de la vitesse d'air pour différents rayons R des pales.

4.2.2 Effet du vent sur les caractéristiques de l'éolienne

Comme expliqué précédemment, les caractéristiques mécaniques et électriques de l'éolienne sont sensibles à la variation du vent. En utilisant les résultats de la figure 4.13, on remarque que l'évolution de ces puissances est proportionnelle à la variation du vent pendant toute l'année. La figure 4.20 montrent l'effet de cette variation sur la puissance électrique récupérée en utilisant le modèle de l'éolienne présenté dans la section précédente. Dans ce cas, on remarque que la puissance électrique maximale est égale à 16.2 W pour un vent maximum égal à 14.1 m/s.

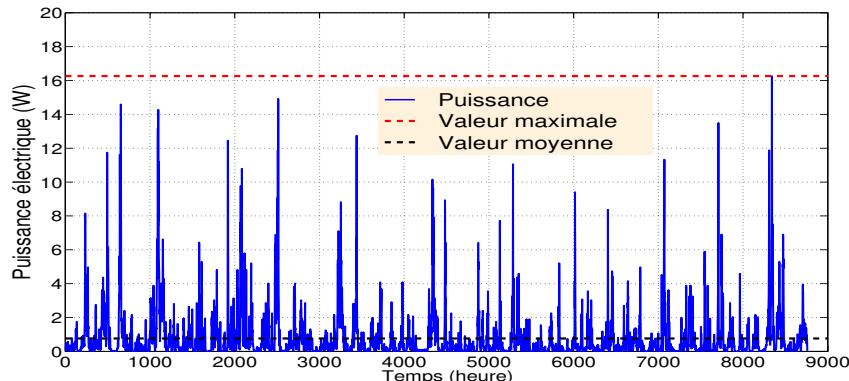


Figure 4.20 – Évolution de la puissance éolienne récupérée pendant une année (site étudié : Nantes).

La figure 4.21 montre les résultats de caractérisation de l'énergie éolienne récupérée. En effet, cette figure présente l'évolution de la quantité d'énergie électrique récupérée par jour pendant l'année (en commençant par le mois de janvier). On remarque que l'énergie électrique maximale est égale à 192 Wh/jour avec une valeur moyenne égale à 18 Wh/jour.

Pour conclure, on montre à travers les résultats obtenus que l'on peut caractériser l'énergie éolienne incidente afin de faire le management d'énergie des capteurs communicants.

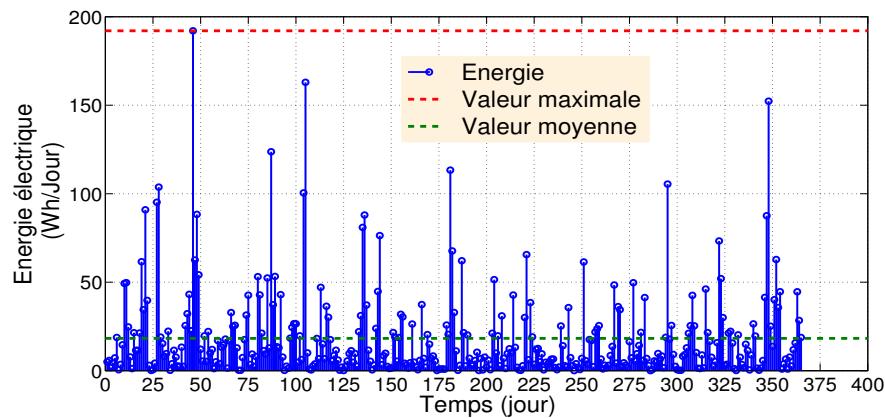


Figure 4.21 – Évolution de l'énergie électrique récupérée pendant une année (site étudié : Nantes).

En utilisant les résultats précédents, la figure 4.22 montre la variation de la probabilité où l'énergie éolienne récupérée par jour notée E_r atteint une certaine valeur donnée x , notée $P(E_r > x)$. On remarque que dans 70% des cas, l'énergie électrique récupérée par jour atteint la valeur 160 W/jour . Il est à noter que le modèle développé ne prend pas en compte le temps de réponse de l'éolienne (les caractéristiques dynamiques telle que la vitesse d'arrêt de la micro-turbine).

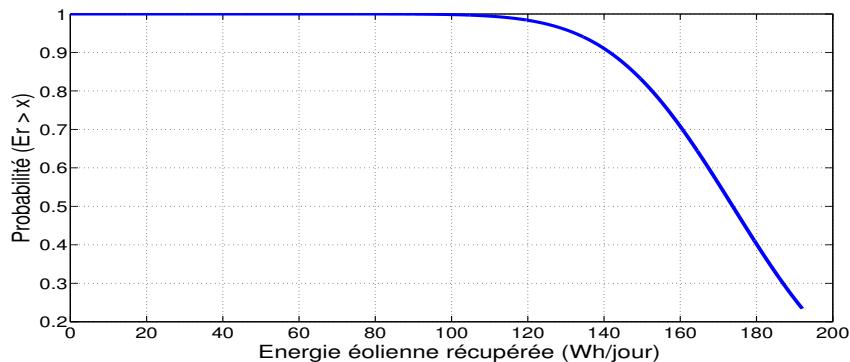


Figure 4.22 – La probabilité où E_r atteint une valeur donnée.

5 Conclusion

Ce chapitre présente une étude sur la technologie de récupération d'énergie éolienne pour les objets communicants. Pour cela, nous avons proposé des modèles de caractérisation de la quantité d'énergie éolienne qui peut-être récupérée. Ces modèles s'appuient sur des équations analytiques qui permettent de modéliser la micro-turbine.

Dans la première partie du chapitre, nous avons commencé par un rappel sur la composition et le principe de fonctionnement de l'éolienne dans le cas général. Ensuite, nous avons présenté les différents types d'éoliennes qui permettent d'avoir l'électricité à partir du vent. Puis, on est passé à la modélisation de la turbine à travers la modélisation de la partie mécanique (le rotor) et de celle électrique (la machine synchrone). Nous avons

proposé ensuite un modèle de micro-turbine qui permet d'avoir une puissance maximale égale à 10 W pour une vitesse d'air égale à 12 m/s.

Les modèles développés sont enfin testés en utilisant des bases de données qui présentent l'évolution du vent pendant une année. En effet, en utilisant le modèle proposé de la micro-turbine, nous avons caractérisé la quantité d'énergie éolienne que l'on peut récupérée par jour. Cette caractérisation est nécessaire pour faire la gestion d'énergie du capteur communicant.

Après avoir modélisé la consommation énergétique d'un capteur communicant en LoRa et étudié des dispositifs permettant de récupérer l'énergie solaire et éolienne pour alimenter le nœud capteur, nous allons passer ensuite à faire la gestion d'énergie de tout le système. Cette gestion se base sur la prédiction d'énergie incidente. Pour cela, nous allons présenter dans le chapitre suivant les résultats de prédiction d'énergie pour les capteurs communicants.

Bibliographie : chapitre 4

- [1] J.-D. Langlois. Modélisation et étude des performances des systèmes éoliens hors réseaux, Montréal, avril 2006.
- [2] S. Drouilhet, E. Muljadi, R. Holz and V. Gevorgian. Optimizing small wind turbine performance in battery charging applications. In Annual conference and exhibition on wind power (25th), United States.
- [3] J. Pierik. Pemswecs performance evaluation methods for autonomous, applications oriented, wind turbine systems : Systems with batteries. rapport de recherche dans le cadre du programme JOULE III sur les énergies renouvelables de la commission européenne ECN-C-01-032, National Engineering Laboratory NEL (UK), Windenergie Institute DEWI (Germany), Energy research Centre of Netherlands ECN (NL), 2001.
- [4] E. Muljadi, S. Drouilhet, R. Holz and V. Gevorgian. Analysis of permanent magnet generator for wind power battery charging. IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting, Oct. 1996, vol. vol.1 of IAS.96, San Diego, CA, USA.
- [5] Projet de Physique P6-3 STPI/P6-3/2009.41, Dimensionnement d'une installation éolienne et modélisation d'une pale d'éolienne, INSA ROUEN, 2009.
- [6] A.M. Knight and G.E. Peters. Simple wind energy controller for an expanded operating range. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.20, pp.459-466. 2005.
- [7] P. Boscq, B. Dumortier, A. Dutin and K. Friry. projet de fin d'études, modélisation de l'énergie éolienne, année universitaire 2005-2006.
- [8] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 61400-12-1-Ed. 1.0 -Wind turbines, Part 12-1 : Power performance measurements of electricity producing wind turbines. 2015.
- [9] J.F. Manwell, J.G. McGowan, and A.L. Rogers. Wind energy explained : theory, design and application. Chichester ; New York : Wiley. 2002.
- [10] Parc éolien, note d'information à destination des Elus Commune de Bussières EOLE-RES-JSA, Janvier 2012.
- [11] G.L. Johnson. Wind energy systems. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall. 1985.
- [12] T. Burton. Wind energy handbook. Chichester ; New York : John Wiley and Sons. 1985.
- [13] M.O.L. Hansen. Aerodynamics of wind turbines : rotors, loads and structure. London : James and James. 2000.
- [14] J. Chatelain. Machines électriques, vol. X of Traité d'électricité. Lausanne, Suisse. 1983.
- [15] Y. Wu, W. Liu and Y. Zhu. Design of a Wind Energy Harvesting Wireless Sensor Node, Third International Conference on Information Science and Technology March 2013, Jiangsu, China.
- [16] Y.K. Tan and S.K. Panda. Optimized wind energy harvesting system using resistance emulator and active rectifier for wireless sensor nodes, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 26, No. 1, pp.38.50, 2011.
- [17] Y.K. Tan and S.K. Panda. Self-Autonomous wireless sensor nodes with wind energy harvesting for remote sensing of wind-driven wildfire spread, IEEE Trans. on Instrumentation And Measurement, Vol. 60, No. 4, pp.1367.1377, 2011.
- [18] M. Lefranc and H. J. Milkelson, Conception d'éolienne, INSA de Strasbourg, Juin 2008.

- [19] A. Jushi, A. Pegatoquet and T.-N. Le, Wind Energy Harvesting for Autonomous Wireless Sensor Networks, Euromicro Conference on Digital System Design, 2016.
- [20] P. Kamalinejad, C. Mahapatra, Z. Sheng, S. Mirabbasi, C. M. L. Victor and Y. L. Guan, Wireless energy harvesting for the internet of things, IEEE Communications Magazine, vol. 53, pp. 102-108, 2015.
- [21] D. Porcarelli, D. Spenza, D. Brunelli, A. Cammarano, C. Petri-oli and L. Benini, Adaptive rectifier driven by power intake predictors for wind energy harvesting sensor networks, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 3, no.2, pp. 471-482, 2014.
- [22] A. Rolan, A. Luna and G. Vazquez, Modeling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea July, 2009.
- [23] C. Krause. Analysis of electric machinery. 2nd Edition. United States of America : Wiley, 2002.
- [24] L. Rodriguez, C. Burgos and L. Amalte. Sistemas E6licos de Produccion de Energia Electrica. Madrid : Editorial Rueda S.L, 2003.
- [25] I. Boldea. Synchronous Generators. United States of America : Taylor and Francis, 2006.
- [26] G. Ramtharan and N. Jenkins. Modelling and Control of Synchronous Generators for Wide-Range Variable-speed Wind Turbines. Wind Energy, Wiley Interscience, vol. 10, pp. 231-246, March 2007.
- [27] M. Chinchilla, S. Arnaltes and C. Burgos. Control of PermanentMagnet Generators Applied to Variable-Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, no. 1, 2006.
- [28] F. Neupveu. Calcul du rayonnement global sur une surface inclinée à partir des données sur une surface horizontale, 2015. CEA Tech Nantes.
- [29] A. Osamede, S. James and P. Christo. Correlating the power conversion of a PV panel to the solar irradiance obtained from Meteonorm. IEEE Conf. on Industrial Technology (ICIT), South Africa, 2013, pp. 684-688.
- [30] J. Vieira and A. M. Sharaf. Analytical model of a wind energy AC-DC-AC scheme, the 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Toronto, ON, Canada 2014.
- [31] J. Cao and Z. Yan. AC/DC optimal power flow problem considering wind farm integration. IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, USA, 2016.
- [32] P. Maegaard. Wind energy development and application prospects of non-grid-connected wind power. The World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, Nanjing, China, 2009.

Chapitre 5

Prédiction d'énergie pour les capteurs communicants

1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est de pouvoir estimer la quantité d'énergie solaire récupérée par un panneau solaire. Cette prédiction est essentielle pour faire la gestion d'énergie des capteurs communicants. Pour ce faire, un prédicteur d'énergie solaire est développé en se basant sur un prédicteur de l'état de l'art appelé EWMA (Exponentially Weighted Moving-Average), qui recourt à l'historique de l'énergie récupérée pour estimer les prochaines quantités d'énergie solaire. Notre prédicteur est appelé SEPCS (Solar Energy Predictor for Communicating Sensor). Le SEPCS, qui utilise un historique plus large que l'EWMA, est un prédicteur temps réel (il fait la mise à jour de ses coefficients à chaque intervalle de temps).

Les performances des deux prédicteurs sont comparées en utilisant des bases de données d'éclairement pour différentes villes françaises. Les résultats obtenus montrent que notre prédicteur s'adapte mieux aux changements météorologiques que l'EWMA. Dans ce contexte, l'erreur de prédiction donnée par le SEPCS est plus faible que celle donnée par l'EWMA. Le prédicteur est également testé en utilisant des bases de données d'éclairement à l'échelle internationale.

Dans ce chapitre, nous commençons par présenter un état de l'art sur la prédiction d'énergie récupérée pour les capteurs sans fil. Afin de proposer une version temps réel du prédicteur EWMA, nous étudions ses différentes caractéristiques. Dans la deuxième partie du chapitre, nous détaillons le fonctionnement du prédicteur proposé. Enfin, les performances des deux prédicteurs sont comparées en utilisant un ensemble de données de différentes régions.

2 État de l'art sur la prédiction d'énergie

Afin de concevoir un gestionnaire d'énergie (Power Manager en Anglais), on recourt à différentes approches qui s'appuient sur des algorithmes de prédiction d'énergie [1-5]. Ces algorithmes permettent d'estimer la quantité d'énergie pouvant-être récoltée à court et à long termes. Ainsi, dans le cas d'un noeud capteur avec récupération d'énergie, plusieurs travaux ont étudié la prédiction d'énergie afin de faire le management de puissance [6-10].

Kansal et al. sont les premiers qui présentent un algorithme de prédiction d'énergie solaire pour les capteurs sans fil dans [6]. Pour ce faire, les auteurs développent une technique appelée EWMA (Exponential Weighted Moving Average) pour estimer la quantité d'énergie solaire. Cette technique recourt à l'historique des énergies récupérées pour prédire l'énergie que l'on peut capter. Pour implémenter ce modèle, les auteurs divisent le domaine temporel (24 heures) en intervalles de temps égaux. L'idée principale de cet algorithme est que l'énergie récupérée sur un intervalle particulier de la journée peut-être similaire aux quantités d'énergies récupérées pendant les heures précédentes. Le EWMA présente de bonnes performances (de faibles erreurs de prédiction) sous de bonnes conditions météorologiques. Mais, ses performances sont dégradées lorsqu'il y a une alternance entre le beau et le mauvais temps et inversement (alternance entre journées ensoleillées et pluvieuses par exemple).

Un autre modèle de prédiction d'énergie solaire appelée WCMA (Weather Conditioned Moving Average) est proposé dans [11]. Les auteurs ont remarqué que lorsque des journées ensoleillées et des journées nuageuses s'alternent, le EWMA fournit des résultats incorrects car sa prédiction pour la journée courante est biaisée par l'effet mémoire du filtre EWMA. En plus de l'historique des énergies récupérées, Piorno et al. proposent de prendre en compte l'évolution des conditions d'ensoleillement au cours de la journée. En utilisant un ensemble de données, les auteurs montrent que l'erreur de prédiction moyenne donnée par le WCMA est d'environ 10%. Le prédicteur EWMA donne, avec le même ensemble de données, une erreur moyenne au niveau de 29% [12].

Lu et al. ont présenté un algorithme d'estimation d'énergie en temps réel pour les systèmes embarqués. L'algorithme proposé, appelé MAP-DVFS (Model Accurate Predictive-Dynamic Voltage and Frequency Scaling algorithm), est basé sur un modèle de régression linéaire pour prédire l'énergie [13]. Le MAP-DVFS est un modèle précis qui vise à obtenir les meilleures performances du système sous des contraintes de récupération d'énergie. Dans ce contexte, les auteurs montrent que le MAP-DVFS donne des résultats intéressants de prédiction d'énergie à court terme (environ 1 s). Cependant, la prédiction d'énergie à moyen et à long termes n'est pas étudiée.

Le et al. présentent un autre prédicteur d'énergie solaire pour les capteurs sans fil alimentés par la récupération d'énergie dans [14]. Ce prédicteur, qui est basé sur les filtres adaptatifs, présente une faible complexité et nécessite peu de mémoire pour estimer la quantité d'énergie que l'on peut récupérer. Les résultats obtenus, dans cette étude, montrent que l'erreur de prédiction moyenne donnée par le prédicteur proposé est plus faible que les algorithmes de l'état de l'art.

Ces différents algorithmes de prédiction ont été proposés pour estimer la quantité d'énergie solaire que l'on peut récupérer à court et à long termes. En regardant les résultats obtenus, on note que les erreurs moyennes de prédiction sont élevées. Cela indique une fausse estimation de l'énergie solaire récupérée. En conséquence, ces erreurs de prédiction élevées permettent d'avoir des gestionnaires d'énergie non-optimisés avec de mauvaises qualités de service des capteurs communicants. Ainsi, afin de diminuer le niveau des erreurs de prédiction, on propose une nouvelle solution de prédiction d'énergie appelée SEPCS [15]. Testé avec différentes bases de données, le SEPCS présente de meilleures performances par rapport à l'état de l'art.

3 Contributions

Dans ce travail, nous avons quatre contributions principales :

- La première contribution est l'optimisation du coefficient du filtre EWMA (paramètre α). L'optimisation de ce paramètre permet d'avoir une version du EWMA dans laquelle le coefficient α est calculé en temps réel. Dans ce contexte, on propose deux méthodes de calcul de ce coefficient.
- La deuxième contribution est la version non-temps réel du SEPCS qui utilise un historique plus large que l'EWMA. Cet algorithme peut réduire l'erreur de prédiction moyenne de 28% à 22% en utilisant des bases de données annuelles d'éclairement solaire.
- La troisième contribution de ce travail est la version temps réel du prédicteur SEPCS qui permet de réduire l'erreur de prédiction moyenne de 28% à 6,5%.
- Enfin, les performances des algorithmes proposés sont étudiées dans différentes régions (à l'échelle nationale et internationale) en utilisant des bases de données avec des pas de temps différents (1 heure et 10 minutes). Dans ce contexte, les résultats obtenus sont très pertinents (le SEPCS s'adapte mieux aux changements météorologique que l'EWMA).

4 Modèle linéaire de prédiction d'énergie

Dans cette section on présente les résultats de prédiction d'énergie solaire en utilisant l'algorithme EWMA. Pour ce faire, nous allons commencer par décrire le principe de fonctionnement du prédicteur. Nous étudions ensuite les performances de cet algorithme en utilisant un ensemble de données d'éclairement. Afin d'avoir une version temps réel du EWMA, nous proposons deux nouvelles méthodes de calcul de son coefficient α .

Le principe de fonctionnement de l'algorithme EWMA est présenté à la figure 5.1.

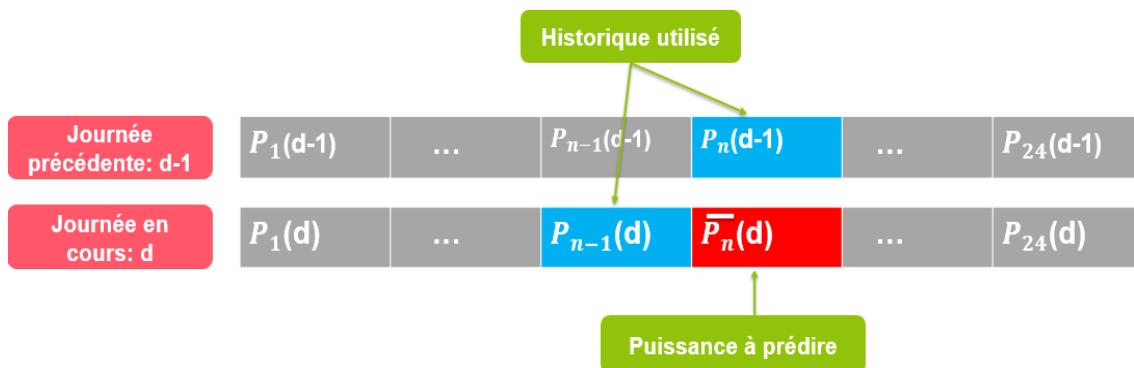


Figure 5.1 – Principe de fonctionnement de l'algorithme EWMA.

Pour prédire l'énergie solaire, le EWMA commence par diviser le domaine temporel en intervalles de temps égaux de durée égale à une heure chacun (soient 24 intervalles de temps pour chaque journée notée d : $P_1(d)$; ..; $P_{24}(d)$). Puis, pour trouver la valeur de la puissance $\overline{P_n}(d)$ de l'intervalle n de la journée d , on utilise deux valeurs de l'historique des énergies récupérées ; ces deux valeurs sont la puissance récupérée pendant l'intervalle

de temps précédent $n - 1$ de la même journée $P_{n-1}(d)$ et la puissance récupérée dans le même intervalle de temps n de la journée précédente $P_n(d - 1)$.

On note que la puissance $\overline{P}_n(d)$ est sensée rester constante pendant toute la durée de l'intervalle de temps n ($\overline{P}_n(d)$ présente la valeur moyenne durant l'intervalle de temps n). Ceci est la principale hypothèse sur laquelle les auteurs basent leur technique de prédiction et de gestion d'énergie [15-18]. L'équation (5.1) montre l'expression de la puissance solaire estimée en utilisant le prédicteur EWMA :

$$\overline{P}_n(d) = \alpha.P_n(d - 1) + (1 - \alpha).P_{n-1}(d), \quad (5.1)$$

avec α le poids du filtre ($0 \leq \alpha \leq 1$). Ce paramètre est optimisé en utilisant des mesures d'énergie solaire pendant 9 jours dans [6]. Dans cette étude, la valeur optimale de α , donnant l'erreur de prédiction minimum, est égale à 0.5.

4.1 Optimisation du paramètre α

Pour étudier le comportement de l'algorithme EWMA dans des conditions météorologiques variables, nous avons utilisé différentes bases de données d'éclairement ainsi que le modèle de panneau solaire donnant une puissance maximale égale à 800 mW (section 6 du chapitre 3).

On note qu'un choix adéquat du paramètre α est essentiel pour évaluer les performances du prédicteur EWMA. Afin d'obtenir la valeur optimale de ce coefficient, l'évolution de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne RMSE (Root Mean Square Error) en fonction de α est représentée à la figure 5.2. On remarque que la valeur minimale du RMSE est obtenue pour un coefficient optimum $\alpha = 0,28$.

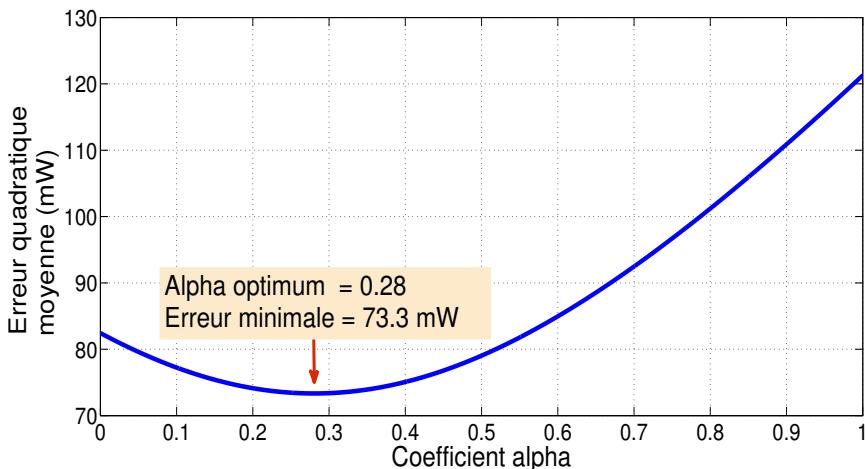


Figure 5.2 – Évolution du RMSE en fonction du paramètre α (cas d'étude : Nantes).

Cette valeur optimale de α peut-être recalculée en utilisant l'expression de l'erreur quadratique moyenne MSE (Mean Square Error) :

$$MSE = E[(P_n(d) - \overline{P}_n(d))^2], \quad (5.2)$$

$$\alpha = \frac{E[P_{n-1}(d)^2] - E[P_{n-1}(d).P_n(d)] + E[P_n(d-1).P_n(d)] - E[P_n(d-1).P_{n-1}(d)]}{E[P_{n-1}(d)^2] - 2.E[P_n(d-1).P_{n-1}(d)] + E[P_n(d-1)^2]} \quad (5.3)$$

où $E[(P_n(d) - \bar{P}_n(d))^2]$, $P_n(d)$ et $\bar{P}_n(d)$ sont respectivement l'espérance, la puissance solaire réelle et la puissance estimée de l'intervalle de temps n de la journée d (calculée en utilisant l'équation (5.1)).

La valeur optimale de α pour chaque intervalle de temps n est obtenue lorsque la dérivée de la MSE est nulle ($\frac{dMSE}{d\alpha} = 0$). Avec un calcul approprié, l'équation (5.3) montre l'expression du coefficient optimal α . Telle que $P_n(d)$ est la puissance mesurée de l'intervalle de temps actuel n . On note que pour ce calcul, on suppose que $P_n(d)$ est stationnaire.

En utilisant l'équation (5.3), on peut recalculer la valeur optimale de α pour chaque intervalle de temps. Ceci permet d'avoir une version de l'algorithme EWMA dans laquelle le coefficient α est calculé en temps réel (ce qui n'est pas le cas dans [6]).

4.2 Performances du prédicteur EWMA

Pour évaluer les performances du prédicteur EWMA, on fixe la valeur optimale du paramètre α à 0.28 (figure 5.2). Cette valeur peut-être retrouvée en utilisant l'équation (5.3). La figure 5.3 présente les résultats de prédiction en utilisant l'EWMA pendant une semaine à Nantes. On remarque que s'il y a des changements météorologiques importants (alternance entre les journées ensoleillées et celles nuageuses par exemple), l'algorithme EWMA donne des erreurs de prédiction élevées (e.g. journée autour de l'heure 640). Dans ce cas, l'erreur quadratique moyenne est égale à 73.3 mW et l'erreur relative moyenne est égale à 28%.

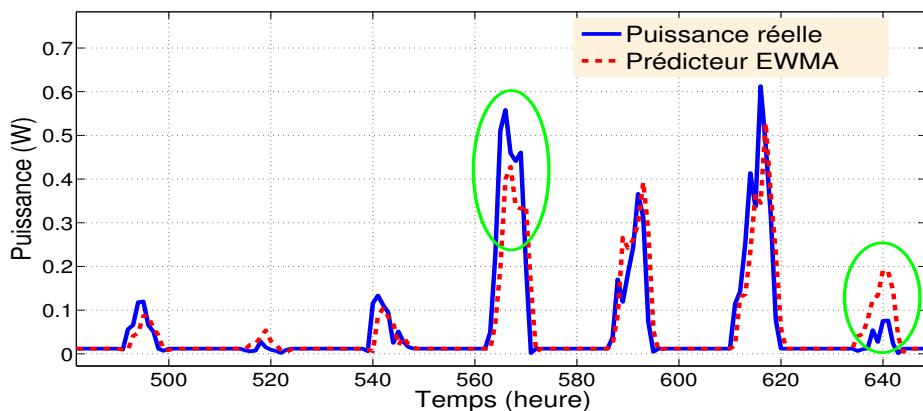


Figure 5.3 – Prédiction d'énergie solaire avec l'EWMA ; $\alpha = 0.28$ (cas d'étude : Nantes).

Comme indiqué précédemment, selon l'algorithme EWMA, la valeur optimale du coefficient α est toujours fixée à une valeur constante (e.g. $\alpha = 0.5$ dans [6] et 0.28 dans notre cas). Pour savoir si ce coefficient optimal change avec les saisons, on se réfère au tableau

5.1. En regardant les valeurs optimales α_{opt} , on déduit que le paramètre α change en fonction des périodes de l'année. Ceci n'est pas le cas dans [6] qui suppose que α est toujours constant. En effet, on remarque que la valeur optimale de α est plus faible en hiver, ce qui indique selon l'équation (5.1) que, lorsque la météo d'un jour à l'autre est moins stable (l'hiver), on privilégie les instants précédents de la même journée. Cependant, lorsque la météo d'un jour à l'autre est plus stable (l'été), on privilégie plus les jours précédents à la même heure.

Saison	Hiver	Automne	Printemps	Été
α_{opt}	0.244	0.297	0.263	0.322

Table 5.1 – Différentes valeurs de α_{opt} pendant les saisons (cas d'étude : Nantes).

Enfin, le prédicteur EWMA est testé en utilisant des bases de données pour d'autres villes françaises (Bordeaux, Marseille et Toulouse). Le tableau 5.2 présente les valeurs optimales de α pour ces différentes villes ainsi que les valeurs d'erreurs quadratiques moyennes correspondantes. On constate que la plus grande valeur de α_{opt} est obtenue pour la ville de Marseille, ce qui signifie, selon l'équation (5.1), que les jours se ressemblent plus dans cette ville. À l'inverse, α_{opt} est moins élevé à Bordeaux, c'est-à-dire que les jours y sont plus différents (pour prédire l'énergie solaire, on donne plus d'importance à l'intervalle de temps précédent de la même journée).

Ville	Nantes	Bordeaux	Marseille	Toulouse
α_{opt}	0.281	0.250	0.350	0.341
RMSE (mW)	73.3	72.4	78.8	77.1

Table 5.2 – Valeurs de α_{opt} et de la RMSE dans différentes régions françaises.

5 Nouveau prédicteur temps réel d'énergie solaire : SEPCS

Cette section présente les résultats de prédiction d'énergie solaire en utilisant notre prédicteur SEPCS, qui est basé sur l'algorithme EWMA. Nous présentons dans un premier temps le principe de fonctionnement ainsi que la version non-temps réel du prédicteur proposé. Puis, la version temps réel est étudiée en utilisant un ensemble de données d'éclairement.

5.1 Version non-temps réel du SEPCS

5.1.1 Principe de fonctionnement

Notre méthode proposée est basée sur le prédicteur EWMA qui divise le domaine temporel en intervalles de temps égaux. Ceci permet d'estimer l'énergie solaire au début de chaque intervalle de temps [15, 19-20]. La figure 5.4 montre le principe de fonctionnement du SEPCS. Pour prédire la puissance solaire $\overline{P}_n(d)$ de l'intervalle de temps n , on utilise

un historique plus large que l'EWMA. En effet, au lieu de n'utiliser que deux valeurs de l'historique des puissances récupérées, on utilise un nombre N_S d'intervalles de temps précédents de la même journée d et un nombre N_J d'intervalles de temps des journées précédentes.

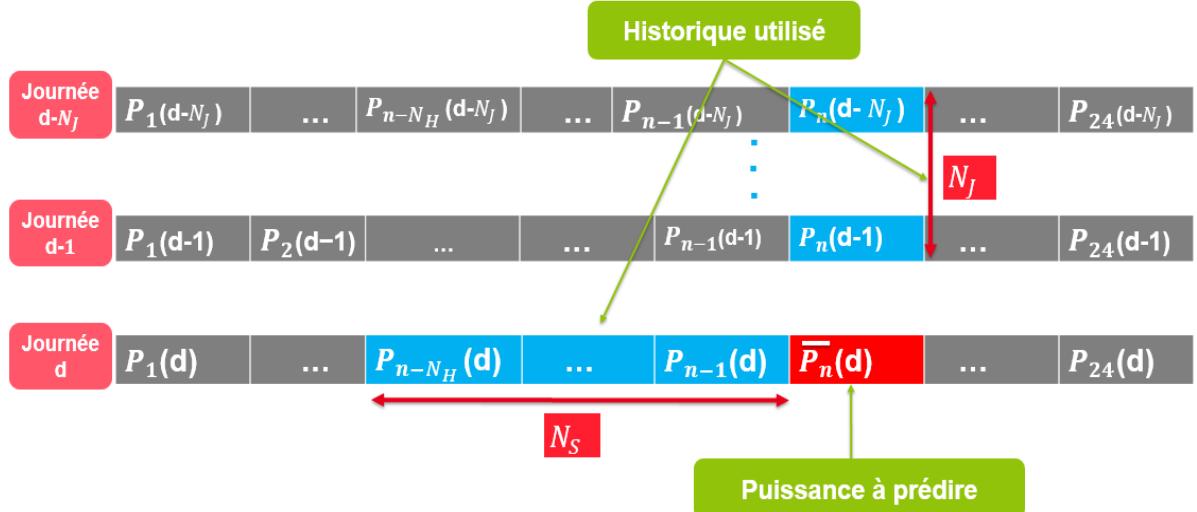


Figure 5.4 – Principe de fonctionnement de l'algorithme SEPCS.

L'expression de la puissance solaire $\bar{x}(n)$ estimée par le SEPCS est donnée par l'équation (5.4). Cette expression est décomposée en deux termes principaux présentant les quantités de puissance solaire récupérées dans les intervalles précédents de la même journée d et les quantités de puissance solaire récupérées dans les jours précédents (ce qui signifie que le SEPCS utilise un historique plus large que l'EWMA). Pour l'instant, on note que la journée est divisée en 24 intervalles de temps égaux de durée égale à une 1 heure :

$$\bar{x}(n) = \sum_{i=1}^{N_H} \alpha_i \cdot x(n-i) + \sum_{j=1}^{N_J} \beta_j \cdot x(n-j \cdot 24), \quad (5.4)$$

avec $\bar{x}(n)$, α_i , N_H , $x(n-i)$, N_J , β_j et $x(n-j \cdot 24)$, respectivement, la puissance solaire estimée pour l'intervalle de temps n , les premiers coefficients du filtre ($0 \leq \alpha_i \leq 1$), le nombre d'heures dans la même journée d , la puissance solaire récupérée dans les N_H intervalles de temps précédents, le nombre de jours, les deuxièmes coefficients du filtre ($0 \leq \beta_j \leq 1$) et la puissance solaire récupérée dans le même intervalle de temps n des N_J journées précédentes.

5.1.2 Résolution du système proposé

Pour résoudre le système proposé, on peut réécrire l'équation (5.4) sous la forme suivante :

$$\bar{x}(n) = W^t \cdot X_n, \quad (5.5)$$

tels que W^t est le transposé d'un vecteur qui contient les coefficients du filtre α_i et β_j et X_n est un vecteur qui représente l'historique des puissances récupérées. Les deux vecteurs W^t et X_n s'écrivent ainsi comme le suivant :

$$W = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_{N_H} \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{N_J} \end{pmatrix} \text{ et } X_n = \begin{pmatrix} x(n-1) \\ x(n-2) \\ \vdots \\ x(n-N_H) \\ x(n-24) \\ x(n-48) \\ \vdots \\ x(n-N_J \cdot 24) \end{pmatrix}$$

Afin de calculer la solution optimale W_{opt} de l'équation (5.5), on utilise l'expression suivante de l'erreur quadratique moyenne MSE :

$$MSE = E[(x(n) - \bar{x}(n))^2] \quad (5.6)$$

Ensuite, pour trouver W_{opt} qui minimise l'erreur MSE, on dérive l'expression du MSE par rapport au vecteur W (soit le gradient du MSE par rapport à W est nul, $\frac{\partial MSE}{\partial W} = 0$).

Avec un calcul approprié, la solution W_{opt} est donnée par l'équation (5.7). Celle-ci représente la solution de Wiener [21-23] :

$$W_{opt} = [E(X_n \cdot X_n^t)]^{-1} \cdot E(X_n \cdot x(n)) = R^{-1} \cdot r, \quad (5.7)$$

tels que $R = E(X_n \cdot X_n^t)$ et $r = E(X_n \cdot x(n))$ sont respectivement une matrice carrée et un vecteur. Les deux paramètres R et r peuvent-être estimés par les expressions suivantes :

$$\hat{R} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N (X_n \cdot X_n^t), \quad (5.8)$$

$$\hat{r} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N (X_n \cdot x(n)), \quad (5.9)$$

où N représente le nombre total des mesures effectuées.

5.1.3 Performances de la version non-temps réel du SEPCS

Pour évaluer les performances de cette version non-temps réel du SEPCS, on utilise le même ensemble de données annuelles d'éclairement et le modèle de panneau solaire qui donne une puissance maximale égale à 800 mW. Afin de faire les simulations, on fixe le nombre de jours $N_J = 7$ (historique d'une semaine) et le nombre d'heures $N_H = 12$ (historique d'une demi-journée). La figure 5.5 présente les résultats de prédiction d'énergie solaire durant une semaine à Nantes.

Dans ce cas, la RMSE moyenne est égale à 64,3 mW (l'erreur relative moyenne est égale à 22 %). Ces valeurs sont inférieures à celles données par le prédicteur EWMA (la RMSE moyenne est au niveau de 73,3 mW et l'erreur relative moyenne est égale à 28 %).

Pour conclure, en utilisant cette version non-temps réel du SEPCS, on peut diminuer l'erreur de prédiction moyenne par rapport à l'algorithme EWMA. Cependant, cette erreur reste toujours élevée car les coefficients du filtre ne sont pas mis à jour pour chaque intervalle de temps. Pour remédier à cela, une version temps réel du SEPCS est présentée dans le reste du chapitre.

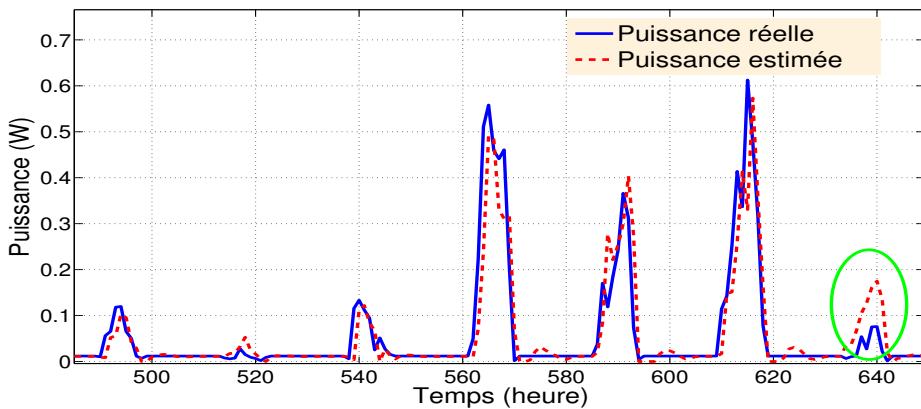


Figure 5.5 – Prédiction d'énergie solaire en utilisant la version non-temps réel du SEPCS ; $N_J = 7$ et $N_H = 12$ (cas d'étude : Nantes).

5.2 Version temps réel du SEPCS

Afin de diminuer davantage l'erreur de prédiction, une amélioration de notre prédicteur peut-être introduite. En effet, pour les résultats précédents, les deux paramètres \hat{R} et \hat{r} qui sont donnés dans les équations (5.8) et (5.9) sont calculés sur toute l'année. Ainsi, pour avoir un algorithme temps réel, on peut mettre à jour les valeurs de ces deux paramètres en utilisant une formule récursive (c'est-à-dire que les deux paramètres peuvent-être recalculés pour chaque intervalle de temps).

Les équations (5.10) et (5.11) présentent les nouvelles expressions de \hat{R} et \hat{r} estimés pour l'intervalle de temps k , avec $1 \leq k \leq N$ [24] :

$$\hat{R}_k = X_k \cdot X_k^t + \gamma \cdot \hat{R}_{k-1}, \quad (5.10)$$

$$\hat{r}_k = X_k \cdot x(k) + \gamma \cdot \hat{r}_{k-1}, \quad (5.11)$$

où $0 \leq \gamma \leq 1$ détermine la mémoire du filtre (plus γ est élevée, plus la mémoire de prédiction est longue). Par conséquent, la solution optimale du système notée W_k est donnée par l'équation (5.12) :

$$W_k = \hat{R}_k^{-1} \cdot \hat{r}_k \quad (5.12)$$

On note que si la matrice \hat{R}_k est non-inversible ou mal-conditionnée, on peut alors calculer sa pseudo-inverse noté M_k en utilisant la méthode de Tikhonov concernant la régularisation des matrices [25] :

$$M_k = \hat{R}_k + h \cdot \|\hat{R}_k\| \cdot I, \quad (5.13)$$

avec h est un coefficient égal à 0.1, $\|\hat{R}_k\|$ est la norme 2 de la matrice \hat{R}_k et I est la matrice identité. Enfin, l'algorithme final de prédiction d'énergie solaire en temps réel correspond au système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{r}_k = X_k \cdot x(k) + \gamma \cdot \hat{r}_{k-1} \quad (1) \\ M_k = \hat{R}_k + h \cdot \|\hat{R}_k\| \cdot I \quad (2) \\ W_k = M_k^{-1} \cdot \hat{r}_k \quad (3) \end{array} \right.$$

Afin d'évaluer les performances de notre prédicteur proposé, nous avons fixé $N_J = 7$ et $N_H = 12$. Pour déterminer la valeur optimale de la mémoire γ , on recourt à la figure 5.6 qui présente l'évolution de l'erreur RMSE en fonction de γ . On voit bien que la valeur optimale notée γ_{opt} de la mémoire du filtre est égale à 0.12. Cette valeur est utilisée pour la suite.

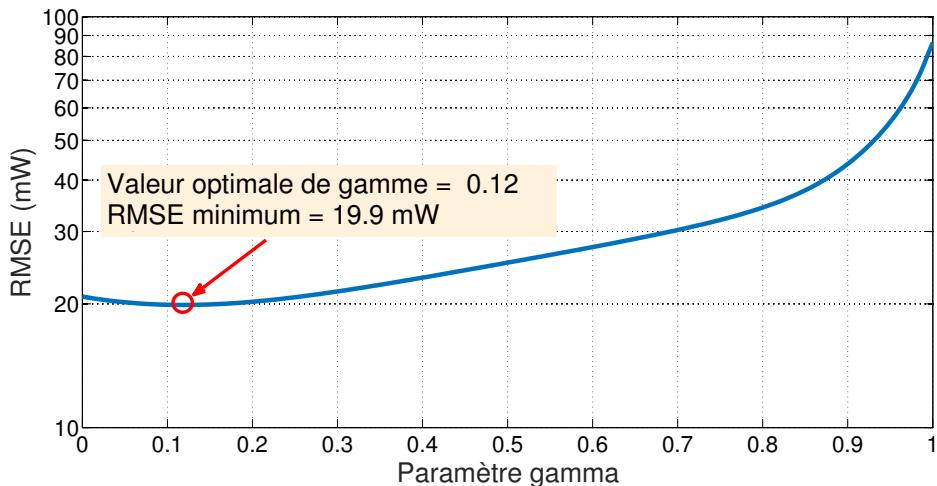


Figure 5.6 – Évolution de l'erreur quadratique moyenne en fonction de la mémoire du filtre γ (cas d'étude : Nantes).

La figure 5.7 montre les résultats de prédiction d'énergie solaire durant une semaine à Nantes. Comme on peut le voir, notre prédicteur temps réel s'adapte bien aux changements météorologiques importants (la mise à jour de ses coefficients pour chaque intervalle de temps lui permet de suivre ces changements). Dans ce cas, on note que la RMSE moyenne décroît de 64,5 mW à 19,9 mW. Quant à l'erreur relative moyenne, elle décroît de 22 % à 6,5 %.

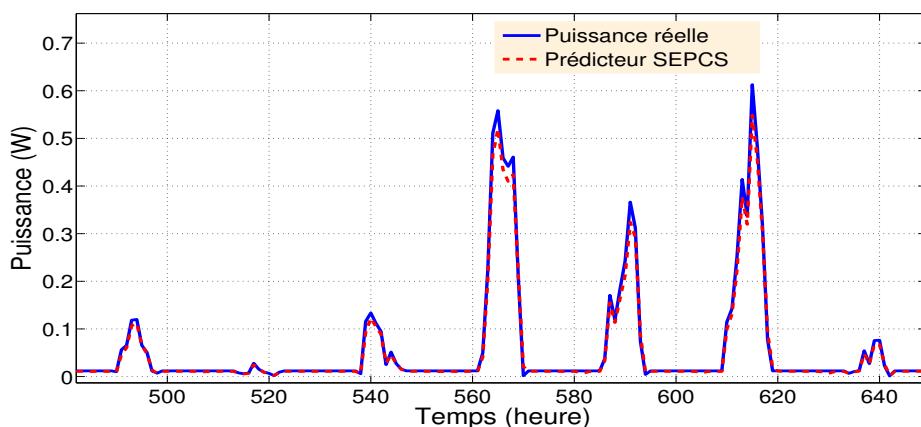


Figure 5.7 – Prédiction en temps réel d'énergie solaire pendant une semaine (cas d'étude : Nantes).

Pour vérifier les résultats obtenus, la figure 5.8 présente la prédiction de l'éclairement solaire pendant deux semaines à Nantes. On remarque que le prédicteur donne des résul-

tats pertinents avec des erreurs de prédition faibles (l'erreur RMSE moyenne décroît de 91.6 W/m^2 dans le cas du EWMA à $25,4 \text{ W/m}^2$ donnée par notre prédicteur SEPCS).

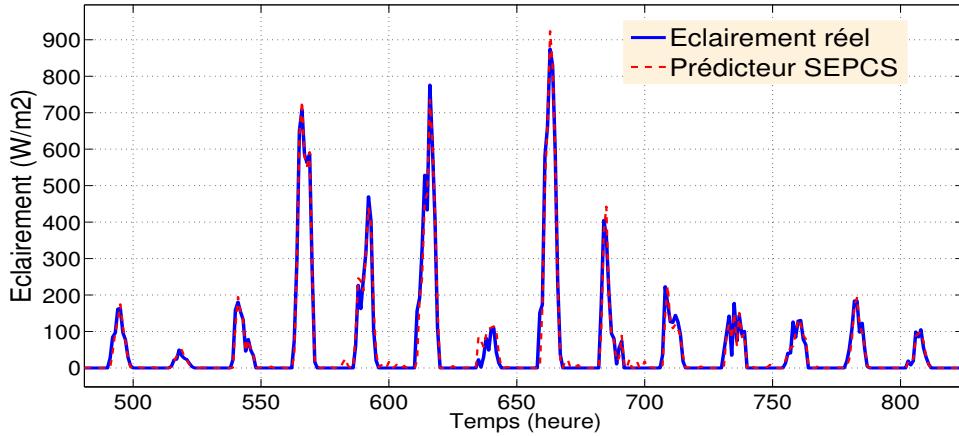


Figure 5.8 – Prédiction en temps réel d'éclairement solaire pour deux semaines (cas d'étude : Nantes).

La figure 5.9 montre l'effet du nombre de jours N_J et du nombre d'heures N_H sur l'évolution de l'erreur RMSE. On voit bien que cette erreur diminue de manière significative avec l'augmentation de N_H (la RMSE est presque constante après $N_H = 12$). Cette variation est moins importante avec l'évolution de N_J (la RMSE est presque constante après $N_J = 7$).

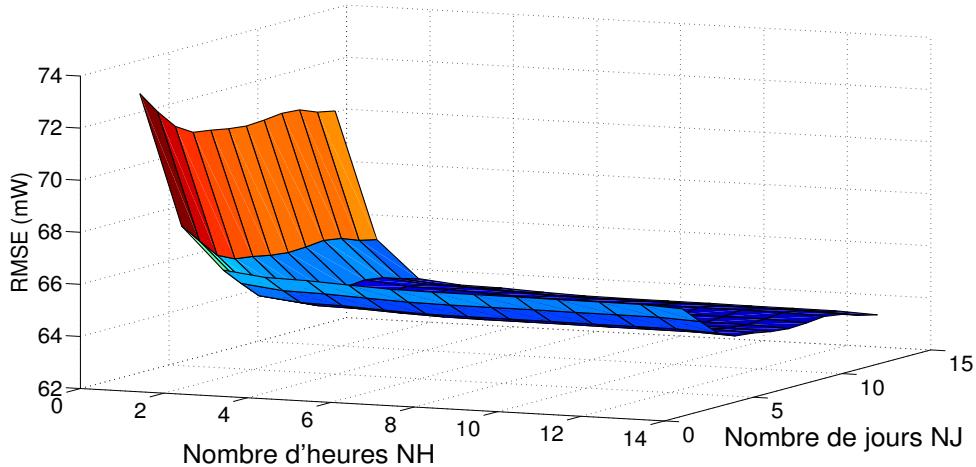


Figure 5.9 – Évolution de l'erreur quadratique moyenne en fonction du nombre d'heures N_H et du nombre de jours N_J (cas d'étude : Nantes).

6 Évaluation de performances : EWMA vs. SEPCS

Dans cette section, nous allons comparer les performances des deux algorithmes de prédition, le EWMA et le SEPCS en temps réel. Pour cela, nous allons utiliser un en-

semble de données qui présentent l'évolution d'éclairement solaire dans différentes régions françaises et d'autres villes internationales. Afin de faire des prédictions à moyen et à court termes, ces bases de données sont caractérisées par des pas de temps différents (1 heure et 10 minutes).

6.1 Prédiction à moyen terme

La figure 5.10 montre l'évolution de la puissance solaire pendant sept jours consécutifs avec des conditions météorologiques variables (alternance de jours ensoleillés et nuageux) ainsi que les puissances solaires estimées en utilisant les deux algorithmes de prédiction. Dans ce cas, on note que le pas de temps utilisé est égal à une heure. On remarque qu'avec les changements météorologiques importants, l'algorithme EWMA donne des erreurs de prédiction plus élevées par rapport à notre prédicteur qui fournit des valeurs beaucoup plus exploitable.

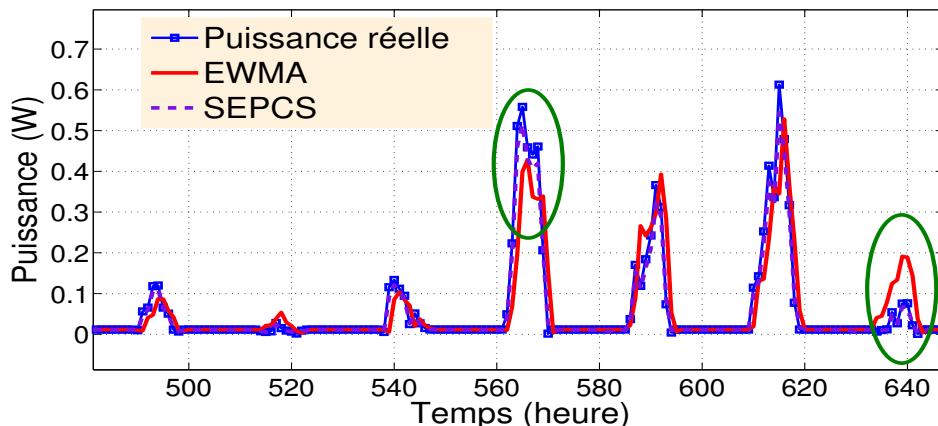


Figure 5.10 – Prédiction à moyen terme d'énergie solaire en utilisant l'EWMA et le SEPCS ; avec un pas de temps égal à une heure (cas d'étude : Nantes).

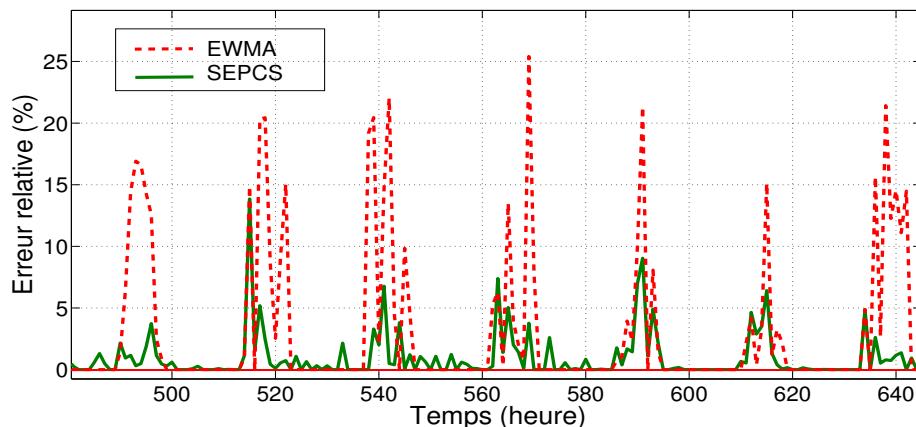


Figure 5.11 – Erreurs de prédiction données par l'EWMA et le SEPCS ; avec un pas de temps égal à une heure (cas d'étude : Nantes).

La figure 5.11 montre l'évolution des erreurs relatives moyennes pour la même période de temps. On voit bien que l'EWMA donne des erreurs de prédiction très élevées par rapport à notre prédicteur. Ceci signifie que le prédicteur de l'état de l'art ne s'adapte pas bien aux variations météorologiques. Alors que, le SEPCS recalcule ses coefficients en temps réel pour s'adapter à ces changements.

Les performances des deux prédicteurs sont comparées dans le tableau 5.3. Pour cela on utilise deux métriques de comparaison qui sont l'erreur relative et l'erreur quadratique moyenne. On remarque que notre prédicteur donne de meilleurs résultats que l'algorithme EWMA.

Métrique / prédicteur	Prédicteur EWMA	Prédicteur SEPCS
Erreur relative (%)	28	6.5
RMSE (mW)	73.3	19.9

Table 5.3 – Comparaison entre l'EWMA et le SEPCS en utilisant différentes métriques ; avec un pas de temps égal à une heure (cas d'étude : Nantes).

Le tableau 5.4 présente les résultats de prédiction données par l'EWMA et le SEPCS dans différentes villes nationales et internationales. On constate que notre prédicteur donne toujours de meilleurs résultats que le prédicteur de l'état de l'art.

Ville / prédicteur	Prédicteur EWMA	Prédicteur SEPCS
London	29	7.1
Paris	27.1	6.2
Berlin	26.8	6
Madrid	26.5	5.8
Rome	26.2	5.6
Tunis	25.5	5.3
Cairo	25.3	5.1
Dubai	24.9	5

Table 5.4 – Erreurs de prédiction en (%) données par l'EWMA et le SEPCS dans différentes villes internationales ; avec un pas de temps égal à une heure.

6.2 Prédiction à court terme

En utilisant les deux algorithmes EWMA et SEPCS, la figure 5.12 présente les résultats de prédiction d'énergie solaire sur deux jours consécutifs à Nantes. L'intervalle de temps est égal à 10 minutes dans ce cas. Malgré les changements météorologiques importants, le SEPCS donne de meilleurs résultats de prédiction que l'EWMA. En effet, on note que la valeur optimale de α est égale à 0.04, ce qui indique selon l'équation (5.1), que pour estimer la puissance solaire, le EWMA donne toute sa confiance à l'intervalle de temps précédent de la même journée (c'est-à-dire que le prédicteur EWMA recopie la valeur de puissance solaire mesurée à l'instant précédent). Dans ce cas, l'erreur de prédiction augmente avec la variation rapide des conditions climatiques. Alors que, notre prédicteur

temps réel met à jour ses coefficients toutes les 10 minutes, ce qui lui permet de s'adapter aux variations météorologiques avec des erreurs de prédiction plus faibles que l'EWMA.

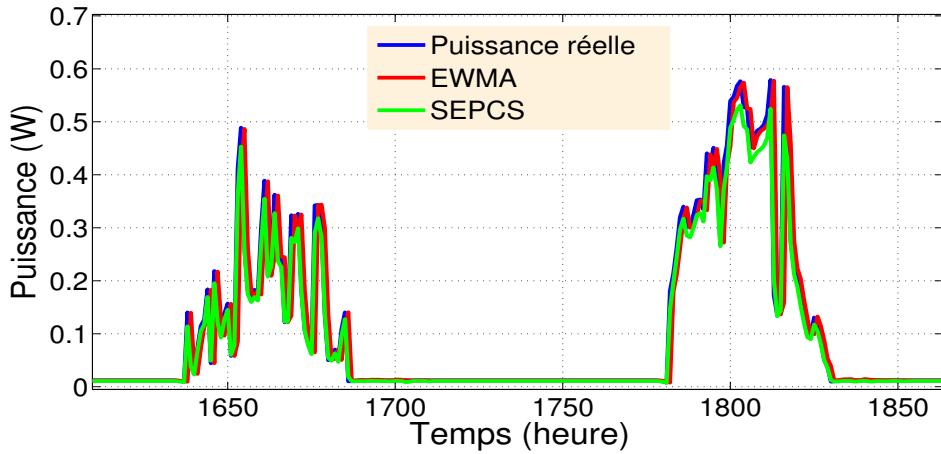


Figure 5.12 – Prédiction à court terme d'énergie solaire en utilisant l'EWMA et le SEPCS ; avec un pas de temps égal à 10 minutes (cas d'étude : Nantes).

La comparaison des erreurs relatives moyennes dans différentes villes est présentée dans le tableau 5.5. On constate que malgré la variation importante des conditions météorologiques, le SEPCS permet d'avoir de meilleurs résultats de prédiction que l'EWMA (les erreurs de prédiction sont toujours plus faibles en utilisant notre algorithme SEPCS). On note aussi qu'en diminuant le pas de temps d'une heure à quelques minutes, l'erreur de prédiction augmente dans les deux cas de prédicteurs. Cela provient de variations rapides et plus aléatoires de l'éclairement solaire.

Ville / prédicteur	Prédicteur EWMA	Prédicteur SEPCS
Nantes	32.1	8.2
Bordeaux	31.8	8
Madrid	31	7.6
London	33.2	8.9
Dubai	30.1	7.4

Table 5.5 – Erreurs de prédiction en (%) données par l'EWMA et le SEPCS dans différentes villes nationales et internationales ; avec un pas de temps égal à 10 minutes.

7 Conclusion

Afin d'estimer la quantité d'énergie récupérée par un panneau solaire, un prédicteur d'énergie solaire est développé en se basant sur un algorithme de l'état de l'art appelé EWMA. L'EWMA recourt à l'historique d'énergie récupérée pour estimer les prochaines quantités d'énergie. Pour avoir de meilleures performances que l'EWMA, notre prédicteur temps réel utilise un historique plus large et met à jour ses coefficients chaque intervalle de temps.

Après avoir présenté un état de l'art sur différents prédicteurs d'énergie solaire, nous avons commencé par étudier les caractéristiques de l'algorithme EWMA. Cette étude nous a permis de proposer une version temps réelle du EWMA en calculant son coefficient optimal pour chaque intervalle de temps.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à l'étude de notre algorithme de prédiction d'énergie solaire. Pour ce faire, nous avons présenté le fonctionnement du prédicteur ainsi que la solution non-temps réel proposée. Cette solution permet d'avoir de meilleures performances par rapport à l'EWMA. Mais, pour diminuer davantage l'erreur de prédiction, nous avons décrit une version temps réel de notre algorithme SEPCS.

Ensuite, les performances des deux prédicteurs sont comparées en utilisant des bases de données d'éclairement pour différentes villes françaises. Comme nous l'avons vu, notre prédicteur s'adapte mieux aux changements météorologiques que l'EWMA, avec des erreurs de prédiction plus faibles que celles données par le prédicteur de l'état de l'art. Les deux prédicteurs sont testés en utilisant des bases de données d'éclairement à l'échelle nationale et internationale et avec des pas de temps différents (10 minutes et 1 heure). On a toujours de meilleurs résultats de prédiction par rapport à l'EWMA.

Cette prédiction d'énergie est essentielle pour le reste de ce travail. En fait, après avoir préparé le terrain pour faire le management d'énergie des capteurs sans fil, nous allons présenter les résultats de gestion d'énergie dans le chapitre suivant.

Bibliographie : chapitre 5

- [1] S. Kosunalp. A new energy prediction algorithm for energy-harvesting wireless sensor networks with Q-learning, IEEE Access, 2016, 4, pp. 1-3
- [2] M. Detyniecki, C. Marsala, A. Krishnan et al. Weather-based solar energy prediction, IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI 2012), Australia, June 2012, pp. 1-7
- [3] M. Shin and I. Joe. Energy management algorithm for solar powered energy harvesting wireless sensor node for internet of things, IET Commun., 2016, 10, (12), pp. 1508-1521
- [4] A. Cammarano, C. Petrioli and D. Spenza. Online energy harvesting prediction in environmentally powered wireless sensor networks, IEEE Sens. J, 2016, 16, (17), pp. 6793-6803
- [5] L. Qiang and Z. Qi-Jun, Accuracy improvement of energy prediction for solarenergy-powered embedded systems, IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst., 2016, 24, (6), pp. 2062-2074
- [6] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi et al. Power management in energy harvesting sensor networks, ACM Trans. Embedded Comput. Syst., 2007, 6, (4), pp. 2062-2073
- [7] T. N. LE, rapport de thèse, Global Power Manager System for Self-Powered Autonomous Wireless Sensor Node, Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires-CAIRN École Nationale Supérieure des Sciences Appliquées et de Technologie, 2014.
- [8] N. Karunanithi, D. Whitley and Y.K. Malaiya. Using neural networks in reliability prediction. IEEE Software, pp. 53-59, 1992.
- [9] N. Ferry, S. Ducloyer, N. Julien and D. Jutel. Power energy estimator for designing WSN nodes with ambient energy harvesting feature. EURASIP J. Embedded Syst. 2011, pp.1-6.
- [10] P. Rong and M. Pedram. An analytical model for predicting the remaining battery capacity of lithium-ion batteries. Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on, 14(5), pp.441-451, 2006.
- [7] M. Hassan and A. Bermak, Solar harvested energy prediction algorithm for wireless sensors, 4th Asia Symp. on Quality Electronic Design, Penang, Malaysia, 2012, pp. 178-181
- [11] J.R. Piorno, C. Bergonzini, D. Atienza, et al. Prediction and management in energy harvested wireless sensor nodes, Wireless VITAE-09, Aalborg, Denmark, 2009, pp. 1-5
- [12] A. Castagnetti, rapport de thèse, étude de la gestion de l'autonomie en énergie d'objets communicants sans fil, université de Nice, Octobre 2012.
- [13] J. Lu, S. Liu, Q. Wu, et al. Accurate modeling and prediction of energy availability in energy harvesting real time embedded systems, IEEE Int. Green Computing Conf. and Workshops (IGCC), Chicago, USA, August 2010, pp. 469-476
- [14] T. N. Le, O. Sentieys, O. Berder, A. Pegatoquet and C. Belleudy. Adaptive Filter for Energy Predictor in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, The 26 International Conference on Architecture of Computing Systems, Prague, Czech Republic, 2013.
- [15] T. Bouguera, J.-F. Diouris, G. Andrieux, J.-J. Chaillout and R. Jaouadi. A novel solar energy predictor for communicating sensors. IET Communications, Institution of Engineering and Technology, 2018, 12 (17) :2145, pp.1-5.

- [16] M. Ali, B. Al-Hashimi, J. Recas and D. Atienza. Evaluation and design exploration of solar harvested-energy prediction algorithm. In proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe. European Design and Automation Association, 2010. pp. 142-147.
- [17] N. Sharma, J. Gummesson, D. Irwin and P. Shenoy. Cloudy computing : Leveraging weather forecasts in energy harvesting sensor systems. In proceedings of IEEE SECON 2010, Boston, Massachusetts, USA, June 21-25, 2010, pp. 1-9.
- [18] C. Moser, D. Brunelli, L. Thiele and L. Benini. Lazy Scheduling for Energy Harvesting Sensor Nodes. In Model-Driven Design to Resource Management for Distributed Embedded Systems (Springer 2006), 2006, pp. 125-134.
- [19] N. Amjadi. Short Term Hourly Load Forecasting Using Time Series Modeling with Peak Load Estimation Capability. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 16, no.4, pp. 798-805, 2001.
- [20] F. Deng, G. Su, C. Liu and Z. Wang. Prediction of Solar Radiation Resources in China Using the LS-SVM Algorithms. The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), vol. 5, pp.31-35, 2010.
- [21] D. Jethro, W. Stephan, H. David et al. Short-term spatio-temporal prediction of wind speed and direction using WIENER filter, Wind Energy, 2014, 17, pp. 1-10
- [22] A. Osamede, S. James, P. Christo, Correlating the power conversion of a PV panel to the solar irradiance obtained from Meteonorm, IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT), South Africa, 2013, pp. 684-688
- [23] D. Benda, S. Sun, X. Chu et al. PV cell angle optimization for energy generation-consumption matching in a solar powered cellular network, IEEE Trans. Green Commun. Netw., 2018, PP, (99), pp. 1-2
- [24] Y. Peter, Recursive estimation and time-series analysis : an introduction, Springer-Verlag, Chicago, USA, 1984
- [25] A.N. Tikhonov, Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method, Sov. Math., 1963, 4, pp. 1035-1038

Chapitre 6

Gestion d'énergie pour les capteurs communicants

1 Introduction

Ce dernier chapitre décrit la partie principale du projet de thèse. Il s'agit de faire le management d'énergie du capteur communicant proposé. L'objectif de cette partie est de pouvoir converger vers le fonctionnement neutre en énergie (ou la condition ENO) du capteur sans fil. Pour cela, un algorithme de gestion d'énergie est proposé pour gérer toutes les briques du système communicant. Cet algorithme, qui est basé sur le prédicteur SEPCS, est appelé PMA-SEPCS (Power Management Algorithm). En effet, suivant la quantité d'énergie disponible et celle prédite par le SEPCS, le PMA-SEPCS contrôle l'activité du capteur communicant (e.g. rapport cyclique) en jouant sur la qualité de service. Dans ce contexte, si la quantité d'énergie récupérée ne satisfait pas les besoins énergétiques du capteur, on pourra soit utiliser des modes appelés modes dégradés du capteur, soit traiter l'urgence de l'information à transmettre (on parle alors de priorité sur les données à transmettre).

Dans ce chapitre, nous commençons par présenter un état de l'art sur la gestion d'énergie pour les capteurs sans fil. Ensuite, nous détaillons le principe de fonctionnement du gestionnaire d'énergie proposé (ou PM- Power Manager). Pour cela, deux différentes méthodes sont développées et validées en utilisant un scénario applicatif réel. La première méthode consiste à concaténer les données de mesures et à les transmettre dans une même trame LoRa. Cette approche permet de minimiser la consommation du capteur et d'économiser l'énergie. Quant à la seconde approche, elle consiste à adapter le rapport cyclique du noeud capteur suivant la quantité d'énergie disponible.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous décrivons le fonctionnement ainsi que les composantes du PMA-SEPCS proposé. Les performances de cet algorithme sont ensuite évaluées en utilisant des bases de données annuelles d'éclairement.

Enfin, une méthodologie de conception et de réalisation des capteurs communicants pour les applications IoT appelée CCAE-IoT (Capteur Communicant Autonome en Énergie pour l'IoT) est proposée vers la fin de ce chapitre.

2 État de l'art sur la gestion d'énergie

La gestion d'énergie est une problématique très intéressante dans la conception des noeuds capteurs avec récupération d'énergie [1-3]. Dans ce cas, le capteur sans fil doit adapter dynamiquement ses performances en fonction de l'énergie disponible, tout en maintenant une bonne qualité de service [3-6]. L'objectif principal du PM est de réaliser la condition ENO (signifie que l'énergie totale disponible doit être supérieure ou égale à l'énergie consommée) pendant une longue période de temps [4-7]. Cette condition nécessaire et suffisante permet d'avoir une durée de vie théoriquement illimitée du capteur communicant [7, 10-11].

Dans la littérature, un grand nombre d'études ont proposé différents algorithmes de gestion d'énergie pour les capteurs communicants telles que [8] qui propose un algorithme de gestion d'énergie basé sur la méthode DVFS (Dynamic Voltage and Frequency Scaling) et [9] qui présente une étude sur la gestion et l'optimisation de la puissance de transmission dans le cas des capteurs communicants. Cependant, on note que la méthode de contrôle du rapport cyclique est l'une des techniques les plus populaires dans les approches de management d'énergie des noeuds capteurs avec récupération d'énergie [5-7,9-10]. En effet, étant donné que les sources d'énergie ont généralement des niveaux de disponibilité imprévisibles, l'adaptation du rapport cyclique est alors une méthode efficace qui peut garantir la condition ENO du capteur. De plus, cette méthode peut réguler directement les activités de l'unité radio, l'unité qui consomme le plus dans les activités du capteur sans fil [11].

Un des premiers travaux sur la gestion d'énergie des capteurs sans fil est proposé dans [5]. Dans cette étude, Kansal et al. ont introduit la notion de fonctionnement neutre en énergie pour les noeuds capteurs avec récupération d'énergie. Afin de calculer le rapport cyclique, la méthode développée divise le temps en N intervalles de temps égaux par jour. Ensuite, pour prédire la quantité d'énergie solaire à récupérer, les auteurs ont développé le prédicteur EWMA. Cependant, comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, l'erreur de prédiction donnée par l'algorithme EWMA est élevée lorsqu'il y a un changement météorologique important. Dans ce cas, on obtient de fausses valeurs du rapport cyclique, ce qui se traduit par un fonctionnement non-optimal du capteur sans fil.

Le et al. ont proposé un gestionnaire efficace d'énergie pour les capteurs communicants [7]. Le PM proposé peut-être appliqué aux noeuds capteurs alimentés par des sources d'énergie périodiques (par exemple, l'énergie lumineuse dans un bureau). Ce gestionnaire d'énergie permet de satisfaire la condition ENO et d'optimiser les intervalles de réveil du capteur communicant suivant l'énergie totale disponible. Les résultats obtenus montrent que le débit de données ainsi que la qualité de service d'un capteur sans fil sont améliorés par rapport aux méthodes de l'état de l'art. Cependant, l'algorithme proposé est basé sur le prédicteur EWMA qui donne des erreurs de prédiction très élevées par rapport à celles données par notre prédicteur SEPCS.

Une autre étude a été publiée par Cammarano et al. dans [12]. Dans ce travail, un nouveau modèle de prédiction d'énergie solaire appelé Pro-Energy est proposé. L'algorithme de prédiction développé permet d'améliorer les erreurs de prédiction par rapport aux modèles existants tel que l'EWMA. Cette étude est très intéressante et le prédicteur a été validé en utilisant un ensemble de données réelles d'énergie solaire. Cependant, les auteurs n'ont pas détaillé leur méthode de gestion d'énergie du noeud capteur.

Vigorito et al. ont proposé une nouvelle technique pour contrôler le rapport cyclique des capteurs sans fil avec récupération d'énergie dans [10]. Cette technique est basée sur les méthodes théoriques proposées dans [5]. Dans ce contexte, un algorithme de contrôle du rapport cyclique est développé puis validé en utilisant des mesures expérimentales. Mais, cette nouvelle technique n'inclue aucune méthode de prédiction d'énergie pour ajuster le rapport cyclique du capteur communicant.

D'autres travaux basés sur la méthode d'adaptation du rapport cyclique ont été publiés. Nguyen et al. ont développé un nouveau protocole nommé ERI-MAC (Energy-harvested Receiver-Initiated MAC Protocol) dans [13]. Kosunalp a proposé un autre protocole MAC pour les noeuds capteurs avec récupération d'énergie dans [14]. L'objectif de ces études est de réaliser la condition de neutralité énergétique du noeud capteur. Cependant, la majorité des méthodes proposées n'introduisent aucune technique de prédiction d'énergie pour adapter le rapport cyclique. Dans ce cas, les capteurs sans fil peuvent ajuster leurs intervalles de réveil sans prendre en compte la quantité d'énergie disponible dans le futur proche.

Les études précédentes ont été proposées afin de faire le management d'énergie et d'adapter le rapport cyclique des capteurs communicants alimentés par la récupération d'énergie (e.g. énergie solaire). Certains travaux n'intègrent aucun algorithme de prédiction dans leurs méthodes de management d'énergie, ils tentent alors d'ajuster le rapport cyclique sans tenir compte des quantités d'énergie disponibles dans le futur. Par conséquent, lorsqu'il y a des changements météorologiques importants, les valeurs obtenues du rapport cyclique ne sont plus optimales.

D'autres auteurs ont développé des algorithmes de gestion d'énergie basés sur des méthodes de prédiction tels que l'EWMA et le prédicteur Pro-Energy. Cependant, les erreurs de prédiction données par ces algorithmes sont élevées. Différentes autres études ont proposé des méthodes de contrôle de rapport cyclique en utilisant des modèles génériques de consommation d'énergie qui ignorent la consommation d'énergie par différentes unités du noeud capteur telles que les unités de détection et de traitement de données mesurées.

Afin de contrôler le rapport cyclique des noeuds capteurs avec récupération d'énergie solaire sous la condition ENO, nous proposons de nouvelles méthodes de management de l'énergie. L'algorithme proposé, le PMA-SEPCS, présente différentes fonctionnalités et nouveautés. Dans ce cas, le noeud capteur adapte son rapport cyclique suivant l'énergie disponible tout en gardant une bonne qualité de service. Dans ce travail, nous avons étudié l'exemple de la ville de Nantes, mais l'algorithme développé peut-être appliqué à différentes régions, car le prédicteur SEPCS a été testé au niveaux national et international.

3 Contributions

Dans ce paragraphe, nous présentons nos contributions principales concernant la gestion d'énergie des noeuds capteurs :

- Notre première contribution est la concaténation de données mesurées lorsque la puissance disponible est faible. Cette méthode est déployée pour la première fois avec la technologie LoRa. Comme on va le voir, cette approche permet d'économiser l'énergie et de minimiser la consommation du capteur.
- La deuxième contribution consiste en l'approche d'adaptation du rapport cyclique

- du capteur communicant en fonction de l'énergie disponible.
- Notre troisième contribution est la proposition d'une méthode de stockage d'énergie solaire pour alimenter le nœud capteur pendant les périodes de non-récupération d'énergie (e.g. la nuit).
 - Notre dernière contribution est le développement d'un algorithme de gestion d'énergie basé sur le prédicteur SEPCS. Cet algorithme permet de gérer toutes les composantes du capteur sans fil. Les performances du PMA-SEPCS sont évaluées en utilisant un ensemble de données annuelles d'éclairage solaire.

4 Système de gestion d'énergie

La figure 6.1 montre le système de gestion d'énergie proposé pour adapter le rapport cyclique du capteur communicant suivant la quantité d'énergie disponible. Pour ce faire, on commence par diviser le temps en intervalles égaux.

Les entrées principales du système sont respectivement :

- $E_C(n)$: l'énergie consommée par le nœud capteur qui est calculée en utilisant le modèle de consommation d'énergie avec la technologie LoRa/LoRaWAN (présenté dans le chapitre 2).
- $E_H(n)$: l'énergie solaire récupérée qui est estimée en utilisant le prédicteur SEPCS (présenté dans le chapitre 5).
- $E_S(n)$: l'énergie solaire stockée afin d'alimenter le système durant les périodes de non-récupération d'énergie. Comme on va le voir, ce paramètre $E_S(n)$ peut-être déterminé avec une nouvelle méthode de calcul en se basant sur des bases de données d'éclairage.

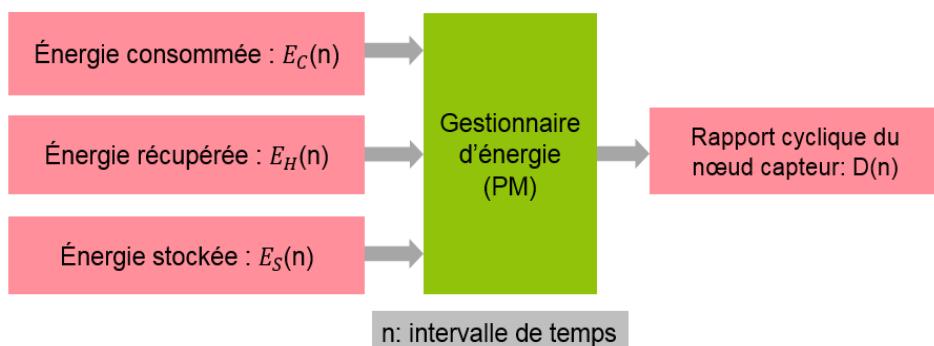


Figure 6.1 – Système proposé de gestion d'énergie.

5 Algorithme PMA-SEPCS et différentes méthodes

Cette partie est consacrée à l'étude des différentes méthodes proposées pour faire la gestion d'énergie d'un capteur communicant. Ces méthodes sont ensuite exploitées pour concevoir et développer l'algorithme PMA-SEPCS.

5.1 Méthode de concaténation de données

5.1.1 Principe

Comme indiqué dans le chapitre 2 (sections 6.2.3-6.2.7), le module radio est le principal consommateur d'énergie pour les applications IoT (e.g. contrôle de mouvements des pylônes). Afin de minimiser la consommation de ce bloc et de diminuer le nombre de transmissions de données, les valeurs d'accélération mesurées peuvent-être stockées localement puis concaténées dans une seule trame LoRa/LoRaWAN. Ce mécanisme est appelé concaténation de données [15]. Comme indiqué dans [15-18], les trames de données peuvent-être concaténées lorsqu'elles ont les mêmes origines et destinations.

Pour calculer le nombre maximum de mesures concaténées noté n_{max} , on recourt aux [19-21] indiquant la taille maximale de la charge utile PL en LoRa/LoRaWAN, qui est comprise entre 51 octets (pour un facteur d'étalement SF = 12) et 222 octets (pour SF = 7). Par conséquent, le nombre n_{max} peut-être calculé par l'équation suivante :

$$n_{max} = \frac{PL}{4}, \quad (6.1)$$

avec 4 le nombre de symboles utiles à transmettre dans notre cas d'application (contrôle des pylônes de réseaux électriques et télécommunications). En utilisant l'équation (6.1), le nombre maximum de données concaténées n_{max} est égal à 12 pour un facteur d'étalement SF = 12 et est égal à 55 pour SF = 7.

La figure 6.2 montre un exemple de concaténation de 5 données de mesures (ces mesures peuvent-être des valeurs d'accélération dans le cas de notre application). Les mesures concaténées sont ensuite envoyées dans une même trame LoRa/LoRaWAN transmise à la fin de la dernière mesure (cinquième mesure dans cet exemple). On note que la période de mesure T_m est égale à 1 seconde dans cette étude.

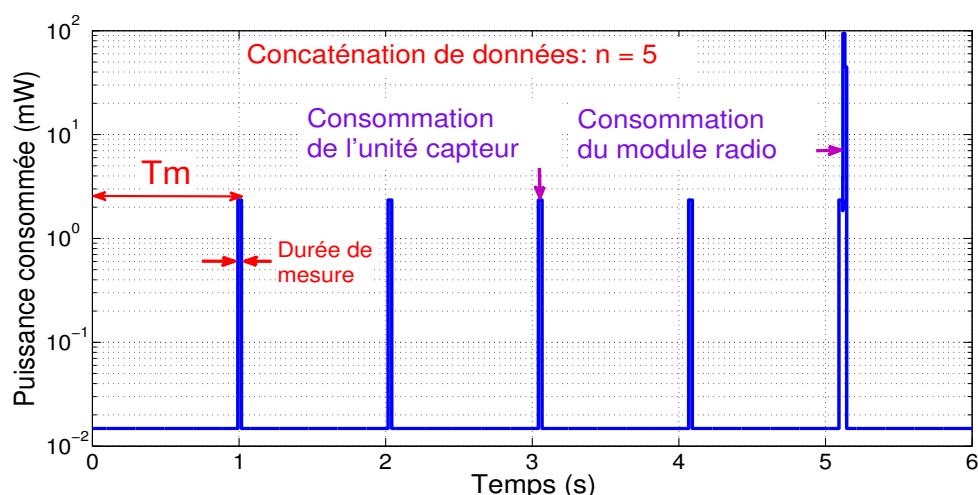


Figure 6.2 – Exemple de concaténation de données (n = 5).

5.1.2 Puissance moyenne consommée

Pour étudier les performances de la méthode proposée, on peut calculer la puissance moyenne consommée P_m par l'équation (6.2) :

$$P_m = \frac{E_{Total}}{T_{Cycle}}, \quad (6.2)$$

où T_{Cycle} est la durée d'un cycle de n mesures et d'une transmission de toutes les données mesurées dans la même trame LoRa/LoRaWAN. T_{Cycle} est calculé comme suit :

$$T_{Cycle} = n \cdot T_m, \quad (6.3)$$

telle que T_m est la période de mesure.

En utilisant le modèle de consommation d'énergie développé dans le chapitre 2 (section 4.2, équations 1.1-1.3), la puissance moyenne consommée P_m peut-être exprimée par l'équation suivante :

$$P_m = \frac{E_{WU} + n \cdot E_m + n \cdot E_{proc} + E_{WUT}(n) + E_{Tr}(n) + E_R(n) + n \cdot E_{Veille}}{T_{Cycle}}, \quad (6.4)$$

avec E_{WU} , E_m , E_{proc} , $E_{WUT}(n)$, $E_{Tr}(n)$, $E_R(n)$ et E_{Veille} , respectivement, les énergies consommées pour le réveil de tout le système, la mesure de données, le traitement des données mesurées, le réveil de l'émetteur-récepteur LoRa/LoRaWAN, le mode de transmission, le mode de réception d'un acquittement ACK (après la dernière mesure n) et l'état de veille du microcontrôleur.

La figure 6.3 présente l'évolution de cette puissance P_m en fonction du nombre de mesures par transmission n . Comme on peut le voir, la puissance P_m diminue lorsque le nombre de mesures n augmente. Ceci signifie qu'on a intérêt à augmenter le nombre de mesures par transmission pour minimiser la consommation moyenne du bloc radio.

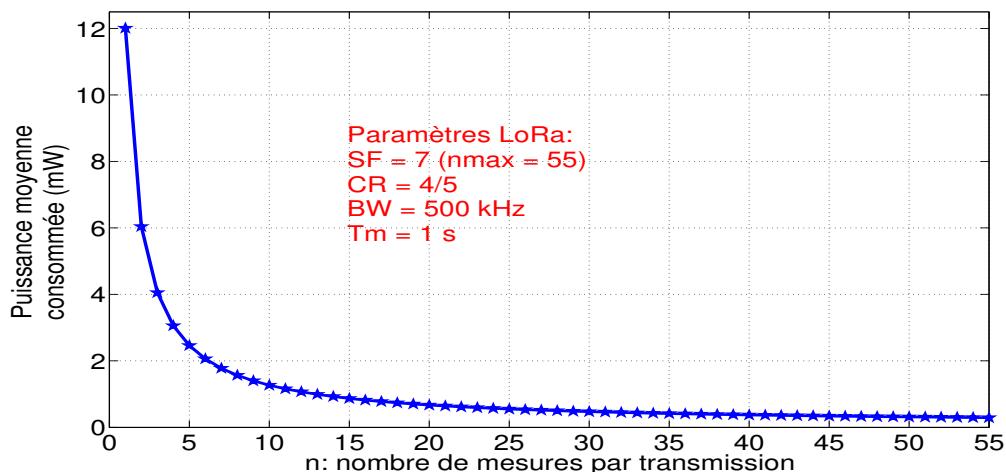


Figure 6.3 – Puissance moyenne consommée en fonction du nombre de mesures par transmission.

5.1.3 Évaluation de performances

Afin d'évaluer les performances du mécanisme de concaténation de données, on utilise la figure 6.4. Cette figure présente la consommation d'énergie pour toutes les tâches assurées par le capteur communicant. On note que le nombre de mesures n_{max} est égal à 55 (avec un facteur d'étalement SF = 7). Dans ce cas, comme indiqué dans le chapitre 2, les principaux consommateurs d'énergie sont le microcontrôleur ($E_{MCU} = 4.015 \text{ mJ}$), l'unité capteur ($E_m = 14.3 \text{ mJ}$) et l'unité radio ($E_{Tr} = 7.9 \text{ mJ}$ et $E_R = 0.27 \text{ mJ}$).

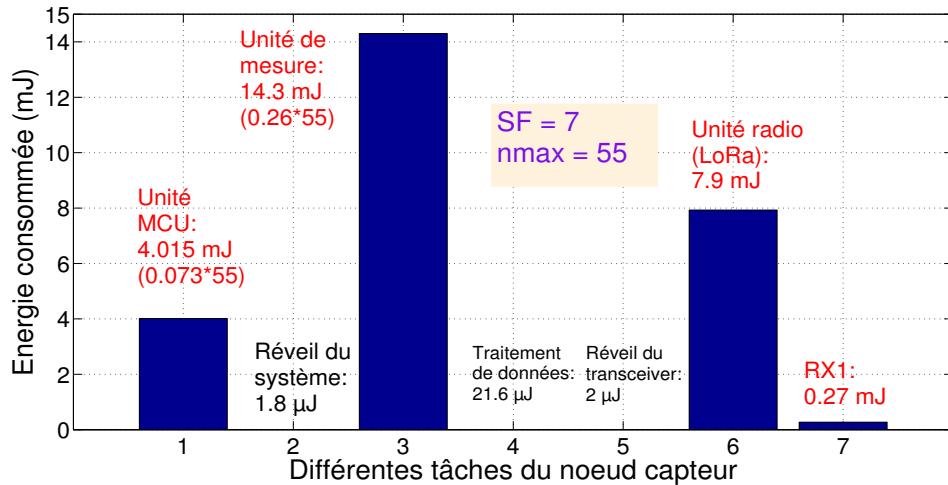


Figure 6.4 – Énergies consommées par les unités du noeud capteur en utilisant la concaténation de données.

Le tableau 6.1 compare la consommation d'énergie du module radio en utilisant la méthode de concaténation de données (avec n égale à 55 pour SF = 7) et celle avec 55 mesures et transmissions de données sans concaténation. On voit bien que le mécanisme de concaténation de données est une méthode intéressante permettant de minimiser la quantité d'énergie consommée par le module radio (pour l'exemple de 55 mesures, la méthode proposée permet de gagner 82.7% d'énergie par rapport à 55 transmissions et réceptions d'ACK sans concaténation).

Méthode / Mode	Concaténation de données ($n=55$)	55 transmissions et réceptions (sans concaténation)
Mode de transmission (E_{Tr})	7.9 mJ	32.45 mJ ($0.59 * 55$)
Mode de réception (E_R)	0.27 mJ	14.85 mJ ($0.27 * 55$)

Table 6.1 – Évaluation de performances de la méthode de concaténation de données (SF = 7 et $n = 55$).

Cette méthode sera intégrée dans l'algorithme PMA-SEPCS. On note néanmoins que la concaténation de données peut introduire un retard de temps ou un délai sur la transmission de données. Ce retard est très élevé lorsque le nombre de mesures n et la période de mesure T_m sont élevés. Pour cela, la concaténation de données peut entraîner des retards non-compatibles avec les contraintes de l'application. Dans ce cas, différentes contraintes

peuvent-être intégrées dans l'algorithme PMA-SEPCS, comme par exemple le délai maximum de transmission de données mesurées.

5.2 Méthode de contrôle du rapport cyclique

5.2.1 Principe

L'objectif principal de cette méthode est de calculer la période de mesure ou de transmission en respectant la condition de neutralité énergétique (condition ENO). Dans ce contexte, le nœud capteur adapte ses performances en fonction de l'énergie disponible afin de maintenir une bonne qualité de service [21-22].

La figure 6.5 montre le principe de fonctionnement de la méthode du rapport cyclique. Dans cet exemple, le calcul de la période de mesure dépend de la quantité d'énergie solaire disponible. En effet, si la quantité d'énergie solaire est élevée, alors le nombre de mesures augmente (la période de mesure T_m diminue). Dans le cas inverse, si la quantité d'énergie disponible est faible, alors la période de mesure augmente (la fréquence de mesure diminue).

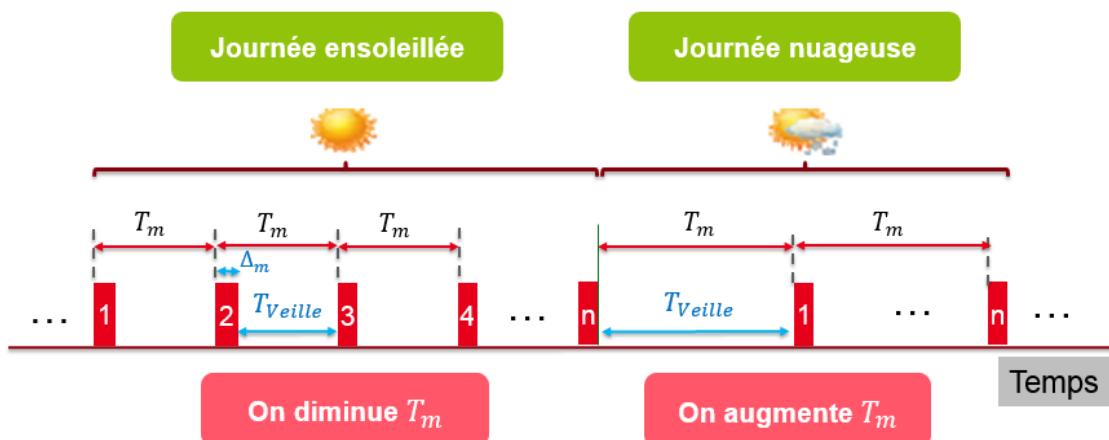


Figure 6.5 – Principe d'adaptation du rapport cyclique ; en utilisant une source d'énergie solaire.

Pour déterminer la période de mesure (respectivement la période de transmission), la méthode de contrôle du rapport cyclique proposée est basée sur les hypothèses suivantes :

- Pendant la période de récupération d'énergie (la journée), le temps est divisé en intervalles de temps égaux.
- La période de mesure est calculée au début de chaque intervalle de temps en utilisant les résultats de prédiction de l'algorithme SEPCS.
- Pour chaque intervalle de temps pendant la journée, on donne la priorité au stockage d'énergie pour la nuit qui représente la période de non-récupération d'énergie. En effet, l'algorithme proposé doit adapter le rapport cyclique et stocker l'énergie nécessaire afin de permettre le fonctionnement du système durant la nuit.
- Les contraintes de l'algorithme sont les périodes de mesure minimale et maximale $T_{m_{min}}$ et $T_{m_{max}}$ (soit : $T_{m_{min}} \leq T_m \leq T_{m_{max}}$).

5.2.2 Calcul de la période de mesure et de l'énergie stockée

Pour calculer la période de mesure $T_m(n)$ de l'intervalle de temps n sous la condition ENO, on commence par écrire le bilan énergétique grâce à l'équation suivante :

$$E_{Totale}(n) + E_L(n) = E_H(n) - E_S(n), \quad (6.5)$$

avec $E_{Totale}(n)$, $E_L(n)$, $E_H(n)$ et $E_S(n)$, respectivement, l'énergie totale consommée par le capteur communicant, les pertes d'énergie dans le condensateur, l'énergie solaire estimée par le SEPCS et l'énergie solaire stockée pour la nuit.

En utilisant le modèle de consommation d'énergie (chapitre 2), l'énergie totale $E_{Total}(n)$ peut-être exprimée comme suit :

$$E_{Totale}(n) = E_{Active}(n) + P_{Veille} \cdot (T_m(n) - \Delta_m), \quad (6.6)$$

où Δ_m est la durée de mesure. Dans cette étude, on suppose que la durée de transmission est négligeable par rapport à Δ_m .

De plus, les énergies $E_L(n)$ et $E_H(n)$ peuvent-être écrites en fonction de $T_m(n)$ comme suit :

$$E_i(n) = P_i \cdot T_m(n), \quad (6.7)$$

telle que P_i représente respectivement la puissance P_L dissipée dans la capacité et la puissance P_H estimée par le SEPCS.

Enfin, afin de déterminer l'énergie stockée $E_S(n)$, on se réfère au tableau 6.2 qui présente le calcul de $E_S(n)$ pour toutes les saisons (en tenant compte des longueurs moyennes des jours et des nuits durant ces saisons). Ces longueurs moyennes peuvent-être déduites en utilisant les bases de données annuelles d'éclairage (par exemple Nantes). Dans ce cas, l'énergie $E_S(n)$ est déterminée en fonction de l'énergie consommée pour un cycle de fonctionnement du capteur communicant pendant la nuit notée E_{CN} . Cette dernière peut-être calculée en utilisant le modèle de consommation d'énergie présenté dans le chapitre 2, soit :

$$E_{CN} = E_{Active} + P_{Veille} \cdot (H - \Delta_m), \quad (6.8)$$

avec H la période de mesure maximale pendant la nuit. (H est fixée à 1 heure dans cette étude).

Saison	Longueur moyenne de la journée	Longueur moyenne de la nuit	Valeur de $E_S(n)$
Hiver	8	16	$2 \cdot E_{CN}$
Printemps et automne	12	12	$1 \cdot E_{CN}$
Été	16	8	$\frac{1}{2} \cdot E_{CN}$

Table 6.2 – Calcul de l'énergie stockée $E_S(n)$.

Afin de retrouver les valeurs de $E_S(n)$ (tableau 6.2), prenons l'exemple de l'hiver. Dans ce cas, les durées moyennes de la journée et de la nuit sont respectivement égales à 8 et à 16 heures. Afin de transmettre les données mesurées toutes les heures durant la nuit, on doit stocker une quantité d'énergie égale à $2 \cdot E_{CN}$ pendant chaque intervalle de temps de la journée. Cette valeur peut-être déterminée à l'aide de l'équation (6.9). Ceci signifie

qu'en hiver nous devons stocker suffisamment d'énergie pendant 8 heures de la journée pour transmettre les données 16 fois durant la nuit.

$$8.E_S(n) = 16.E_{CN} \quad (6.9)$$

De plus, en faisant le même calcul pour les autres saisons, l'énergie $E_S(n)$ peut-être exprimée par l'équation suivante :

$$E_S(n) = C.E_{CN}, \quad (6.10)$$

où C est une valeur constante égale à $\frac{1}{2}$, 1 ou 2 selon les saisons.

En utilisant les équations (6.5), (6.6), (6.7) et (6.10) et en faisant un calcul approprié, la période de mesure $T_m(n)$ est donnée par l'équation suivante :

$$T_m(n) = \frac{E_{Active}(n) - P_{Veille}.\Delta_m + C.E_{CN}}{P_H(n) - P_{Veille} - P_L} \quad (6.11)$$

5.2.3 Évaluation de performances

Afin de valider la méthode développée, on peut utiliser la figure 6.6, qui représente l'évolution de la période de mesure T_m en fonction de la puissance solaire récupérée P_H (en utilisant le panneau solaire donnant une puissance maximale égale à 800 mW). Comme on peut le voir, la période T_m diminue lorsque la puissance récupérée augmente (ceci signifie que si P_H augmente, alors on augmente la fréquence de mesure et vice versa).

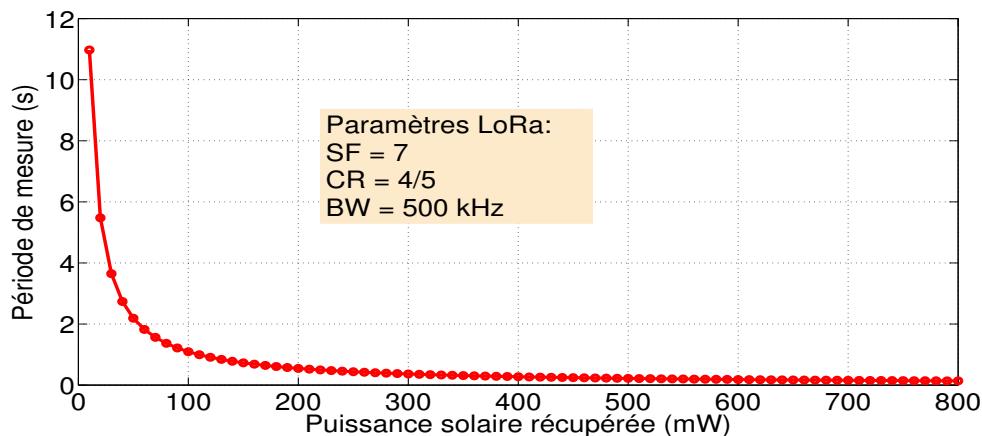


Figure 6.6 – Période de mesure en fonction de la puissance solaire récupérée.

On note que selon le type d'application du capteur communicant, de nombreuses contraintes telles que les périodes de mesure minimale et maximale notées $T_{m_{min}}$ et $T_{m_{max}}$ peuvent-être appliquées pour adapter le rapport cyclique du capteur sans fil. Toutes ces contraintes sont détaillées dans l'algorithme PMA-SEPCS.

5.3 Algorithme de gestion d'énergie

Dans ce paragraphe, on présente le fonctionnement de l'algorithme de gestion d'énergie PMA-SEPCS. L'algorithme proposé est basé sur le prédicteur SEPCS. La figure 6.7

montre la stratégie adoptée pour faire le management d'énergie des capteurs communicants. Comme indiqué précédemment, on considère un accéléromètre connecté pour contrôler le déplacement des pylônes de réseaux électriques et télécommunications. On note que le PMA-SEPCS est un modèle générique qui peut-être appliqué à différentes classes d'applications.

Pour notre cas d'application, le fonctionnement du système communicant est toujours lié à la quantité d'énergie disponible P_H (estimée par le SEPCS). Dans ce contexte, trois cas de figures se présentent :

- Si P_H est faible, alors le nœud capteur doit récupérer l'énergie solaire sans transmettre les données mesurées à la passerelle.
- Si P_H est moyenne, alors on peut utiliser le mécanisme de concaténation de données pour minimiser la consommation énergétique du capteur.
- Si P_H est élevée, alors le capteur sans fil adapte son rapport cyclique en fonction de la quantité d'énergie disponible.

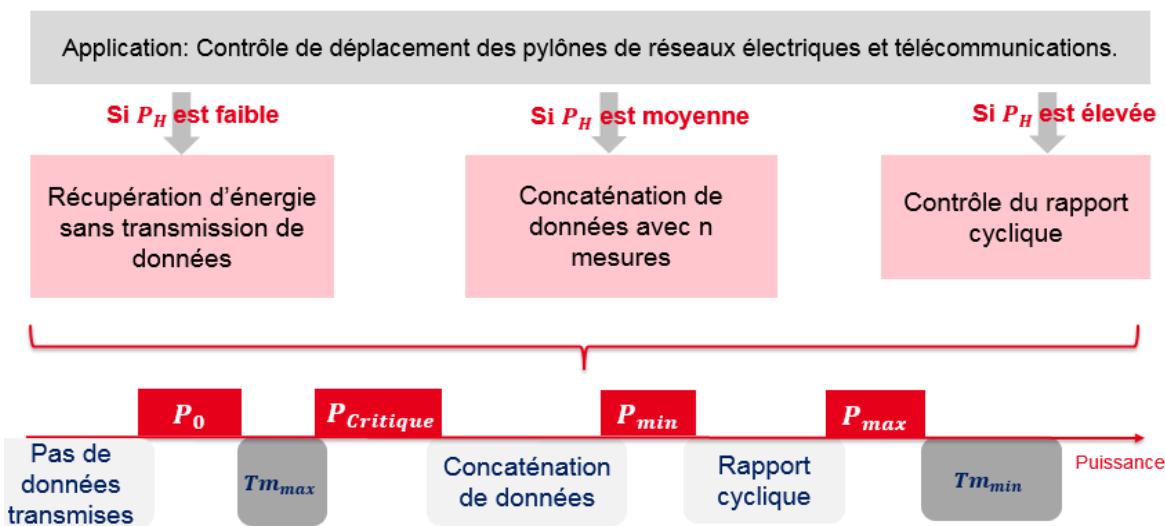


Figure 6.7 – Stratégie de gestion d'énergie pour les capteurs communicants.

En regardant la figure 6.7, les seuils P_0 , $P_{Critique}$, P_{min} et P_{max} sont fixés par l'utilisateur suivant les exigences de l'application visée. On note aussi que les contraintes de l'algorithme sont les périodes de mesure minimale et maximale Tm_{min} et Tm_{max} (signifie qu'on a : $Tm_{min} \leq T_m \leq Tm_{max}$).

L'algorithme 1 présente le fonctionnement du PMA-SEPCS pour les capteurs communicants avec récupération d'énergie. Les paramètres P_H , n , P_0 , $P_{Critique}$, P_{min} et P_{max} sont les différentes entrées de l'algorithme.

Afin de calculer la sortie de l'algorithme $T_m(n)$ à l'instant n , on utilise, dans un premier temps, le prédicteur SEPCS pour estimer la puissance disponible $P_H(n)$ pour chaque intervalle de temps (avec de faibles erreurs de prédiction). Ensuite, en comparant la valeur de cette puissance $P_H(n)$ avec les différents seuils de puissance, on peut alors sélectionner la méthode adéquate pour déterminer la période de mesure $T_m(n)$ adaptée.

Algorithm 1 : PMA-SEPCS : calcul de la période de mesure T_m

Require: $P_H, n, P_0, P_{Critique}, P_{min}, P_{max}$ % Entrées du programme.

```

for chaque intervalle de temps i do
    if  $P_H \leq P_0$  then
         $T_m \leftarrow 0$  : % On récupère l'énergie sans transmettre les données.
    end if
    if  $P_0 < P_H \leq P_{Critique}$  then
         $T_m \leftarrow Tm_{max}$  : % Mesure et transmission de données avec  $Tm_{max}$ 
        % (e.g.  $Tm_{max} = 3600$  seconds).
    end if
    if  $P_{Critique} < P_H \leq P_{min}$  then
         $T_{Cycle} \leftarrow T_m.n$  : % Méthode de concaténation de données (e.g.  $n=55$  pour SF=7).
    end if
    if  $P_{min} < P_H \leq P_{max}$  then
         $T_m(n) = \frac{E_{Active}(n) - P_{Veille} \cdot \Delta_m + C.E_{CN}(n)}{P_H(n) - P_{Veille} - P_L}$  : % Méthode de contrôle du rapport cyclique.
    else { $P_{max} < P_H$ }
         $T_m \leftarrow Tm_{min}$  : % Mesure et transmission de données avec  $Tm_{min}$ 
        % (e.g.  $Tm_{min} = 60$  seconds).
    end if
end for
```

6 Évaluation de performance du PMA-SEPCS

Cette section est consacrée à l'évaluation des performances de notre algorithme de management d'énergie pour les capteurs communicants. Pour cela, on utilise les données annuelles d'éclairement solaire (e.g. ville de Nantes).

La figure 6.8 montre les résultats d'implémentation de l'algorithme développé. Cette figure présente l'évolution de trois paramètres essentiels, que sont la puissance solaire récupérée en utilisant un panneau solaire donnant une puissance maximale égale à 800mW (estimée par le SEPCS), la période de mesure de données (les mesures de l'accélération dans cet exemple) et la puissance solaire stockée en utilisant un condensateur de capacité égale à 3F avec une tension maximale égale à 2.2V. Dans cet exemple, les paramètres $n, P_0, P_{Critique}, P_{min}$ et P_{max} sont respectivement égales à 55, 0mW, 100mW, 300mW et 750mW. En regardant cette figure, on remarque que :

- Pendant l'hiver (les mois de janvier, février et décembre), la puissance solaire moyenne récupérée est plus faible par rapport aux autres saisons.
- En conséquence, on voit bien que le noeud capteur réalise moins de mesures pendant cette saison (ceci est expliqué par les espaces vides présentés par la courbe de la période de mesure).
- L'énergie stockée dans la capacité diminue et atteint ses valeurs minimales pendant l'hiver (le capteur communicant recourt plus à l'énergie stockée pendant l'hiver pour satisfaire ses besoins énergétique et transmettre l'information).

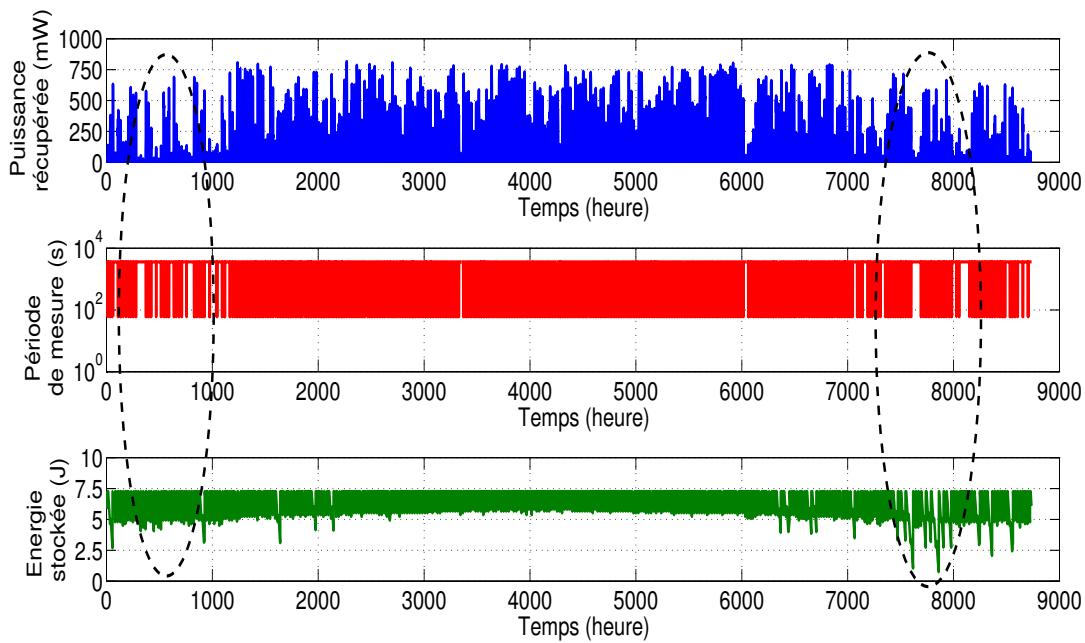


Figure 6.8 – Implémentation du PMA-SEPCS en utilisant des bases de données annuelles d'éclairement : évolution de la puissance solaire estimée par le SEPCS, de la période de mesure et de l'énergie stockée (cas d'étude : Nantes).

Afin de voir plus de détails, on utilise la figure 6.9 qui représente l'évolution des mêmes paramètres précédents pendant cinq jours. On note que les cinq journées choisies présentent différentes conditions météorologiques pour valider le fonctionnement de l'algorithme proposé. Ainsi, de nombreuses constations peuvent-être déduites de cette figure :

- Remarque "1" : pendant la période de non-récupération (la nuit), le nœud capteur réalise une mesure et une transmission toutes les heures. Par conséquent, l'énergie stockée dans la capacité diminue continuellement.
- Remarque "2" : pendant la journée : le capteur communicant adapte la période de mesure en fonction de l'énergie disponible. En effet, au début de la journée, l'énergie récupérée commence à augmenter. En conséquence, la période de mesure commence à diminuer (la fréquence de mesure augmente). Puis, vers la fin de la journée, comme l'énergie récupérée diminue alors la période de mesure augmente simultanément (la fréquence de mesure diminue dans ce cas).
- Remarque "3" : pendant la période de récupération d'énergie, lorsque la puissance solaire récupérée est très faible, la période de mesure peut-être fixée à Tm_{max} (égale à 1 heure) pour minimiser l'énergie totale consommée par le nœud capteur (on donne la priorité au stockage d'énergie dans ce cas).
- Remarque "4" : Les contraintes minimale $Tm_{min} = 60$ secondes et maximale $Tm_{max} = 1$ heure sont respectées par l'algorithme. Ces contraintes restent toutefois spécifiques à l'application du capteur communicant.

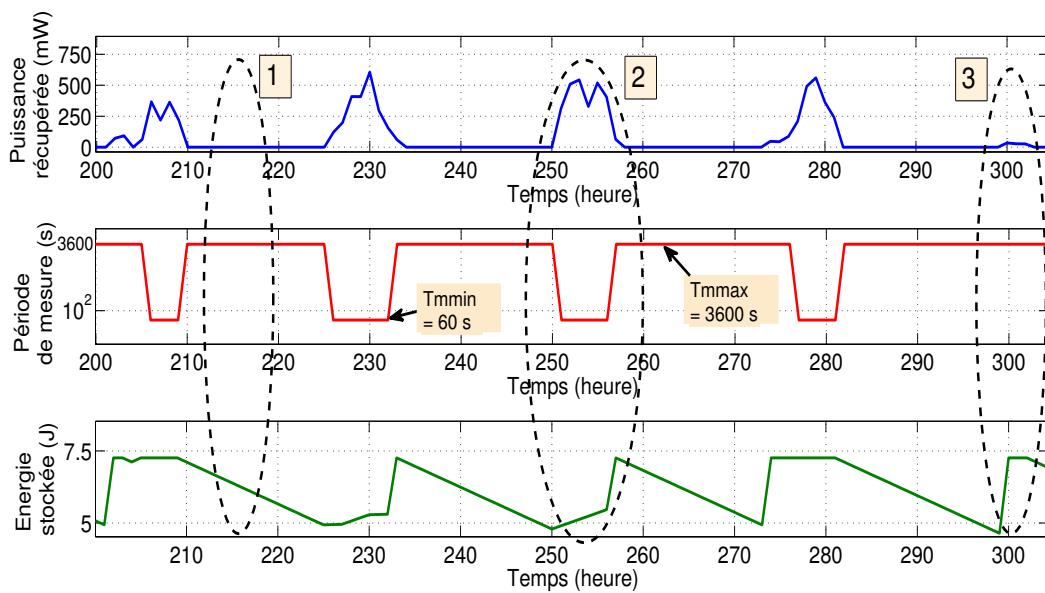


Figure 6.9 – Évaluation de performances de l'algorithme PMA-SEPCS ; avec une période égale à cinq jours de récupération d'énergie (cas d'étude : Nantes).

7 Méthodologie de conception de capteurs communicants autonomes

Dans ce dernier paragraphe, nous présentons notre méthode de conception des nœuds capteurs pour les applications IoT. Cette méthodologie est décrite par la figure 6.10.

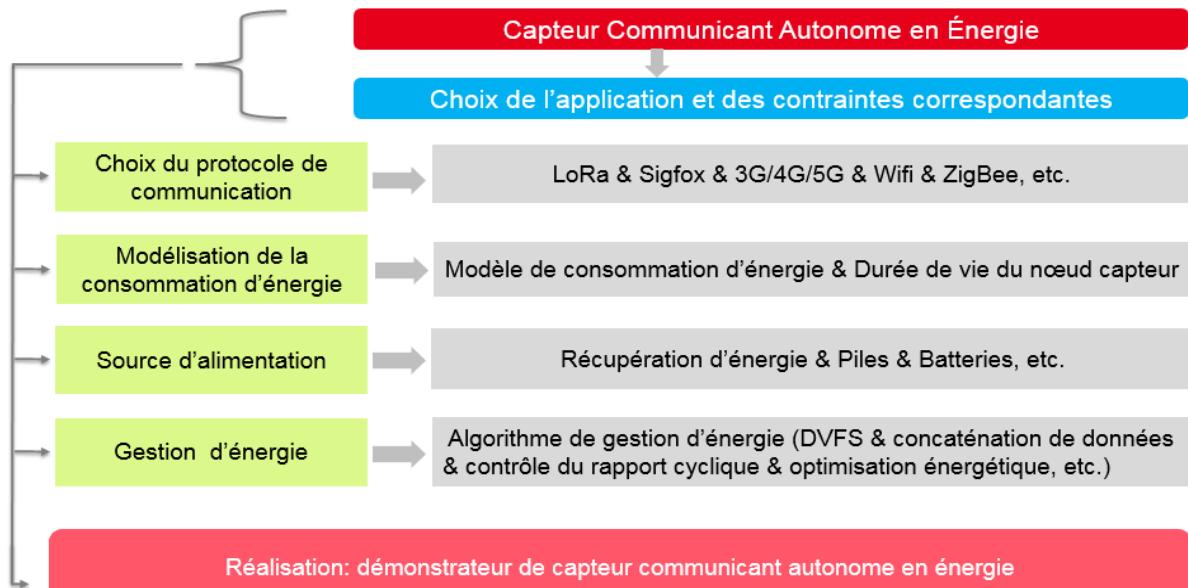


Figure 6.10 – Conception de capteurs sans fil pour les applications IoT.

Pour concevoir et réaliser un capteur communicant autonome en énergie, on propose une méthodologie appelée CCAE-IoT (Capteur Communicant Autonome en Énergie pour l’IoT). Cette méthode est décrite comme suit :

- Choix de l’application désirée et définition de l’ensemble des contraintes : parmi ces applications on cite à titre d’exemples la gestion des villes intelligentes (gestion des infrastructures de la ville) tels que l’eau, le transport, les bâtiments, les services et équipements publics, les déchets (niveau de pollution dans les rues, gaz polluant : CO_2) ; le sport connecté ; le contrôle d’ouvrages d’art (ponts, quais, barrages, tunnels) ; les grandes structures mobiles (avions, navires, métros) ; la vidéo-surveillance et les vêtements connectés ; etc. Dans ce contexte, définir l’application du capteur sans fil ainsi que l’ensemble des contraintes correspondantes est essentiel pour entamer la phase de conception et de développement du nœud capteur.
- Choix du protocole de communication adéquat : le choix de la technologie de communication est primordial pour la conception des nœuds capteurs. Ce choix est basé sur différents paramètres essentiels liés à l’application choisie. Parmi ces paramètres, on cite la portée de communication, le débit de transmission et l’autonomie énergétique, etc.
- Modélisation de la consommation énergétique du capteur : après avoir fixé l’application et le protocole de communication, on peut modéliser la consommation du capteur sans fil. Cette modélisation permet de connaître les besoins énergétiques du capteur suivant les contraintes applicatives.
- Choix de la source d’alimentation : dans ce cas, l’utilisateur décide de la source d’énergie à utiliser. Pour les capteurs communicants déployés dans des emplacements non-accessibles, la récupération d’énergie pourrait-être une solution pertinente.
- Management d’énergie du système proposé : la gestion d’énergie est le cœur de tout le travail réalisé. Il s’agit de développer des méthodes de gestion d’énergie adéquates afin de minimiser la consommation énergétique du capteur et de prolonger sa durée de vie.

On note que les algorithmes de modélisation et d’optimisation développés peuvent-être exploités afin de réaliser un démonstrateur de capteur communicant et autonome en énergie. Pour cela, la méthode CCAE-IoT peut-être un candidat potentiel pour le futur des objets connectés.

8 Conclusion

Ce dernier chapitre décrit le management d’énergie des capteurs communicants. L’objectif de cette partie est de faire la gestion d’énergie du système proposé afin de converger vers son fonctionnement neutre en énergie (condition ENO).

Pour cela, nous avons développé un algorithme de gestion d’énergie appelé PMA-SEPCS. En prenant en considération la quantité d’énergie disponible (prédite par le SEPCS), le PMA-SEPCS permet de contrôler l’activité du capteur communicant en adaptant son rapport cyclique. En effet, le PMA-SEPCS permet de satisfaire la condition ENO et de maintenir une bonne qualité de service en fonction de l’énergie récupérée.

L’algorithme proposé permet d’estimer la période d’exécution (la période de mesure dans cette étude), en fonction de l’énergie disponible. Dans ce contexte, deux différentes

méthodes sont développées et validées en utilisant un scénario d'application réel. La première approche consiste à concaténer les données mesurées lorsque la puissance disponible est faible et de ne transmettre qu'une seule trame de données avec la technologie LoRa/LoRaWAN. Nous avons montré à travers les résultats obtenus que cette approche permet d'économiser l'énergie et de minimiser la consommation du capteur sans fil. La deuxième approche consiste à adapter le rapport cyclique pendant la journée tout en donnant la priorité au stockage d'énergie pour la période de non-récupération (la nuit). Pour cela, une nouvelle méthode de calcul de l'énergie stockée a été proposée.

Ensuite, les performances du PMA-SEPCS ont été évaluées à l'aide d'un ensemble de données annuelles d'éclairement. Dans ce travail, nous avons étudié l'exemple de la ville de Nantes, mais l'algorithme développé peut-être appliqué à différents endroits, car le SEPCS fonctionne bien au niveau national ainsi qu'à l'échelle internationale.

Enfin, ce chapitre ainsi que ce manuscrit sont clôturés par la proposition d'une méthodologie de conception et de réalisation de capteurs communicants et autonomes appelée CCAE-IoT (Capteur Communicant Autonome en Énergie pour l'IoT).

Bibliographie : chapitre 6

- [1] S. Yang, X. Yang, J. A. McCann, T. Zhang, G. Liu, and Z. Liu, Distributed networking in autonomic solar powered wireless sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 12, pp. 750-761, 2013.
- [2] M. Shin and I. Joe, Energy management algorithm for solar-powered energy harvesting wireless sensor node for internet of things. *IET Communications*, vol. 10, no. 12, pp. 1508-1521, 2016.
- [3] Q. Liu and Q. Zhang, Accuracy improvement of energy prediction for solar-energy-powered embedded systems. *IEEE Trans. VLSI Syst.*, vol. 24, no. 6, pp. 2062-2074, 2016.
- [4] T. Bouguera, J. Diouris, J. Chaillout, R. Jaouadi, and G. Andrieux, A novel solar energy predictor for communicating sensors. *IET Communications*, 2018.
- [5] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, and M. B. Srivastava, Power management in energy harvesting sensor networks. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, vol. 6, no. 4, p. 32, 2007.
- [6] F. A. Aoudia, M. Gautier, and O. Berder, Demo abstract : How fuzzy logic can enhance energy management in wireless sensor nodes equipped by energy harvesters and wake-up radios, in *DASIP*, 2016 Conference on. IEEE, 2016, pp. 229-230.
- [7] T. N. Le, A. Pegatoquet, O. Berder, and O. Sentieys, Energy-efficient power manager and MAC protocol for multi-hop wireless sensor networks powered by periodic energy harvesting sources. *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 12, pp. 7208-7220, 2015.
- [8] W. Tuming, Y. Sijia, and W. Hailong, A dynamic voltage scaling algorithm for wireless sensor networks. in *ICACTE*, 2010 3rd International Conference on, vol. 1. IEEE, 2010, pp. V1-554.
- [9] A. Castagnetti, A. Pegatoquet, T. N. Le, and M. Auguin. A joint duty-cycle and transmission power management for energy harvesting wsn. *IEEE Trans. Industrial Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 928-936, 2014.
- [10] C. M. Vigorito, Adaptive control of duty cycling in energy-harvesting wireless sensor networks. Computer Science Department Faculty Publication Series, p. 65, 2007.
- [11] T. Bouguera, J. Diouris, J. Chaillout, R. Jaouadi, and G. Andrieux, Energy consumption model for sensor nodes based on LoRa and LoRaWAN. *Sensors* (Basel, Switzerland), vol. 18, no. 7, 2018.
- [12] A. Cammarano, C. Petrioli, and D. Spenza, Online energy harvesting prediction in environmentally powered wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 17, pp. 6793-6804, 2016.
- [13] K. Nguyen, V.-H. Nguyen, D.-D. Le, Y. Ji, D. A. Duong, and S. Yamada, ERI-MAC : An energy-harvested receiverinitiated MAC protocol for wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 10, no. 5, p. 514169, 2014.
- [14] S. Kosunalp, MAC protocols for energy harvesting wireless sensor networks : Survey. *ETRI journal*, vol. 37, no. 4, pp. 804-812, 2015.
- [15] Y. Xiao, Ieee 802.11 performance enhancement via concatenation and piggyback mechanisms. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, no. 5, pp. 2182-2192, 2005.
- [16] H. S. Chhaya and S. Gupta. Performance modeling of asynchronous data transfer methods of IEEE 802.11 MAC protocol. *Wireless Netw.*, vol. 3, no. 3, pp. 217-234, 1997.
- [17] F. Cali, M. Conti, and E. Gregori. IEEE 802.11 protocol : Design and performance

evaluation of an adaptive backoff mechanism. IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 18, no. 9, pp. 1774-1786, Sep. 2000.

[18] Y. Xiao. A simple and effective priority scheme for IEEE 802.11. IEEE Commun. Lett., vol. 7, no. 2, pp. 70-72, Feb. 2003

[19] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, Understanding the limits of lorawan. IEEE Communications magazine, vol. 55, no. 9, pp. 34-40, 2017.

[20] A. Minaburo, A. Pelov and L. Toutain. LP-WAN Gap Analysis. IETF Std, Feb. 2016.

[21] C. Goursaud and J. M. Gorce. Dedicated Networks for IoT : PHY/MAC State of the Art and Challenges. EAI Endorsed Trans. Internet of Things, vol. 15, no. 1, Oct. 2015.

[22] F. A. Aoudia, M. Gautier and O. Berder. Adaptation dynamique de la qualité de service dans les réseaux de capteurs avec récupération d'énergie. In Gretsi, 2015.

[23] B. Buchli, F. Sutton, J. Beutel and L. Thiele. Dynamic power management for long-term energy neutral operation of solar energy harvesting systems. In Proceedings of the 12th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, SenSys, pages 31-45, NewYork, USA, 2014.

Conclusion générale et perspectives

L'autonomie des nœuds capteurs et la consommation d'énergie sont des problématiques majeures dans le domaine des objets connectés. Grâce à l'évolution rapide de la technologie au niveaux matériel et logiciel, la consommation des circuits électroniques ne cesse de baisser. Ainsi, les techniques de management de puissance (ou de gestion de la consommation d'énergie des nœuds capteurs) est un élément clé qui intervient dans la conception des capteurs communicants. Ces techniques visent à établir la neutralité énergétique ou le fonctionnement neutre en énergie du nœud capteur.

La récupération d'énergie (ou energy harvesting en anglais) est de plus en plus considérée pour remédier aux problèmes d'alimentation causés par les piles ou les batteries. Il s'agit d'une technologie très prometteuse puisqu'elle répond à de nombreux besoins techniques et économiques. Cependant, cette technologie met en question l'ensemble des techniques de management de puissance du capteur communicant. En effet, les politiques de gestion d'énergie doivent se baser dans ce cas sur un équilibre énergétique global entre l'énergie disponible (récupérée et stockée) et l'énergie consommée.

Afin de proposer un Capteur Communicant Autonome en Énergie pour l'IoT et d'étudier la problématique de gestion de puissance, nous avons développé un ensemble de modèles et d'algorithmes permettant de satisfaire les objectifs du cahier des charges. Nous présentons dans ce rapport le travail effectué pendant ce projet de thèse. Ainsi, un état de l'art sur la récupération et la gestion d'énergie pour les capteurs communicants est présenté dans le premier chapitre. En effet, nous avons commencé par étudier les différentes sources d'énergie présentes dans l'environnement. Ensuite, afin d'avoir deux sources complémentaires et donnant des quantités de puissances comparables, nous avons choisi le solaire et l'éolien pour alimenter notre capteur communicant. Nous avons présenté ensuite un état de l'art sur la gestion d'énergie des capteurs sans fil. Il s'agit d'une partie essentielle de notre travail, dans laquelle nous avons décrit les travaux de recherche qui traitent le management d'énergie mono-source (solaire par exemple). Puis, l'architecture interne du capteur communicant est présentée. Il s'agit d'un système autonome à base de récupération et de gestion multi-sources d'énergie dont les différents blocs sont étudiés dans le reste du manuscrit.

Dans le deuxième chapitre nous avons étudié la consommation énergétique du capteur communicant en tenant compte d'un exemple d'application choisi. Le capteur proposé sert, à titre d'exemple, à contrôler le déplacement d'ouvrages d'art tels que les ponts, les tunnels et les pylônes de réseaux électriques et télécommunications. Le scénario d'application précis nous a permis de choisir les technologies de communication adéquates. Dans ce contexte, le choix de ces technologies n'était pas arbitraire. En fait, pour ce genre de projet,

il s'agit de transmettre les données mesurées à longue portée avec une faible consommation, ce qui est le cas pour LoRa/LoRaWAN. Ensuite, le modèle de consommation proposé, qui est validé par des modes et des scénarios LoRa/LoRaWAN, permet d'estimer la durée de vie du noeud capteur en utilisant une source d'alimentation standard (e.g. une pile). En effet, nous avons montré que la durée de vie du capteur communicant est limitée à quelques années, voire même quelques mois suivant le scénario et le mode de transmission utilisé. Pour remédier à ce problème de limitation de vie des noeuds capteurs, nous avons envisagé un système de récupération et de gestion multi-sources d'énergies solaire et éolienne.

Le troisième chapitre met l'accent sur la technique de récupération d'énergie solaire pour les objets communicants à travers la caractérisation de la quantité d'énergie incidente. Dans ce contexte, nous avons proposé des modèles de caractérisation d'énergie solaire. Cette caractérisation s'appuie sur des équations mathématiques permettant d'évaluer les caractéristiques électriques des panneaux solaires. En effet, nous avons présenté une étude permettant la modélisation de l'éclairage et du panneau solaire. Nous avons commencé tout d'abord par un rappel sur les techniques de récupération d'énergie solaire. Nous avons décrit ensuite les différentes caractéristiques du panneau solaire d'un point de vue électrique. Les modèles de caractérisation développés, qui sont basés sur des bases de données qui montrent l'évolution de l'éclairage pendant un an dans différentes régions françaises, ont été également validés par des mesures d'énergie solaire.

Quant au quatrième chapitre, il décrit la technologie de récupération d'énergie éolienne pour les objets communicants. Pour cela, nous avons développé des modèles de caractérisation de la quantité d'énergie éolienne qui peut-être récupérée. Ces modèles de caractérisation s'appuient sur des équations analytiques qui permettent de représenter la micro-turbine utilisée. On a présenté, dans les différentes parties de ce chapitre, une étude d'énergie éolienne basée sur la modélisation du vent et de l'éolienne. Pour satisfaire nos objectifs, nous avons commencé, dans la première partie du chapitre, par un rappel sur la composition et le principe de fonctionnement d'une éolienne dans le cas général. Nous avons présenté ensuite les différents types d'éoliennes utilisées sur le marché. Puis, nous avons passé à la modélisation de la turbine à travers la modélisation du rotor et de la machine synchrone. Nos modèles de récupération d'énergie éolienne sont enfin validés par des simulations en utilisant un ensemble de données qui montrent l'évolution du vent pendant une année à différentes régions.

Afin d'estimer la quantité d'énergie récupérée par un panneau solaire, un prédicteur d'énergie solaire appelé SEPCS a été développé en se basant sur un prédicteur existant, nommé EWMA. L'EWMA recourt à l'historique d'énergie récupérée pour estimer les prochaines quantités d'énergie. Notre prédicteur proposé utilise un historique plus étendu que l'EWMA. Ensuite, nous avons comparé les performances des deux prédicteurs en utilisant des bases de données d'éclairage pour différentes villes françaises. Notre prédicteur SEPCS s'adapte mieux aux changements météorologiques que l'EWMA, avec des erreurs de prédiction plus faibles (e.g. pour la ville de Nantes, l'erreur de prédiction diminue de 28% à 6.5% donnée par notre prédicteur proposé). Enfin, le SEPCS a été testé en utilisant des bases de données d'éclairage à l'échelle internationale. On obtient toujours de meilleurs résultats de prédiction par rapport à l'EWMA.

Le dernier chapitre décrit le cœur du projet de thèse. L'objectif de cette partie est de pouvoir faire la gestion d'énergie du système proposé afin de converger vers un fonctionnement neutre en énergie du capteur. Pour cela, nous avons développé un algorithme de

gestion d'énergie appelé PMA-SEPCS. En prenant en considération la quantité d'énergie disponible et celle prédictée par le SEPCS, le PMA-SEPCS permet de contrôler l'activité du capteur communicant en jouant sur le rapport cyclique par exemple. En effet, le PMA-SEPCS permet de satisfaire la condition ENO et de maintenir une bonne qualité de service en fonction de l'énergie récupérée. Cet algorithme peut estimer la période d'exécution (la période de mesure dans cette étude), en fonction de l'énergie disponible. Dans ce cas, deux différentes méthodes sont développées et validées en utilisant un scénario d'application réel. La première approche consiste à concaténer les données mesurées lorsque la puissance disponible est faible et à transmettre une trame de données avec la technologie LoRa/LoRaWAN. Nous avons montré à travers les résultats obtenus que cette approche permet d'économiser de l'énergie et de minimiser la consommation énergétique du capteur sans fil (e.g. pour un nombre de mesures égal à 55 avec un facteur d'étalement égal à 7, cette méthode permet de gagner 82.7% d'énergie par rapport à 55 transmissions et réceptions d'ACK sans concaténation). La seconde approche consiste à adapter le rapport cyclique en donnant la priorité au stockage d'énergie pour la nuit. Pour cela, une nouvelle méthode de calcul de l'énergie stockée a été proposée. Enfin, les performances du PMA-SEPCS ont été évaluées à l'aide d'un ensemble de données annuelles d'éclairage. Dans ce travail, nous avons étudié l'exemple de la ville de Nantes, mais l'algorithme développé peut-être appliqué à différents endroits, car le SEPCS peut-être utilisé au niveau national et voire même international. Enfin, le présent chapitre est clôturé par la proposition d'une méthodologie de conception et de développement de capteurs communicants appelée CCAE-IoT (Capteur Communicant Autonome en Énergie pour l'IoT).

Ces différents travaux ont permis différentes améliorations importantes par rapport à l'état de l'art. La première amélioration est dédiée au développement d'un modèle de consommation d'énergie pour les noeuds capteurs basé sur la technologie LoRa. Le modèle proposé peut-être appliqué à différentes classes d'applications IoT.

La deuxième innovation de ce travail est liée à l'étude d'optimisation énergétique à base de LoRa/LoRaWAN. Nous avons montré à travers cette étude qu'il existe un compromis entre la portée de communication LoRaWAN, le facteur d'étalement SF et la puissance de transmission. Cette optimisation est essentielle pour économiser la consommation énergétique du nœud capteur.

D'autres contributions sont liées à l'évaluation de l'énergie récupérable (solaire ou éolienne). Dans ce cas, des modèles de caractérisation d'énergies solaire et éolienne ont été développés. Les modèles proposés sont basés sur des bases de données d'éclairage et de vent dans différentes régions nationales et internationales.

Puis, une autre contribution de cette thèse est le développement d'un prédicteur temps réel nommé SEPCS. Un prédicteur performant qui donne de meilleurs résultats de prédictions par rapport aux algorithmes de l'état de l'art.

La dernière innovation de ce travail est liée à la conception et au développement d'un algorithme de gestion d'énergie appelé PMA-SEPCS, qui est basé sur le prédicteur SEPCS. Pour cela, deux méthodes de gestion d'énergie sont proposées (la concaténation de données et le contrôle du rapport cyclique du capteur communicant en fonction de l'énergie disponible). Les performances du PMA-SEPCS sont enfin évaluées en utilisant des données annuelles d'éclairage.

En terme de perspectives, on pourra dans un premier temps réaliser différentes mesures telles que des mesures de paramètres LoRa/LoRaWAN (portée de communication et rapport de puissance RSSI, etc.) et des mesures de consommation d'énergie. Ces mesures sont nécessaires pour valider les modèles de consommation d'énergie proposés. Il est aussi intéressant de viser d'autres technologies de communication tels que Sigfox, WiFi, etc. afin de modéliser la consommation du capteur communicant.

Sachant que les algorithmes proposés peuvent-être appliqués à différentes classes d'applications, il serait alors important de viser d'autres applications dans le domaine de l'IoT (avec d'autres contraintes sur la transmission de données par exemple).

Il est aussi souhaitable de tester les modèles de management d'énergie développés dans des conditions réelles afin de réaliser un démonstrateur de capteur autonome à base de récupération multi-sources d'énergie. Dans ce contexte, il est essentiel de développer d'autres méthodes de gestion d'énergie pour les capteurs sans fil avec récupération d'énergie.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à un noeud capteur qui transmet directement l'information à la station de base. On pourra alors travailler à l'échelle d'un réseau de capteurs et traiter d'autres problématiques telle que la gestion de collision dans un réseau de capteurs sans fil avec LoRa/LoRaWAN.

On note aussi que le prédicteur SEPCS et l'algorithme PMA-SEPCS peuvent-être utilisés pour faire la gestion de l'énergie éolienne. Dans ce contexte, il est intéressant d'optimiser les coefficients des algorithmes développés afin d'avoir des modèles d'estimation et de management d'énergie éolienne.

Hormis les problématiques évoquées ci-dessus, il existe d'autres sujets différents à explorer dans le domaine des objets connectés et principalement celui des capteurs communicants avec récupération d'énergie. Nous espérons que ce travail de thèse offrira des sources d'inspiration pour de prochains travaux.

Liste des publications

- **Publications dans des revues scientifiques**

1. Taoufik Bouguera, Jean-François Diouris, Jean-Jacques Chaillout, Randa Jaouadi et Guillaume Andrieux ; Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN. Sensors, MDPI, 2018, 18 (7).
2. Taoufik Bouguera, Jean-François Diouris, Guillaume Andrieux, Jean-Jacques Chaillout et Randa Jaouadi ; A Novel Solar Energy Predictor for Communicating Sensor. IET Communications, 2018, 12 (17) : 2145.
3. Taoufik Bouguera, Jean-François Diouris, Jean-Jacques Chaillout et Guillaume Andrieux ; A Novel Power Management Algorithm for Autonomous Communicating Sensors, à soumettre à IEEE Sensors Journal.

- **Publications dans des conférences internationales**

1. Taoufik Bouguera, Jean-François Diouris, Jean-Jacques Chaillout et Guillaume Andrieux ; Energy consumption modeling for communicating sensors using LoRa technology. IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA), Sep. 2018, Västerås, Sweden.
2. Taoufik Bouguera, Jean-François Diouris, Guillaume Andrieux et Jean-Jacques Chaillout ; Solar energy harvesting and storage modeling for communicating sensors. Sino-French Workshop on Education and Research collaborations in Information and Communication Technologies (SFWICT), Jun 2017, Qingdao, China.
3. Taoufik Bouguera, Jean-François Diouris, Jean-Jacques Chaillout et Guillaume Andrieux ; Performance evaluation of a solar energy predictor for communicating sensor, à soumettre.

- **Publication dans des conférences nationales**

1. Taoufik Bouguera, Jean-François Diouris, Guillaume Andrieux et Jean-Jacques Chaillout ; Gestion d'énergie d'un capteur communicant en LoRa. Colloque IoT, Nov. 2018, Angers, France.
2. Taoufik Bouguera, Jean-François Diouris, Guillaume Andrieux et Jean-Jacques Chaillout ; Caractérisation de la récupération de l'énergie solaire pour les capteurs communicants. Journées scientifiques URSI : Radioscience au service de l'humanité, Feb. 2017, Nice, France.

Titre : Capteur Communicant Autonome en Énergie pour l'IoT

Mots clés : IoT, technologie LoRa/LoRaWAN, capteurs sans fil, gestion d'énergie, prédition d'énergie, consommation d'énergie, optimisation énergétique, démonstrateur.

Résumé : Une grande partie des nouvelles générations d'objets connectés ne pourra se développer que s'il est possible de les rendre entièrement autonomes sur le plan énergétique. Même si l'utilisation de batteries ou de piles résout une partie de ce problème en assurant une autonomie qui peut-être importante avec des coûts relativement faibles, elle introduit non seulement des contraintes de maintenance incompatibles avec certaines applications, mais aussi des problèmes de pollution.

La récupération de l'énergie thermique, mécanique, électromagnétique, solaire ou éolienne est une solution très prometteuse. Dans ce cas, la vie de l'objet connecté peut-être prolongée. Cependant, l'énergie récupérée dépend fortement des conditions au voisinage du dispositif et peut donc varier de façon périodique ou aléatoire.

Il paraît alors important d'adapter le système (mesure et transmission de données) aux contraintes de la récupération d'énergie. L'objectif de la thèse est de proposer une solution de capteur autonome basée sur un système de récupération et de gestion multi-sources d'énergies (solaire et éolienne) et pouvant-être mis en oeuvre dans différentes classes d'applications IoT. On s'intéresse, dans un premier temps, à la modélisation de la consommation du noeud capteur. Ensuite, on modélise le système de récupération multi-sources. Puis, on se focalise sur le management de puissance du système autonome. Ce management est basé sur des prédictions de l'énergie disponible et de celle consommée. Enfin, le travail de modélisation et d'optimisation est validé par des expérimentations afin d'avoir un démonstrateur de Capteur Communicant Autonome en Énergie pour les applications IoT.

Title : Autonomous communicating sensors for IoT

Keywords: IoT, LoRa/LoRaWAN technology, wireless sensors, energy management, energy prediction, energy consumption, energy optimization, demonstrator.

Abstract: Researchers aim to develop entirely autonomous sensors. By ensuring an important autonomy, the use of batteries solves part of the energy problem with relatively low costs. However, batteries introduce different problems such as maintenance and environmental pollution. Harvesting thermal, mechanical, electromagnetic, solar or wind energy present in the environment is an attractive solution. Using harvested energy from their surroundings, wireless sensor nodes can significantly increase their typical lifetime. Nevertheless, the harvested energy depends on the surrounding conditions of the device and can vary periodically or randomly. It seems important to adapt the system (measurement and data transmission) to the harvesting energy constraints.

The thesis objective is to provide an autonomous sensor solution based on a multi-sources energy harvesting and management system (solar and wind energies), which can be used in different IoT applications. First, we are interested in modeling and optimizing the sensor node energy consumption. Then, the multiple harvesting system is modeled according to the energy needs of the sensor node. Besides, we focus on the power management of the autonomous system. This management part is based on predictions of both available and consumed energies. Finally, the proposed modeling and optimization studies are validated with experimental works in order to develop an Autonomous Communicating Sensor platform for IoT applications.