



HAL
open science

Conception de capteurs autonomes et intelligents sans fil pour un campus durable, responsable et fortement connecté

Yassine Faize

► To cite this version:

Yassine Faize. Conception de capteurs autonomes et intelligents sans fil pour un campus durable, responsable et fortement connecté. Electronique. Université de Bordeaux, 2022. Français. NNT : 2022BORD0312 . tel-04077563

HAL Id: tel-04077563

<https://theses.hal.science/tel-04077563v1>

Submitted on 21 Apr 2023

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

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

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE N°209 : SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR
SPÉCIALITÉ : ELECTRONIQUE

par Yassine FAIZE

Conception de capteurs autonomes et
intelligents sans fil pour un campus durable,
responsable et fortement connecté

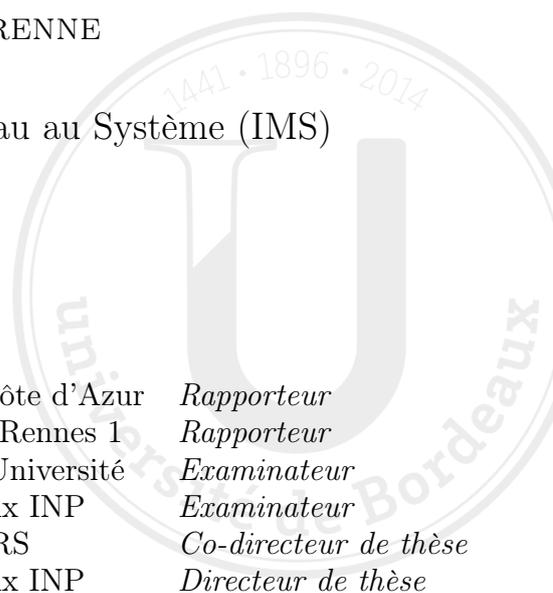
Co-directeurs de thèse : Christophe JÉGO
Nicolas HANUSSE
Encadrant de thèse : Jérémie CRENNE

préparée au Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS)

Soutenue le 25/11/2022

Jury :

Sébastien BILAVARN	- Maître de conférences HDR	- Université Côte d'Azur	<i>Rapporteur</i>
Matthieu GAUTIER	- Maître de conférences HDR	- Université Rennes 1	<i>Rapporteur</i>
Bertrand GRANADO	- Professeur des Universités	- Sorbonne Université	<i>Examineur</i>
Jérémie CRENNE	- Maître de Conférences	- Bordeaux INP	<i>Examineur</i>
Nicolas HANUSSE	- Directeur de recherche	- CNRS	<i>Co-directeur de thèse</i>
Christophe JÉGO	- Professeur des Universités	- Bordeaux INP	<i>Directeur de thèse</i>



Thèse réalisée au Laboratoire de l'INTÉGRATION DU MATÉRIAU AU SYSTÈME (IMS)
de Bordeaux, au sein de l'équipe CSN du groupe CONCEPTION.

Université de Bordeaux, Laboratoire IMS
UMR 5218 CNRS - Bordeaux INP
351 Cours de la Libération
Bâtiment A31
33405 Talence Cedex

Remerciements

Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Intégration du Matériau au Système (IMS) à Bordeaux.

La thèse a été co-dirigée par Christophe Jégo et Nicolas Hanusse. Je les remercie chaleureusement pour ce qu'ils m'ont respectivement apporté au cours de ces années d'activités communes, humainement et professionnellement, et pour m'avoir épaulé à chaque instant de ces travaux.

Je tiens également à exprimer mes remerciements à Jérémie Crenne pour son encadrement tout au long de cette thèse, de sa confiance et de ses bonnes paroles en toute conséquence.

Je remercie chaleureusement tous les collaborateurs avec qui j'ai eu l'occasion de travailler, notamment Marwane Rezzouki, Yiye jiang et Mohamed Amine Ben Temim.

L'IMS a été un lieu où il a fait bon travailler et où a régné une ambiance chaleureuse tout au long de mon séjour. J'adresse mes remerciements à l'ensemble des membres du laboratoire, et notamment aux permanents, doctorants et stagiaire de l'équipe CSN pour la bonne atmosphère qu'ils ont su créer.

De façon plus personnelle, je termine ces remerciements en adressant ma profonde gratitude envers ma famille : ma maman, mes soeurs Leïla, Karima et Naïma, mon frère Rachid ainsi que mes beaux-parents et mon frère Mohamed. Vos encouragements et votre soutien ont été décisifs pour cette thèse.

Je remercie du fond du coeur plus particulièrement mon épouse Boutaina, qui m'a encouragée, soutenue et supportée sans relâche tout au long de cette aventure.

Ce titre de docteur vous appartient également.

Résumé

Les réseaux de capteurs sont devenus omniprésents dans notre quotidien, que ce soit dans les milieux privés ou professionnels. Ils permettent de mesurer diverses grandeurs physiques selon un contexte applicatif. Dans le cadre des campus universitaires connectés, l'utilisation de réseaux de capteurs permet de superviser les coûts de fonctionnement des bâtiments, afin de réduire les différents impacts. Les mesures collectées et traitées permettent d'adresser des actionneurs afin d'améliorer la qualité de vie au sein d'un campus universitaire.

La gestion énergétique des éléments constituant un réseau de capteurs est primordiale afin d'éviter une surconsommation des capteurs, et ainsi de garantir une autonomie suffisante des capteurs. Concernant les échanges de données, différents types de communication sont possibles. Elles peuvent être filaires en utilisant une infrastructure existante ou en déployant une infrastructure spécifique. Une alternative est l'utilisation de technologie sans fil, tel que les réseaux WIFI ou Bluetooth, ou encore des technologies basse consommation, bas débit, mais longue portée telle que le réseau LORA. Afin de maximiser les performances de ces capteurs, une adéquation matérielle et logicielle est également indispensable. Dans ce contexte, l'objectif principal de cette thèse fut d'étudier la conception d'un réseau de capteurs autonomes pour le campus universitaire de Bordeaux. Ce réseau doit avoir pour première fonctionnalité le suivi des caractéristiques environnementales des bâtiments. L'objectif est de réduire au maximum les coûts d'infrastructure, de déploiement et de maintenance. Les capteurs doivent être autonomes en énergie avec une durée de vie suffisante. Différentes techniques existent pour favoriser l'autonomie des capteurs, mais le plus souvent ces dernières altèrent la qualité de service souhaitée. Des réponses et des choix sont apportés de façon spécifique à la fois aux niveaux matériel et logiciel. Pour ce faire, un modèle architectural de capteurs est proposé, associant de la récupération d'énergie avec une technique de "Wake-Up" radio. L'idée est d'aboutir à un modèle pouvant être flexible vis-à-vis de l'hétérogénéité géographique des bâtiments d'un campus.

Puis, la seconde partie de cette thèse s'est focalisée sur la proposition de solutions visant à garantir une qualité de service du réseau de capteurs. Ainsi, un traitement supplémentaire a été introduit. Ce dernier s'appuie sur des méthodes mathématiques d'estimation et de prédiction de séries temporelles. Les algorithmes développés permettent de compenser les possibles pertes de données en utilisant l'historique disponible ainsi que les capteurs présents dans le voisinage du capteur considéré afin de proposer une estimation avec une erreur limitée. Cette approche permet d'aboutir à une qualité de service du réseau de capteurs conforme aux attentes.

Ces différentes contributions ont pu être implémentées et puis expérimentées à l'aide du prototypage d'un réseau de capteurs. Ainsi, les différentes contributions de la thèse ont pu être validées dans un des bâtiments du campus de Bordeaux. Il en résulte un ensemble d'expérimentations et de résultats qui sont décrits puis analysés dans ce manuscrit de thèse.

Mots clefs : Campus connecté, Réseau de capteurs, Récupération d'énergie, Optimisation énergétique, Qualité de service, Architecture matérielle, Estimation/Prédiction

Abstract

Nowadays, sensor networks are everywhere in our daily lives, whether in private or professional environment. With them, it is possible to measure various physical quantities depending on the application context. For smart campuses, sensor networks enable to supervise operating costs of buildings, and therefore to reduce their various impacts. Measures collected and processed are used to address actuators in order to improve life quality.

The sensor network energy management is essential in order to avoid sensors overconsumption, and thus guarantee sufficient autonomy. Regarding data exchanges, different types of communication are possible. They can be wired by using an existing infrastructure or by deploying a specific one. Wireless technology, such as WIFI or Bluetooth networks, or even low consumption, low speed but long range technologies such as the LORA network are alternatives approaches. In order to maximize sensor performances, hardware and software suitability are also essential. In this context, this thesis main objective was to study the design of an autonomous sensor network for Bordeaux Campus. The primary purpose is to monitor environmental characteristics of buildings. In order to minimize infrastructure, deployment and maintenance costs, sensors have to be energy self-sufficient with adequate lifespan. Different techniques exist to improve sensors autonomy, but with an alteration of desired quality of service (QoS). Specific answers and choices were made at both hardware and software level. To do this, an architectural model of sensors is proposed, combining energy harvesting and the "Wake-up" radio technique. The main idea is to come up with a model that can be flexible to be adapted to buildings geographical heterogeneity.

The second part of this thesis is focused on solutions that enables to guarantee a good QoS. Thus, additional processings were introduced. The latter is based on mathematical methods for estimating and predicting time series. Proposed algorithms compensate possible data losses by using available history as well as neighbors sensors of considered one, by proposing data estimation with limited errors. This approach guarantees a network QoS that meets specifications.

These various contributions were implemented and experimented thank to a sensors network prototype. Thus, the contributions were validated in one of Bordeaux campus buildings. A set of experiments and results were obtained. They are described described and analysed in this manuscript.

Keywords: Smart Campus, Sensor Network, Energy Harvesting, Energy Optimisation, Quality of Service, Hardware Architecture, Estimation, Prédiction

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iv
Liste des Figures	viii
Liste des Tableaux	x
Liste des Acronymes	xi
Introduction	1
1 Contexte, objectifs et état de l'art	6
1.1 Généralités sur les réseaux de capteurs	7
1.1.1 Définitions	7
1.1.2 Métriques caractéristiques d'un capteur	8
1.1.3 Architecture d'un nœud de capteur	9
1.1.3.1 Le Microcontrôleur	9
1.1.3.2 L'émetteur radio	10
1.1.3.3 Le capteur	12
1.1.3.4 La source d'énergie	13
1.1.4 Couche logicielle	14
1.1.5 Conclusion	16
1.2 Techniques favorisant la prolongation de la durée de vie d'un nœud de capteur	17
1.2.1 La radio de réveil	17
1.2.2 Techniques de récupération d'énergie	18
1.2.3 Protocoles et topologies de réseau	19
1.3 Configuration et apprentissage	21
1.3.1 Classification des méthodes d'apprentissage pour les réseaux de capteur	22
1.3.1.1 Apprentissage supervisé	22
1.3.1.2 Apprentissage non-supervisé	23
1.3.1.3 Apprentissage semi-supervisé	23
1.3.1.4 Conclusion	24
1.3.2 Mise en œuvre dans les réseaux de capteurs	24
1.3.2.1 Apprentissage automatique pour la récupération d'énergie .	24
1.3.2.2 Apprentissage automatique pour la détection d'évènements	25
1.3.2.3 Apprentissage automatique pour la détection d'erreurs . . .	25
1.3.3 Conclusions	25
1.4 Les bâtiments connectés	26
1.5 Conclusion	27

2	Architecture de nœuds de capteurs efficaces énergétiquement	29
2.1	Architecture du nœud de capteur	30
2.1.1	Architecture matérielle	31
2.1.1.1	Le bloc de traitement de l'information.	32
2.1.1.2	Gestion de l'énergie	36
2.1.2	Architecture logicielle	38
2.1.3	Conclusion	39
2.2	Estimation de la durée de vie	39
2.2.1	Modèle proposé	39
2.2.2	Déploiement intérieur	41
2.2.3	Déploiement extérieur	41
2.2.4	Conclusion	42
2.3	Expérimentations et Validation	42
2.3.1	Estimation de la durée de vie	42
2.3.2	Comparaison avec des capteurs déployés	46
2.4	Conclusion	50
3	Protocole d'amélioration	52
3.1	Prédiction et estimation	53
3.1.1	La prédiction de données	53
3.1.2	Proposition d'un algorithme d'Estimation-Reconstruction	55
3.2	Implémentation dans le réseau de capteurs	59
3.2.1	États et qualité de service des capteurs	59
3.2.2	Déploiement du réseau de capteur	61
3.2.3	Fonctionnement en qualité de service <i>Faiblement forte</i>	62
3.2.4	Fonctionnement en qualité de service <i>Faiblement faible</i>	64
3.2.5	Fonctionnement pour une qualité de service <i>Fortement faible</i>	66
3.3	Conclusions	68
4	Expérimentations et analyse des résultats	70
4.1	Caractéristiques du réseau existant à l'Enseirb-Matmeca	71
4.1.1	nœuds Capteurs du réseau SC ²	71
4.1.2	Passerelle du réseau SC ²	72
4.1.3	Positionnement des nœuds capteurs du réseau SC ²	72
4.1.4	Qualité de service	74
4.1.5	Passerelle proposée pour notre réseau expérimental	74
4.1.6	Architecture des nœuds capteurs de notre réseau expérimental	75
4.1.7	Positions des nœuds capteurs de notre réseau expérimental	75
4.2	Protocole expérimental pour la validation du réseau de capteurs	77
4.2.1	Expérimentation de base sur notre réseau sans protocole de prédiction	77
4.2.2	Expérimentations de notre réseau intégrant des prédictions	78
4.3	Analyse des résultats expérimentaux	79
4.3.1	Pertinence du protocole de prédiction	79
4.3.2	Qualité de service du réseau de base sans prédiction	79
4.3.3	Qualité de service du réseau intégrant le protocole de prédiction	83
4.4	Analyse et conclusions	86
	Conclusion et Perspectives	89
	Bibliographie	91

Publications Personnelle

97

Table des figures

1.1	Architecture d'un réseau de capteur	7
1.2	Architecture de nœud	9
1.3	Exemple de microcontrôleurs de la littérature pour les nœuds de capteurs de réseau : NRF52840 [Sema], STM32L [STM], PIC32 [Mic]	10
1.4	Compromis débit-consommation pour des technologies Radio Fréquence	11
1.5	Utilisation de différents systèmes d'exploitation dans l'industrie	15
1.6	Topologies de réseaux de capteurs. a) étoile, b) arbre, c) maillé	20
1.7	Synthèse des techniques d'apprentissage automatique	23
2.1	Principe de fonctionnement du Duty Cycle	31
2.2	Architecture proposée pour le nœuds capteur.	32
2.3	Architecture de nœuds intégrant un module de radio de réveil.	35
2.4	Modèle architectural global du nœud de capteur.	36
2.5	Capteur déployé en intérieur pendant 10 jours.	46
2.6	Capteur déployé en extérieur pendant 15 jours.	47
2.7	Nœud capteur déployé au sein de Bordeaux INP	48
2.8	Système expérimental de comparaison	48
2.9	Capteurs déployés en extérieur pendant 8 jours.	49
3.1	Organisation de la prédiction pour un réseau de capteur	54
3.2	Plan de déploiement des capteurs au sein du laboratoire <i>Intel Berkeley</i>	57
3.3	Erreur moyenne de prédiction pour 10 mesures en fonction de l'historique utilisé pour différentes périodes de mesure	58
3.4	Transitions d'états possibles pour les différents capteurs	60
3.5	Etat E1 : Organisation pour une qualité de service Fortement Forte	61
3.6	Schéma d'un réseau de 14 capteurs déployés	62
3.7	État du réseau après le passage d'un capteur dans l'état E ₂	63
3.8	État E ₂ : Organisation pour une qualité de service Faiblement forte	65
3.9	État du réseau avec un nœud capteur dans l'état E3	66
3.10	Etat E3 : Organisation pour une qualité de service <i>Faiblement faible</i>	67
3.11	Etat du réseau avec un nœud capteur dans l'état E4	67
3.12	Etat E4 : Organisation pour une qualité de service fortement détaillée	68
4.1	Nœud capteur du réseau SC ²	71
4.2	Passerelle du réseau SC ²	72
4.3	Plan détaillant les positions des nœuds capteurs dans les deux bâtiments de l'Enseirb-Matmeca	73
4.4	Passerelle du réseau proposé	74
4.5	Nœud capteur du réseau expérimental proposé	76
4.6	Plan et position des nœuds capteurs dans le nouveau bâtiment de l'Enseirb-Matmeca	77

4.7	Boîte à moustache récapitulant l'ensemble des erreurs pour des historiques différents	80
4.8	Carte de chaleur (Heatmap) représentant l'erreur moyenne pour différentes tailles d'historiques	81

Liste des tableaux

1.1	Caractéristiques de techniques radios utilisées dans l'IoT	12
1.2	Caractérisations de capteurs courants de la littérature	13
1.3	Caractéristiques de systèmes d'exploitation pour l'IoT.	16
1.4	Comparaison de la densité de puissance de différentes sources d'énergie. . .	18
1.5	Energie solaire produite.	19
1.6	Récapitulatif des différents protocoles de réseau de capteurs.	21
1.7	Comparaison de différentes techniques de ML [Als+15].	22
1.8	Caractéristiques de technique de détection d'erreurs pour les réseaux de capteurs.	25
2.1	Composants matériels du nœud de capteur expérimental	43
2.2	Estimation de la durée de vie d'un nœud de capteur	44
3.1	Comparaison des différentes méthodes de prédiction en fonction du seuil d'erreur ϵ	57
4.1	Synthèse des différents temps de fonctionnement dans les états E_1 et E_4 pour douze nœuds capteurs sans protocole de prédiction	82
4.2	Synthèse des différents temps de fonctionnement dans les états E_1 , E_2 , E_3 et E_4 pour douze nœuds capteurs avec le protocole de prédiction.	83
4.3	Synthèse des scores obtenus par les douze nœuds capteurs avec le protocole de prédiction pour des périodes de mesure de 5, 10 et 20 minutes	84



Liste des Acronymes

ADC	Analog to Digital Converter
I2C	Inter Integrated Circuit Bus
RF	Radio Fréquence
PM	Power Manager
PMIC	Power Manager Integrated Circuit
MCU	MicroController Unit
BLE	Bluetooth Low Energy
WSN	Wireless Sensors Network
WUR	Wake-Up Radio

Introduction

L'Internet des Objets

Le domaine des objets connectés est en pleine expansion depuis de nombreuses années. Le réseau créé par l'interconnexion de l'ensemble de ces appareils communicants est appelé L'Internet des Objets ou Internet of Thing (IoT). Ce concept a été initialement proposé par Kevin Ashton en 1999. Ce dernier définissait l'IoT comme "*des objets connectés interopérables et identifiables avec une technologie d'identification radio-fréquence*". La technologie RFID (Radio Frequency IDentification) a donc été la première à être utilisée dans ce domaine. Nous pouvons également qualifier l'IoT comme la prochaine génération de l'Internet, où les objets physiques peuvent être identifiés et accessibles via Internet. L'une des premières publications à ce sujet date de 2002, dans laquelle [Sch02] détaille l'utilisation de l'IoT dans les magasins, leur permettant d'avoir des "*yeux*".

L'émergence de différentes technologies sans-fil a permis d'améliorer et d'agrandir le spectre d'utilisation des objets connectés. Les protocoles tels que le WiFi, le Bluetooth, le Zigbee ou le LoRa [VKR21] favorise l'augmentation du nombre d'objets connectés ainsi que la facilité de leur usage. L'évolution du marché global est corrélée à la forte croissance d'utilisation de ces objets. [Wan+21] indique qu'en 2020 le marché de l'IoT avait atteint 389 milliards de dollars Ce marché devrait atteindre 1058,3 milliards de dollars en 2030. Soit doublement en 10 ans, avec un nombre d'objets connectés qui devrait tripler passant de 8.8 milliards à 25,5 milliards d'après [Insa].

Un grand nombre d'objets connectés a pour but d'être déployé dans des endroits difficiles d'accès. C'est pour cela que des travaux de recherche se focalisent sur le développement d'objets autonomes tant au niveau fonctionnel et énergétique. L'utilisation d'une batterie permet une certaine autonomie, mais limite la durée de vie du système. C'est pour cette raison que le principe de récupération d'énergie doit faire l'objet d'une attention toute particulière. Les énergies solaires, éoliennes, thermiques ou encore électromagnétiques, permettent de prolonger la durée de vie d'un capteur connecté. Cela est tout de même limité par l'environnement de déploiement d'un objet connecté. De plus, les conditions d'usage peuvent faire varier fortement les quantités d'énergie récupérées.

La limitation de la durée de vie des appareils connectés implique des maintenances et par conséquent un accès plus ou moins simple aux capteurs constituant un réseau. Ainsi, [Bou+18] a simulé la durée de vie d'un objet connecté qui est limitée dans le temps. dans ce cas, il est alors nécessaire d'accéder aux capteurs afin de recharger ses batteries, ou pour tout autre problème. Cependant, au regard du grand nombre d'appareils pouvant être déployés, cette tâche peut rapidement s'avérer chronophage et coûteuse. Il est primordial que les systèmes matériels et logiciels qui composent un objet connecté soient adaptés aux contraintes de l'application. Ainsi, des modèles architecturaux sont étudiés et améliorés afin de répondre à ces problématiques.

Les capteurs communicants

L'IoT a permis l'émergence de réseaux de capteurs sans fil ou Wireless Sensor Networks (WSN). Ils sont constitués d'un ensemble de nœuds de capteurs qui mesurent des grandeurs physiques. Un nœud spécifique, souvent appelé passerelle, reçoit et centralise l'ensemble des données transmises par les différents éléments du réseau. Ces données mesurées sont ensuite utilisées au niveau applicatif.

Ces types de données sont désormais utilisés dans quasiment tous les domaines : industriels, étatiques ou domestiques. Par exemple, les problématiques énergétiques et environnementales des bâtiments peuvent être en partie résolues par l'utilisation de réseaux de capteurs assurant le suivi des consommations d'énergie et de qualité de l'air. Pour ce faire, les grandeurs classiquement relevées sont la température, l'humidité, la pression, le niveau de CO₂ ou encore la luminosité.

Objectifs de la thèse

SmartCampus est un projet initié en 2017, au sein de l'Université de Bordeaux. En effet, avec un coût de fonctionnement annuel d'environ 12.5 millions d'euros en 2017 et une augmentation constante de l'utilisation des bâtiments et du nombre d'étudiants, une analyse prévisionnelle prévoyait un coût de fonctionnement du campus dépassant les 20 millions en 2025.

En conséquence, ce projet a pour but principal d'apporter des solutions afin de réduire cette augmentation prévisionnelle en équipant les bâtiments d'un réseau de capteurs. Les capteurs doivent à la fois permettre la supervision de la consommation de fluides et d'offrir des nouveaux services aux usagers comme l'évaluation de la qualité de l'air.

Afin d'équiper les bâtiments à moindre coût, les capteurs doivent être autonomes. En effet, pour éviter des coûts supplémentaires d'infrastructure, les capteurs ne doivent pas avoir d'alimentation électrique filaire. Il est donc demandé d'avoir des nœuds auto-alimentés. De plus, il est nécessaire de limiter au maximum l'intervention de personnel, et donc les coûts de maintenance. Pour cela, le réseau de capteurs déployé doit avoir une durée de fonctionnement de plusieurs années.

En lien avec la volonté de limiter au maximum les potentiels travaux d'infrastructure, il est aussi souhaité que la communication au sein du réseau soit sans-fil. De plus, toutes ces spécifications doivent être respectées sans dégrader une qualité de service adéquate. Pour cela, il est demandé que le réseau de capteurs ait un fonctionnement intelligent.

C'est dans ce contexte que l'objectif de cette thèse s'inscrit. Le but principal étant d'étudier les différentes problématiques inhérentes à ce cahier des charges afin de proposer un modèle de capteurs à la fois autonomes et intelligents.

Contributions de la thèse

Autonomes énergétiquement signifie que le capteur doit avoir la plus grande autonomie possible, tout en étant sans-fil et auto-alimenté. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés dans un premier temps à la proposition d'un modèle architectural de nœuds de capteur. Celui-ci exploite des méthodes de récupération d'énergie et de radio de réveil afin d'aboutir à un système autonome énergétiquement. Durant cette première étude, l'importance de la durée de vie est primordial vis-à-vis de la qualité de service.

C'est pour cette raison que nous nous focalisons ensuite sur la proposition d'un fonctionnement intelligent. En effet, nous proposons un protocole de fonctionnement adapté à notre modèle architectural. Il utilise des méthodes de prédiction et d'estimation de séries temporelles, afin de relever la qualité de service à un niveau jugé acceptable. Ces travaux ainsi que les propositions associées ont été expérimentés puis analysés à l'aide d'un réseau de capteurs développé et déployé dans les bâtiments de l'école d'ingénieur Enseirb-Matmeca.

Ces différentes contributions ont été valorisées au travers des publications et présentations scientifiques suivantes :

1. Yassine Faize, Jérémie Crenne, Nicolas Hanusse et Christophe Jego. "Projet Smart-campus porté par Sysnum". Dans : IEEE Sensors France Chapter Workshop. 2021.
2. Yassine Faize, Jérémie Crenne, Nicolas Hanusse et Christophe Jego. "Architecture de Nœud basse Consommation et Intelligent pour des Réseaux de Capteur". In : Colloque sur les Objets et systèmes Connectés-COC'2021. 2021 (cf. p. 3).
3. Yassine Faize, Jeremie Crenne, Nicolas Hanusse et Christophe Jego. "An Energy Efficient and Scalable Node Architecture for Sensor Network". In : 2021 19th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS). IEEE. 2021, p. 1-4 (cf. p. 3).

Organisation du manuscrit

Chapitre 1 : Ce premier chapitre présente un état de l'art sur les réseaux de capteurs. Il permet de définir toutes les notions qui seront utilisées tout au long du manuscrit. Le principe de réseau de capteurs est rappelé en détaillant les parties matérielles et logicielles. Nous introduisons et définissons également un ensemble de métriques afin de caractériser ce type de système. Nous détaillons ensuite certaines approches qui favorisent la prolongation de la durée de vie d'un capteur, en particulier la modélisation de la consommation énergétique qui permet d'estimer l'impact de chaque élément sur la longévité. Une discussion sur ces techniques de récupération d'énergie et la gestion de l'énergie ambiante favorisant l'augmentation de l'énergie utilisable par le système est également proposée. Cela implique un management adéquat du réseau de capteurs afin de limiter les actions superflues. Nous introduisons ensuite les techniques d'intelligence utilisées dans ces systèmes, ainsi que leur mise en œuvre. Enfin, nous récapitulons les problématiques principales traitées lors de cette thèse dans le contexte de bâtiments universitaires connectés.

Chapitre 2 : Ce chapitre propose une solution architecturale favorisant l'augmentation de la durée de vie des capteurs. Afin d'être adaptée à l'hétérogénéité d'un bâtiment connecté, l'architecture se compose d'une partie matérielle et d'une partie logicielle . Une méthode de

récupération d'énergie combinée au principe de Wake-up Radio est également étudiée. Par ailleurs, un modèle de consommation associé à la solution architecturale est ensuite proposé dans ce chapitre. Ce modèle permet d'obtenir une estimation de la durée de vie d'un nœud capteur afin de le confronter au cahier des charges. Enfin, les différentes contributions sont récapitulées et mises en perspectives.

Chapitre 3 : Les propositions décrites tout au long du Chapitre 2 permettent d'avoir une solution architecturale ayant une durée de vie virtuellement illimitée. Les nœuds de capteurs peuvent néanmoins être dans des phases de non-fonctionnement dues à la dépendance vis à vis de l'environnement de déploiement. Une réduction de la Qualité de Service peut alors être observée. Une contribution qui permet de compenser artificiellement cette baisse de QoS est détaillée dans ce troisième chapitre. Des outils mathématiques de prédiction et d'estimation de séries temporelles sont exploitées afin d'obtenir un protocole de fonctionnement évolué. Dans un premier temps, ces principes sont détaillés et leurs efficacités analysées. Puis le fonctionnement du protocole proposé est étudié.

Chapitre 4 : Ce chapitre présente les résultats obtenus au sein d'un réseau comprenant plusieurs capteurs. Celui-ci a été déployé au sein du bâtiment de l'Enseirb-Matmeca afin d'être comparé à un réseau de référence. Ce dernier est présenté dans une dernière section. Une deuxième section détaille notre réseau et ses composantes : la passerelle, les capteurs ainsi que les emplacements. Le protocole expérimental et les résultats obtenus sont ensuite présentés. À l'issue de cela, une analyse du système global est réalisée.

1 Contexte, objectifs et état de l'art

Ce premier chapitre présente un état de l'art sur les réseaux de capteurs. Il permet également de définir toutes les notions qui seront utilisées tout au long du manuscrit. Une première partie présente le principe de réseau de capteurs, et en particulier les parties matérielles et logicielles. Les principales métriques caractéristiques des systèmes relevant du domaine des réseaux de capteurs sont aussi introduites. La deuxième section détaille différentes approches favorisant la prolongation de la durée de vie d'un capteur. La modélisation de la consommation énergétique permet d'estimer l'impact de chaque élément sur la longévité. De plus, une discussion sur la possibilité de récupération et la gestion de l'énergie ambiante est proposée pour augmenter l'énergie utilisable par le système. Cela implique un management adéquat du réseau de capteurs afin de limiter les actions superflues. Une troisième section introduit des techniques d'intelligence utilisées dans ces systèmes, ainsi que leur mise en œuvre et leur apport. Enfin, une dernière section récapitule les problématiques principales traitées lors de cette thèse dans le contexte de bâtiments connectés.

1.1 Généralités sur les réseaux de capteurs

1.1.1 Définitions

Un réseau de capteurs est un ensemble d'objets communicants sans-fils. Ces objets, appelés aussi nœuds de capteurs, permettent dans un contexte donné de fournir des informations représentant une grandeur physique. Ces informations peuvent prendre la forme de quantités mesurables telles que la température, l'humidité, la pression, la luminosité, le niveau sonore ou encore bien d'autres. Certaines de ces valeurs, appelées *tags*, permettent aussi de faciliter l'identification d'un objet ou d'une personne. Ces données sont alors transmises via une passerelle (*gateway/hub*). Cette dernière a pour fonction de collecter les données et de réaliser le cas échéant un pré-traitement. Puis les données sont transmises via internet, où elles peuvent être enregistrées et/ou exploitées. Selon l'application retenue, différents traitements sont appliqués. Dans la plupart des systèmes IoT, le serveur joue les rôles suivants : l'acquisition, le stockage et l'accès aux données, les analyses et enfin le contrôle d'actionneurs.

Les capteurs sans fils étant le plus souvent alimentés par batterie ou par pile, leur durée de vie est un paramètre essentiel. Une fois les capteurs déployés, la pénibilité et le coût de l'intervention humaine nécessaire pour une recharge ou un changement de batterie imposent de privilégier une longévité maximale. Une consommation énergétique minimale est alors essentielle. Une optimisation est nécessaire entre les parties matérielles et logicielles. Ces deux parties doivent être simples, intégrant la plus faible complexité possible. Un compromis doit donc être fait entre les deux couches du système afin d'éviter une augmentation superflue de la consommation énergétique. Comme un réseau possède souvent un grand nombre de capteurs, alors il est nécessaire de limiter le coût énergétique de chaque élément. Ces contraintes engendrent une difficulté non négligeable lors du développement et du déploiement d'un réseau de capteurs.

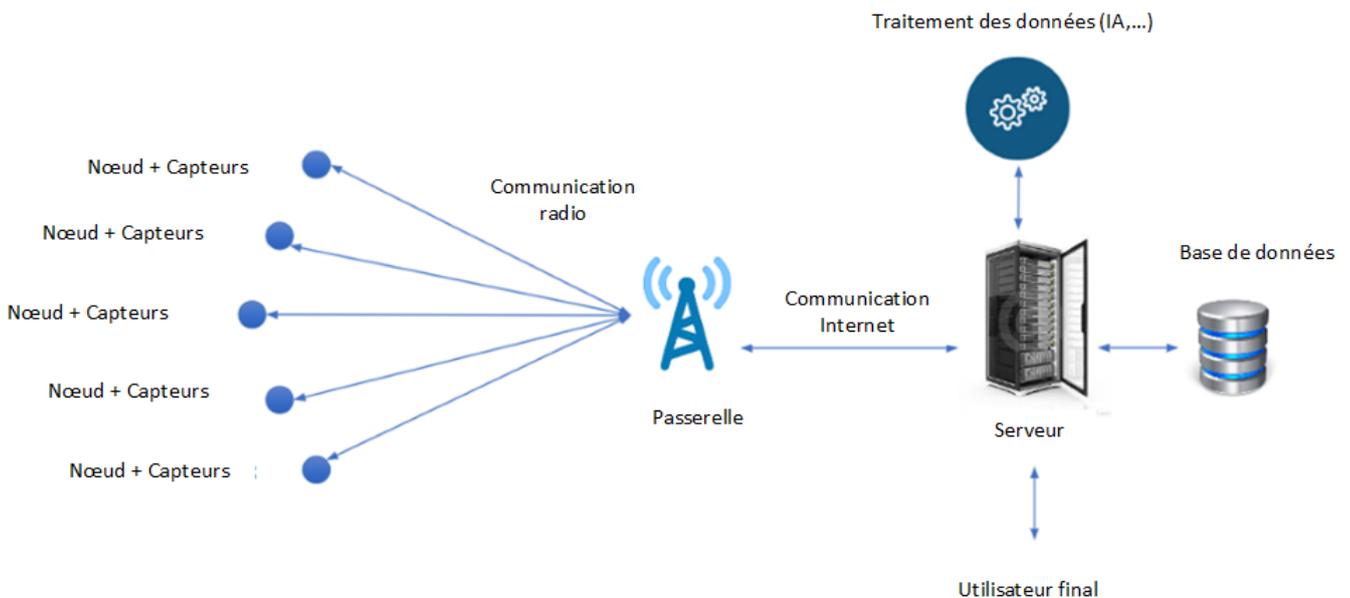


FIGURE 1.1 – Architecture d'un réseau de capteur

Avec la forte croissance du marché de l'Internet des Objets (IoT), un grand nombre de capteurs est déployé avec l'applicatif associé. D'autres sont en cours de développement

dans tous les domaines industriels. Nous pouvons par exemple citer le domaine de la domotique, qui permet une gestion intelligente d'un bâtiment collectif public ou privé. Les systèmes de gestion d'énergie des bâtiments ou des sources de production énergétique (ferme solaire, éolienne,...) sont souvent contrôlés et suivis par des réseaux de capteurs. Le domaine des transports lequel la présence de capteurs doit faciliter la circulation des voitures dans les villes. Les villes et les campus universitaires sont des ensembles de bâtiments et d'infrastructures qui nécessitent une meilleure gestion afin d'améliorer la qualité de vie dans ces milieux urbains. Au niveau de l'agriculture, les capteurs peuvent remonter des grandeurs physiques caractéristiques des milieux. Pour un meilleur usage du système, une mesure de l'humidité dans le sol permet un arrosage plus adapté des cultures, un meilleur rendement, mais aussi une réduction de la consommation d'eau. Par ailleurs, les usines 4.0 font appel à ces systèmes dans leur organisation. Cette liste n'est pas exhaustive, les capteurs étant désormais présents dans tous les domaines de la vie courante.

Ce marché croissant et associé à des problématiques de plus en plus importantes conduit des équipes de recherche à s'intéresser davantage à ces problématiques et à proposer des solutions à la fois théorique et pratique.

1.1.2 Métriques caractéristiques d'un capteur

Les réseaux de capteurs permettent de mesurer des grandeurs physiques. Notre objectif est une gestion intelligente des ressources suivant une contrainte d'énergie dans un environnement donné. Les contraintes qui peuvent s'appliquer à un capteur dépendent de l'application ciblée. Néanmoins, un certain nombre de métriques facilitent la caractérisation des performances d'un capteur [Des11].

1. **Le coût financier** : Dans l'optique d'aboutir à un réseau suffisamment dense permettant un maillage de l'environnement cible, le prix des capteurs doit être pris en compte. En effet, malgré un coût unitaire qui reste globalement modeste, la démultiplication du nombre de capteurs peut rapidement remettre en cause le budget de déploiement alloué dans un cahier des charges. Il s'agit donc d'un paramètre à prendre en compte lors du dimensionnement du système.
2. **La consommation** : Selon l'application et la configuration du réseau, ce paramètre peut s'avérer critique. Dans le cas de capteurs alimentés par le courant du secteur, une contrainte supplémentaire sur le positionnement sera à prendre en compte. En effet, si on prend le cas d'un déploiement au sein d'un bâtiment avec pour objectif une gestion énergétique intelligente, il ne serait pas acceptable que le gain réalisé soit totalement compensé par la consommation du réseau.
Concernant un nœud alimenté sur batterie, la durée de vie est directement corrélée à ce paramètre. Une forte consommation nécessitera une batterie importante pour assurer une durée de fonctionnement adéquate. Cela augmentera alors le coût final, ainsi que la taille du capteur.
3. **La taille** : Cette contrainte va dépendre de l'environnement où le capteur doit être déployé. Dans certains cas, le nœud doit être le plus petit possible, au détriment de son coût. Dans d'autres cas, comme dans un champ agricole par exemple, une taille plus importante peut être admise.
4. **La sécurité** : Une problématique importante concerne le niveau de sécurité des réseaux de capteurs. En effet, ils transmettent parfois des données sensibles, ce qui impose la présence d'un protocole de sécurité, afin de garantir un échange de données

sans interception.

La *Qualité de Service* (QoS) est une métrique qui récapitule l'ensemble de ces contraintes vis-à-vis de l'application et de son cahier des charges. Dans notre cas, le réseau se caractérise par sa capacité à réaliser à une fréquence donnée des mesures de grandeurs physiques et à les transmettre vers une passerelle sous une contrainte de durée de vie. La notion de QoS sera explicitée dans la Section 2.1.

Afin de respecter ces contraintes et le cahier des charges, une étude doit être effectuée sur les différentes parties qui constituent le capteur.

1.1.3 Architecture d'un nœud de capteur

Les nœuds de capteur d'un réseau sont généralement composés de différentes parties de l'architecture comme illustré par la Figure 1.2. Une source d'énergie (pile ou batterie) fournit l'énergie nécessaire au système dans le cas de capteurs non alimentés par le secteur. Un ou plusieurs capteurs permettent de mesurer une ou plusieurs grandeurs physiques. Selon l'application souhaitée, il peut être nécessaire de récupérer des valeurs de température, de taux d'humidité, de pression, de taux de dioxyde de carbone... Un microcontrôleur (MCU), fait office d'unité de traitement, en gérant les données provenant des capteurs ou de la radio. Enfin, un module radio permet l'échange de données avec la passerelle ou avec d'autres nœuds de capteurs. Il est à noter que par abus de langage l'architecture est souvent appelée **capteur**. Chaque partie de l'architecture est détaillée dans les sous-sections suivantes.

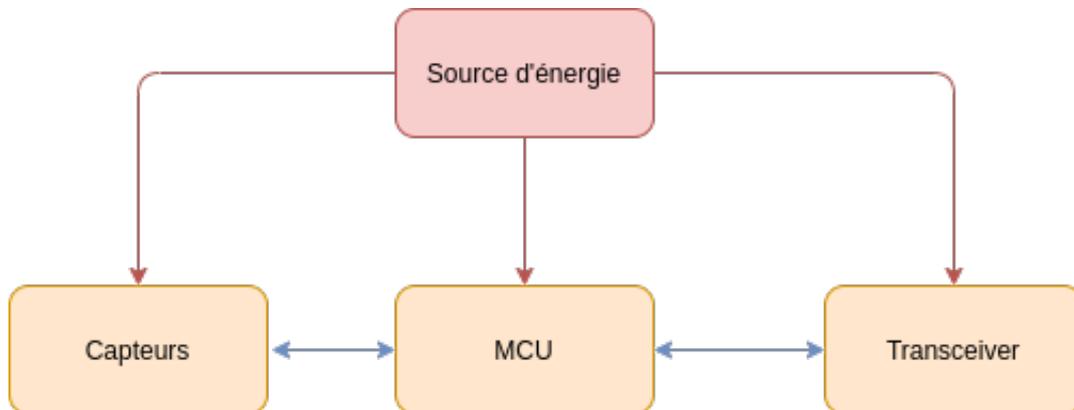


FIGURE 1.2 – Architecture de nœud

1.1.3.1 Le Microcontrôleur

Cette unité est en charge de la gestion de chaque élément du système sans fil. Elle doit également exécuter l'algorithme de traitement des données et le protocole de communication. De plus, elle permet de solliciter une prise de mesure par le capteur. Le MCU est en charge du traitement des données brutes reçues, à l'aide d'un algorithme prédéfini. L'information est ensuite encapsulée dans un paquet dépendant de la technologie de radio-fréquence (RF) utilisée. Le MCU gère aussi l'envoi à l'unité radio pour transmettre les paquets. Enfin, il traite les demandes provenant de la passerelle.

Lorsque le nœud se trouve dans un état de sommeil, cela est géré par le MCU. Il est important pour des raisons énergétiques, que le système puisse basculer dans un mode de



FIGURE 1.3 – Exemple de microcontrôleurs de la littérature pour les nœuds de capteurs de réseau : NRF52840 [Sema], STM32L [STM], PIC32 [Mic]

sommeil profond. De même, certains modules (radio, capteurs...) doivent pouvoir être mis en mode faible consommation.

Afin de d'assurer le fonctionnement dépendamment de l'application, les ressources calculatoires du MCU doivent être plus ou moins nombreuses. Par exemple, des microcontrôleurs possèdent des unités de calcul flottant (FPU) par l'exécution de calculs sur des nombres réels. La Figure 1.3 donne quelques MCU de la littérature utilisés pour le déploiement réseau de capteurs.

1.1.3.2 L'émetteur radio

L'unité radio permet une communication sans fil entre les nœuds, mais aussi avec la passerelle qui renvoie les données vers un serveur. En raison de l'étendue du domaine des radiofréquences, nous présentons uniquement certaines caractéristiques à prendre en compte lors de la conception d'un réseau de capteur sans-fil.

Selon la technologie utilisée, les performances varient en fonction de :

1. **La distance** : La distance de communication entre deux modules radio peut varier de quelques mètres jusqu'à plusieurs kilomètres. L'augmentation de la distance peut être obtenue par l'augmentation de la puissance d'émission de la radio. Plus la puissance en question sera importante, plus le signal émis sera accessible. Parallèlement, au niveau du récepteur, la sensibilité du module radio caractérise l'énergie nécessaire pour recevoir correctement un signal. Une meilleure sensibilité permet une meilleure communication distante.
2. **Le débit** : La vitesse de transmission, à savoir le débit, est variable. Selon la technologie radio, il est possible de transmettre un plus grand nombre d'informations plus rapidement. Néanmoins, un débit plus important implique une consommation plus élevée.
3. **La consommation** : Pour ce type de système sans fil, l'émetteur est souvent la partie qui consomme le plus d'énergie. Cela dépend de la puissance d'émission, donc de la distance, du débit et de la technologie utilisée. Une distance d'émission plus importante nécessite une puissance plus importante, donc une consommation plus élevée.

Un compromis débit-consommation d'un certain nombre de technologies radio-fréquences (RF) est illustré par la Figure 1.4. Pour les réseaux **LPWAN** (**L**ow **P**ower **W**ide **A**rea **N**etwork), une longue portée et une faible consommation sont obtenues au détriment du

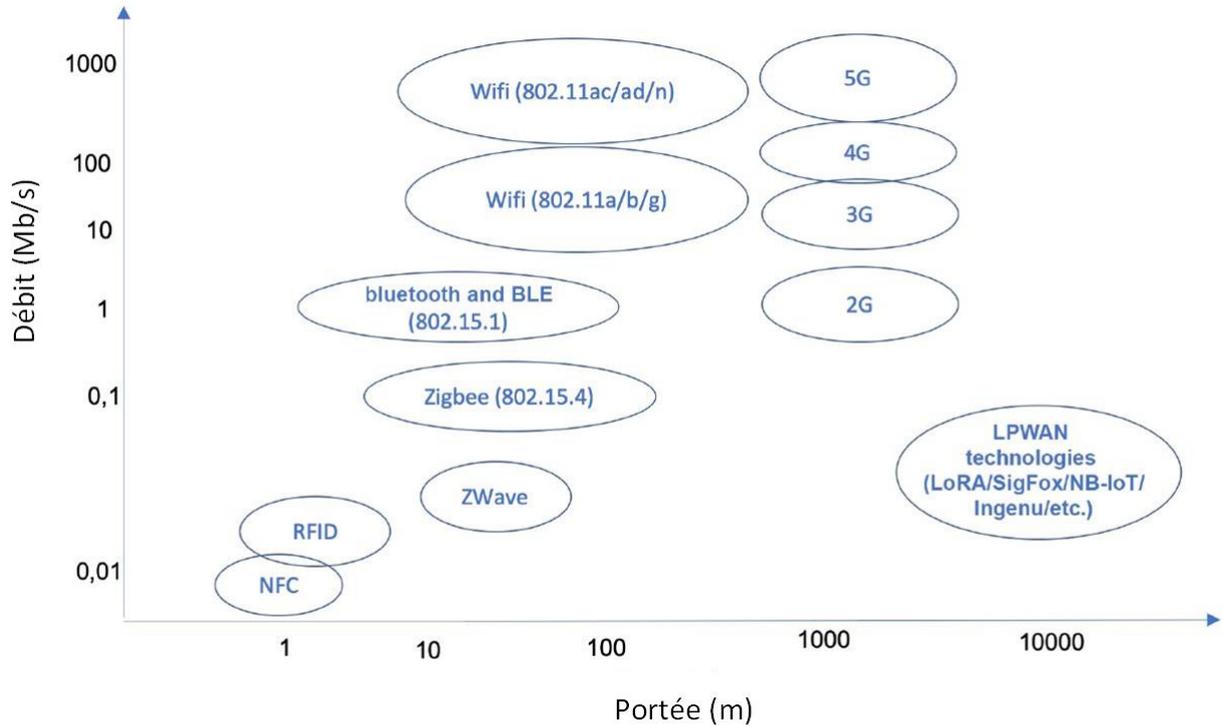


FIGURE 1.4 – Compromis débit-consommation pour des technologies Radio Fréquence

débit. Si nous considérons la technologie WiFi, un débit élevé est atteint pour une faible distance et une consommation élevée.

Comme nous pouvons le constater dans le Tableau 1.1, un grand nombre de standards radio différents cohabitent actuellement. Nous tenons à préciser que ce tableau n'est pas un récapitulatif exhaustif, mais une sélection de technologies utilisées. Il est possible différencier plusieurs cas d'usage selon la portée et la consommation énergétique :

1. Les radios RFID/NRF ont de très courtes portées, de l'ordre de quelques centimètres.
2. Les technologies courtes portées sont associées aux standards Bluetooth Low Energy (BLE)[MLW12], Zigbee [Gis08] ou encore le Wi-Fi [Sun+14].
3. Les réseaux **LPWAN** (**L**ow **P**ower **W**ide **A**rea **N**etwork) [Mek+19], ont une portée plus importante. Elles sont basse consommation. Nous pouvons citer les réseaux LoRa [lora]ou Sigfox [LPP19].
4. Les réseaux cellulaires ont une longue portée et une consommation élevée telle que la 5G [MSD17] ou la 4G. Ils permettent d'avoir des débits de transmission très importants.

Chacun de ces standards est utilisé pour des cas d'usage différents. Les radios NFC/RFID sont, par exemple, utilisées dans les paiements sans contact du fait de leur très courte portée. Les standards BLE et Zigbee sont privilégiés pour des réseaux de capteurs qui nécessitent des distances d'émission. En effet, le standard Wi-Fi a une consommation trop élevée (238mA en transmission contre 13.5 mA pour le Zigbee). Ces dernières années, les réseaux LPWAN ont vu le jour. Ils permettent d'atteindre de longues portées (jusqu'à 10 kilomètres en milieu urbain et 50 en milieu rural) pour une consommation peu élevée. Les principales technologies sont le LoRa proposée par la société Semtech et les radios compatibles avec l'opérateur d'objet connecté Sigfox.

1.1. Généralités sur les réseaux de capteurs

Tableau 1.1 – Caractéristiques de techniques radios utilisées dans l’IoT

Radios	Très courte portée	Courte portée			Longue portée LP	
	NFC	Bluetooth LE	Wi-Fi	Zigbee	LoRa	SIGFOX
Standard	NFCPI-1	802.15.1	802.11.n	802.15.4	LoRaWAN	Bande étroite
Fréquence	13.56MHz	2.4GHz	2.4/5 GHz	808MHz/ 2.4GHz	868MHz (EU)	868MHz (EU)
Portée intérieure/ extérieure (m)	0.2/0.2	10/50	50/125	30/1500	2000/15000	3000/30000
Courant max	10 mA	5.9(RX) 9.1 mA (TX)	65(RX) 235mA (TX)	11.8(RX) 13.8 mA (TX)	11.2(RX) 125 mA (TX)	17(RX) 45 mA (TX)
Courant de veille (µA)	120	1	160	0.2	0.1	0.12
Débit max (kb/s)	848	1000	100 000	2000	300	50
Topologie	point à point	étoile muti-étoile	point à point étoile	étoile arbre maillé	étoile multi-étoile	réseau cellulaire
Applications	Transport Paiements Traçabilité	Santé Médicale Industrie Domotique Sport	PC WLAN Multimédia	Domotique Industrie Environnement	Domotique Industrie Sécurité Longue portée	Sécurité Domotique Industrie

Du fait du grand nombre de solutions existantes, il faut faire un choix adapté au cahier des charges et aux contraintes du lieu de déploiement.

1.1.3.3 Le capteur

Le capteur est le composant permettant de mesurer et de quantifier une grandeur physique réelle. Pour ce faire, un signal analogique représentant la grandeur est produit. Celui-ci est ensuite converti en un signal numérique afin de pouvoir être traité correctement par le MCU. Cette conversion peut être directement intégrée dans le capteur. Si ce n’est pas la cas alors la conversion doit être réalisée par le MCU. Pour ce faire, il doit contenir des entrées analogiques et un convertisseur analogique-numérique (ADC).

Un grand nombre de capteurs existent dans la littérature. Une liste non exhaustive

Tableau 1.2 – Caractérisations de capteurs courants de la littérature

Type	Capteurs	Interfaces	Courant typique (~mA)
Acoustique	Microphone	I2C/ADC	0.65
	Ultrason	Interruption Timer	15
Chimique	CO ₂ , CO, CH ₄	ADC	1
Courant	Effet Hall	ADC	10
Environnement	Humidité du sol	ADC	4
	Humidité/Température Air	I/O	1.5
	Pression	I2C	0.6
Radiation	Tube Geiger	Interruption Timer	20
Déplacement	Accéléromètre Gyroscope	I2C/SPI	3.7
	PIR	Interruption	1.6
Position	GPS	UART	16
Optique	Photorésistance	ADC	0.5
Mécanique	Force	ADC	0.45
	Position	Interruption	-
	Tactile	Interruption	0.4

est proposée dans le Tableau 1.2. Les microphones peuvent détecter et enregistrer un son. Des capteurs de CO₂ ou de tout autre gaz existent pour des mesures chimiques. Des capteurs d'humidité, de température ou de pression permettent d'avoir des informations pour caractériser un milieu. Par ailleurs, un certain nombre de capteurs est utilisé dans les domaines de la médecine, afin d'assurer un suivi physiologique de patients. Pour chaque application il existe un capteur pouvant être utilisé afin de favoriser le suivi ou la supervision du milieu cible.

1.1.3.4 La source d'énergie

L'alimentation des capteurs communicants est généralement assurée par des piles ou des 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 un domaine d'application spécifique.

Dans ce contexte, le capteur communicant peut consommer différents niveaux de puissance selon ses modes de fonctionnement. Il faut alors que la source d'énergie soit capable de fournir la puissance nécessaire pour tous les modes de fonctionnement d'un capteur. Cela peut s'avérer contraignant lors de pics de consommation, durant lesquels le courant demandé par le système augmente drastiquement.

De plus, l'auto-décharge de la source d'énergie doit être la plus lente possible pour garantir une durée de vie maximale du capteur.

Suivant le déploiement des capteurs communicants, l'utilisation de batteries (ou de piles) engendre un certain nombre de contraintes. En effet, les batteries ou les piles sont des sources de pollution de l'environnement. Par ailleurs, certaines applications exigent une autonomie importante (une durée de vie importante du capteur). Or, les capacités des batteries ou des piles sont limitées par le nombre de cycles de recharge. Les moyens de stockage les plus répandus sont les supercondensateurs et les batteries chimiques telles que les batteries Lithium-Ion (Li-ion) ou les batteries Lithium-Polymère (LiPo).

1.1.4 Couche logicielle

Le développement logiciel pour l'IoT diffère du développement pour des systèmes numériques classiques. En effet, il faut tout d'abord prendre en compte le fait que les nœuds de capteurs font partie intégrante d'un système plus large, composé de dizaines d'éléments. Cet aspect doit être pris en compte par les développeurs afin d'éviter que les actions d'un ou plusieurs capteurs puissent impacter le réseau. De plus dans un système classique, les capteurs ne sont pas généralement éteints. En effet, selon les cas, cela pourrait bloquer des prises de mesures, et donc réduire potentiellement la qualité de service du réseau. Ces capteurs doivent donc être résilients vis-à-vis des différents problèmes pouvant impacter leur fonctionnement.

Si les capteurs sont déployés dans des endroits difficiles d'accès alors il faut être en mesure de garantir le fonctionnement avant déploiement d'un réseau, ou avoir la possibilité de réaliser à distance des mises à jour. De plus, les différents types de nœuds d'un réseau peuvent être hautement hétérogènes. Les microcontrôleurs retenus peuvent avoir des caractéristiques différentes (puissance calculatoire, capacité de mémorisation ou consommation énergétique). Les différents capteurs nécessitent parfois un effort de développement supplémentaire selon les ou les fonctions attribuées aux nœuds.

L'interaction quasi-constante des capteurs avec les différents paramètres environnementaux auxquels ils font face engendre l'apparition d'erreurs logicielles ou de transmissions. La gestion de ces différents problèmes est impérative afin de se prémunir d'une surconsommation de ressources, et donc d'énergie. Enfin, les différentes topologies et protocoles associés aux réseaux peuvent nécessiter une consommation énergétique importante. Le choix et leur implémentation impactent l'efficacité globale d'un réseau de capteurs.

Un réseau de capteurs typique doit être réactif aux variations d'une grandeur à mesurer. Selon les grandeurs observées, une transmission et/ou un traitement sont réalisés. Dans la plupart des cas, les programmes implémentés doivent être asynchrones et parallèles.

La partie logicielle d'un nœud de capteur peut être décomposée de la manière suivante :

1. Un kernel de drivers matériels nécessitant un faible encombrement en mémoire.
2. Une pile réseau pour gérer les communications entrantes et sortantes.
3. Une ou plusieurs applications qui s'exécutent au-dessus de la pile réseau.

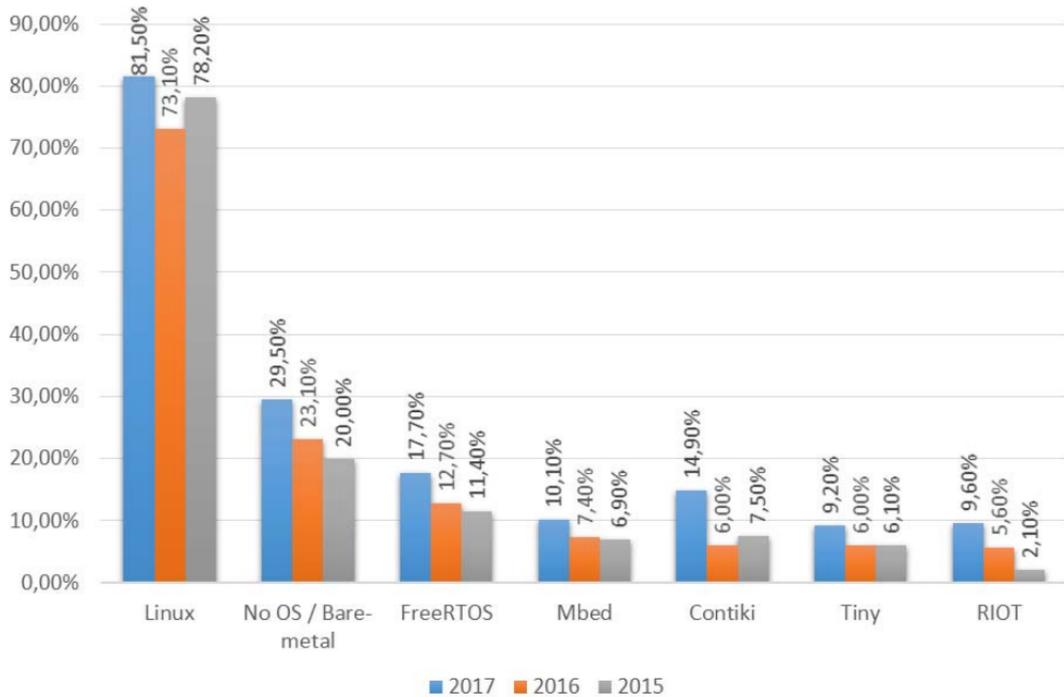


FIGURE 1.5 – Utilisation de différents systèmes d’exploitation dans l’industrie

L’exécution de la partie logicielle par le microcontrôleur peut se faire selon deux approches : utilisation d’un système d’exploitation (OS) ou sans (bare métal). Le système d’exploitation se doit d’être léger et temps réel (RTOS). Comme nous pouvons le constater à la lecture de la Figure 1.5, les OS Linux et FreeRTOS sont plébiscités dans le domaine de l’IoT. Un OS Windows peut être utilisé du côté des serveurs en raison des services fournis par Azure IoT. Enfin, le système d’exploitation Zephyr OS est de plus en plus utilisé par la communauté. Cet OS open source est soutenu par la Linux Foundation afin qu’il devienne une référence dans le domaine des réseaux de capteurs en raison de sa flexibilité et de sa maniabilité. D’autres systèmes d’exploitation open source tel que Mbed, Contiki ou encore Tiny OS sont également fréquemment utilisés. Le Tableau 1.3 récapitule les caractéristiques de différents systèmes d’exploitation.

L’utilisation d’un système d’exploitation permet de faciliter l’implémentation de fonctionnalités complexes, telles que certaines piles réseau. Néanmoins, selon l’usage, une implémentation bare-metal peut être suffisante. Cette approche permet d’optimiser l’implémentation. En effet, dans ce cas, aucun système d’exploitation n’est utilisé.

Lors du choix d’un système d’exploitation, les sept caractéristiques suivantes sont à prendre en compte : son architecture, son scheduler et ses capacités d’exécution temps réel, son modèle de programmation et sa facilité d’utilisation, son encombrement mémoire, les différentes technologies de communications supportées, son coût énergétique et enfin le matériel supporté.

Tableau 1.3 – Caractéristiques de systèmes d’exploitation pour l’IoT.

IoT OS	Fournisseur	License	Processeur
FreeRTOS	Amazon	MIT	ARM Cortex-M, MSP430, AVR, x86,...
Mbed OS	ARM	Apache 2.0	ARM Cortex-M
Contiki OS	Thingsquare	3-clause BSD	ARM Cortex-M, MSP430, AVR, x86,...
RIOT OS	FU Berlin	LGPLv2.1	ARM Cortex-M, MSP430, ARM7, AVR, x86, Cortex-M23, ESP8266, ESP32, MIPS32, MSP430,.....
Apache Mynewt	Apache Foundation	Apache 2.0	Cortex-M, RISC-V
Zephyr	Linux Foundation	Apache 2.0	ARM Cortex-M, x86, ARC, NIOS II, RISC-V,...
Android Things	Google	Apache 2.0/GPLv2	High-end processors such as x86, ARM Cortex-A (32/64)
Windows 10 IoT	Microsoft Corporation	Commercial	ARM Cortex-A7, Snapdragon 400, ARM Cortex-A53
Embedded Linux	Multiple	GPL, GPLv2,.....	ARM Cortex-A8, ARM Cortex A-53, ARM Cortex A7 ARM Cortex-A9, Intel Core i3,i5,i7,.....

1.1.5 Conclusion

Pour réaliser un réseau de capteur, un certain nombre de composants matériels et logiciels sont nécessaires. Le microcontrôleur, les capteurs, la technique de communication et la source d’énergie doivent être choisis parmi un grand nombre de possibilités, afin d’aboutir à un réseau adapté au cahier des charges et/ou à l’application visé. De plus, la couche logicielle, avec ou sans système d’exploitation, doit permettre un fonctionnement optimal entre chaque élément. C’est à ce niveau que les protocoles sont implémentés pour ajouter de *l’intelligence* dans la gestion du réseau. Tous ces éléments sont alors des possibilités à étudier pour la création et l’amélioration d’un réseau de capteur. La section suivante détaille certaines techniques et approches utilisées dans la littérature pour la prolongation de la durée de vie d’un réseau et de ses éléments.

1.2 Techniques favorisant la prolongation de la durée de vie d'un nœud de capteur

Les nœuds de capteurs d'un réseau qui sont alimentés par des batteries peuvent être difficiles d'accès après leur déploiement. Il peut alors s'avérer difficile de les recharger ou de les remplacer. L'énergie consommée par le capteur influe donc directement sur la durée de vie d'un réseau. La durée de vie d'un réseau de capteurs peut être définie de deux manières complémentaires :

1. L'intervalle de temps entre le déploiement d'un réseau et l'arrêt de fonctionnement d'un premier nœud de ce réseau.
2. L'intervalle de temps entre le déploiement d'un réseau et l'arrêt de fonctionnement du dernier nœud de ce réseau.

Des travaux de recherche de la littérature se focalisent sur les méthodes permettant de garantir une durée de vie importante d'un réseau de capteurs. En raison de l'importance de chaque élément du système, tant matériel que logiciel, des techniques sont proposées pour chaque élément. Nous allons donc considérer successivement les trois types de propositions :

1. L'utilisation d'une radio de réveil afin de limiter le coût énergétique des transmissions.
2. Les différentes méthodes de récupération d'énergie dans l'environnement ambiant.
3. Les améliorations concernant les protocoles de communication utilisés dans un réseau de capteurs.

Nous allons détailler ces différents axes de recherche, suite à une présentation de la radio de réveil et de son principe de fonctionnement.

1.2.1 La radio de réveil

La raison principale pour laquelle les protocoles de communication basés sur le duty-cycling ne sont pas adaptés pour prolonger la durée de vie d'un capteur est que la consommation énergétique est similaire durant les phases de transmission et de réception. Par exemple, le module radio CC2420 [Insb] largement utilisé consomme 21.8mA en émission et 19.5 en réception. Une radio ayant ces caractéristiques toujours allumée (en réception ou transmission) déchargerait des batteries en seulement quelques jours.

Comme mentionné précédemment, la plus large consommation d'énergie peut être attribuée à la radio. Avec l'introduction de la radio de réveil (WuR) qui a une consommation plus faible de plusieurs ordres, l'approche WuR réduit les consommations inutiles. En effet, la radio principale et le nœud de capteur sont réveillés seulement si nécessaire. La radio de réveil permet alors d'éliminer les périodes en *idle* et en attente d'écoute du capteur.

De plus, certaines WuRs intègrent des mécanismes d'adressage qui permettent de solliciter spécifiquement un ou des capteurs. Aussi, comme la radio de réveil peut être constamment en activité, le capteur peut fonctionner en mode asynchrone et activer la radio principale à la demande sans générer de communications inutiles. En théorie, ce concept est simple avec des bénéfices importants. Néanmoins, l'implémentation matérielle présente plusieurs défis. En effet, avoir une écoute avec une consommation minimale apporte des limites quant aux choix matériels. De nombreuses alternatives ont été explorées dans la littérature,

1.2. Techniques favorisant la prolongation de la durée de vie d'un nœud de capteur

Tableau 1.4 – Comparaison de la densité de puissance de différentes sources d'énergie.

Source d'énergie	Densité de puissance
Photovoltaïque en extérieur (cellule de rendement à 15%)	15 mW/cm ²
Photovoltaïque en intérieur (cellule de rendement à 15%)	100 10 ⁻³ mW/cm ²
Vibrations	16 10 ⁻³ mW/cm ²
Thermoélectrique (pour un gradient de 10°C)	40 10 ⁻³ mW/cm ²
Bruit acoustique (100dB)	0.96 10 ⁻³ mW/cm ²

incluant même des communications hors RF comme l'optique ou l'acoustique. Cette volonté de faible consommation limite aussi le choix des modulations et de la complexité du récepteur. Cela implique une limite de sensibilité possible, et donc une limite de la distance de communication. Comme le capteur est par principe réveillé par la radio de réveil, cette limite s'applique également au module de réveil indépendamment des capacités de la radio principale.

Des informations supplémentaires seront donnés sur le fonctionnement des radios de réveil dans le Chapitre 2.

1.2.2 Techniques de récupération d'énergie

Dans la littérature, différentes sources d'énergie s'avèrent contenir un potentiel intéressant. Nombreuses sont celles qui sont capables d'alimenter des systèmes communicants [Rou03]. Parmi ces sources, nous pouvons citer l'énergie vibratoire qui résulte de vibrations ou de chocs, l'énergie nucléaire, l'énergie électromagnétique, l'énergie thermique, l'énergie solaire photovoltaïque (intérieur et extérieur) ou encore l'énergie éolienne [Arm+05]. La comparaison de ces différentes sources est délicate, car elle dépend de nombreux facteurs et du domaine applicatif considéré. Cependant, des études comparatives dans [BW10] ont permis de comparer les densités de puissance de ces différentes sources, qui représentent l'énergie en milliwatts obtenus par centimètre au carré. Les résultats de comparaison sont présentés dans le Tableau 1.4.

Ce tableau montre que la quantité d'énergie solaire récupérée en extérieur est plus élevée par rapport aux autres formes d'énergies. Cette constatation est utile pour le choix des sources d'énergie qui peuvent être associées à des réseaux de capteurs.

Le Tableau 1.5 récapitule les quantités d'énergie récupérées lors des expérimentations menées par différentes équipes de recherche.

Cette énergie récupérée directement au niveau d'un capteur permet de prolonger l'usage de ce nœud. Afin d'être exploitée correctement, elle doit être gérée par un module électrique appelé *Power Manager* (PM). Il permet la gestion de l'alimentation énergétique du nœud. En effet, il adapte l'énergie consommée à partir de l'énergie récupérée par les sources externes. La caractéristique la plus importante de ce gestionnaire d'énergie est son rendement. Celui-ci correspond au ratio entre l'énergie d'entrée et l'énergie de sortie. Il représente donc la perte d'énergie lors de la conversion. Celle-ci doit donc être la plus faible possible. Dans un cas optimal, il s'assure que la consommation est toujours inférieure ou égale à l'énergie

1.2. Techniques favorisant la prolongation de la durée de vie d'un nœud de capteur

Tableau 1.5 – Energie solaire produite.

Réf	Rendement (%)	Puissance générée (mW/cm ²)	Conditions
[CTS08]	20	11 à 19	Ensoleillé en extérieur
[GB08]	15	5.6 à 6.7	Région tempérée
[Mat+08]	5	3.5	Ensoleillée
[Lan06]	20	49	Ensoleillée

disponible en entrée. Cela mène à ce que nous appelons *Energy Neutral Operation* [Buc+14], qui correspond à l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie.

[SJ16] propose l'utilisation de PM dynamique, où le temps est divisé en slots. Ainsi, une adaptation des paramètres (périodes de réveil) pour chaque slot est possible selon l'énergie disponible. Certains proposent un PM de faible complexité, qui ne considère que l'énergie disponible dans la batterie. Les possibilités de récoltes d'énergie ne sont donc pas prises en compte.

Dans [Cha+16], il est proposé, quant à eux, de supprimer la batterie. Dans ce cas, le nœud est uniquement alimenté par de la récupération d'énergie. Les mesures et les transmissions de grandeurs physiques sont possibles si de l'énergie est disponible. Le capteur a dans cette situation des périodes de temps (par exemple, la nuit) durant lesquelles il n'est pas fonctionnel. Cela signifie que des mesures et des communications durant de longues périodes ne sont pas possibles. La qualité de service du système est alors fortement diminuée. D'autres propositions associent la récupération d'énergie à une batterie. Le capteur peut alors être alimenté directement par le système de récupération ou par la batterie. Un PM adapté permet de stocker dans la batterie le surplus d'énergie généré puis de la réutiliser en cas de besoin.

1.2.3 Protocoles et topologies de réseau

Le protocole spécifiant les règles de transmission des données entre les différents nœuds de capteurs et également avec la passerelle a un impact sur la consommation globale du réseau. Pour les communications radios, la structure des réseaux sans fil peut être associée à différentes topologies : en étoile, en arbre ou encore maillée.

La topologie en étoile est organisée telle que chaque nœud communique directement avec la passerelle. Celle-ci peut envoyer ou recevoir des messages à plusieurs capteurs distants. Dans cette structure, une communication entre nœuds n'est pas possible. Tous les messages doivent transiter par la passerelle. Cela implique donc une forte dépendance envers un unique système pour la gestion du réseau. Un problème technique sur la passerelle impacte directement le bon fonctionnement de l'ensemble du réseau de capteurs. En revanche, cette dépendance directe permet de diminuer la charge des nœuds distants, réduisant ainsi leur consommation énergétique. Par ailleurs, la taille d'un réseau en étoile est limitée par le nombre de communications pouvant être gérées en parallèle par la passerelle.

La topologie en arbre est aussi considérée comme une topologie étoile, mais hiérarchique. Dans cette configuration, la passerelle est positionnée tout en haut de l'arbre. Les nœuds,

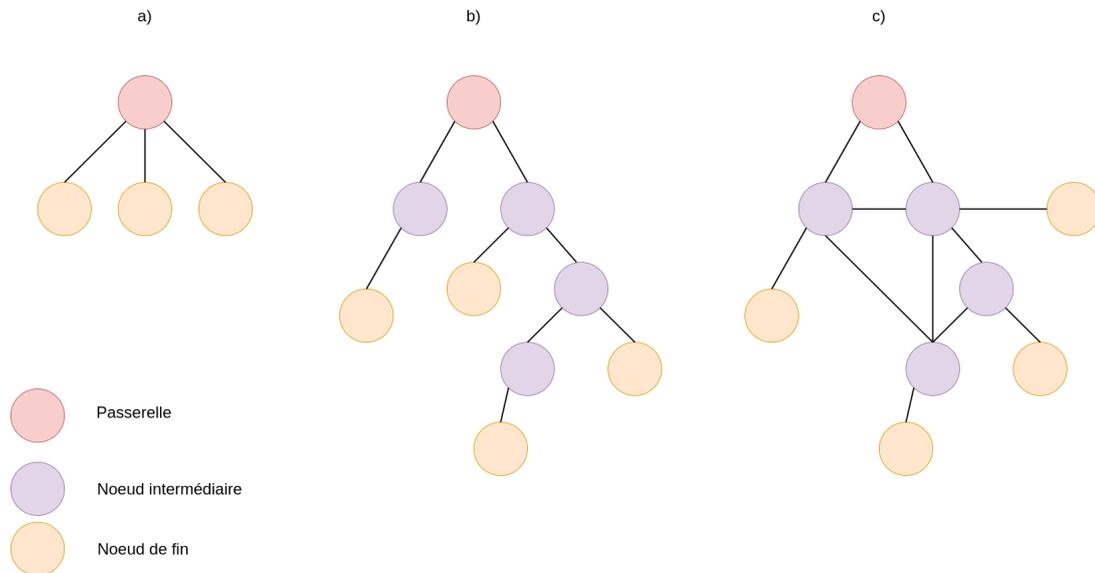


FIGURE 1.6 – Topologies de réseaux de capteurs. a) étoile, b) arbre, c) maillé

quant à eux, sont connectés à d'autres nœuds positionnés plus haut dans l'arbre, jusqu'à la passerelle. Les avantages de cette topologie sont les facilités d'expansion du réseau et la facilité de détection de capteurs qui dysfonctionnent. Néanmoins, si un nœud vient à cesser de fonctionner, tous les nœuds en aval de ce dernier dans l'arbre perdront la communication avec la passerelle.

Quant aux réseaux maillés, ils permettent des communications directes entre les différents éléments du réseau. Ainsi, si un nœud veut communiquer avec un autre nœud qui est en dehors de sa portée, alors il peut faire transiter les données par des capteurs intermédiaires. Cela permet un déploiement géographique du réseau plus important. De plus, cela offre la possibilité aux nœuds d'interagir directement entre eux. Ces transmissions intermédiaires vont néanmoins augmenter l'énergie nécessaire à la transmission de données vers la passerelle.

Une étape de spécification est nécessaire pour adapter le protocole de routage des données aux caractéristiques du réseau. De nombreux travaux de recherche traitent de la conservation et du management de l'énergie dans chaque couche de protocole suivant le modèle OSI (Open Systems Interconnexion) :

1. La couche physique : permet la transmission du flux d'information sur le support physique.
2. La couche de liaison : permet de spécifier le format des données sur le réseau.
3. La couche réseau : permet de choisir le chemin physique qu'emprunteront les données.
4. La couche de transport : permet de transmettre les données en utilisant un protocole.
5. La couche application : couche d'interaction où les applications peuvent accéder aux services du réseau.

Le développement de nouveaux protocoles est une thématique très répandue dans la littérature. Les différentes propositions ont des atouts et des limites. Dans les propositions faites dans les prochains chapitres, nous n'utiliserons pas un protocole spécifique mais des transmissions directes comme explicitées dans le Chapitre 2.

Tableau 1.6 – Récapitulatif des différents protocoles de réseau de capteurs.

Protocole	Description
Protocoles data-centrées	
SPIN [HKB99]	Efficace pour les réseaux de petite et moyenne taille Communication inter nœuds pour éviter les saturations de données
EPAS, HEPAS [CLL06]	Efficace énergétiquement, utilise des nœuds agrégateur afin de minimiser la consommation globale du réseau.
Protocoles Hiérarchiques	
Leach [SKS17]	Crée des sous-réseaux avec à leur tête des capteurs sélectionnés. La charge de communication est distribuée. Difficilement utilisables sur de grande surface géographique.
TEEN, APTEEN [MA02]	Utilise des clusters de capteurs. La tête de chaque cluster ne communique qu'en cas de variations significative des grandeurs. Dans APTEEN, les données sont également transmises périodiquement.
Protocoles basés sur la topologie	
GAF [GS+14]	Modifie les rôles des capteurs périodiquement pour assurer une consommation équitable entre chacun.
ASCENT [CE04]	Seul les capteurs se situant sur le chemin vers la passerelle sont autorisés à rester actif.

1.3 Configuration et apprentissage

L'apprentissage automatique (Machine Learning(ML)) permet à une machine d'apprendre à partir d'approches mathématiques ou statistiques. Des modèles sont ainsi générés en analysant un grand nombre de données complexes de manière automatisée et rapide. La pertinence de ces techniques réside dans leur capacité à fournir des solutions généralisées autour d'une architecture qui peut apprendre à améliorer ses capacités décisionnelles. En plus d'améliorer les performances des systèmes auxquels elles sont appliquées, ces techniques permettent aussi de limiter des interventions humaines. Un certain nombre de recherches dans ce domaine a été appliqué aux réseaux de capteurs [Als+15]. Voici une liste non-exhaustive des problématiques traitées : localisation des capteurs, le tracking d'objets, l'agrégation de données et la détection d'événements ou d'erreurs. Nous pouvons constater que ces techniques sont utilisables dans tous types de contexte applicatif. Suite à un apprentissage, elles permettent souvent de prendre des décisions, d'agir efficacement et rapidement au sein d'un réseau. Ces techniques d'apprentissage sont multiples, et peuvent être classifiées en différents groupes comme détaillés par la suite.

Tableau 1.7 – Comparaison de différentes techniques de ML [Als+15].

Spécifications	DT	RF	ANN	DL	SVM	Bayesian	k-NN
Paramétrage	3	3	1	2	1	4	3
Précision	2	2	3	3	4	1	2
Rapidité d'apprentissage	3	2	1	1	1	4	4
Rapidité de classification	4	4	4	4	4	4	1
Gestion de valeurs manquantes	3	2	1	2	2	4	2
Gestion des redondances	2	2	2	2	3	1	2
Gestion du bruit	2	3	2	3	2	3	1
Gestion des variables parasites	3	3	1	2	4	2	2

1.3.1 Classification des méthodes d'apprentissage pour les réseaux de capteur

Les différentes méthodes d'apprentissage automatique peuvent être classées en apprentissage supervisé, non-supervisé, semi-supervisé et en apprentissage renforcé.

1.3.1.1 Apprentissage supervisé

Dans cet ensemble de techniques, un entraînement est réalisé en fournissant des données labellisées afin d'établir des relations de dépendance entre les entrées et les sorties. Une fonction est obtenue pour chaque entrée x et donne une estimation de la sortie y . Ces techniques permettent de résoudre de nombreux problèmes comme la localisation [BAS18, Sun+17], la détection d'erreur [ZMA17, ZLK16], le routage [Meh+17, Kaz+14] ou encore la récupération d'énergie [SK18].

L'apprentissage supervisé peut aussi être divisé en deux sous-catégories : la régression et la classification. La régression permet de prédire certaines valeurs Y à partir d'un ensemble de données X , qui sont continues ou quantifiées. Cette approche permet d'obtenir des résultats avec de faibles taux d'erreurs [MPV21]. Concernant la classification, elle est effectuée selon différentes techniques : *decision tree*, *random forest*, *deep learning*, *artificial neural network (ANN)*, *bayésien*, *support vector machine (svm)* et *k-nearest neighbor*. Chaque technique est plus ou moins adaptée à un défi à relever.

Le Tableau 1.7 [Als+15] propose une comparaison de ces différentes techniques. Un score de 4 indique la meilleure performance et un 1 la moins bonne. On remarque clairement qu'aucune méthode d'apprentissage n'obtient de score élevé pour chaque élément de comparaison. Prenons par exemple l'apprentissage bayésien. Malgré sa rapidité d'apprentissage et de classification, sa précision est faible. Un compromis doit alors être fait lors du choix d'un apprentissage supervisé.

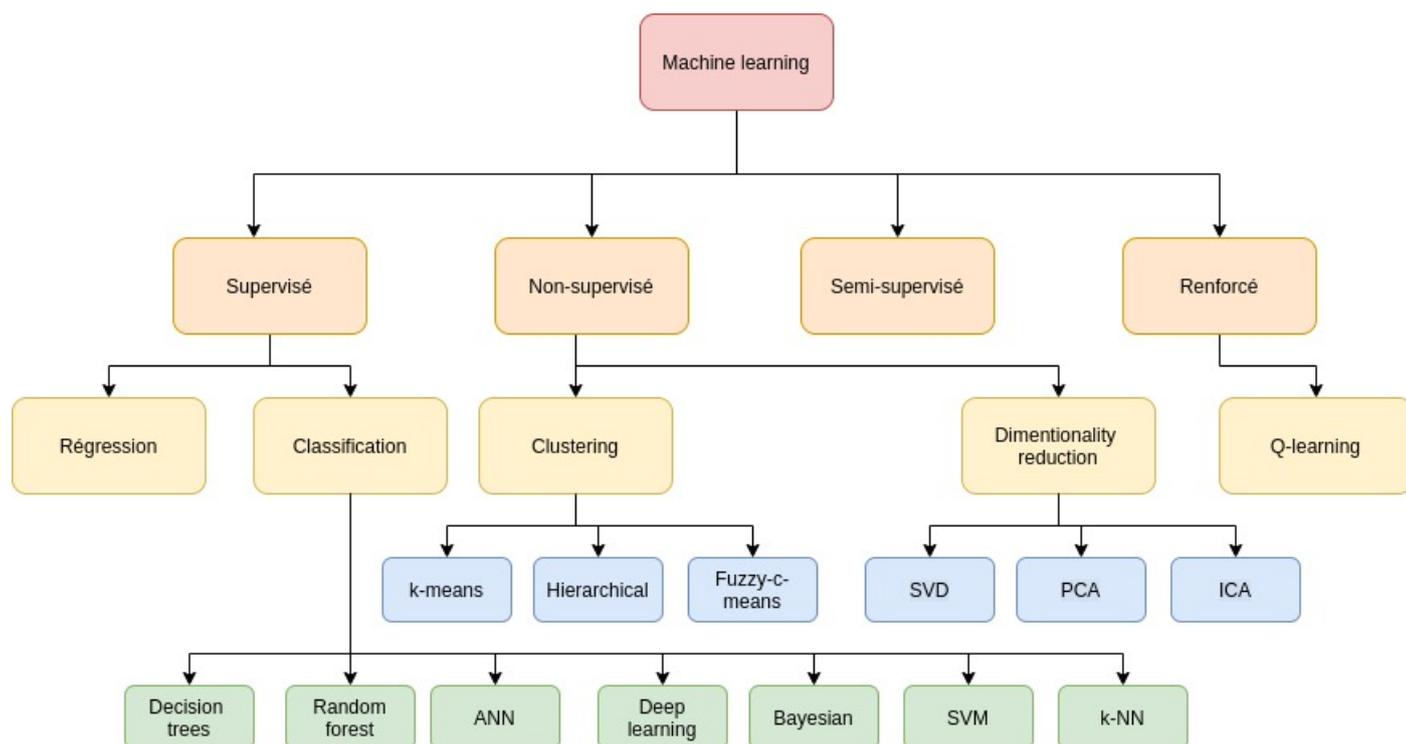


FIGURE 1.7 – Synthèse des techniques d’apprentissage automatique

1.3.1.2 Apprentissage non-supervisé

Dans l’apprentissage non-supervisé, l’ensemble des données ne sont pas labellisées. La relation entre les sorties et les entrées est réalisée par l’algorithme lui-même. Le modèle utilisé tente de générer une relation entre l’entrée et la sortie. Cela permet de classifier des données dans des ensembles, de faire de la réduction de dimension et de la détection d’anomalie. Comme précédemment, les différentes méthodes peuvent être classifiées en deux groupes distincts : *clustering* (*k-means*, *hiérarchique* et *fuzzy-c-means*) et *dimensionality reduction* (*PCA*, *ICA* et *SVD*). Les applications utilisant ces techniques traitent de problème de détection d’anomalie [GMJ19], de routage [RD16] ou encore de problème de connectivité [Qin+16].

1.3.1.3 Apprentissage semi-supervisé

L’apprentissage supervisé travaille avec une combinaison de données labellisées et non labellisées. Les objectifs sont de prédire dans un premier temps, les labels à partir des jeux de données d’entraînement non labellisés, puis à partir des données de test. Ces méthodes sont bien adaptées à des applications temps réels [ZG09]. Pour des réseaux de capteurs, ice type d’apprentissage est adapté à des problématiques de localisation [YKK15] et de détection d’erreurs [ZC15].

1.3.1.4 Conclusion

Avant de conclure, précisons qu'il existe une autre catégorie qui est l'apprentissage renforcé. Ce dernier se compose d'algorithmes interagissant avec leur environnement. Cela leur permet de continuellement apprendre en rassemblant des informations, afin de prendre des décisions et des actions. Une *stratégie* est déterminée en utilisant les expériences itérées. La Figure 1.7 récapitule graphiquement les différentes techniques d'apprentissage automatique. Nous observons les quatre types d'apprentissage que nous avons détaillé précédemment. Ces derniers peuvent être mis en œuvre dans des réseaux de capteurs pour améliorer leur fonctionnement.

1.3.2 Mise en œuvre dans les réseaux de capteurs

Appliquées aux réseaux de capteurs, les techniques d'apprentissage automatique permettent de répondre à un certain nombre de problématiques. Les sections suivantes détaillent ces problématiques et introduisent des solutions proposées dans la littérature. Cette synthèse décrit les atouts et les contraintes de ce type d'approche.

1.3.2.1 Apprentissage automatique pour la récupération d'énergie

Comme introduit dans la Sous-Section 1.2.2, les méthodes de récupération d'énergie sont utilisées afin de prolonger la durée de vie d'un capteur. De plus, elles permettent de réduire les coûts d'infrastructure, d'installation et de maintenance. De l'énergie peut être produite depuis des sources extérieures comme le photovoltaïque, l'énergie RF, l'énergie thermique ou par processus mécanique. Ces énergies rendent possible la conception des nœuds de capteurs avec ou sans batterie.

C'est dans ce cadre que l'apprentissage automatique peut être utilisé afin d'améliorer la récupération d'énergie.

[Kos16] propose un algorithme basé sur le Q-learning. Il permet de prédire l'énergie pouvant être récupérée durant un intervalle de temps. Ainsi, une meilleure gestion de cette énergie est réalisée pour améliorer la durée de vie du capteur.

[SK18] utilise une régression afin de prévoir l'irradiance moyenne journalière. Cette prédiction, de la même façon que la précédente, permet une meilleure gestion énergétique d'un nœud de capteur.

De l'apprentissage renforcé est utilisé dans les travaux publiés dans [AGB18]. Il permet d'adapter dynamiquement la consommation du capteur. Ces trois propositions utilisent des techniques et des applicatifs différents, mais avec un même objectif qui est la prolongation de la durée de vie du réseau.

Le but de ces différentes propositions et approches est de favoriser la meilleure gestion possible de l'énergie disponible, en prenant en compte la consommation du capteur et l'énergie disponible.

Tableau 1.8 – Caractéristiques de technique de détection d’erreurs pour les réseaux de capteurs.

Technique	Type d’erreur détectée	Précision
Bayésien [Men+17]	malfunction de capteurs	98%
Deep learning [Li+15]	erreur de données	99%
SVM [ZMA17]	fausse alerte	99%
Semi-supervisé [ZC15]	malfunction de capteurs	99%

1.3.2.2 Apprentissage automatique pour la détection d’évènements

Lors de la supervision de grandeurs physiques, il est nécessaire de réaliser des actions spécifiques lors de la détection d’un événement. Nous pouvons prendre l’exemple de l’activation d’un éclairage spécifique lors du passage d’une personne devant un capteur. Les capteurs étant limités tant en ressources qu’en énergie, les problèmes de faux positifs et négatifs doivent être traités. Un faux positif arrive lorsqu’un évènement est détecté alors qu’il ne s’est pas produit. De même, un faux négatif est lorsqu’un événement n’est pas détecté alors qu’il s’est produit. Dans ce contexte, les solutions basées sur l’apprentissage automatique peuvent être utiles pour détecter des évènements à partir des sources de données.

1.3.2.3 Apprentissage automatique pour la détection d’erreurs

Lors du déploiement de capteurs, ceux-ci doivent être positionnés dans des lieux appropriés. Des problèmes de communication ou de récupération d’énergie ou encore un dysfonctionnement du logiciel ou du matériel peuvent introduire des erreurs ou une rupture de service. Il est donc nécessaire d’avoir des méthodes permettant de les détecter rapidement, afin d’apporter des solutions pour s’en prémunir.

Le tableau 1.8 récapitule les méthodes proposées dans la littérature pour détecter un dysfonctionnement ou générer des alertes. Quatre propositions utilisent différentes techniques. Ces dernières sont choisies en adéquation avec le type d’erreur à détecter. La précision sur ces erreurs est élevée : autour de 99%.

1.3.3 Conclusions

Malgré l’intérêt des techniques d’apprentissage automatique pour les réseaux de capteurs, ces dernières ne permettent pas de résoudre tous les problèmes existants. En effet, un certain nombre de données doit être fourni pour garantir l’efficacité de l’apprentissage automatique. Ce volume doit être le plus élevé possible pour que leur utilisation ait un intérêt.

Notons aussi que leur utilisation nécessite un grand nombre de traitements de par l’apprentissage. Il est donc difficile de réaliser cela localement au sein d’un capteur, qui possède souvent une puissance calculatoire limitée. De plus, un grand nombre de calculs implique une forte consommation énergétique. Cela est difficilement applicable à un capteur sans fil. C’est pour ces raisons qu’il est préférable de privilégier un apprentissage centralisé c’est à dire au niveau de la passerelle ou du serveur.

1.4 Les bâtiments connectés

L'un des domaines d'application des réseaux de capteurs sont les bâtiments connectés, qui sont traités dans le cadre de ces travaux de thèse. Les capteurs déployés peuvent mesurer une multitude de grandeurs et ainsi offrir un grand nombre de services aux usagés. Que ce soit la production d'informations sur la qualité de vie, sur le nombre de personnes dans un espace réduit ou encore une réduction des consommations énergétiques, ils permettent une amélioration de l'usage de bâtiments existants.

Les campus universitaires sont des espaces qui peuvent être une référence dans ce domaine d'étude. En effet, la diversité et l'hétérogénéité des différentes infrastructures constitue un terrain expérimental pertinent. C'est pour cette raison que nous nous focaliserons sur les campus connectés. Mais toutes les propositions faites au cours de nos travaux peuvent être extrapolées vers tout type de bâtiments ayant des configurations similaires. Un réseau de capteur a pour objectif d'améliorer le fonctionnement d'un campus, tout en offrant une multitude de services aux utilisateurs [AS16]. La demande de nouveaux services et l'apparition d'usages numériques incitent les universités à s'équiper afin de connecter leurs infrastructures.

1. Coût de fonctionnement :

Un suivi de grandeurs environnementales (température, pression, humidité, luminosité) favorise la réduction des coûts de fonctionnement. Une connaissance de ces valeurs permet de mieux gérer le chauffage, l'eau ou encore l'éclairage. Une gestion adaptée permet de limiter les surconsommations inutiles, réduisant aussi l'empreinte carbone des bâtiments. Une centralisation de ces données permet également une automatisation du campus.

2. Fonctionnement automatisé :

Un certain nombre d'actionneurs peut être connecté pour automatiser le fonctionnement et la gestion des bâtiments. Des prises connectées permettraient, par exemple, de désactiver l'alimentation d'appareil lorsqu'aucune utilisation n'est identifiée. Un ensemble d'éclairage peut être automatiquement éteint si des capteurs de présence informent d'une inactivité dans une zone spécifique. Nous pouvons également citer un contrôle automatisé du chauffage, où les décisions sont prises suite à la remontée de mesures de température provenant de capteurs.

3. Disponibilité de ressources :

L'idée est de fournir aux usagés du campus une visibilité en temps réel de l'occupation des différentes ressources des bâtiments. Cela peut correspondre au taux d'occupation d'une salle ou d'un amphithéâtre, la disponibilité des toilettes les plus proches, ou encore l'affluence dans les points de restauration.

Afin de réduire le coût de fonctionnement ainsi que l'empreinte carbone d'un campus universitaire, un intérêt particulier a concerné les réseaux de capteurs. [SW16] a proposé un prototype basé sur une carte arduino avec une communication Zigbee afin de réaliser une supervision des bâtiments.

Néanmoins, l'utilisation d'une carte arduino implique une consommation élevée, et donc une alimentation sur secteur. Par ailleurs, un réseau basé sur une carte Raspberry Pi a été déployé à l'Université de Glasgow comme décrit dans [Hen+16]. Là encore une limitation des possibilités de déploiement est rencontrée en raison d'une alimentation filaire.

1.5 Conclusion

Ce chapitre présente un état de l'art des thématiques qui ont été abordées durant ces travaux de thèse. Nous avons pu récapituler les atouts et les limites associés aux capteurs, aux composants matériels, ainsi que les problématiques liées à la couche logicielle. Ensuite, nous nous sommes concentrés sur des méthodes permettant de gérer la consommation énergétique afin de prolonger la durée de vie des capteurs. Nous avons aussi présenté brièvement les techniques d'apprentissages existantes. Un certain nombre de propositions existe dans la littérature. Elles apportent des réponses à des problématiques liées aux capteurs. Néanmoins, nous avons vu que ces solutions avaient des restrictions importantes. Enfin, nous avons introduit le principe de campus connecté et les spécifications associées.

Le deuxième chapitre présentera la première contribution de ces travaux de thèse, à savoir une architecture efficace énergétiquement, tout en étant adaptée à l'hétérogénéité d'un campus universitaire.

2 Architecture de nœuds de capteurs efficaces énergétiquement

Ce chapitre se concentre sur les stratégies architecturales établies pour l'amélioration de la durée de vie des capteurs. Ces contributions sont divisées en deux parties : 1) une proposition d'architecture et 2) un modèle de consommation associé. L'architecture proposée se compose d'une partie matérielle, associée à une partie logicielle adaptée à l'hétérogénéité d'un bâtiment connecté. Une méthode de récupération d'énergie associée au principe de Wake-up Radio est également étudiée. Le modèle de consommation est décrit dans la dernière partie du chapitre 2. Il permet d'obtenir une estimation de la durée de vie d'un capteur pour l'adapter au cahier des charges. Enfin, une dernière section récapitule les différentes contributions et les met en perspective.

2.1 Architecture du nœud de capteur

Le développement d'un réseau de capteurs implique de faire des choix architecturaux. Ceux-ci doivent permettre l'implémentation de technologies de communication appropriées. Il est pour cela nécessaire que les éléments matériels et logiciels soient pertinents vis-à-vis de l'application cible. Comme expliqué dans la Section 1.1, le déploiement d'un réseau filaire nécessite d'importants coûts d'infrastructure. En effet, la mise en œuvre de l'infrastructure associée à un réseau filaire spécifique impacte fortement le budget d'intégration d'un réseau de capteurs dans un bâtiment.

L'alimentation énergétique des nœuds de capteurs est une contrainte supplémentaire dans les réseaux de capteurs. Dans le cas d'une importante consommation, le capteur doit être alimenté par le réseau électrique du bâtiment. C'est le cas par exemple du réseau *Supersensors* déployé au sein de l'Université de Glasgow [Hen+16]. Les nœuds de ce réseau, basés sur des cartes Raspberry Pi 3 [Ras], ont une consommation au repos de 28Wh. Dans le cas d'un déploiement, cela impliquerait l'utilisation d'une batterie d'environ 5000 mAh pour un jour de fonctionnement. L'intervention journalière de maintenance pour la recharge ou le changement des batteries dans un bâtiment de dizaines de capteurs est peu raisonnable en pratique. Le besoin d'alimentation filaire pour ce type de capteurs limite les capacités de déploiement. Il s'agit d'une contrainte forte qui dépend des positions des prises électriques disponibles.

Pour pallier à ces deux contraintes, les réseaux de capteurs autonomes (sur batteries) et sans-fils sont un compromis adéquat malgré une durée de vie limitée et les limites des technologies Radio Fréquences. Rappelons que les travaux de cette thèse ont pour but de répondre aux problématiques associées à des bâtiments connectés et leur suivi énergétique. Nous proposons donc le cahier des charges suivant afin d'adresser cette problématique :

1. Des nœuds capteurs autonomes qui ont une durée de vie de plusieurs années afin de limiter les interventions techniques sur le réseau.
2. Des nœuds capteurs sans-fils qui évitent les travaux d'infrastructure.
3. Des nœuds capteurs dédiés au suivi énergétique et au confort d'un bâtiment.

Ces spécifications sont directement liées à la *Qualité de Service*. Comme expliqué dans la Section 1.1.2, la qualité de service se caractérise par la capacité du réseau à surveiller des grandeurs physiques spécifiques. Ces grandeurs (températures, humidités, pressions) sont représentatives de la consommation et du confort intérieur des pièces d'un bâtiment. Elles permettent également d'avoir une information sur la consommation énergétique globale du bâtiment. La qualité de service prend aussi en compte la fréquence de mesure des capteurs qui impacte la précision de caractérisation d'un bâtiment. Plus la fréquence d'acquisition est élevée, meilleure sera la modélisation énergétique du bâtiment, mais cela engendre une consommation d'énergie plus élevée. Enfin, elle intègre la durée de vie minimale des capteurs qui doivent pouvoir fonctionner plusieurs années.

La section suivante détaille une proposition d'architecture matérielle qui permet de répondre aux différentes problématiques explicitées dans cette Section.

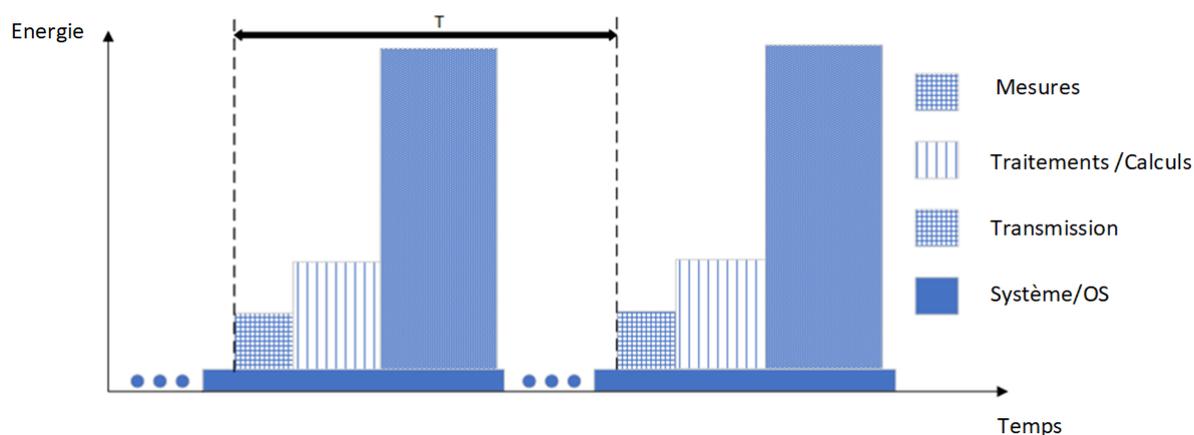


FIGURE 2.1 – Principe de fonctionnement du Duty Cycle

2.1.1 Architecture matérielle

De nos jours, les réseaux de capteurs classiques sont basés sur un principe de *duty-cycle* (DC). [Car+14] a proposé en 2013 un *survey* des mécanismes de duty-cycling. Cette méthode permet, par comparaison au fonctionnement classique de capteurs, de réduire la consommation des nœuds. Elle permet de supprimer les temps de fonctionnement inutiles du capteur en limitant les temps d'attente inutiles. Typiquement, la mise en attente constante de réception de paquets par le module radio est supprimée. Un fonctionnement basé sur le principe de duty cycle est illustré par la Figure 2.1.

Nous pouvons observer que chaque étape de fonctionnement du capteur a une durée fixe, avec une valeur de consommation typique. À défaut d'avoir des successions perpétuelles des différentes étapes, le capteur se réveille à fréquence fixe afin de réaliser une acquisition. Suite à l'acquisition, un temps de traitement est nécessaire, puis une transmission radio vers une passerelle. Une fois les exécutions prévues réalisées, le nœud passe dans un mode de fonctionnement déprécié (mode sommeil).

Pour éviter des périodes de réveils inutiles, un certain nombre de travaux de recherche proposent l'utilisation de Wake-up Radios (WuR). Une Wake-up Radio est une radio de faible consommation et de très faible débit. Elle permet de réveiller le capteur seulement lorsqu'une prise de mesure ou une action particulière est nécessaire comme l'activation d'un actionneur. Comme expliqué dans [GS05], l'utilisation de cet élément permet une réduction de 70% de l'énergie consommée par un nœud capteur.

Par ailleurs, l'utilisation d'un module de récupération d'énergie permet une prolongation de la durée de vie du nœud du capteur. Dans la Section 1.2.2, nous avons montré que le photovoltaïque est l'énergie offrant la meilleure efficacité en extérieur. Néanmoins, cette technique peut être jusqu'à 1000 fois moins efficace en intérieur. Cette différence d'efficacité, associée à l'hétérogénéité des bâtiments universitaires, sont des contraintes pour la conception de nœud de capteurs autonomes et sans-fils.

Nous proposons une architecture de capteur se focalisant autour de la récupération d'énergie photovoltaïque et d'une wake-up radio. Cette architecture peut être divisée en deux parties distinctes :

1. Les éléments qui permettent une gestion de l'alimentation du système.
2. Les éléments qui permettent l'acquisition, le traitement et la transmission de données.

La partie de gestion d'énergie est composée d'un module de récupération d'énergie qui permet d'exploiter de l'énergie ambiante, d'un module de gestion d'énergie qui est le centre de l'alimentation du système et d'une batterie afin de stocker de l'énergie. La partie traitement de l'information est quant à elle composée d'un microcontrôleur, d'un module de communication principal, de la radio de réveil et de l'ensemble des capteurs nécessaires. Ces parties sont expliquées dans la suite de cette section.

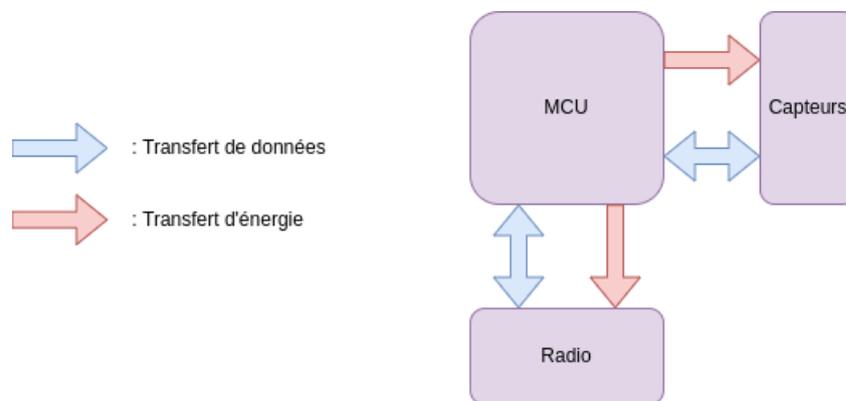


FIGURE 2.2 – Architecture proposée pour le nœuds capteur.

2.1.1.1 Le bloc de traitement de l'information.

Nous commençons par détailler les spécifications des éléments communs à un système classique tel que décrit dans la Figure 2.2.

Le microcontrôleur

L'élément incontournable de l'architecture est le microcontrôleur. Afin de choisir le modèle le plus adapté pour un capteur, deux visions sont possibles selon le contexte applicatif. Dans une première approche, nous pouvons considérer l'application cible souhaitée au moment du déploiement du réseau. Dans ce cas, les ressources du microcontrôleur seront suffisantes pour exécuter comme souhaité les tâches qui seront demandées. Dans une seconde approche, en plus de l'applicatif souhaité lors du déploiement, nous pouvons aussi prendre en compte une volonté d'amélioration des services au cours de l'usage. Dans ce cas, il faut que le microcontrôleur dispose des ressources supplémentaires afin d'ajouter ou de mettre à jour les services envisagés.

Dans le contexte de bâtiments connectés, nous avons décidé de retenir la seconde approche de développement. En effet, l'intégration d'un microcontrôleur surdimensionné (avec raison) nous semble être un meilleur choix afin de permettre de futures améliorations et de nouveaux usages. Il doit être en mesure d'exécuter toutes les tâches d'acquisition, de traitement, de transmission et de réception radio.

Pour les acquisitions, la communication avec les différents capteurs se fait via des ports d'entrées/sorties. Il faut alors que ce nombre de ports soit suffisant pour interfacier la totalité des périphériques nécessaires à une application. Si ce nombre de ports est limité au minimum nécessaire lors du déploiement, aucun ajout de capteurs ne sera possible ultérieurement sans revoir une grande partie du capteur. Or, dans une volonté de suivi de consommation et de confort intérieur de bâtiments, un ajout de capteurs peut s'avérer utile. Cela doit être combiné avec la contrainte de durée de vie. Ce compromis devra être pris en considération en amont lors du développement.

Ceci est également vrai pour les traitements qui peuvent être demandés au microcontrôleur. Tout comme l'ajout de capteurs est envisageable, il faut que le traitement associé soit aussi pris en compte. Les traitements peuvent être de simples mises en forme de données et de gestion de la pile réseau. Mais nous pouvons également avoir besoin d'une intégration de services plus énergivores comme proposé dans [Hos+20], où des traitements d'apprentissage sont distribués au sein des capteurs d'un réseau.

Ces différentes conditions impliquent une connaissance et un choix de la fréquence d'horloge, de l'empreinte mémoire et de la consommation énergétique du microcontrôleur. Des compromis doivent donc être faits en fonction du contexte applicatif tout en prenant en compte la durée de vie souhaitée pour les capteurs. Il est possible de faire un choix parmi les composants disponibles sur le marché actuel ou comme [Ber16] qui propose un processeur spécifique aux réseaux de capteurs.

Au niveau de la communication radio, il faut que le microcontrôleur puisse communiquer avec le module. Deux configurations peuvent être envisagées :

1. Un émetteur externe qui communique avec le microcontrôleur en passant par un port entrée/sortie. Dans cette configuration, le module radio peut être alimenté par le PMIC ou directement par le microcontrôleur.
2. Le microcontrôleur intègre directement un module radio. Celui-ci sera alors alimenté par le microcontrôleur.

Il est alors nécessaire de détailler le fonctionnement de la radio principale.

L'émetteur radio

L'émetteur radio permet la communication sans fil entre le nœud et la passerelle. Comme expliqué précédemment, son alimentation peut être gérée de deux façons différentes selon le fait qu'il soit ou non intégré dans le microcontrôleur. La portée de communication et le débit possible sont dépendant de la technologie radiofréquence choisie. Nous avons expliqué puis donné des exemples de technologies utilisées dans les réseaux de capteurs dans la Section 1.1.3.2.

Ainsi, plus la fréquence est élevée, plus la portée est faible, mais avec un meilleur débit. Une plus haute fréquence et une meilleure portée s'accompagnent d'une consommation énergétique plus importante. Du fait que le module radio soit l'élément le plus énergivore de par les courants demandés lors des transmissions et des réceptions, le choix de la technologie est important lors du développement. Pour de longues portées avec de faibles débits, il est intéressant de se tourner vers des technologies LPWAN. Dans le contexte de bâtiments

connectés, il est préférable de retenir le Bluetooth qui permet des consommations limitées avec une portée allant jusqu'à plusieurs dizaines de mètres. Pour une portée similaire, le Wi-Fi est inintéressant de par sa consommation trop importante.

Ce choix implique également la sélection d'une topologie et du nombre maximum de capteurs dans le réseau. La Figure 1.6 de la Section 1.2.3 illustre les trois catégories de topologies. Pour rappel :

1. **Topologie en étoile** : les capteurs communiquent seulement avec la passerelle.
2. **Topologie en arbre** : les nœuds sont connectés et configurés comme les branches d'un arbre, avec des communications passant par des nœuds intermédiaires avant d'arriver à la passerelle.
3. **Topologie maillée** : tous les capteurs sont interconnectés.

L'utilisation d'un réseau en arbre ou maillé permet d'augmenter la portée du réseau en utilisant des capteurs intermédiaires (principe du *multi-hopping*). Mais en augmentant le nombre de communications, la consommation énergétique globale du réseau augmente. Ce compromis doit être fait en prenant en compte la zone de déploiement du réseau. Si un capteur est positionné trop loin pour pouvoir transmettre directement des données à la passerelle, l'utilisation du principe de multi-saut s'avère alors nécessaire.

Les capteurs

Un choix doit être fait pour les capteurs. Ils sont dépendants de l'application cible et de la consommation du module. Pour chaque capteur, le choix doit également être adapté aux différents ports du microcontrôleur. Si celui-ci ne possède pas de convertisseur Analogique/Numérique, il faudra exclusivement choisir des capteurs numériques.

Les trois éléments que nous venons de détailler sont communs avec la majorité des nœuds de capteur sans-fils. Dans notre proposition, ils sont associés à une radio de réveil.

La radio de réveil (Wake-up Radio)

Dans un contexte classique basé sur une technique de duty cycle, les problèmes de synchronisation entre un capteur et la passerelle peuvent accroître la consommation. C'est pour pallier à cette problématique que de nombreux travaux se focalisent sur des algorithmes de synchronisation entre les capteurs. [LC10] ou encore [Wan+19] plus récemment proposent des synthèses sur les propositions pour répondre à ce problème.

L'ajout d'une radio de réveil dans l'architecture comme illustré dans la Figure 2.3 permet une meilleure gestion des capteurs, et donc de leur énergie. Elle est utilisée afin de solliciter un nœud seulement lorsque cela s'avère nécessaire. Son utilisation réduit fortement les problèmes de synchronisation entre capteurs et la passerelle. Comme indiqué dans la Section 1.2.1, lorsque qu'une transmission ou une réception est demandée à un capteur, la passerelle envoie un signal de réveil. Ce signal, qui contient une commande, permet dans un premier temps de sortir le système d'un mode de sommeil ou d'un mode éteint. Ensuite, la commande qu'il contient demande au nœud de capteur d'exécuter des tâches spécifiques.

Pour une communication de la passerelle vers le capteur, une première commande est envoyée via la radio de réveil. Le capteur se réveille et se met en écoute avec la radio

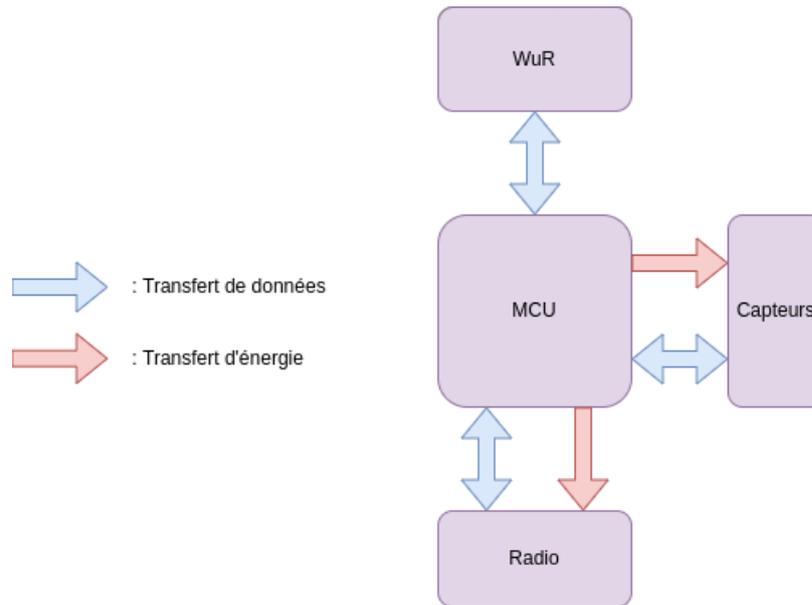


FIGURE 2.3 – Architecture de nœuds intégrant un module de radio de réveil.

principale. Cette coordination diminue la consommation en réduisant les problèmes de synchronisation.

Ainsi, le module radio basse consommation permet d'avoir une période de réveil variable. Le capteur ne transmet pas des données à une fréquence prédéfinie. Une sollicitation provenant de la passerelle est réalisée si la ou les grandeurs mesurées doivent être mises à jour.

Les radios de réveil sont divisées en deux systèmes d'adressage :

1. **ID-Based** : le signal de réveil contient une séquence de bits qui correspond à l'identité d'un nœud capteur. Une fois reçue, la séquence est décodée et le microcontrôleur est réveillé.
2. **Broadcast** : le signal de réveil ne contient aucune adresse de nœud de capteur. Lorsqu'il est envoyé par la passerelle, tous les nœuds capteurs qui reçoivent le signal sont réveillés. Dans ce cas, la consommation globale du réseau augmente.

Dans notre proposition, nous faisons le choix d'avoir une radio de réveil intégrant le principe de *ID-Based* afin de limiter au maximum la consommation des nœuds capteurs.

Concernant la communication radio avec la passerelle, nous utilisons une fréquence dédiée pour la radio de réveil. Cela diminue les probabilités d'avoir des interférences, et donc la perte de paquets.

Pour son alimentation énergétique, la radio de réveil est alimentée directement par la batterie, afin d'être constamment en écoute pour ne pas manquer les demandes de réveil provenant de la passerelle.

Afin de garantir le fonctionnement du capteur, une gestion adéquate de l'énergie est nécessaire. Les modules qui permettent cela sont décrits par la suite.

2.1.1.2 Gestion de l'énergie

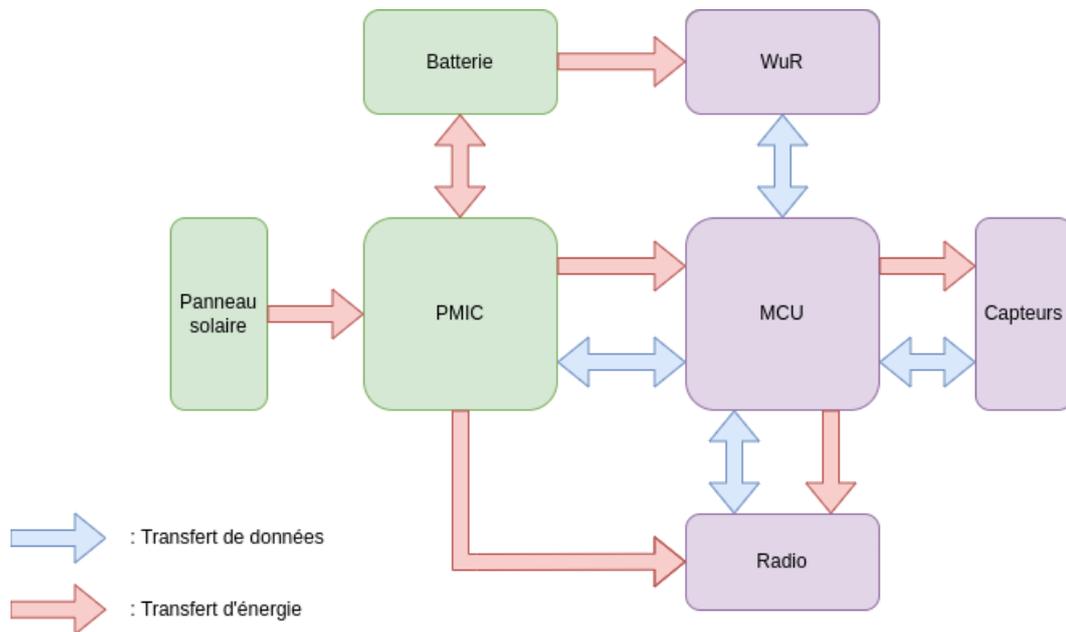


FIGURE 2.4 – Modèle architectural global du nœud de capteur.

Récupération d'énergie

Comme précisé plus tôt, nous avons fait le choix du photovoltaïque parmi les différents types d'énergie disponibles. Sa capacité à générer de l'énergie grâce à la lumière en fait une solution appropriée dans toute zone éclairée. L'efficacité d'un panneau solaire est définie par sa capacité à transformer l'énergie en entrée en une énergie exploitable. C'est le rapport entre l'énergie en sortie et l'énergie en entrée de la cellule photovoltaïque. La taille du panneau utilisé a un impact direct sur la quantité d'énergie produite. Plus le panneau est grand, plus l'énergie fournie sera élevée. Néanmoins, il implique également une limite sur la taille du capteur : il ne pourra être plus petit que le panneau photovoltaïque utilisé. L'énergie récoltée peut être exprimée à l'aide de l'équation suivante :

$$E_{\text{récolté}} = \text{Surface} \times E_{\text{entrée}} \times \text{Efficacité} \quad (2.1)$$

Ici, $E_{\text{entrée}}$ représente l'énergie lumineuse arrivant sur le panneau solaire. L'énergie fournie par le solaire doit être adaptée afin d'être utilisée par le reste du système. Pour cela, un PMIC (Power Manager Integrated Circuit) permet la conversion. Il utilise des convertisseurs de tension continue vers tension continue comme des régulateurs *Low DropOut* (LDO) ou des régulateurs *BOOST*.

Conversion et contrôle de l'énergie

Les PMIC peuvent être catégorisés en deux groupes : les convertisseurs mono-voies et doubles voies. Pour un mono-voie, l'énergie générée sert soit à alimenter directement le système, soit à être envoyée vers la batterie. Il lui est impossible de faire les deux en même temps. En revanche, les PMIC double voies ont le fonctionnement suivant :

1. Lorsque le panneau photovoltaïque fournit suffisamment d'énergie, le PMIC alimente directement le système tout en stockant le surplus dans la batterie pour une utilisation ultérieure ;
2. Lorsque le panneau photovoltaïque ne fournit pas suffisamment d'énergie, cette dernière est stockée au préalable. L'énergie est complétée par celle disponible dans la batterie pour alimenter le système ;
3. Lorsqu'aucune énergie n'est produite par le panneau photovoltaïque, le PMIC utilise l'énergie stockée dans la batterie pour alimenter le système.

Ces différents modes de fonctionnement permettent de faire face aux différentes situations d'éclairage dans lesquelles peut être positionné le capteur. Durant une période de fort éclairage, le nœud capteur sera capable de fonctionner tout en emmagasinant de l'énergie. Cette dernière servira alors à maintenir le fonctionnement du système durant des périodes de faible éclairage. Cependant, si la période de faible éclairage perdure, la durée de vie de fonctionnement du capteur sera limitée par la capacité de la batterie. Cette durée de vie correspond à la durée de vie minimale du capteur.

Une autre caractéristique essentielle du composant PMIC est sa capacité à activer ou non l'alimentation d'un nœud de capteur. Cette fonction associée à une radio permet de remplacer les périodes de sommeil du nœud capteur par des périodes *off* durant lesquelles l'alimentation est désactivée. Cette spécificité est intéressante dans des situations où l'énergie nécessaire pour allumer le microcontrôleur est inférieure à celle consommée durant une période en état de sommeil :

$$E_{\text{réveil}_{\text{mcu}}} < E_{\text{sommeil}} \quad (2.2)$$

Avec :

$$E_{\text{sommeil}} = V \times I \times T_{\text{sommeil}} \quad (2.3)$$

V représente la tension d'alimentation du système, I le courant consommé et T_{sommeil} la durée de la période de sommeil.

Lorsque le microcontrôleur est éteint et que la radio de réveil reçoit un ordre de réveil, alors cette dernière peut envoyer une commande au PMIC afin d'allumer le nœud capteur. Une fois que toutes les tâches sont réalisées, le microcontrôleur peut renvoyer une commande afin que le PMIC stoppe l'alimentation du microcontrôleur.

Le dernier élément est la batterie, qui permet au PMIC de stocker l'énergie provenant du panneau solaire.

Stockage d'énergie

Comme observé dans la Figure 2.4, notre architecture intègre une batterie. Tel que mentionné dans la Section 1.2.2 ou encore dans [HS17], certains travaux proposent d'utiliser des capteurs avec de la récolte d'énergie, mais sans batterie. Néanmoins, lorsqu'aucune énergie n'est collectée, le nœud ne fonctionne pas. Dans de mauvaises conditions, et au vu de notre définition de la qualité de service, l'énergie disponible pourrait rapidement s'effondrer et devenir nulle. Un système sans batterie est donc incompatible avec notre

cahier des charges qui implique une qualité de service élevée associée à une importante durée de vie.

Aussi, pour pallier aux périodes de faible éclairage, la batterie doit permettre un fonctionnement autonome de plusieurs jours du système. Ainsi, le capteur peut continuer à fonctionner en attendant une nouvelle collecte d'énergie. En pratique, plus la capacité de la batterie est importante, plus la durée de vie du capteur sera élevée. Mais cela augmente la taille et le prix de l'architecture du nœud capteur. Néanmoins, l'autodécharge (environ 1%/mois pour des li-ions) de la batterie implique l'incapacité de cette dernière à sauvegarder indéfiniment de l'énergie. Il y a donc un compromis à réaliser entre l'architecture du capteur, sa taille et le coût financier. Par ailleurs, dans notre contexte d'usage, la batterie doit être capable d'alimenter constamment la radio de réveil. En effet, il est nécessaire pour que la radio soit active en phase d'écoute et pour pouvoir réagir lors d'une demande de réveil qui provient de la passerelle.

Nous pouvons également remarquer que dans le schéma de la Figure 2.4, le module radio peut être alimenté par le microcontrôleur ou directement par le PMIC. Comme détaillé dans la Section 1.1.3.2, selon la technologie de transmission radio utilisée, le courant consommé est plus ou moins important. Sa valeur peut atteindre jusqu'à 125mA pour la technologie LORA. Cela signifie que le microcontrôleur doit être en mesure de fournir des valeurs de courants élevées lorsque cela est nécessaire.

Maintenant que les différents éléments qui composent notre architecture matérielle sont définis, l'architecture du nœud capteur doit être associée à une couche logicielle adaptée afin de pouvoir gérer l'hétérogénéité et le dimensionnement.

2.1.2 Architecture logicielle

Afin d'obtenir les meilleures performances avec une faible consommation, il est préférable de développer la couche applicative directement sur l'architecture matérielle. Nous parlons alors de programmation bare métal en anglais. Dans ce contexte, les instructions du microcontrôleur sont exécutées sans passer par un système d'exploitation comme précisé dans la Section 1.1.3.1. Les ressources matérielles sont utilisées plus efficacement en évitant des couches intermédiaires tel qu'un système d'exploitation. Toutefois, une forte augmentation de la difficulté et du temps de développement accompagne cette approche. En effet, une connaissance approfondie du fonctionnement du microcontrôleur est indispensable pour atteindre les meilleurs temps d'exécution avec la plus faible consommation. Les applications développées en bare métal pour un microcontrôleur spécifique doivent être modifiées, et parfois totalement réécrites s'il s'avère nécessaire de changer de microcontrôleur. Les temps et les coûts sont alors décuplés lorsque nous souhaitons déployer un réseau de capteurs hétérogènes.

Du coup, il est plus rapide et plus simple de programmer une architecture à jeu d'instructions complexe en utilisant un système d'exploitation. Or, il existe des systèmes d'exploitation adaptés au domaine des réseaux de capteurs comme le montre [Yaq+19]. Une sélection de systèmes d'exploitation est analysée en tenant compte des points positifs et négatifs. Nous pouvons ainsi développer une application pour un MCU spécifique, puis la déployer sur un autre microcontrôleur avec un minimum de modifications. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé d'utiliser un système d'exploitation pour le déploiement de

notre réseau de capteurs.

2.1.3 Conclusion

Le déploiement d'un réseau de capteurs implique une phase préalable de définition de l'architecture des nœuds du réseau et de spécification précise des fonctions envisagées. Pour cela, un choix de composants doit être fait pour chacune des fonctionnalités. Malgré les caractéristiques données par les fabricants, il peut être difficile de prévoir correctement la durée de vie d'un nœud de capteur composé d'éléments de divers fabricants. La définition d'un modèle de consommation est une contribution indispensable pour un dimensionnement pertinent d'un réseau de capteurs avant déploiement.

2.2 Estimation de la durée de vie

La deuxième partie de ce chapitre a pour objectif de présenter un modèle mathématique analytique qui permet de réaliser une estimation de la durée de vie d'un nœud capteur. Si le résultat obtenu est satisfaisant vis-à-vis de l'application et de son cahier des charges, alors un déploiement peut être envisagé. Si ce n'est pas le cas, alors une remise en cause des choix des composants ou du cahier des charges s'avère nécessaire.

Afin de simplifier ce modèle analytique, nous faisons les hypothèses suivantes :

1. Le module radio principal et la radio de réveil n'utilisent pas les mêmes fréquences. Cela permet d'éviter de potentielles interférences.
2. La radio de réveil fonctionne suivant le principe *ID-Based*. Seul le nœud de capteur destinataire est réveillé lorsqu'un signal de réveil est envoyé par la passerelle.
3. Nous voulons que la topologie du réseau et que le protocole de routage n'impactent pas significativement la consommation d'énergie. Nous utilisons alors une topologie en étoile. Cela signifie que chaque nœud de capteur communique directement avec la passerelle.
4. Les interférences radio et les pertes de paquets pendant les communications ne sont pas prises en considération.

Afin de prendre en compte la variabilité de la récupération d'énergie photovoltaïque, le modèle analytique est composé de deux parties distinctes :

1. Une première partie permet d'estimer la durée de vie maximale du capteur dans le pire des cas (cas pessimiste) à savoir si aucune énergie n'est récupérée.
2. La seconde partie estime la durée de vie du capteur si de l'énergie est récupérée.

2.2.1 Modèle proposé

L'utilisation d'une topologie en étoile interdit l'utilisation de nœuds intermédiaires ce qui élimine une éventuelle surconsommation lors d'une transmission radio. Cela implique également que chaque signal de réveil soit envoyé par la passerelle. Un nœud capteur ne peut alors pas réveiller un autre nœud capteur. Selon la taille d'un bâtiment, une passerelle peut gérer une partie ou la totalité du réseau. Lorsqu'un capteur spécifique doit être réveillé, le signal envoyé contient son adresse et un code correspondant à une tâche spécifique. Ce

paquet envoyé est reçu par toutes les radios de réveil afin d'être traité et d'évaluer s'il lui est destiné. Si oui, le microcontrôleur du nœud associé est réveillé.

Scénario pessimiste

Dans notre configuration comprenant une radio de réveil, la fréquence de réveil d'un capteur dépend de l'application et de la fréquence des mesures. Comme expliqué précédemment, une première modélisation permet d'estimer la durée de vie en l'absence de récupération d'énergie et pour une fréquence de fonctionnement élevée.

Définissons alors T_{\min} le temps minimal autorisé entre deux réveils. Même dans le pire scénario, la passerelle ne peut réveiller un capteur plus d'une fois par période T_{\min} . Nous pouvons alors associer cette configuration à un fonctionnement en duty-cycle avec une période de T_{\min} . En conséquence, en se référant à la Figure 2.1, la consommation énergétique d'un capteur réveillé peut être exprimée comme suit :

$$E_N = E_{S_{ys}} + E_{Acq} + E_{Trait} + E_{Tx} + E_{WuB,Rx} \quad (2.4)$$

$E_{S_{ys}}$ est la consommation de base du système lorsqu'il est en mode *idle*. Sa valeur dépend des spécifications du microcontrôleur utilisé ainsi que de l'efficacité de la partie logicielle implémentée. Lorsqu'une mesure est réalisée, le nombre d'acquisitions et le capteur utilisé impliquent une consommation appelée E_{Acq} . Une étape ayant pour consommation énergétique (E_{Trait}) permet de préparer les données et d'exécuter localement des algorithmes avant la transmission. Enfin, les données sont transmises avec une consommation d'une valeur de E_{Tx} . Concernant la radio de réveil, $E_{WuB,Rx}$ est l'énergie consommée afin de recevoir et de traiter un signal de réveil entrant.

Lorsque le nœud a exécuté l'ensemble des tâches, il passe en mode basse-consommation (sommeil). Il attend alors la prochaine demande de réveil. Ainsi l'Equation 2.4 a pour expression finale :

$$E_N = E_{S_{ys}} + E_{Acq} + E_{Trait} + E_{Tx} + E_{WuB,Rx} + E_{Sleep} \quad (2.5)$$

Lorsque le microcontrôleur est en mode *sleep*, une énergie E_{Sleep} est consommée. Comme expliqué dans la Section 2.1.1.2, l'alimentation du microcontrôleur est stoppée si le PMIC le permet. Dans ce cas, l'énergie consommée entre deux réveils est réduite à la consommation de la radio de réveil qui permet d'atteindre un signal provenant de la passerelle. Cette énergie est incluse dans $E_{WuB,Rx}$, ce qui permet d'aboutir à $E_{Sleep} = 0$. Nous obtenons ainsi un modèle représentant le pire scénario d'usage pour nos nœuds capteurs.

Configuration complète

A partir de l'Equation 2.5 nous pouvons estimer la consommation énergétique d'un nœud de capteur comprenant une structure de récupération d'énergie. Nous exprimons

l'énergie utilisée par le PMIC par $E_{\text{Harvested}}$. Cela permet d'aboutir à l'expression en :

$$E_N = E_{\text{Sys}} + E_{\text{Acq}} + E_{\text{Trait}} + E_{\text{Tx}} + E_{\text{WuB,Rx}} + E_{\text{Sleep}} - E_{\text{Harvested}} \quad (2.6)$$

$E_{\text{Harvested}}$ doit être calculé pour sa prise en compte dans l'Equation 2.6. Pour cela, l'énergie récupérée par le panneau photovoltaïque doit être estimée. De par la volonté d'hétérogénéité de notre contexte d'usage, nous distinguons des déploiements intérieurs et extérieurs pour les nœuds de capteur constituant notre réseau.

2.2.2 Déploiement intérieur

Pour le déploiement à l'intérieur d'un bâtiment, il est possible d'estimer l'énergie pouvant être récupérée à l'aide de deux méthodes différentes :

1. De façon théorique, nous pouvons estimer l'énergie arrivant au niveau du panneau photovoltaïque. Il faut pour cela prendre en considération les sources naturelles (rayonnements solaires directs et indirects) provenant le plus souvent des fenêtres les plus proches, ainsi que les sources artificielles (les différents éclairages intérieurs proches du nœud). Selon le positionnement de chaque capteur, ces deux composantes énergétiques varient. Cela est d'autant plus vrai que le système déployé est mis dans une pièce sans fenêtre ou orienté de façon non optimale.
2. De façon expérimentale, des mesures de luminosité peuvent être réalisées préalablement au déploiement dans les différents lieux pendant une durée fixe. Une extrapolation de l'énergie potentiellement récupérable peut ensuite être faite.

En raison de l'hétérogénéité des différentes salles d'un bâtiment, il est difficile de réaliser des estimations pour chaque cas d'usage. Afin de simplifier cette étape, nous considérons que les capteurs sont déployés, dans un premier temps, proches (quelques dizaines de centimètres) des éclairages. Ainsi, en approximant l'énergie émise, la distance maximale vis-à-vis de la source de lumière et le temps moyen d'éclairage, il est possible d'obtenir une estimation relativement fiable de l'énergie récupérable.

2.2.3 Déploiement extérieur

Pour un déploiement en extérieur, il est d'abord possible d'utiliser des estimations fournies par des institutions publiques. C'est le cas du *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* de la Commission Européenne [Eur]. Cette base de données est obtenue en utilisant des mesures provenant de satellites afin d'estimer le rayonnement solaire pour différentes zones géographiques à la surface terrestre. Elle est utilisée pour faciliter le déploiement de panneaux photovoltaïques pour la production d'électricité.

Il est également possible d'estimer le rayonnement solaire futur en utilisant des données réelles obtenues durant les années précédentes. Cela est possible si nous considérons que le rayonnement moyen sur une période spécifique est similaire d'une année à l'autre. Une telle base de données peut être créée spécifiquement pour un déploiement de capteurs, mais doit être renseignée au minimum sur une période de 12 mois. Par ailleurs, il existe des bases de données de radiation mesurées pour différentes zones géographiques. C'est le cas de la base

de données produite par le réseau *World Radiation Monitoring Center-Baseline Surface Radiation Network* (WRMC-BSRN) [Dri+18]. Le réseau WRMC-BSRN est un réseau mondial de recherche sur le climat initié en 1992. Il est géré actuellement par l’Institut Alfred Wegener pour la recherche polaire et marine [AWI]. Ce réseau est constitué de différents laboratoires. Il publie des mesures, comprenant notamment le rayonnement solaire. Il est alors possible d’utiliser les données provenant de la station du réseau la plus proche du lieu de déploiement.

2.2.4 Conclusion

Le modèle de consommation décrit dans cette section peut être associé à l’architecture matérielle décrite dans la section 2.1. Cette association a pour but de permettre le dimensionnement d’un réseau de capteurs autonomes ayant une durée de vie de plusieurs années. Avoir une vision sur la longévité des capteurs permet d’adapter avant déploiement le choix des composants ou le protocole applicatif à retenir. La section suivante décrit un ensemble d’expérimentations qui ont été menées afin de valider la précision du modèle d’estimation de durée de vie, l’intérêt de l’architecture présentée et son hétérogénéité.

2.3 Expérimentations et Validation

Cette section présente deux types distincts d’expérimentation afin de valider les propositions précédentes. Le premier nous permet de comparer la fiabilité du modèle de consommation à la durée de vie d’un capteur déployé en milieu réel. Le second permet de s’assurer de l’hétérogénéité de l’architecture proposée pour une sélection de capteurs, mais avec des composants différents pour l’architecture des nœuds. Nous verrons également l’apport d’une telle architecture par comparaison avec celle d’un réseau de capteurs qui a été préalablement déployé dans un bâtiment du campus de Bordeaux.

2.3.1 Estimation de la durée de vie

Afin de valider notre estimation de durée de vie, nous avons déployé un capteur en intérieur puis en extérieur. Cela a permis de comparer les mesures effectuées avec des simulations issues du modèle de consommation. Un choix de composants a dû être fait pour réaliser ce travail. À ce sujet, le choix de composants discrets nous permet de montrer l’évolution de notre proposition par un simple remplacement d’un composant parmi ceux constituant l’architecture du nœud de capteur.

Composants utilisés

Nous avons utilisé les composants discrets listés dans le Tableau 2.1. Il s’agit de produits disponibles pour le grand public. L’émetteur radio est un module BLE 5.2 intégré dans le microcontrôleur nrf25840 de Nordic Semiconductor. Une carte Raspberry Pi 3 est utilisée afin de simuler le fonctionnement et la consommation d’une radio de réveil. Il s’agit d’une fonctionnalité encore récente qui est difficile à trouver sur le marché. La partie logicielle est réalisée à l’aide de Zephyr OS [Pro]. Elle sera décrite plus en détail dans le du Chapitre 4. Afin de se rapprocher au plus près des consommations réelles, nous les avons mesurées à l’aide d’un *Joulescope* de Jetperch [Jeta]. Comme précisé précédemment, dans le cas d’une

Tableau 2.1 – Composants matériels du nœud de capteur expérimental

Composants	Référence
Panneau solaire	IXYS SLMD121H10L
Batterie	190mAh 3.7V Li-Po
PMIC	E-PEAS AEM10941
MCU	Nordic Semi nrf52840
Émetteur radio	Nordic Semi nrf52840
Capteurs	BOSCH BME280
Radio de réveil	Raspberry PI 3

impossibilité de mesures suffisamment fines, il serait aussi possible d'utiliser les valeurs fournies par les fabricants.

Nous obtenons les consommations suivantes : $0.15 \mu\text{J}/\text{ms}$ pour E_{SYS} , $43 \mu\text{J}$ pour E_{ACQ} et $158 \mu\text{J}$ pour E_{TX} . E_{Trait} dépend de l'application retenue. Dans notre cas, une simple accumulation est réalisée. Cette énergie est négligeable vis-à-vis de l'énergie de E_{SYS} . La consommation énergétique pour la mise en forme des données avant une transmission est incluse dans E_{TX} .

Une fois les différents niveaux d'énergie mesurés, un scénario d'usage doit être défini pour l'estimation de la durée de vie du nœud de capteur.

Scénario d'expérimentation

Le scénario suivant a été choisi et utilisé pour le déploiement de ce nœud de capteur test :

1. Le nœud de capteur se réveille toutes les 10 minutes. Cette période de réveil est en adéquation avec les variations lentes que nous pouvons attendre des grandeurs telles que la température ou la pression. Une période plus élevée permet une meilleure durée de vie, mais également un suivi moins précis des grandeurs.
2. Une fois réveillé, le microcontrôleur initialise les capteurs et réalise des mesures de température, de pression et d'humidité.
3. La radio est initialisée avant de transmettre des données en utilisant le BLE 5.2 en mode *Broadcast*. Celui-ci permet de transmettre les données sans connexion et sans attendre une validation de réception au niveau de la passerelle. Un paquet de données est envoyé toutes les 65 millisecondes pendant 1 seconde. Cette configuration permet de prendre en considération un usage où le capteur envoie un grand nombre de paquets vers la passerelle. La période de transmission des paquets a été fixée à cette valeur en raison de l'impossibilité du système d'exploitation à traiter des périodes plus courtes.
4. Une fois terminé, le système reste en mode *idle* jusqu'à ce que le temps total de réveil atteigne 3 minutes. Nous surévaluons ici les moments d'inactivités, afin d'intégrer tout problème éventuel lors du fonctionnement du capteur qui pourrait entraîner une surconsommation. Le microcontrôleur s'éteint alors et le PMIC désactive son alimentation.

Tableau 2.2 – Estimation de la durée de vie d'un nœud de capteur

Période de réveil (minutes)	Durée de fonctionnement (Jours)		
	Sans récupération	Avec récupération (5 sec)	Avec récupération (1 sec)
5	28	42	182
10	49	118	∞
15	66	288	∞
20	79	1039	∞
25	90	∞	∞

5. Enfin, la passerelle attend 7 minutes supplémentaires avant de réveiller le nœud de capteur une nouvelle fois.

Les composants et le modèle applicatif maintenant choisis, nous pouvons réaliser une projection de la durée de vie du capteur.

Estimation de la durée de vie

Pour réaliser cette estimation, le modèle a été implémenté en utilisant Python 3.7. Il sera détaillé dans le Chapitre 4. Il permet dans un premier temps d'obtenir la durée de vie minimale (pessimiste) du capteur avec une période de réveil T_{\min} fixe. Il s'agit d'un paramètre dont la valeur dépend du cas d'usage. Une valeur de 10 minutes pour T_{\min} a été retenue pour une comparaison lors des expérimentations. Concernant l'estimation de la récupération d'énergie, deux sources de données ont été utilisées.

Pour les nœuds extérieurs, nous avons utilisé des données de radiation mesurées par la station de l'Observatoire SIRTÀ [SIR] à Palaiseau et disponible dans la base de données WRMC-BSRN. Étant la plus proche de Bordeaux, elle a été choisie pour nous permettre d'avoir une estimation de l'énergie pouvant être récupérée par des capteurs positionnés en extérieur.

Pour les nœuds capteurs positionnés en intérieur, l'expérimentation a été faite en utilisant des luminaires du Laboratoire IMS au sein de l'Université de Bordeaux. Ce sont des tubes fluorescents Philips de référence TL-D 58W/827 avec une sortie annoncée de 5240 lumens par le fabricant. La pièce de déploiement étant un bureau de travail, nous avons considéré une moyenne d'occupation, donc d'éclairage, de 7 heures par jour pendant 5 jours par semaine.

Le Tableau 2.2 récapitule nos estimations de durée de vie pour différentes périodes de réveil. Pour ces estimations, nous considérons la durée de vie comme étant le temps entre le déploiement et le premier arrêt de fonctionnement du capteur. Comme nous pouvons le constater, une période de réveil plus importante permet de prolonger la durée de vie. Nous passons de 28 jours pour une période de 5 minutes à 90 jours pour une période de réveil de 25 minutes dans le cas d'un capteur sans récupération d'énergie. La durée de fonctionnement n'est pas proportionnelle à la période de réveil choisie. Multipliée par cinq, cette période n'augmente la durée de vie que d'un facteur trois. Cela s'explique par le fait

que de l'énergie est constamment utilisée par le l'architecture même en mode sommeil.

Deux estimations complémentaires ont été réalisées en prenant en compte l'ajout d'énergie : une première avec 5 secondes de transmission et une seconde en considérant 1 seconde de transmission comme pour les expérimentations. Dans le premier cas d'usage, nous pouvons constater que la durée de vie est prolongée grâce à la récupération d'énergie. Cette récupération est donc associée à un PMIC, qui nous permet d'avoir une consommation nulle pendant les périodes de sommeil, et d'un pic de consommation lors des phases de réveil. Cette organisation permet d'avoir une augmentation de la durée de vie plus élevée lorsque la durée des sommeils est plus importante. Nous obtenons un fonctionnement que nous pouvons qualifier d'autonome à partir d'une période de réveil de 25 minutes. Enfin, si la durée de transmission est restreinte à 1 seconde, la consommation du système diminue significativement. Nous obtenons alors un nœud capteur autonome à partir d'une période de fonctionnement de 10 minutes.

Afin de valider les estimations obtenues par notre modèle, le capteur a été déployé avec un système de suivi des tensions caractéristiques du système.

Déploiement d'un capteur pour l'étude de la durée de vie

Nous avons déployé un nœud de capteur complet sans récupération d'énergie dans un premier temps. Sa position physique n'a pas d'impact sur son fonctionnement. En effet, il est indépendant énergétiquement grâce à la présence d'une batterie. Le capteur a été fonctionnel pendant 28.134 jours avec une fréquence de réveil de 5 minutes. Pour une estimation de 28 jours, nous avons une différence de 1.44% entre la simulation et l'expérimentation. Cela permet de valider la pertinence du modèle proposé. Si cinq années de fonctionnement sont considérées alors cette différence engendrerait une erreur de 26.28 jours, ce qui nous paraît acceptable pour une telle projection.

Concernant la récupération d'énergie avec la radio de réveil, les temporalités étant fortement élevées, il est difficile d'obtenir une comparaison fine et exacte entre simulation et expérimentation. Mais déployé en intérieur, le capteur complet a été positionné spécifiquement à proximité d'un éclairage. À vingt centimètres de celui-ci, les panneaux photovoltaïques permettent de récupérer le maximum de l'énergie nécessaire.

La Figure 2.5 récapitule les tensions, de la batterie, du panneau solaire et du capteur de luminosité pour une durée de dix jours. Lorsque la tension des panneaux solaires est nulle, il n'y a pas de récupération d'énergie. Nous pouvons observer la corrélation entre les grandeurs : lorsque la luminosité est non nulle, le panneau solaire a une tension d'environ 3.6 volts et il fournit de l'énergie au système. Pendant les phases d'éclairage, la tension de la batterie augmente. Cela signifie que l'énergie récupérée permet d'alimenter le système tout en rechargeant la batterie. Sa tension diminue lors des phases de non-éclairage, mais cette perte est rapidement compensée par le jour suivant. Durant les jours 5 et 6, la tension baisse fortement de par le manque d'éclairage. Ces deux jours correspondent à un week-end, donc pas d'éclairage artificiel. Malgré ces variations, une tendance à la hausse de la tension de la batterie est observée. Cela signifie que de l'énergie est récupérée en surplus par le système de récupération. Nous avons donc une adéquation avec la simulation prévoyant une autonomie dans cette configuration.

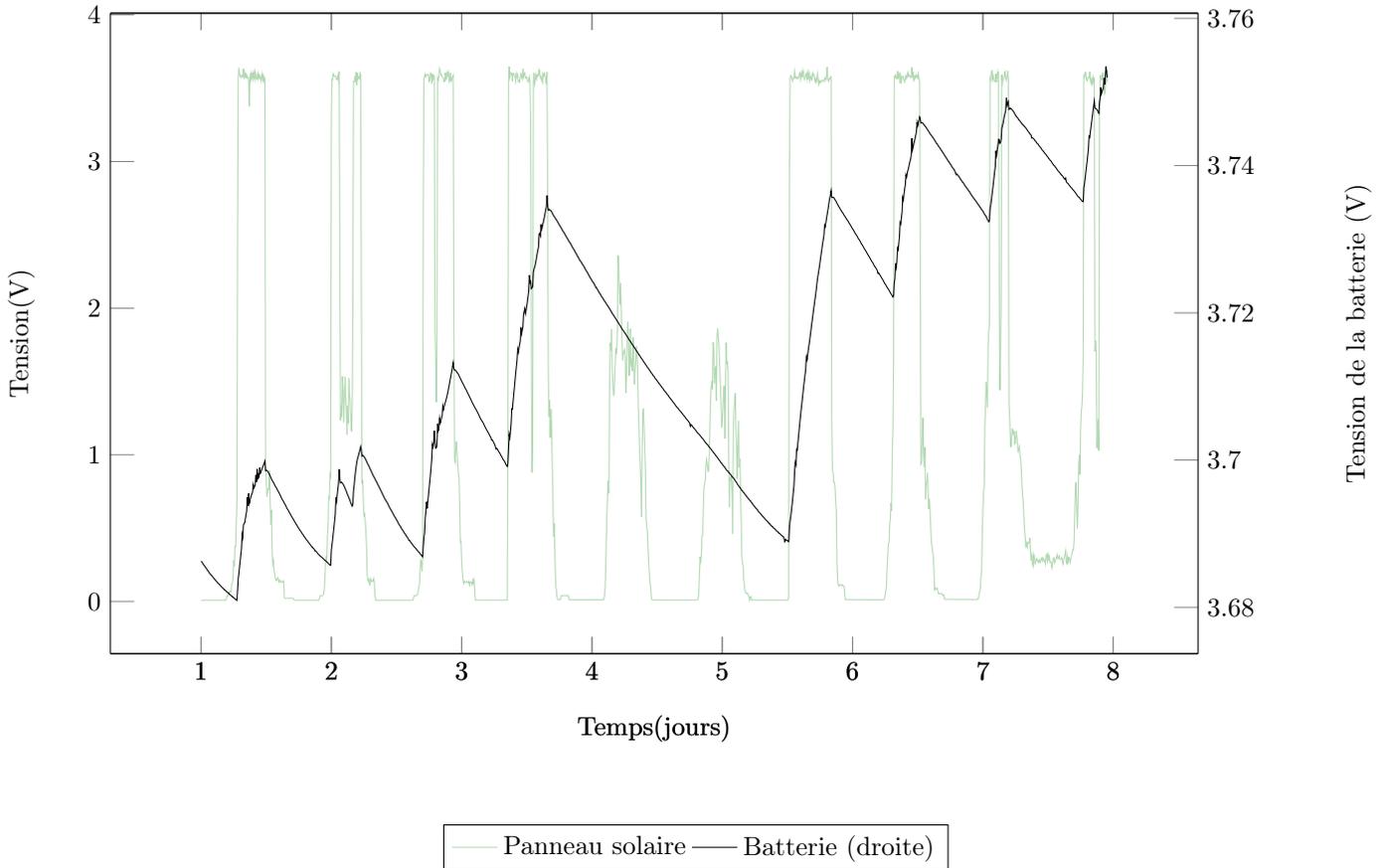


FIGURE 2.5 – Capteur déployé en intérieur pendant 10 jours.

Le déploiement en extérieur illustré par la Figure 2.6 a, quant à lui, été effectué durant 15 jours. Nous pouvons constater que, la tension du panneau est rarement proche de zéro. L'éclairage extérieur nocturne du bâtiment explique ce phénomène. Cette source lumineuse constante, que ce soit le soleil en journée et l'éclairage la nuit, permet une recharge constante de la batterie. Les fluctuations de la tension de la batterie se situent entre 4.08 volts et 4.2 volts, soit le maximum possible. Là encore, la prédiction de l'autonomie est confirmée en extrapolant ces courbes.

Il faut néanmoins prendre en considération le fait que nous sommes dans des cas d'usage connu et caractérisé. L'hétérogénéité d'un bâtiment peut impliquer des variations significatives sur l'énergie pouvant être récupérée. Néanmoins en supposant qu'en intérieur les différents éclairages d'un bâtiment soient similaires alors, nous pouvons atteindre une durée de vie satisfaisante à condition que les capteurs soient proches des sources de lumière artificielle.

Les expérimentations précédentes ont été réalisées à l'aide de composants discrets disponibles pour le grand public. Comparons maintenant l'efficacité de ce capteur expérimental avec ceux d'un réseau existant. Pour ce faire, nous avons appliqué notre modèle à l'existant.

2.3.2 Comparaison avec des capteurs déployés

Au sein du bâtiment de Bordeaux INP [Jetb], un projet de réseau de capteurs SC² utilisant la technologie LoRa pour une trentaine de nœuds a été déployée depuis plusieurs

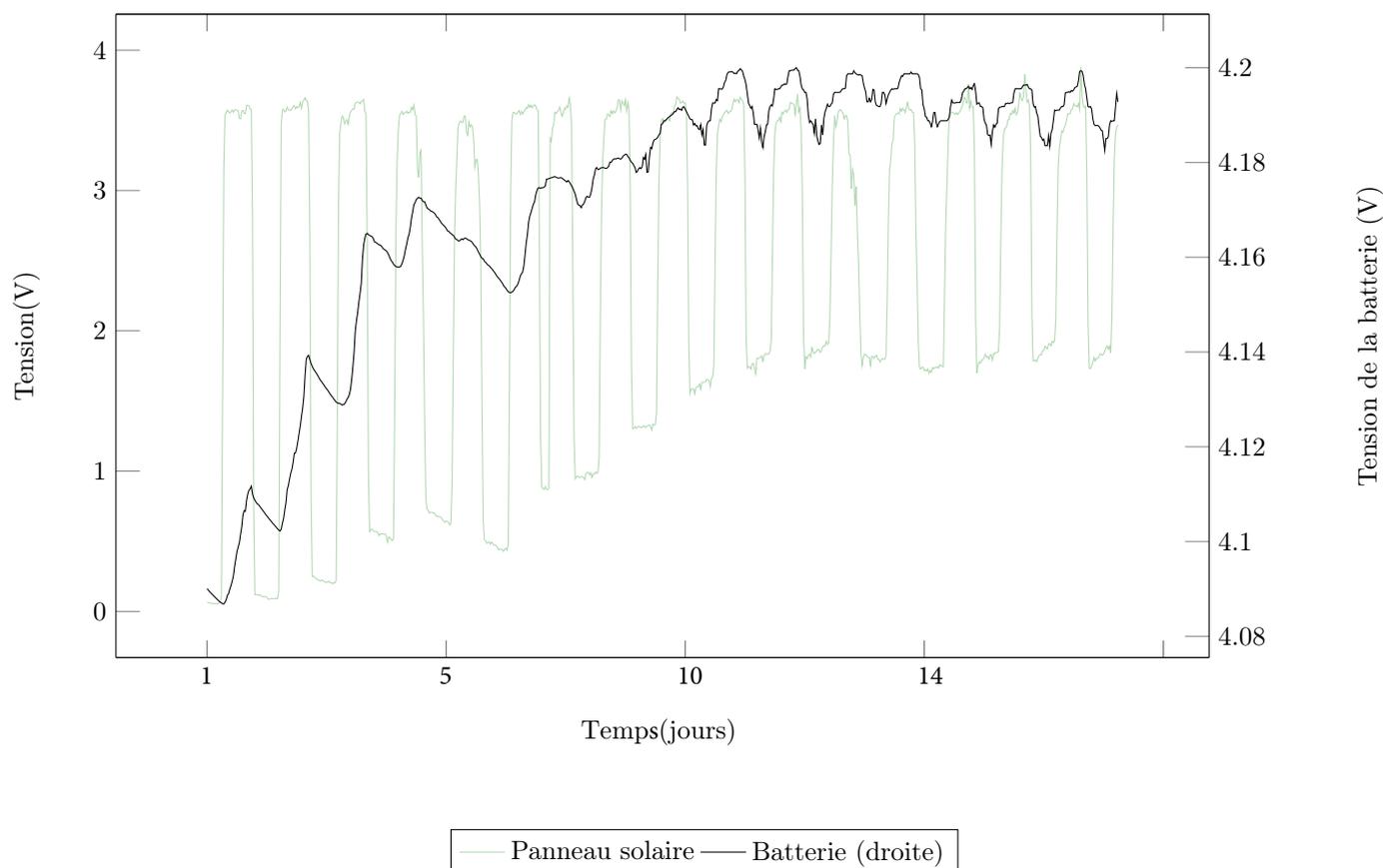


FIGURE 2.6 – Capteur déployé en extérieur pendant 15 jours.

mois.

Son usage (données mesurées) est identique à celui considéré dans les travaux de cette thèse : suivi de la température, de l'humidité et de la pression. La première version des nœuds est basé sur la carte grand public Arduino MKWAN1300 [Ard] intégrant la technologie radio LoRa. Le module DHT22 est utilisé pour la mesure des données.

Avec de tels composants, ces nœuds ont une durée de vie inférieure à une journée avec une période de réveil de 10 minutes et une batterie de 190 mAh. C'est pour cette raison que les nœuds de ce réseau sont constamment alimentés par des prises électriques.

Une seconde version a été réalisée. Elle est basée sur une carte comme présentée dans la Figure 2.7. Elle utilise un microcontrôleur STM32L de STmicroélectronique, un capteur similaire et un module LoRa pour les communications.

Il est à noter que cette seconde version de capteurs a été déployée en considérant la disponibilité de prises électriques.

Afin de valider l'hétérogénéité de notre système, nous avons utilisé cette carte pour un second type d'expérimentations. Nous y avons intégré une wake-up radio ainsi que le système de récupération d'énergie que nous proposons. Cette version a été déployée en même temps et au même endroit que notre nœud capteur expérimental. Afin d'avoir un éclairage similaire, les panneaux photovoltaïques de ces deux systèmes ont été positionnés comme montré dans la Figure 2.8.

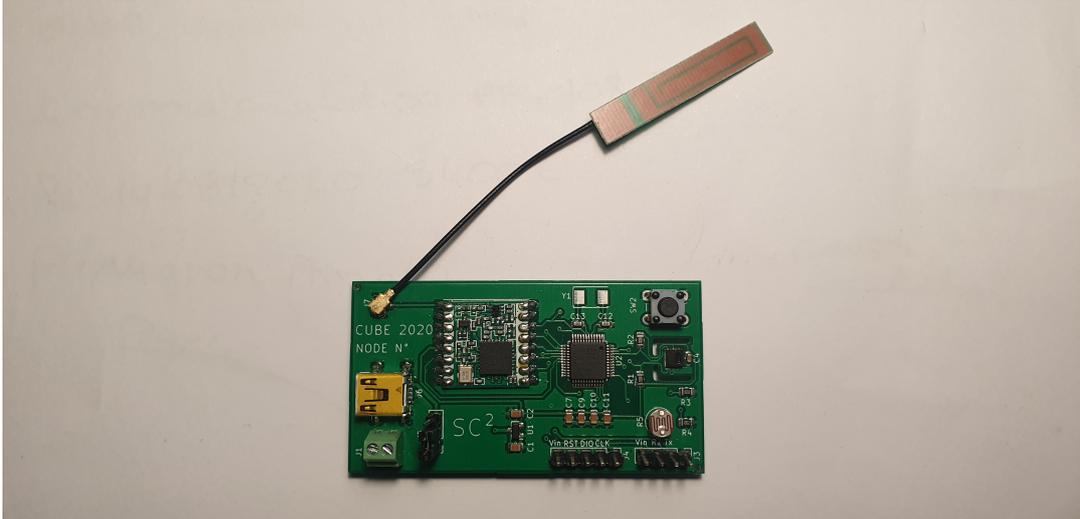


FIGURE 2.7 – Nœud capteur déployé au sein de Bordeaux INP

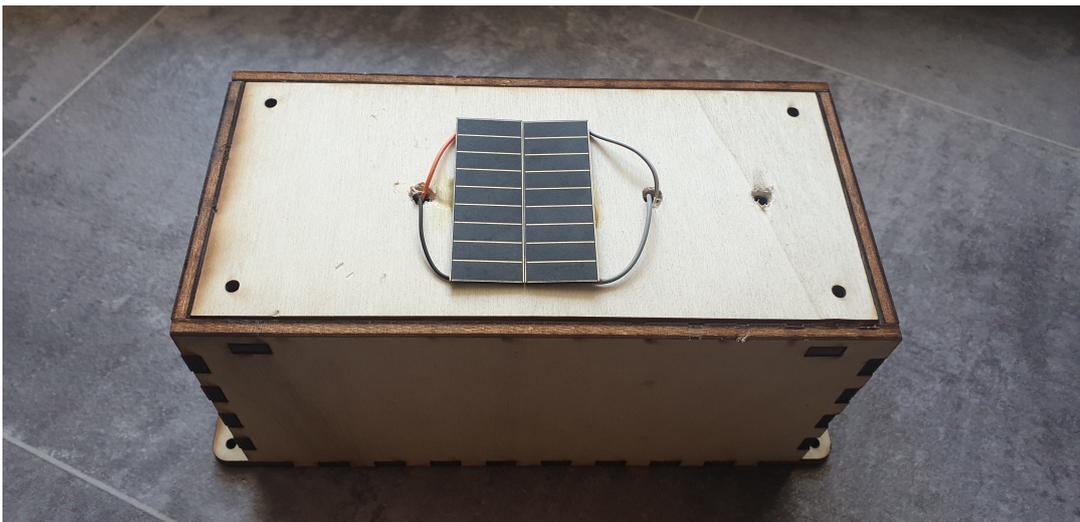


FIGURE 2.8 – Système expérimental de comparaison

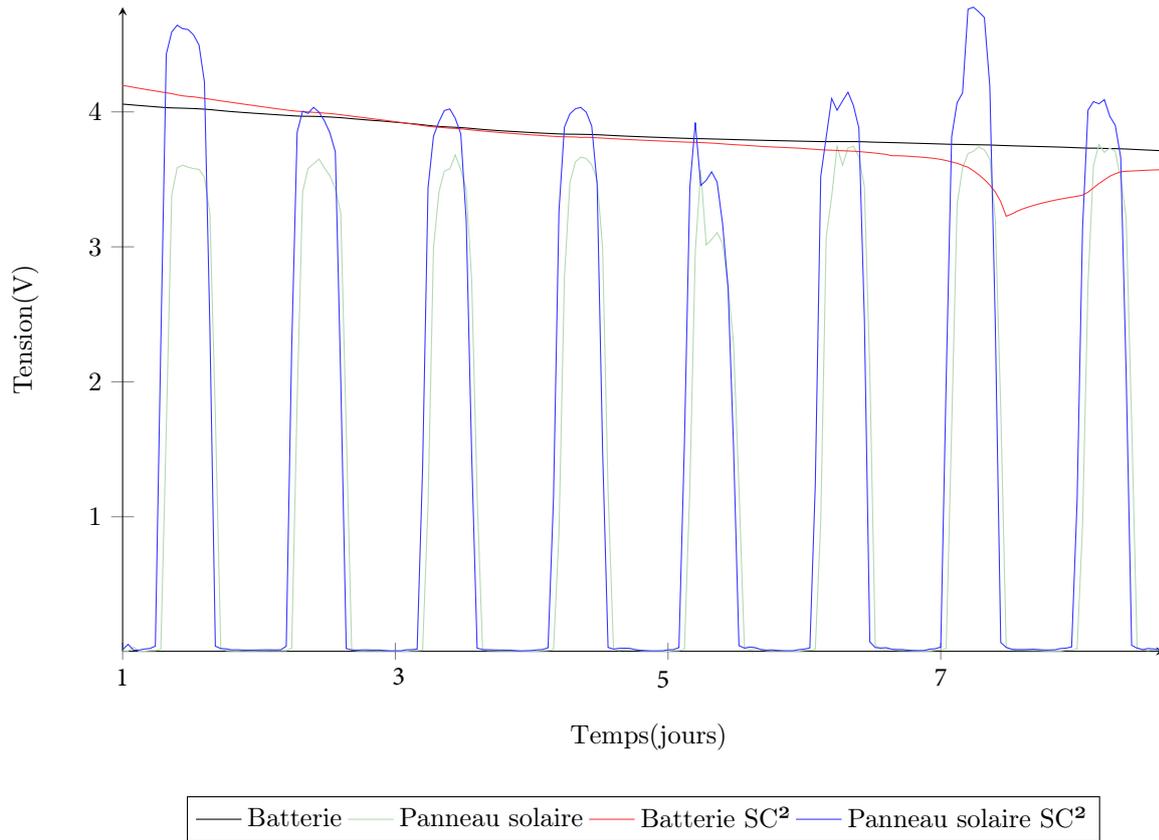


FIGURE 2.9 – Capteurs déployés en extérieur pendant 8 jours.

Ces capteurs ont été positionnés au bord d'une fenêtre orientée plein nord. Aucun rayonnement direct n'est donc reçu. Seuls le rayonnement solaire indirect et les éclairages artificiels ont permis de récupérer de l'énergie.

Les tensions des batteries et des panneaux solaires pour une période de 8 jours sont présentées dans la Figure 2.9. Dans un premier temps, nous pouvons observer une différence entre les tensions aux bornes des panneaux solaires malgré leur référence identique et leur positionnement similaire. En raison de leur orientation, nous pouvons affirmer que cette différence provient de variation de précision des caractéristiques qui ont été délivrées par le constructeur. Deux composants identiques ne fournissent, en réalité, pas un fonctionnement identique. Dans notre cas, l'écart moyen des tensions lors des phases d'éclairage est d'environ 10%. Cette variation induit alors une forte variation dans l'énergie récupérée, et donc sur la durée de vie.

Malgré cette différence, la diminution de la tension du capteur SC² est beaucoup plus rapide que celle du nœud expérimental. Cela est principalement l'effet de la différence de technologie de transmission utilisée. En effet, comme vu dans le Tableau 1.1, nous avons un rapport d'environ 5 au niveau de l'énergie consommée entre les technologies LoRa et BLE.

La baisse de tension est quasi-linéaire jusqu'à chuter brusquement au bout du 7ème jour (168 heures), passant en dessous de 3.6 volts, suivant la caractéristique classique d'une batterie Li-Po. À cet instant, l'alimentation du capteur SC² est éteinte par le PMIC afin de ne pas altérer la batterie en raison d'une tension trop basse. Le capteur ne peut donc plus fonctionner. Par la suite, nous observons une augmentation de la tension de la batterie,

jusqu'à dépasser un seuil fixé avant que le capteur SC2 ne soit réalimenté.

C'est dans ce contexte que l'architecture du nœud que nous proposons montre tout son intérêt. En effet, nous constatons que la récupération d'énergie et l'utilisation de la radio de réveil, permet d'aboutir à un nœud capteur autonome énergétiquement. Nous constatons que cette proposition permet d'atteindre l'autonomie même en situation jugée défavorable.

2.4 Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons présenté et justifié un modèle architectural basé sur de la récupération d'énergie et une radio de réveil dédiée aux réseaux de capteurs. Celle-ci est associée à un modèle de consommation énergétique afin de faciliter la caractérisation au préalable d'un déploiement. Nous avons vu que l'architecture du nœud proposée permet d'obtenir selon le positionnement et l'application considérée une autonomie énergétique. Il faut évidemment prendre en compte une éventuelle défaillance des composants et la durée de vie de la batterie dans une mise en oeuvre pratique. Puis, nous avons comparé le modèle architectural avec des capteurs d'un réseau existant et conclu sur son intérêt.

L'expérimentation avec des composants différents et une technologie de transmission différente montre l'hétérogénéité du système proposé. Même lorsque l'autonomie énergétique totale n'est pas assurée, un nœud capteur peut s'arrêter de fonctionner et attendre un niveau de batterie suffisant. Une fois rechargé, le nœud capteur réveillé est dans configuration de base. Nous pouvons alors affirmer que l'autonomie énergétique est assurée dans la plupart des usages avec une qualité de service qui dépend de la fréquence des périodes de recharge. C'est pour compenser la variabilité de la qualité de service que nous proposons dans le chapitre suivant un protocole de fonctionnement basé sur des techniques de prédiction et d'estimation de données. Cette approche combinée au modèle d'architecture proposé doit pouvoir apporter des garanties indéniables au niveau de la qualité de service.

3 Protocole d'amélioration

Comme observé lors du chapitre précédent, l'architecture proposée permet d'avoir une durée de vie virtuellement illimitée. Mais compte tenu de la dépendance à l'environnement de déploiement, les capteurs peuvent être dans des phases où ils ne sont pas en fonctionnement. Ces dernières peuvent durer de quelques heures à plusieurs jours et peuvent induire une réduction de la Qualité de Service (QoS). Ce chapitre décrit une contribution qui permet de compresser artificiellement cette baisse de QoS. Pour cela, un protocole basé sur des principes mathématiques de prédiction et d'estimation est proposé. Une première section se focalise sur les algorithmes de prédiction et d'estimation utilisés. Le premier permet de prédire avec un taux d'erreurs limité les données futures mesurées par un capteur. Les estimations fournissent une approximation des grandeurs qui auraient dû être mesurées par un capteur entre les instants $T - n$ et T avec n le nombre d'échantillons passés à estimer.

Une simulation de son implémentation est réalisée et les résultats obtenus sont présentés puis discutés dans la dernière section.

3.1 Prédiction et estimation

Le principal intérêt des techniques d'estimation et de prédiction dans les réseaux de capteurs est la réduction du nombre de communications d'un nœud capteur. Sachant que le module radio est le composant le plus énergivore dans un nœud capteur, cela contribue à une baisse de consommation énergétique. Réduire le nombre de transmissions est donc l'un des principaux axes de recherche pour favoriser l'augmentation de la durée de vie d'un réseau. Les méthodes d'apprentissage ont un double intérêt. Elles permettent de déterminer des modèles mathématiques qui représentent les grandeurs physiques ou leur variation pour une transmission. En effet, pour le suivi de grandeurs physiques, il n'est pas toujours nécessaire d'avoir des mesures exactes. Une approximation avec une erreur limitée est souvent tolérable. Ainsi, plus basse est la nécessité de précision, plus léger sera le modèle mathématique et par conséquent plus faible est le volume de communication.

Cette réduction de la consommation due aux transmissions s'accompagne par une baisse de précision sur les données. Nous utilisons dans notre proposition détaillée Section 3.2 des algorithmes de prédiction et d'estimation. Lorsque nous nous plaçons à l'instant T d'une série temporelle, la *prédiction* permet d'avoir une vision sur la tendance future d'une suite de mesures. L'*estimation*, quant à elle permet de reconstruire une période passée d'une série temporelle, en utilisant son historique ainsi que les valeurs des capteurs voisins.

Nous allons maintenant détailler les algorithmes utilisés et leur intérêt pour notre proposition.

3.1.1 La prédiction de données

En utilisant l'historique des mesures d'un nœud capteur, des prédictions permettent de modéliser le comportement futur des données. Ce modèle permet de réduire le nombre de transmissions et donc la consommation. Comme montré par [DBO16], l'utilisation la plus fréquente de ce modèle est double : localement au niveau du capteur et globalement au niveau de la passerelle. Une représentation de cette approche est illustrée Figure 3.1.

Dans ce schéma, P correspond à la profondeur de l'historique nécessaire pour prédire N valeurs. Lors du déploiement du capteur, des mesures sont réalisées puis sont transmises à la passerelle. Parallèlement, elles sont sauvegardées en mémoire locale par le nœud capteur. Une fois l'historique P suffisamment grand. Nous prenons ici la condition que l'historique doit être supérieur ou égal au nombre de valeurs à prédire. Dans ce cas, un modèle de prédiction est généré par le capteur. Les paramètres de ce modèle sont par la suite transmis à la passerelle. Dès lors, N valeurs sont prédites en parallèle au sein du capteur et au niveau de la passerelle. De plus, les mesures sont maintenues au sein du capteur afin de réaliser une comparaison avec la prédiction. Si l'erreur E_r entre les deux valeurs est inférieure à l'erreur autorisée E_a , la valeur n'est pas transmise vers la passerelle. Dans ce cas, nous considérons qu'aucune réception au niveau de la passerelle est nécessaire pour la validation de la valeur prédite au préalable. Ce fonctionnement est maintenu jusqu'à ce que l'erreur E_r soit supérieure à E_a . Dans ce cas, la donnée mesurée est transmise et le nœud capteur transmet P valeurs mesurées.

Cette approche connue dans la littérature comporte des limitations. Pour un fonctionnement global d'un réseau complet, il est nécessaire que la passerelle ait une connaissance

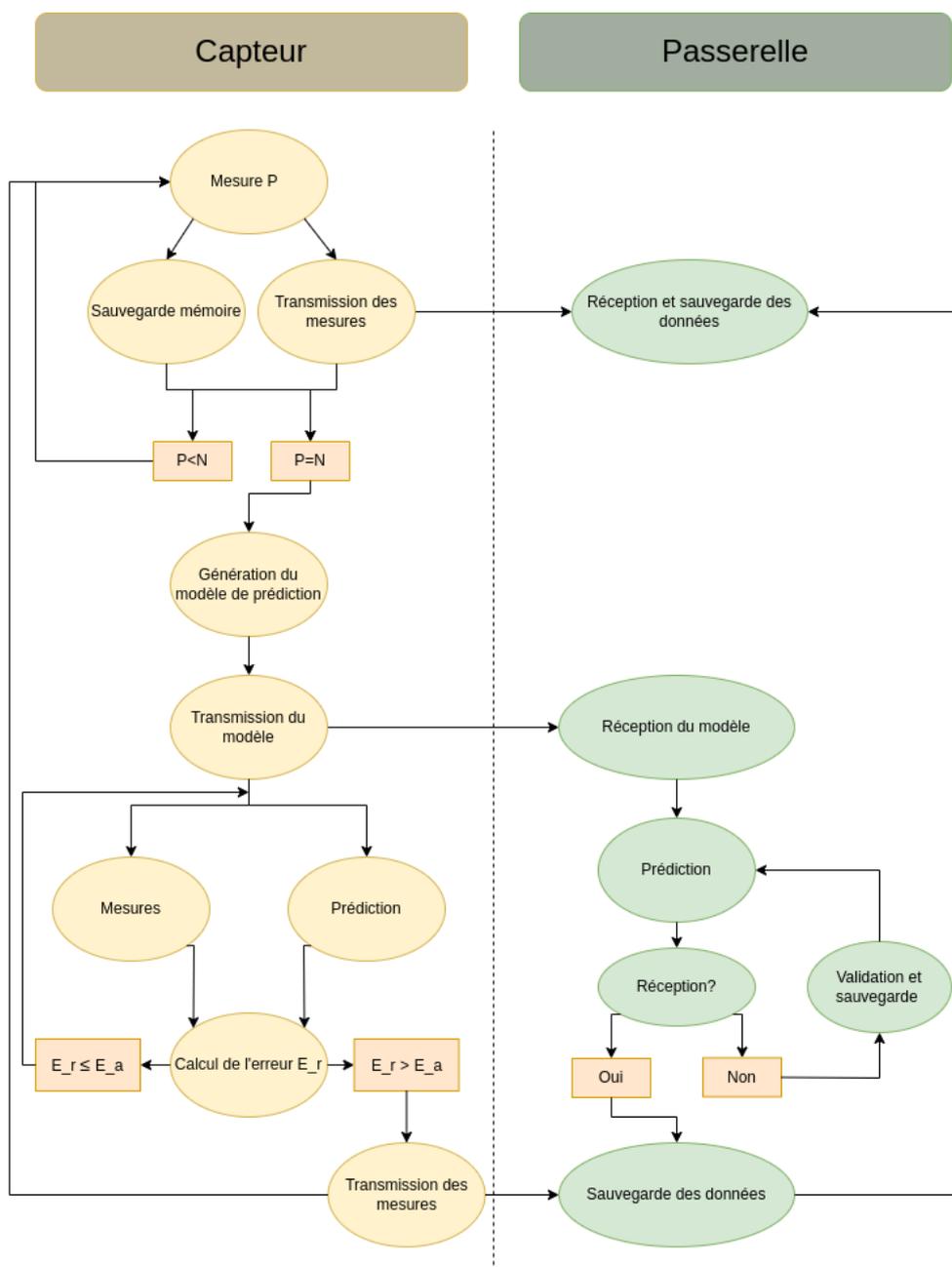


FIGURE 3.1 – Organisation de la prédiction pour un réseau de capteur

des modèles prédictifs de chaque nœud capteur. De plus, ce modèle doit être exécuté à la fois localement au sein de chaque nœud et globalement au niveau de la passerelle. Chaque nœud capteur doit alors disposer de la puissance calculatoire nécessaire. Cela ajoute une contrainte supplémentaire sur le choix du microcontrôleur. Dans le cas d'une architecture avec de la récupération d'énergie et une batterie de faible capacité, nous avons observé des phases de non-fonctionnement du capteur. Cette perte de données peut impacter la modélisation et la prédiction de futures données. La réduction de transmission augmente la durée de vie, mais favorise la présence de périodes sans mesure. Pour pallier à ces "manques" de mesure, nous proposons l'utilisation d'un autre modèle d'estimation.

3.1.2 Proposition d'un algorithme d'Estimation-Reconstruction

Comme expliqué lors du Chapitre 1, l'estimation permet de reconstruire des données passées manquantes. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'un historique suffisamment important. Le dimensionnement de l'historique est à déterminer selon le contexte applicatif.

Nous allons détailler dans cette section un algorithme d'estimation que nous intégrerons dans le protocole proposé par la suite. Cet algorithme est basé sur les travaux de *Yiye Jiang* [JBM20]. Il peut être décomposé en deux tâches distinctes, mais complémentaires.

Sélection des nœuds capteurs

Dans un premier temps, nous spécifions une liste des nœuds classés par ordre d'importance. Ainsi, l'impact de la perte d'un capteur peut être quantifié. Plus un capteur sera reculé dans cette liste, moins il aura d'impact sur la précision de la reconstruction d'une donnée. Un arrêt de son fonctionnement aura, par conséquent, peu d'impact sur le fonctionnement global du réseau de capteurs.

Pour réaliser cette liste, la première étape consiste à déterminer le taux de perte (*missing rate*) lors des transmissions. En effet, nous avons parlé jusqu'ici d'arrêts de transmission lors d'une décharge de la batterie. Mais il peut aussi y avoir des pertes ou des erreurs qui résultent de l'environnement électromagnétique. Ce taux de perte dépendra également de la plage temporelle utilisée. Certains capteurs effectuent des mesures toutes les 10 minutes. La périodicité pour d'autres nœuds capteurs peut être 30 ou 40 minutes. Il est alors nécessaire d'avoir une plage temporelle commune. En prenant par exemple 1 heure, nous obtenons au minimum une mesure par nœud capteur. Si l'un d'entre eux à une période de mesure impliquant plusieurs sollicitations par heure, nous réalisons une moyenne horaire afin d'avoir une référence de comparaison identique. Ainsi, nous pouvons déterminer un *missing rate* pour chaque élément du réseau. Ceux ayant un résultat trop élevé sont automatiquement supprimés de cette liste en raison de la discontinuité des données mesurées.

Une fois cela réalisé, les tendances des historiques de mesure doivent être déterminées. Celles-ci peuvent être déduites d'autres courbes. Par exemple, la courbe de température mesurée par le n-ème capteur est supprimée. Nous obtenons ainsi une série temporelle représentant les variations par rapport à une tendance.

Une fois que chaque courbe de variation est associée à un nœud capteur, la covariance entre chacune d'entre elles est déterminée. Ce dernier paramètre représente la corrélation entre les variations des différents capteurs. Si cette dernière est élevée pour deux nœuds de capteur du réseau, cela signifie qu'une variation de la température de l'un se répercute sur

les mesures de l'autre.

Nous pouvons alors déterminer les meilleurs capteurs pour assurer le rôle des estimateurs : plus un nœuds capteur aura de covariances élevées vis-à-vis d'autres nœuds capteurs, plus il sera pertinent pour la reconstruction globale des données du réseau.

Une fois la liste déterminée et les covariances calculées, il nous est possible de réaliser une reconstruction.

Reconstruction des données

Pour la reconstruction d'un signal, il est nécessaire d'avoir l'historique des nœuds capteurs à reconstruire, celui des estimateurs ainsi que les valeurs actuelles de ces derniers. Les historiques permettent de déterminer les valeurs des niveaux de covariance comme explicités dans le paragraphe précédent.

Pour la reconstruction elle-même, il est nécessaire d'ajouter également les valeurs aux instants T des estimateurs. Ainsi, les paramètres suivants sont utilisés :

- I : la liste des nœuds capteurs dont nous souhaitons reconstruire le signal.
- $\hat{\sigma}$: les covariances calculées durant l'étape précédente.
- X : les valeurs aux instants T qui doivent être reconstruites par les estimateurs.
- Tr : les tendances des signaux des nœuds capteurs à reconstruire.
- Sd : l'écart type (*standard deviation*) des signaux à reconstruire. Si il n'est pas spécifié, nous le fixons à 1.0.

En utilisant ces différents paramètres, nous pouvons alors réaliser une reconstruction en suivant le principe d'une régression linéaire. Celle-ci est appliquée en utilisant les covariances ainsi que les observations aux instants T des estimateurs. Il est ensuite nécessaire de multiplier par Sd qui est fixé à 1.0 par défaut. Enfin, la tendance de chaque capteur est ajoutée afin d'obtenir le signal reconstruit.

Nous avons introduit les deux méthodes de base utilisées par le protocole qui sera détaillé par la suite. Évidemment, la pertinence du protocole est directement liée à l'efficacité des méthodes de reconstruction du signal. Nous allons donc simuler et évaluer la capacité de reconstruction de notre proposition en utilisant un jeu de données adéquat. La proposition complète sera expérimentée dans la Section 3.2.

Evaluation de la validité de la méthode de reconstruction

Afin de pouvoir évaluer l'efficacité de notre méthode de reconstruction, nous allons la simuler en utilisant une base de données de 54 capteurs. Ces capteurs ont été déployés au sein du laboratoire de recherche d'*Intel Berkeley* [Mad04] entre le 28 Février et le 5 Avril 2004.

54 capteurs *Mica2Dot* avaient été déployés au sein de l'étage d'un bâtiment comme illustré par la Figure 3.2. Les données relevées par les capteurs sont la température, l'humidité et la luminosité. Ces mesures ont été réalisées toutes les 31 secondes. Nous nous focaliserons sur les mesures de température afin de comparer dans un premier temps les

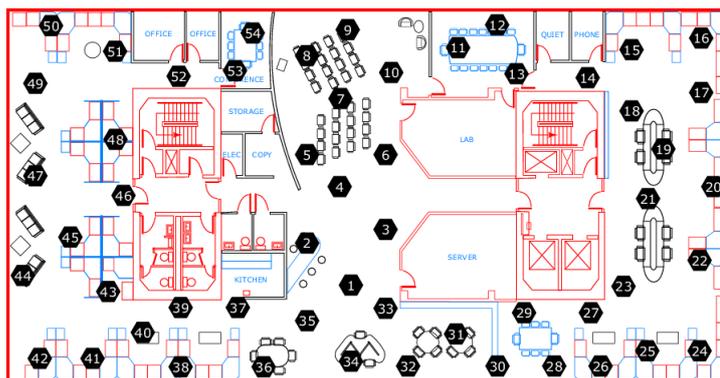


FIGURE 3.2 – Plan de déploiement des capteurs au sein du laboratoire *Intel Berkeley* [Mad04].

Seuil de prédiction (ϵ)	Taux de prédiction réussie (%)		
	Notre proposition	ELR [JAK21]	P-DPA [Zha+12]
0.1	76	42	34
0.2	88	52	45
0.3	95	60	52
0.4	96	70	58
0.5	98	77	66
0.6	98	83	70
0.7	98	86	73

Tableau 3.1 – Comparaison des différentes méthodes de prédiction en fonction du seuil d'erreur ϵ .

performances de reconstruction de notre contribution avec les techniques *ELR* [JAK21] et *P-DPA* [Zha+12].

Le seuil d'erreur de prédiction ϵ varie en $0 < \epsilon < 1$. Plus ce seuil est élevé, plus l'erreur autorisée l'est également. Nous faisons varier dans un premier temps ce seuil entre 0.1 et 0.9. Pour cela, 10 cycles de 48 données d'historique pour une donnée prédite sont considérés. Comme la période des différents cycles n'est pas précisée, ces dernières sont choisies aléatoirement à partir de la base de données.

Le Tableau 3.1 récapitule les différents taux de prédiction obtenus en fonction du seuil de prédiction. Nous pouvons remarquer que la reconstruction des signaux de température que nous utilisons aboutit à de meilleurs résultats par rapport à ceux de la littérature. Cela montre donc que la prédiction que nous intégrons à notre proposition est pertinente.

Dans cette comparaison, nous utilisons un historique de taille 48 pour une donnée prédite. Rappelons que la qualité de la prédiction dépend directement de la taille de l'historique ainsi que de la taille du signal à reconstruire. Évaluons maintenant l'effet de la périodicité des mesures ainsi que de l'historique utilisé. Pour cela, nous créons différents jeux de données en prenant des périodes de temps entre les mesures allant d'une à soixante minutes avec un

pas de cinq minutes. Il est à noter que, nous gardons une profondeur de prédiction de 10 mesures, pour un historique de données allant de 50 à 190. Cela correspond à un historique allant de 50 minutes à 3 heures pour une périodicité de 1 minute et un historique allant de 2 à 8 jours pour une périodicité de 60 minutes.

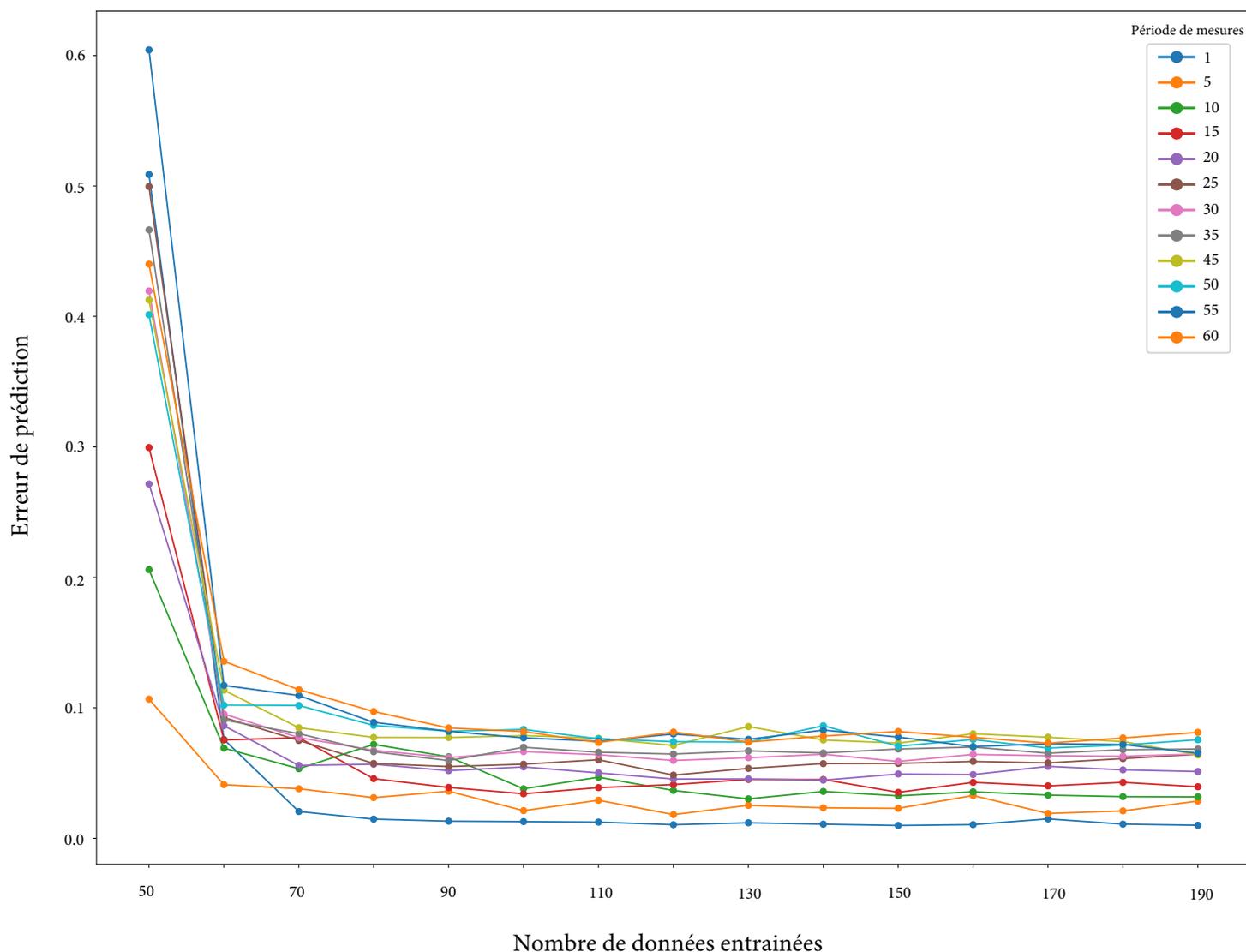


FIGURE 3.3 – Erreur moyenne de prédiction pour 10 mesures en fonction de l'historique utilisé pour différentes périodes de mesure

La Figure 3.3 présente l'erreur moyenne de prédiction pour 10 mesures en fonction de l'historique utilisé et cela pour différentes périodes. Chaque point a été évalué 10 fois en sélectionnant aléatoirement l'historique dans la base de données puis en calculant l'erreur moyenne. Pour 54 capteurs, cela revient à calculer l'erreur moyenne de 5400 points de mesure.

Nous remarquons que la meilleure stabilité de prédiction est obtenue à partir d'un

historique de 80 points. Au-delà, et pour chaque période de mesure, l'erreur est inférieure à 10%. Ce qui implique dans la pire des situations une erreur de 2 degrés Celsius pour une température de 20 degrés. Mais dans certains cas, notamment pour des périodes de mesure allant jusqu'à 20 minutes, l'erreur est inférieure à 5%.

Maintenant que nous nous sommes assurés de la pertinence du modèle d'estimation proposé, nous pouvons discuter de la façon dont est intégrée cette reconstruction pour l'amélioration de la durée de vie et donc de la qualité de service d'un réseau de capteurs.

3.2 Implémentation dans le réseau de capteurs

3.2.1 États et qualité de service des capteurs

L'architecture et les expérimentations présentées dans le Chapitre 2 ont montré des périodes de fonctionnement avec une qualité de service qui varie entre deux niveaux. Un niveau élevé lorsque le capteur fonctionne correctement et un niveau dit bas quand le capteur ne fonctionne pas. Ces périodes de fonctionnement sont dépendantes de la capacité de récupération d'énergie des différents nœuds capteurs. Le but de cette proposition est de limiter un passage direct entre ces deux niveaux de qualité de service. En effet, ce passage implique une sauvegarde et une transmission des données vers la passerelle.

Nous proposons d'introduire deux niveaux de qualité de service supplémentaire, passant ainsi à quatre niveaux différents :

1. Q_1 : QoS *Fortement forte*.
2. Q_2 : QoS *Faiblement forte*.
3. Q_3 : QoS *Faiblement faible*.
4. Q_4 : QoS *Fortement faible*.

Ces niveaux sont associés à des états de fonctionnement de chaque nœud capteur :

1. E_1 : identique au fonctionnement présenté précédemment, le capteur mesure et transmet chaque donnée vers la passerelle comme demandée par l'application.
2. E_2 : le capteur mesure les grandeurs demandées, mais il les transmet si et seulement si la différence avec les mesures précédentes est notable. Cet état est utilisé par un sous-ensemble de nœuds nommés estimateurs.
3. E_3 : dans cet état, le capteur continue à réaliser des mesures, mais les sauvegarde en mémoire. Il ne les transmet pas directement. Le nombre de transmissions est ainsi limité, ainsi que la consommation énergétique. Cet état est possible pour les capteurs non estimateurs.
4. E_4 : état pour une qualité de service fortement faible pour laquelle aucune mesure réelle ne peut être réalisée.

Le passage d'un état à l'autre dépend du niveau de charge de la batterie du capteur à considérer. Ainsi, un niveau de batterie est associé à chaque état :

1. B_1 : nœud capteur dans l'état E_1 avec un niveau de batterie proche du maximum.

3.2. Implémentation dans le réseau de capteurs

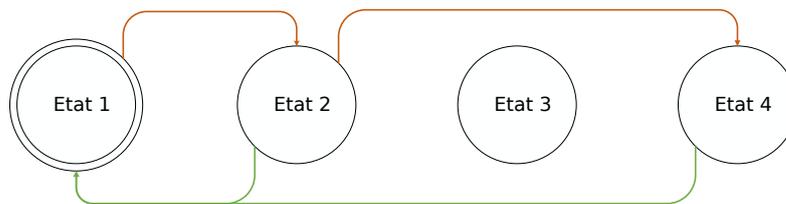
2. B_2 : nœud capteur dans l'état E_2 .
3. B_3 : nœud capteur dans l'état E_3 .
4. B_4 : nœud capteur dans l'état E_4 , avec un niveau de batterie empêchant le fonctionnement du nœud capteur.

Nous avons la possibilité pour un nœud capteur dans l'état E_1 de le considérer comme estimateur. Pour ce faire, nous définissons un paramètre supplémentaire, qui autorise ou non le passage d'un nœud capteur dans un rôle d'estimateur. E_D est une consommation de référence, qui est celle d'un capteur pour une journée de fonctionnement dans l'état E_1 . Aussi, B_D et B_{D-1} sont respectivement les niveaux de batterie du jour de la mesure et du jour précédent. Nous obtenons alors la capacité d'un nœud capteur à récupérer de l'énergie exprimée à l'aide de quatre niveaux distincts :

1. 11 : Si $B_{D-1} - B_D < 0$, l'énergie récupérée pendant les dernières 24 heures est supérieure à la celle consommée par le nœud capteur.
2. 10 : Si $B_{D-1} - B_D = 0$, l'énergie récupérée est similaire à celle utilisée par le nœud capteur.
3. 01 : Si $B_{D-1} - B_D < (E_D/2)$, le nœud capteur récupère à minima l'équivalent d'une demi-journée de fonctionnement, réduisant ainsi la pente de la courbe de décharge de la batterie.
4. 00 : Si $B_{D-1} - B_D > (E_D/2)$, le capteur récupère une quantité d'énergie inférieure à une demi-journée de fonctionnement dans l'état E_1 .

Si un capteur possède une capacité de recharge correspondant au niveau 00, il ne lui sera pas permis d'être sélectionné comme nœud estimateur. Les nœuds capteurs ayant une forte capacité à se recharger, et donc une possibilité d'utilisation énergétique plus importante sont donc privilégiés pour assurer la fonction d'estimateur.

Estimateurs :



Non-Estimeurs :

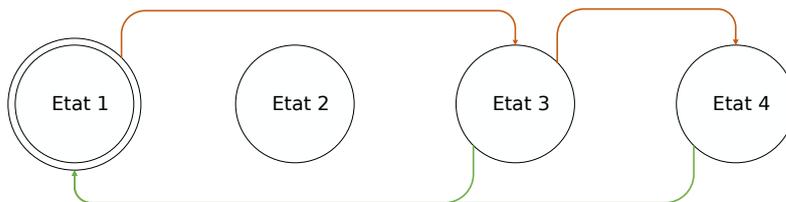


FIGURE 3.4 – Transitions d'états possibles pour les différents capteurs

Les différentes transitions entre les états possibles d'un nœud capteur sont récapitulées dans la Figure 3.4. Un capteur estimateur peut être dans les états E_1 , E_2 et E_4 . Comme

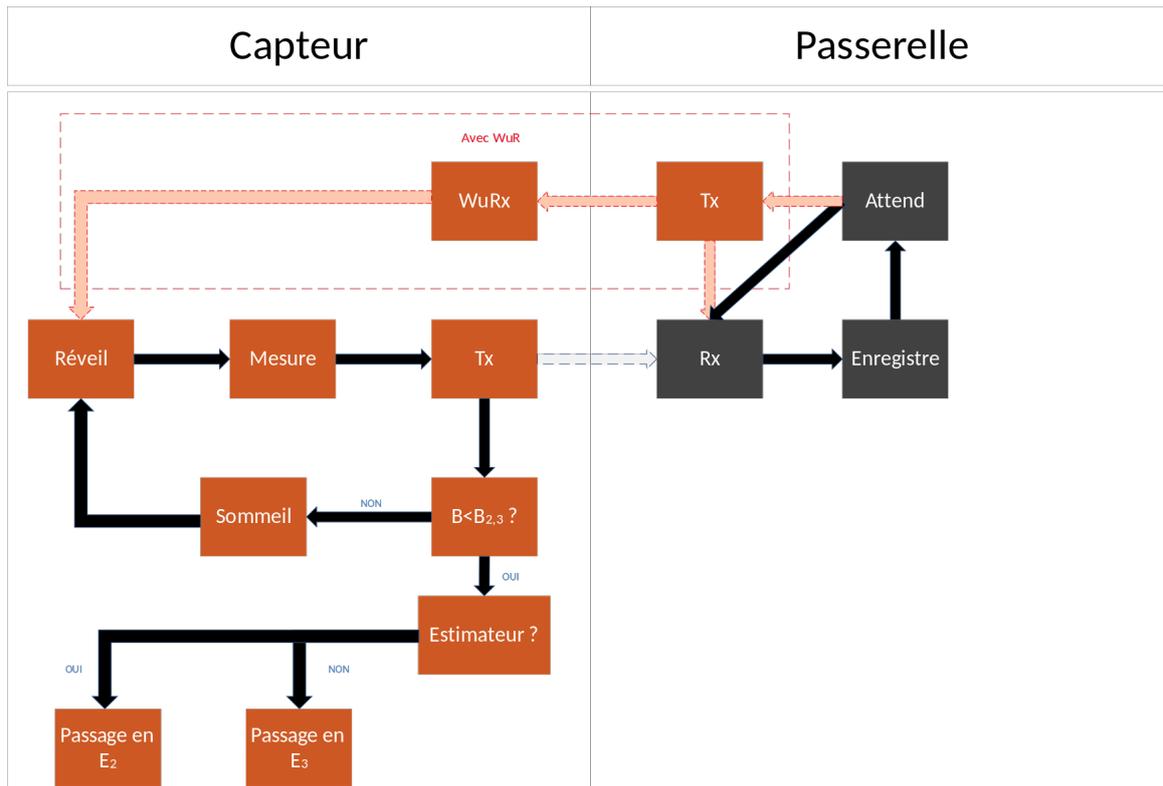


FIGURE 3.5 – Etat E1 : Organisation pour une qualité de service Fortement Forte

détaillé plus tard, ces nœuds capteurs peuvent assurer le rôle d'estimateur lors des passages dans l'état E₄. Un nœud capteur non-estimateur, quant à lui, ne peut pas passer des états E₂, mais directement par l'état E₃. Maintenant que ces différents paramètres et grandeurs ont été définis, détaillons le fonctionnement que nous proposons afin d'améliorer la qualité de service d'un réseau de capteur.

3.2.2 Déploiement du réseau de capteur

Lors du déploiement d'un réseau, nous faisons l'hypothèse que les nœuds capteurs ont des batteries complètement chargées ($B = B_1$). Ce niveau de charge implique que les nœuds capteurs sont tous en état E₁ donc avec une qualité de service *fortement forte*. La Figure 3.6 présente un réseau de N capteurs (ici N = 14) autour d'une passerelle centrale. À ce stade, aucune connaissance de la capacité de recharge d'un capteur n'est disponible. De plus, aucun nœud capteur ne peut être placé en tant qu'estimateur en raison de l'absence de mesures préalables.

Chaque nœud capteur fonctionne donc de façon classique. Lorsqu'une prise de mesures est demandée par la passerelle, la radio de réveil envoie un signal au reste du système. Une mesure est alors réalisée puis transmise vers la passerelle qui réceptionne et l'enregistre dans la base de données. Du côté du capteur, une comparaison est réalisée entre B_{ni} , le niveau de batterie actuel et les seuils de batterie B₂ ou B₃. Si le premier est inférieur au second, le nœud capteur passe en fonctionnement 2 ou 3 selon sa sélection préalable en tant qu'estimateur. Sinon, il reste dans l'état E₁ donc avec une qualité de service *fortement forte*. Puis le capteur repasse en mode sommeil et attend la prochaine demande de réveil. Ces étapes et le fonctionnement d'un capteur dans cette situation sont illustrés par la



FIGURE 3.6 – Schéma d'un réseau de 14 capteurs déployés

Figure 3.6.

Comme observé dans le Chapitre 2, nous considérons qu'un capteur lors de la phase de déploiement reste un certain temps dans un fonctionnement optimal avant de passer potentiellement dans un état inférieur. Il est cependant possible d'avoir une première estimation de la capacité de récupération d'énergie après les deux premiers jours. Aussi, lorsque l'historique de mesure est suffisant, la passerelle peut réaliser des premiers calculs de covariance en suivant les méthodes détaillées précédemment. Comme expliqué, cela permet également d'obtenir une liste qui commence par le meilleur nœud capteur et qui se termine par le nœud capteur le moins efficace. Un choix de nœuds capteurs estimateurs est alors effectué en prenant en compte la liste ainsi que les capacités de recharge de chaque nœud capteur.

La Figure 3.6 illustre le fonctionnement au niveau de la passerelle ainsi que le résultat au sein du réseau. Les nœuds capteurs en vert sont toujours ceux dans l'état E_1 , avec à leur centre leur capacité de recharge aléatoire dans cette figure. Ceux avec un contour bleu jouent le rôle d'estimateurs.

Dans cette configuration, et en adéquation avec les expérimentations présentées dans le chapitre précédent, plusieurs jours de fonctionnement sont possibles dans la pire situation d'éclairage avant une baisse importante de la charge de la batterie. Pour les capteurs positionnés dans de mauvaises conditions d'éclairage, la charge passera plus rapidement en dessous des niveaux de batterie B_2 ou B_3 . Ils passent donc de l'état E_1 à l'état E_2 ou E_3 .

3.2.3 Fonctionnement en qualité de service *Faiblement forte*

Lorsqu'un nœud estimateur a sa batterie qui passe en dessous du niveau B_2 ou B_3 il transite dans l'état E_2 associé à une qualité de service *faiblement forte*. Rappelons qu'un nœud capteur est estimateur en raison de sa capacité à reconstruire les données d'autres

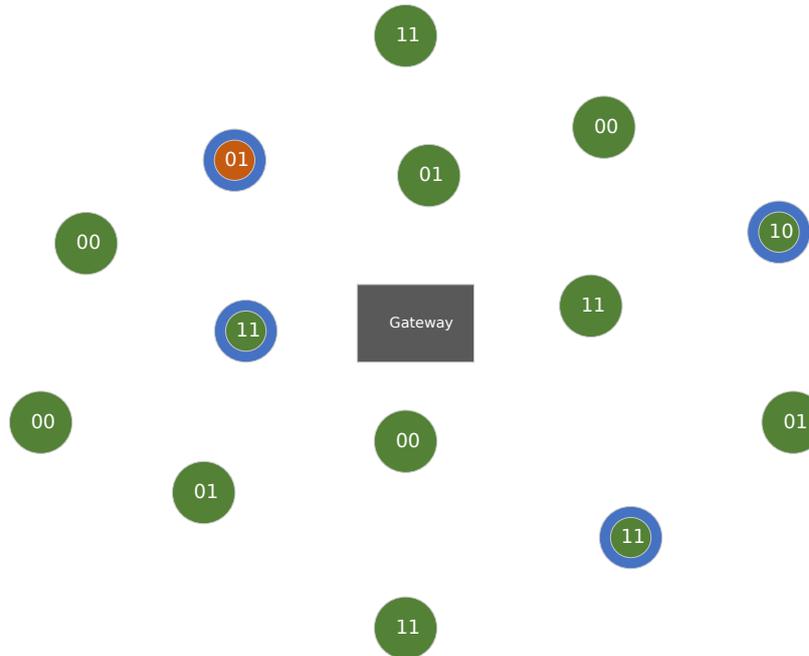


FIGURE 3.7 – État du réseau après le passage d'un capteur dans l'état E_2

éléments du réseau. La Figure 3.7 illustre l'état du réseau avec un capteur estimateur dans l'état E_2 . Ce dernier est en orange avec un contour bleu.

Le nœud capteur dans cet état voit son fonctionnement modifié ainsi que sa gestion par la passerelle. Dans un premier temps, la passerelle utilise l'historique des données mesurées afin de générer les paramètres nécessaires à la prédiction des futures mesures. Ces paramètres sont alors transmis au nœud capteur qui les enregistre en mémoire.

Puis, lors d'un réveil du nœud capteur, une première comparaison sur le niveau de batterie est réalisée. Si le nœud capteur s'est suffisamment rechargé, il repasse dans l'état E_1 avec le fonctionnement détaillé en 3.2.2. En revanche, si son niveau de charge est passé en dessous du niveau B_4 , il bascule sur un fonctionnement correspondant à l'état E_4 expliqué dans la sub-section 3.2.5.

Si aucune modification d'état n'est observée, alors une mesure et une prédiction sont réalisées puis comparées. L'erreur maximale entre ces deux valeurs est choisie en fonction de la criticité des valeurs et du contexte applicatif. Pour un suivi de la qualité de service dans un bâtiment, une erreur de 5% ajoute un biais de 1 degré sur une température de 20 degrés Celsius, ce qui est acceptable. L'erreur obtenue après comparaison modifiera le fonctionnement suivant, et donc la consommation du capteur :

- Si la valeur prédite est dans une marge d'erreur acceptable, la donnée n'est pas transmise, mais elle est enregistrée au niveau du nœud capteur local. Ce dernier passe dans un mode de sommeil, et attend le prochain réveil.
- Si elle est en dehors de la marge d'erreur, et que le nombre d'erreurs successives est inférieur à k alors la donnée n'est pas transmise. Ce dernier paramètre est configuré afin d'éviter une communication pour chaque erreur élevée. Dans certains cas, il est possible d'obtenir une valeur avec une erreur importante, mais repasser dans la marge d'erreur pour les mesures suivantes.

3.2. Implémentation dans le réseau de capteurs

- Si les prédictions sont fausses plus de k mesures de suite, alors le capteur transmet la donnée mesurée à l’instant T ainsi que toutes celles mesurées depuis la dernière transmission. La passerelle peut mettre à jour la base de données avec les valeurs réelles ainsi que les paramètres de prédiction. Les paramètres de prédiction sont ensuite renvoyés au nœud capteur qui les enregistre et attend le prochain réveil.

Ces différentes étapes de fonctionnement dans l’état E_2 sont détaillées dans la Figure 3.8. Elles permettent de limiter le nombre de communications d’un nœud estimateur. Comme ces derniers sont favorisés pour estimer les valeurs d’autres nœuds capteurs qui seraient dans les états E_3 ou E_4 , il est nécessaire que la passerelle ait une valeur utilisable durant chaque exécution, quelle soit réelle ou prédite. Même si ce n’est pas explicité ici, nous pouvons également forcer un nœud capteur à transmettre dans tous les états les données à intervalle régulier. Ainsi, la passerelle pourrait recevoir à minima toute les 12h ou 24h, l’historique des valeurs mesurées.

Cependant, dans cette configuration, la passerelle recevra toujours avec un retard la mesure réelle de chaque exécution. C’est pour cela que nous considérons la qualité de service comme étant *faiblement forte*, comparée à la qualité de service *fortement forte* où la mesure réelle est reçue par la passerelle.

C’est aussi la raison pour laquelle nous limitons cette possibilité d’état état aux nœuds estimateurs. En effet, ils sont suffisants pour proposer une bonne estimation des autres données du réseau. Ils permettent donc de limiter les communications des autres nœuds capteurs. Il est nécessaire de préciser que le nombre d’estimateurs est le nombre minimum nécessaire pour proposer une estimation précise au sein du réseau. Lorsqu’une estimation est réalisée pour un capteur cible, le système utilise en plus l’ensemble des capteurs dans l’état E_1 , afin d’apporter plus de précision aux résultats.

Pour les capteurs de base (non-estimateur) dont le niveau de batterie passe en dessous du niveau B_3 , ils basculent dans l’état E_3 .

3.2.4 Fonctionnement en qualité de service *Faiblement faible*

Un nœud capteur est dans l’état E_3 si son niveau de batterie est inférieur B_3 et qu’il n’a pas une fonction d’estimateur. La Figure 3.9 présente l’état du réseau avec des capteurs dans l’état E_3 .

Les données de ce nœud capteur ne sont pas nécessaire pour reconstruire d’autres capteurs du réseau. L’objectif dans cet état est alors de limiter au maximum les communications, et par conséquent la consommation énergétique. Ainsi le retour dans l’état E_1 pourra se faire plus rapidement, afin de fournir une qualité de service supérieure. La passerelle aura alors accès à des mesures estimées durant chaque itération. Comparée à l’état précédent, aucune vérification locale de l’erreur de mesure est faite. Nous n’avons alors aucune certitude sur l’erreur maximale de chaque donnée.

L’erreur que le système peut présenter est l’erreur maximale obtenue par l’algorithme utilisé. Néanmoins, les données réelles sont stockées puis transmises lors du retour du nœud capteur dans l’état E_1 .

Nous avons alors le fonctionnement suivant pour cet état :

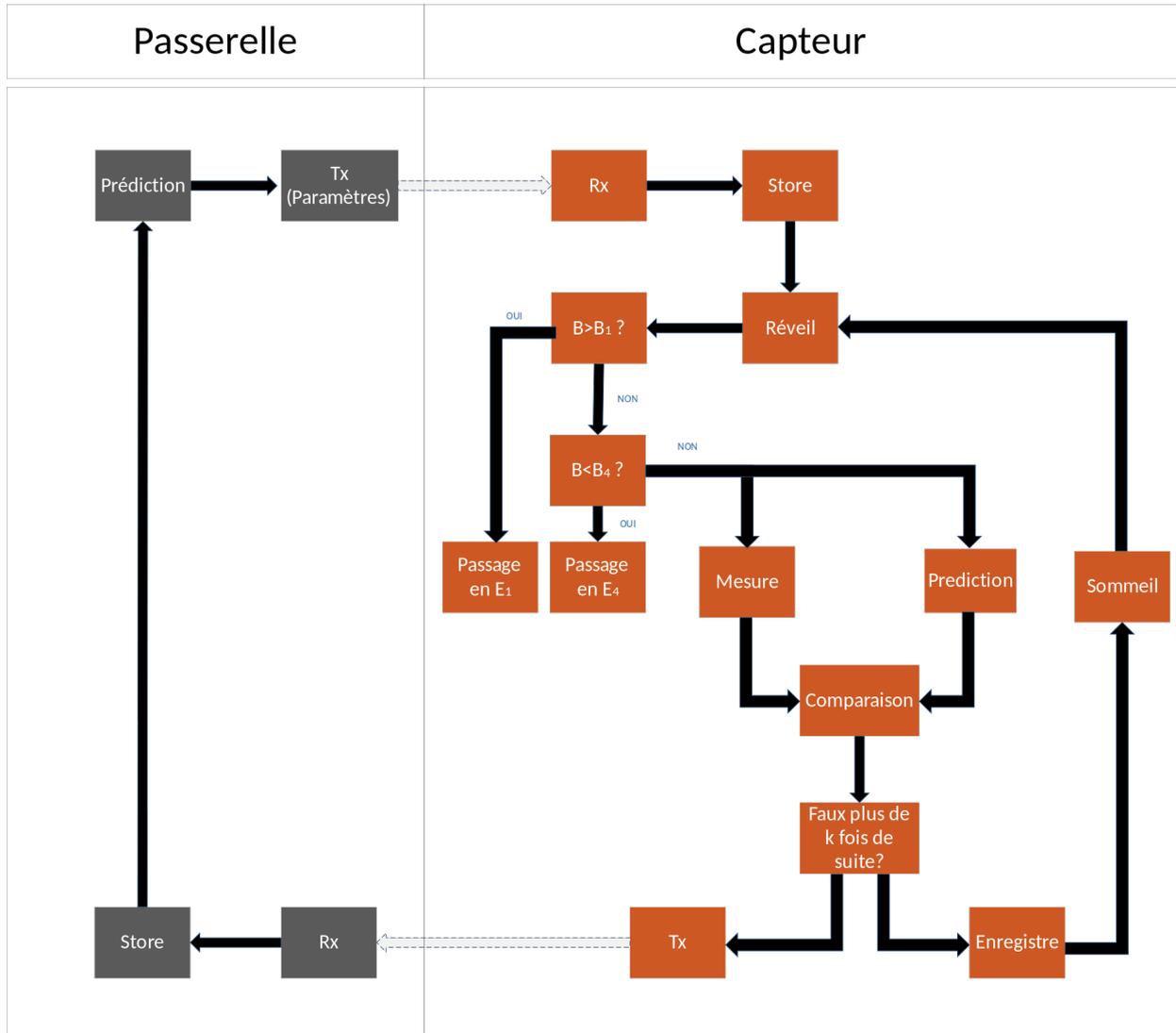


FIGURE 3.8 – État E_2 : Organisation pour une qualité de service Faiblement forte

- Que l'on soit dans un fonctionnement basé sur le principe de radio de réveil ou en duty-cycle, le capteur se réveille lorsque c'est nécessaire.
- Une mesure est réalisée selon le contexte applicatif.
- Un premier test sur le niveau de batterie est réalisé afin de savoir si le capteur peut être positionné dans l'état E_1 . Si c'est le cas, l'historique de données est transmis à la passerelle puis le capteur passe dans un fonctionnement comme décrit en sus-section 3.2.2. Dans le cas contraire, un second test est réalisé.
- Le second test sur la batterie permet de positionner si besoin le nœud capteur dans un état de qualité de service *fortement faible*.
- Si la batterie a un niveau de charge lui permettant de rester dans cet état E_3 , alors la donnée mesurée est enregistrée en mémoire.
- Enfin, le capteur passe en mode sommeil ce qui réduit fortement sa consommation énergétique.

Parallèlement, les données estimées pour ce nœud capteur sont générées au niveau de la passerelle. Pour ce faire, elle utilise son historique, à savoir l'historique des estimateurs et celui des nœuds capteurs dans l'état E_1 . Ces données sont alors transmises vers un serveur

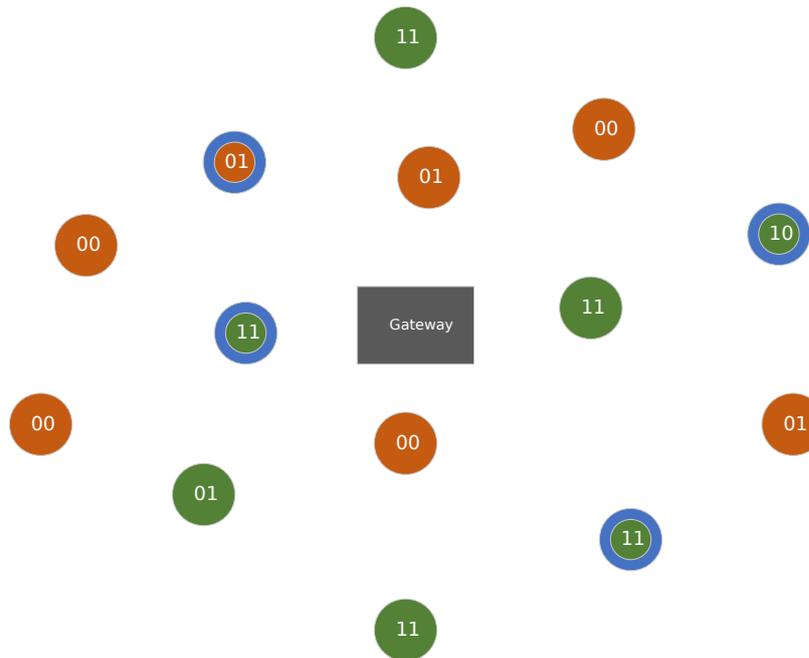


FIGURE 3.9 – État du réseau avec un nœud capteur dans l'état E3

puis exploitées. Il est important de préciser que ces données ne sont pas exactes, mais elles ont des valeurs avec une erreur limitée.

Ce fonctionnement est récapitulé dans la Figure 3.10.

Comme les nœuds capteurs dans cet état ne sont pas décisifs pour la reconstruction, il n'est pas nécessaire pour le système de recevoir des données réelles régulièrement comme pour l'état E_2 . Cela permet un retour à une meilleure qualité de service locale et par conséquent un retour à une meilleure qualité global du réseau plus rapidement. Si ce mode de fonctionnement est associé à des conditions d'éclairage insuffisantes pour que la batterie se recharge alors le nœud capteur passe dans un état déprécié.

3.2.5 Fonctionnement pour une qualité de service *Fortement faible*

Dans l'état E_4 , le nœud capteur a un fonctionnement qui correspond à une qualité de service *Fortement faible*. Pendant cette période, aucune mesure n'est réalisée. Cela signifie que seules les données estimées sont disponibles et fournies par la passerelle Pas de vérification ou de mises à jour de ces valeurs ne sont possible a posteriori comme pour les états E_2 et E_3 . Sachant que le nœud capteur est totalement éteint, aucun traitement n'est réalisé localement. Toutes les générations de valeurs sont effectuées au niveau de la passerelle.

Lors du passage dans l'état fortement faible, une distinction doit être faite entre les anciens estimateurs et les capteurs simples :

- Si un nœud capteur passe de l'état E_2 à l'état E_4 , c'est qu'il a nécessairement un rôle d'estimateur. Dans ce cas, la passerelle doit choisir un autre nœud capteur parmi ceux ayant une récupération d'énergie suffisante. Une fois cela réalisé, cet ancien estimateur devient un nœud capteur de base. Une estimation de ses valeurs

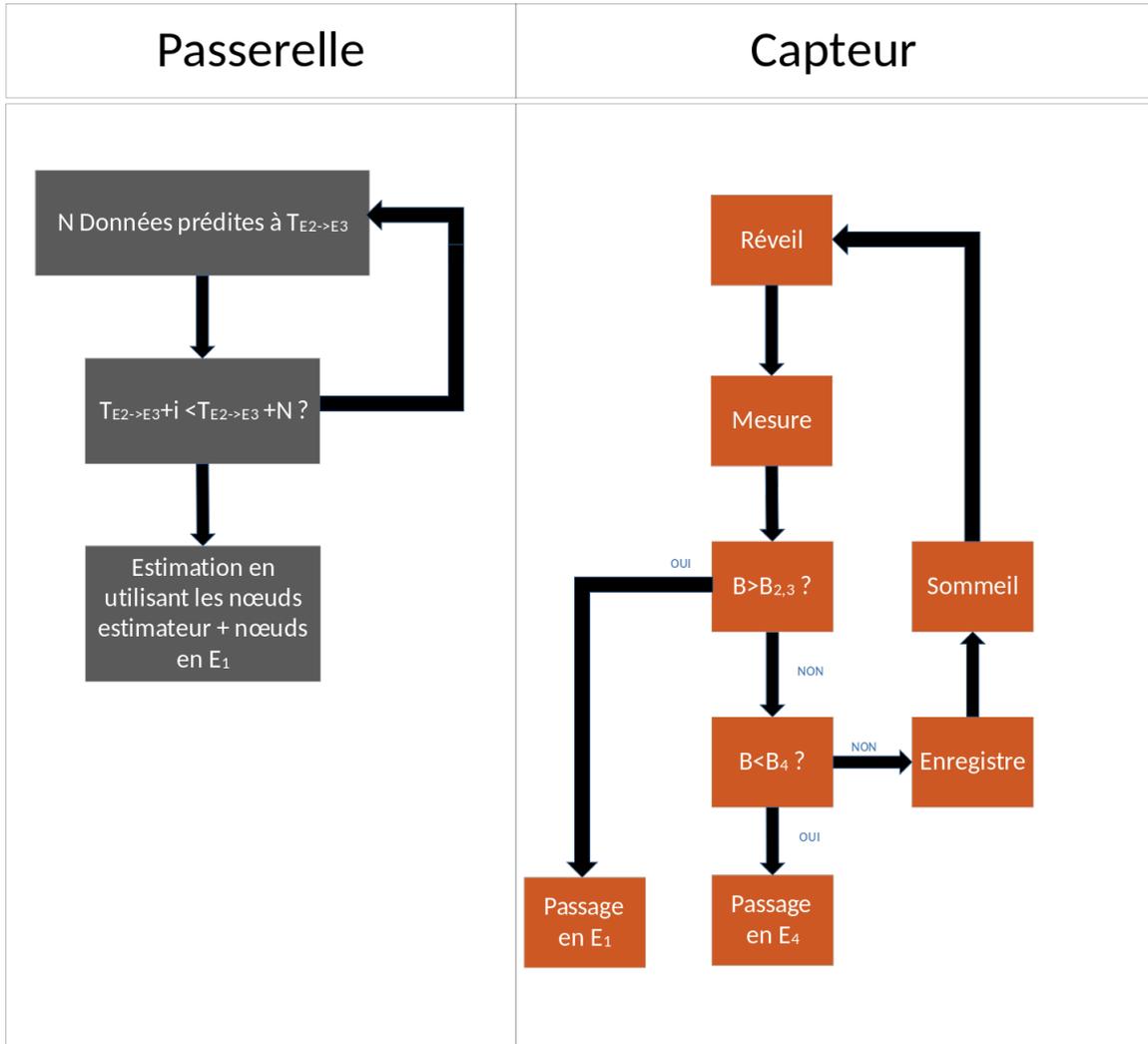


FIGURE 3.10 – Etat E3 : Organisation pour une qualité de service *Faiblement faible*

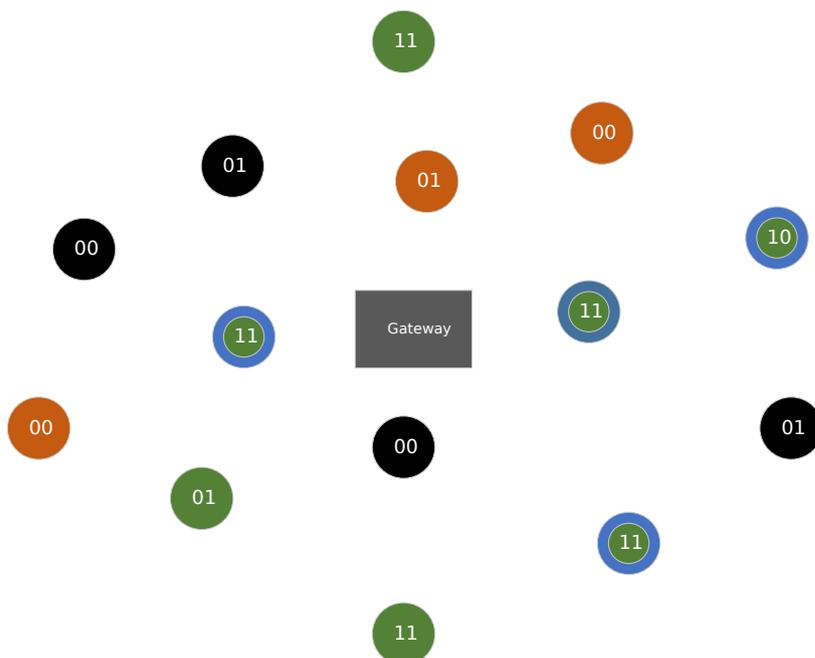


FIGURE 3.11 – Etat du réseau avec un nœud capteur dans l'état E4

est réalisé de la même façon que pour les nœuds capteurs dans l'état E_3 .

- Si un nœud capteur passe de l'état E_2 à l'état E_4 , la passerelle peut directement reconstruire ses données, en associant son historique avec l'information provenant de ses nœuds capteurs voisins.

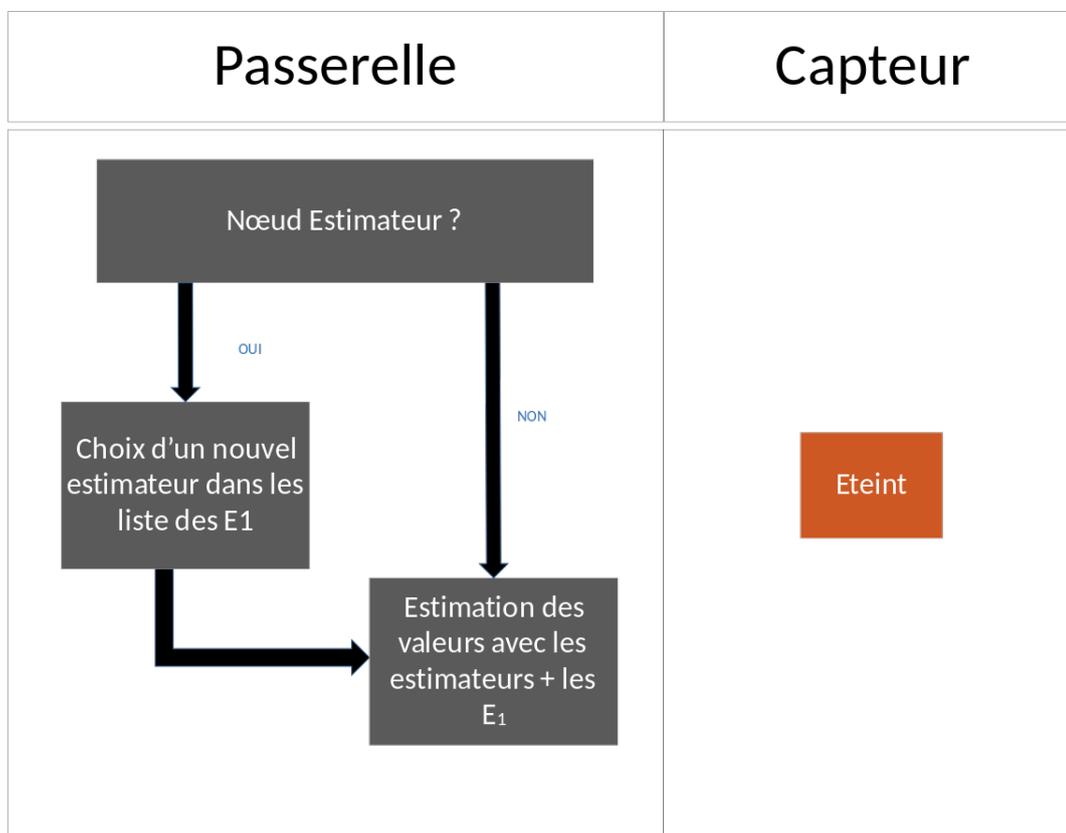


FIGURE 3.12 – Etat E_4 : Organisation pour une qualité de service fortement détaillée

Les différents états et fonctionnements pour une qualité de service élevée ont été détaillés. Une fois le réseau de capteur déployé, cela signifie que des transitions d'états sont possibles comme montré en Figure 3.4. Les changements d'états sont dépendants de la capacité d'un nœud capteur à récupérer de l'énergie, donc de sa position géographique lors du déploiement du réseau.

3.3 Conclusions

La contribution détaillée dans ce chapitre a pour principal objectif de comparer les problèmes qui résultent des pertes de transmission qui résultent d'un manque d'énergie au niveau des nœuds capteurs. Notre approche permet d'améliorer la Qualité de Service, en proposant des niveaux intermédiaires basés sur des méthodes de prédiction et d'estimation de séries temporelles. Cette proposition est une solution alternative aux mesures réelles, limitant les erreurs sur les estimations de données obtenues.

Afin de valider la pertinence de cette contribution, nous allons dans le Chapitre suivant détailler la plateforme expérimentale utilisée dans le prochain chapitre. Celle-ci a permis de valider en condition réelle l'implémentation des algorithmes proposés, leur intérêt et l'impact de différents paramètres comme la périodicité des mesures sur la qualité de service d'un réseau de capteurs.

4 Expérimentations et analyse des résultats

Les deux précédents chapitres ont permis de présenter nos deux principales contributions. La première est un modèle d'architecture de réseau capteurs qui permet de proposer une plateforme matérielle ayant une durée de vie importante sans impacter la qualité de service. La seconde contribution tente de pallier à une potentielle diminution de QoS par l'utilisation d'un protocole de prédiction combinant des mesures réelles à des données estimées et prédites mathématiquement. Pour cela, nous avons vérifié dans un premier temps leurs intérêts par des simulations et des expérimentations. Ce chapitre présente les résultats obtenus lors du déploiement d'un réseau comprenant une dizaine de capteurs. Ce dernier a été déployé au sein du bâtiment de l'Enseirb-Matmeca afin d'être comparé à un réseau de capteurs existant. Les deux réseaux sont détaillés et en particulier les différentes composantes : la passerelle, les nœuds capteurs ainsi que les emplacements. Le protocole expérimental et les résultats obtenus sont ensuite présentés. Nous pouvons alors effectuer une analyse du système obtenu.

4.1 Caractéristiques du réseau existant à l’Enseirb-Matmeca

4.1.1 nœuds Capteurs du réseau SC²

Un réseau a été déployé en 2019 au sein de l’Enseirb-Matmeca sur le campus universitaire de Bordeaux. Il se compose d’une vingtaine de nœuds capteurs. Le réseau SC² utilise la technologie LoRa comme moyen de communication entre la passerelle et les différents nœuds capteurs. Pour assurer cette communication, un module transceiver Semtech SX1276 [Semc] est utilisé. La technologie LoRa étant propriétaire, il est obligatoire de passer par les modules radio de ce fabricant. Par ailleurs un module DHT22 permet de mesurer la température, la pression et l’humidité. Un capteur audio donne, quant à lui, une information sur le volume sonore. Enfin, un dernier un capteur de luminosité évalue l’éclairage. La forte consommation électrique de la carte résultante implique une alimentation constante sur une prise secteur.

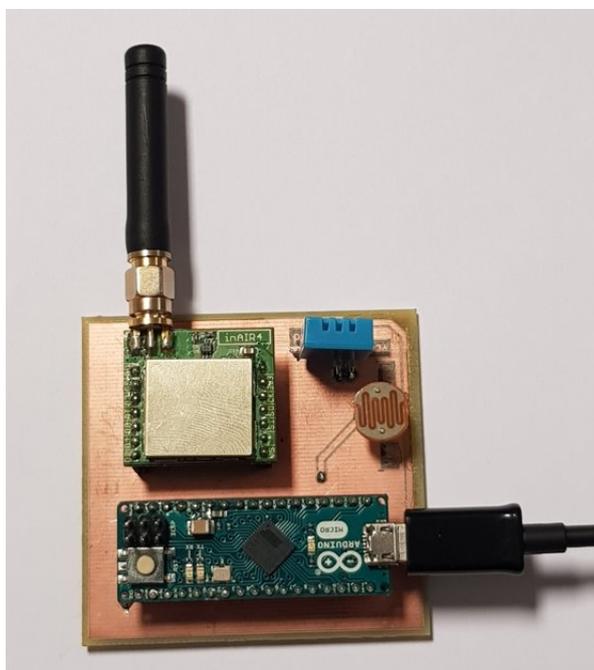


FIGURE 4.1 – Nœud capteur du réseau SC²

Un capteur déployé et fonctionnel est illustré par la Figure 4.1. Il est intéressant de noter que ces nœuds capteurs ont été divisés en deux groupes distincts selon leur fréquence de mesure. Ainsi, le second groupe a une fréquence de mesure qui est divisée par deux par rapport au premier ensemble, passant d’une période de mesure de 5 minutes à 10 minutes.

Les données mesurées sont ensuite transmises à une passerelle qui est en charge de les réceptionner et de les enregistrer dans une base de données comme décrit par la suite.

4.1.2 Passerelle du réseau SC²

La passerelle utilisée pour le réseau SC² est une carte Raspberry Pi 3. À cette dernière, il a été ajouté un shield custom avec également un module Semtech SX1276 afin de gérer la réception des données comme illustrée par la Figure 4.2. Elle a également une fonction de serveur afin de conserver les résultats de mesure dans une base de données InfluxDB [Inf]. Une visualisation graphique est possible via l'outil Grafana [Lab]. Il permet un affichage simplifié des séries temporelles créées à partir des différentes grandeurs mesurées par les nœuds capteurs puis enregistrées dans la base InfluxDB.

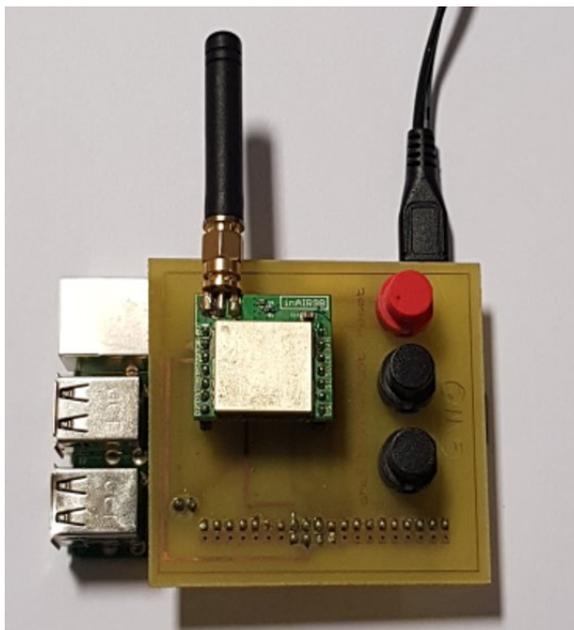


FIGURE 4.2 – Passerelle du réseau SC²

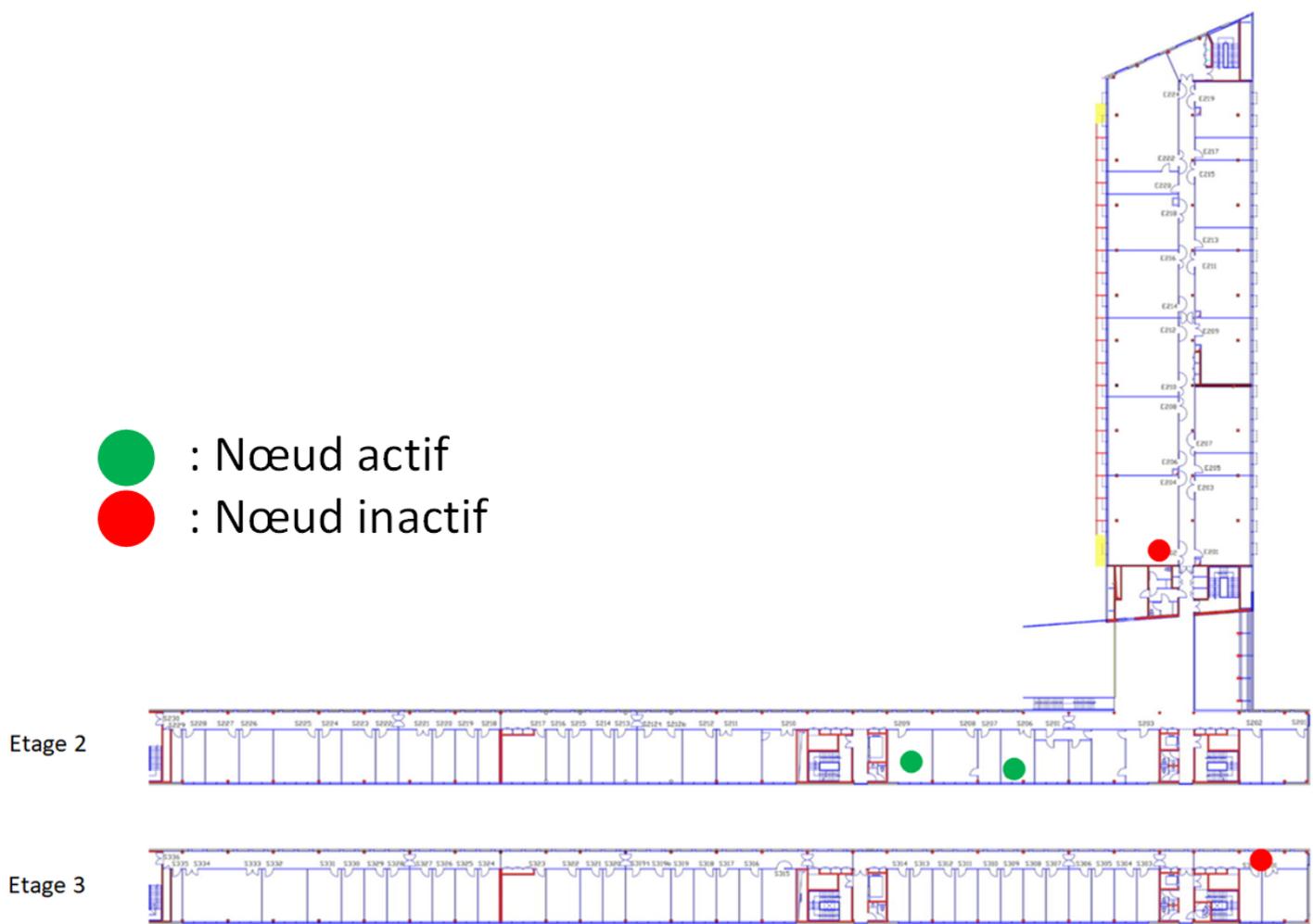
La passerelle fournit également des informations sur les nœuds capteurs ainsi que sur leur position respective dans le bâtiment. Le déploiement géographique des nœuds est détaillé dans la sous-section suivante.

4.1.3 Positionnement des nœuds capteurs du réseau SC²

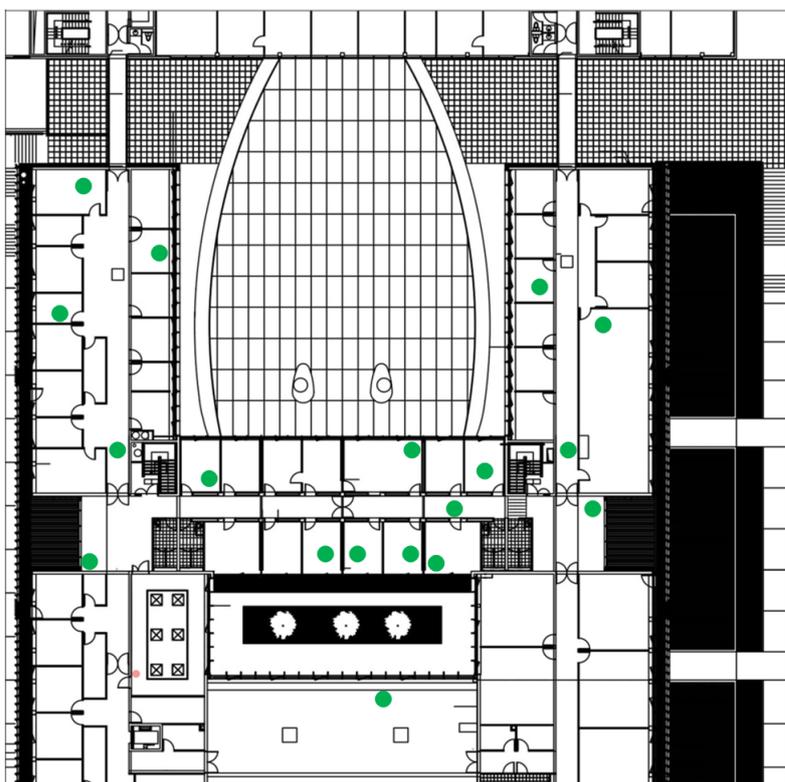
Le positionnement des différents nœuds capteurs a été effectué afin d'aboutir à une couverture significative du bâtiment de l'Enseirb-Matmeca. Les positions sont contraintes par les prises secteurs disponibles afin d'alimenter continuellement chaque nœud capteur. La Figure 4.3 représente l'ensemble du réseau. Le bâtiment est divisé en deux parties distinctes, communément appelé ancien bâtiment 4.3a et nouveau bâtiment 4.3b. Les capteurs sont schématisés à l'aide de deux couleurs qui informent sur leur état de fonctionnement lors de l'étude.

Nous observons une majorité de capteurs dans le nouveau bâtiment, de par leur proximité avec la passerelle.

4.1. Caractéristiques du réseau existant à l'Enseirb-Matmeca



(a) Ancien bâtiment



(b) Nouveau bâtiment

FIGURE 4.3 – Plan détaillant les positions des nœuds capteurs dans les deux bâtiments de l'Enseirb-Matmeca

4.1.4 Qualité de service

La qualité de service du réseau SC² se définit comme l'adéquation vis à vis de la fréquence des mesures et des transmissions souhaitées. Sauf en cas de coupure de courant, aucune batterie ou énergie n'a d'incidence sur la QoS. Néanmoins, des pertes de paquets en raison d'interférences peuvent limiter la transmission de données. Ce réseau ne possède aucune fonctionnalité permettant de pallier à cette éventualité.

La perte de paquets de données a été constatée en calculant le taux de données manquantes pour chaque nœud capteur pendant le mois en juillet 2019. Il a été relevé que onze nœuds capteurs avaient un taux de perte d'environ 50%. Cela signifie qu'une transmission sur deux n'a pas abouti. Pour les deux nœuds capteurs les plus éloignés vis à vis de la passerelle, des taux de perte de 88% ont été atteints. Cela signifie que seule une donnée sur 10 a été reçue par la passerelle.

Nous allons à présent décrire le réseau expérimental que nous avons déployé pour étudier l'efficacité des propositions faites dans le cadre des travaux de thèse.

4.1.5 Passerelle proposée pour notre réseau expérimental

Comme pour le réseau SC², une carte Raspberry Pi 4 est utilisée comme passerelle. Cependant, elle n'a plus besoin de shield supplémentaire. En effet, comme nous avons choisi le standard Bluetooth 5.2 pour les transmissions, nous pouvons utiliser directement le transceiver disponible sur la carte.

Nous pouvons observer sur la photo de la Figure 4.4 la passerelle déployée.



FIGURE 4.4 – Passerelle du réseau proposé

4.1. Caractéristiques du réseau existant à l'Enseirb-Matmeca

Notre passerelle est utilisée afin de réveiller les nœuds capteurs via la radio de réveil. InfluxDB est aussi utilisé pour la sauvegarde des données. Ces données sont exploitées par le protocole de prédiction comme expliqué dans le Chapitre 3. Les différents calculs de prédiction et d'estimation sont réalisés localement au niveau de la passerelle afin de permettre des prises de décision adaptées.

Une centralisation du réseau et des capteurs est également faite au niveau de la passerelle. Les nœuds capteurs, quant à eux, sont basés sur l'architecture détaillée dans le Chapitre 2.

4.1.6 Architecture des nœuds capteurs de notre réseau expérimental

Les nœuds capteurs de notre réseau expérimental sont tous conformes au modèle architectural proposé. Pour ce faire, une carte a été conçue afin de recevoir les différents composants électroniques. La carte et la boîte d'accueil sont présentés dans la Figure 4.5.

Durant nos expérimentations, deux types de nœuds capteurs ont été déployés. En effet, nous avons sélectionné deux modèles de batteries ainsi que deux types de panneau solaire. Le premier groupe comprend des batteries de 370 mAh et des panneaux solaires de dimension 4 par 3 centimètres. Le second groupe contient des batteries de 180 mAh et des panneaux photovoltaïques de dimension 4 par 1.5 centimètres.

Ce choix permet d'avoir un réseau hétérogène au niveau de la récupération d'énergie et de son stockage. Cela permet d'offrir différentes opportunités au niveau des positionnements dans le bâtiment. Pour ce dernier paramètre, nous avons essayé de différencier suffisamment les différents lieux afin de nous rapprocher d'un cas réel comme présenté par la suite.

4.1.7 Positions des nœuds capteurs de notre réseau expérimental

Les 12 nœuds capteurs expérimentaux ont été déployés comme indiqué dans la Figure 4.6. Ils sont positionnés dans le nouveau bâtiment sur deux étages différents ainsi que dans l'ancien bâtiment. Lorsque cela est possible, ils se trouvent proches d'un éclairage ou d'une fenêtre. Concernant l'orientation, les positions sont variées : orienté Sud, Nord, Est et Ouest. Cela rajoute de l'hétérogénéité à l'étude expérimentale.

Une fois le positionnement des nœuds capteurs explicité, nous pouvons détailler le protocole expérimental.

4.1. Caractéristiques du réseau existant à l'Enseirb-Matmeca



FIGURE 4.5 – Nœud capteur du réseau expérimental proposé

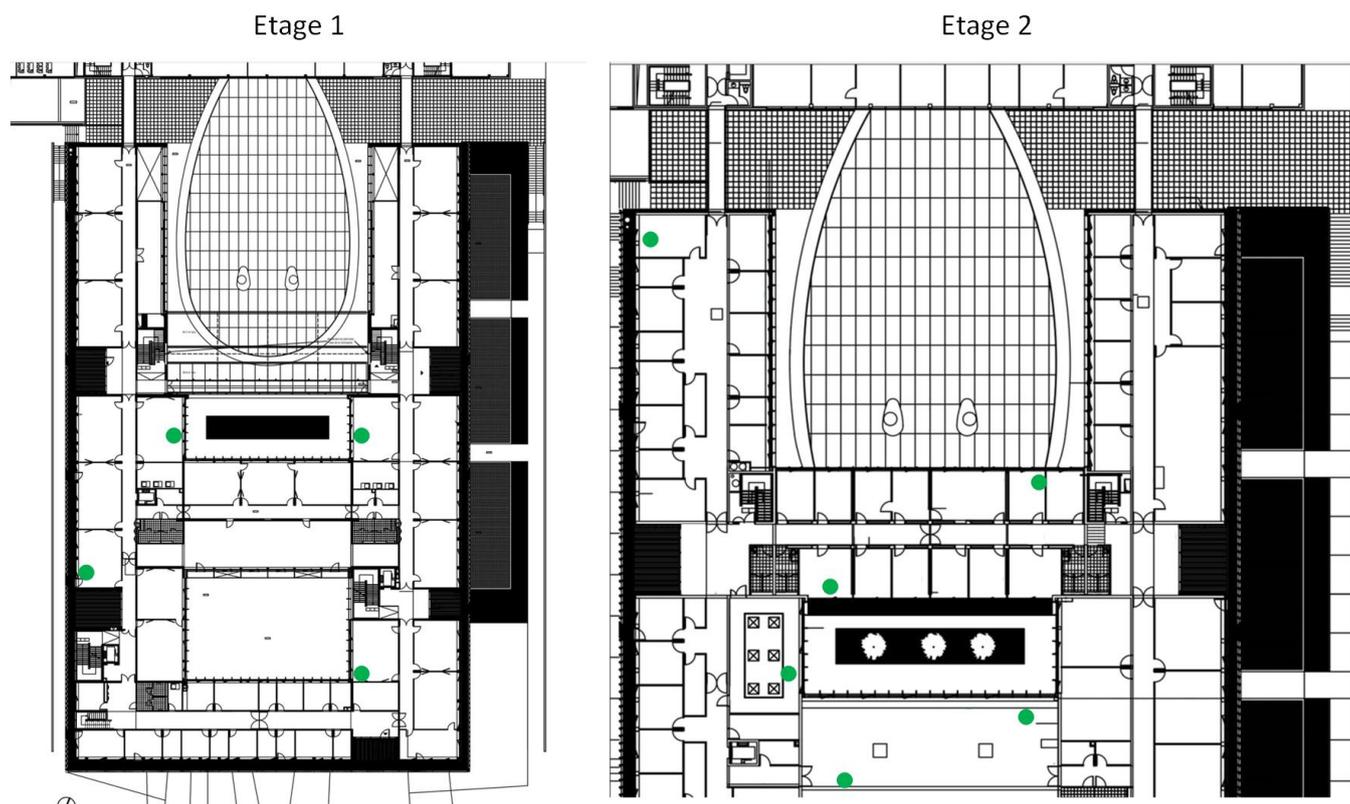


FIGURE 4.6 – Plan et position des nœuds capteurs dans le nouveau bâtiment de l’Enseirb-Matmeca

4.2 Protocole expérimental pour la validation du réseau de capteurs

Afin de pouvoir expérimenter nos contributions, nous avons mis en place un protocole expérimental comprenant plusieurs phases. Les données utilisées pour la suite des différentes expérimentations sont uniquement des mesures de températures.

4.2.1 Expérimentation de base sur notre réseau sans protocole de prédiction

En amont de l’expérimentation de notre réseau global, nous déployons le réseau sans le protocole de prédiction et d’estimation détaillé dans le Chapitre 3. L’ensemble des mesures permettent de nous assurer de la pertinence de nos estimations et prédictions pour un cas d’usage réel. Ainsi, nous avons vérifiés la possible corrélation des grandeurs pour différents lieux choisis de façon arbitraire afin de valider cette composante de notre proposition. Par ailleurs, ce premier ensemble d’expérimentation nous permet d’avoir des données de référence afin de comparer et de valider l’ensemble du réseau proposé. Nous réalisons pour cela des mesures toutes les cinq minutes.

4.2.2 Expérimentations de notre réseau intégrant des prédictions

Pour ce faire, nous devons fixer les différentes valeurs de tension qui modélisent le passage entre les quatre états de notre réseau. Nous prenons en compte la configuration de base du PMIC, qui désactive sa sortie lorsque la tension de la batterie est inférieure à 3.60 V correspondant environ à moins de 10% d'énergie disponible. Cette valeur correspond alors au passage dans l'état E_4 , où le capteur est éteint et pour lequel aucune mesure est effectuée. Les batteries retenues ont une tension maximale est de 4.20V. La plage restante est donc divisée en trois parties de 30% de charge chacune. Au final, le choix suivant a été fait :

1. E_1 : entre 4.20V et 3.92V qui correspond à plus 70% du niveau de charge.
2. E_2 : entre 3.92V et 3.79V qui correspond à une plage de 40% à 70% du niveau de charge.
3. E_3 : entre 3.79V et 3.60V qui correspond à une plage de 10% à 40% du niveau de charge.
4. E_4 : inférieur à 3.60V et donc inférieur à 10% du niveau de charge.

Concernant les fréquences de mesure, nous avons réalisé une série d'expérimentations, en faisant varier la période entre deux transmissions. La transmission de données via le standard BLE 5.2 est réalisée avec une puissance d'émission de 8dBm. Cette puissance est limitée par les caractéristiques techniques de la radio utilisée.

Une phase d'expérimentation se déroule donc de la manière suivante après déploiement du réseau :

1. Les valeurs de tensions représentant les niveaux de batterie de passage entre chaque état sont configurées.
2. La fréquence de mesure et de transmission de base est paramétrée au niveau de la passerelle.
3. Les batteries des capteurs sont rechargées au maximum .
4. La phase d'expérimentation et de mesures est lancée.
5. Le réseau fonctionne cinq jours afin de disposer d'un historique suffisant avant de choisir les nœuds capteurs estimateurs et de déterminer la capacité d'énergie à récolter pour chaque nœud capteur.
6. Le réseau fonctionne normalement en suivant la démarche détaillée dans le Chapitre 3.
7. Les données sont transmises à la passerelle. Elles sont stockées dans une base de données InfluxDB.

Nous disposons ainsi d'un ensemble de données qui permettent d'analyser l'efficacité de nos contributions.

4.3 Analyse des résultats expérimentaux

4.3.1 Pertinence du protocole de prédiction

Comme expliqué précédemment, nous commençons par déployer le réseau sans protocole de prédiction, afin de valider l'efficacité de notre approche. Cela est nécessaire sachant que c'est une composante essentielle de notre proposition. Pour cette configuration, nous avons laissé le réseau fonctionner durant trois semaines, afin d'obtenir deux semaines d'historique puis faire des prédictions théoriques la dernière semaine de l'expérimentation. Comme nous récupérons dans tous les cas l'ensemble des données, nous pouvons alors comparer les prédictions et les valeurs réelles de la dernière semaine d'expérimentation.

Nous récupérons alors l'ensemble des mesures et observons les différentes reconstructions ainsi que les erreurs moyennes obtenues.

La Figure 4.7 détaille les différentes erreurs de prédiction observées pour des historiques allant de 48 à 190 mesures. Comme expliqué précédemment, la période de temps entre deux mesures successives est de 5 minutes. Nous disposons donc de 4 heures à environ 16h de valeurs mesurées. Dans la représentation boîte à moustache, la valeur centrale ici en rouge représente la médiane, le bas et le haut de la boîte représentent respectivement les premier et troisième quartiles. Les moustaches inférieure et supérieure en mauve représentent, quant à elles, respectivement le minimum et le maximum entre le quartile plus ou moins 1.5 fois la distance interquartile. Enfin, des erreurs résiduelles apparaissent en forme de carré.

A la lecture de la Figure 4.7, nous pouvons conclure que pour tous les historiques au minimum 75% des estimations ont une erreur inférieure à 5%. De plus, les prédictions ont quasiment toutes des erreurs inférieures à 10%. Il y a tout de même un nœud capteur qui pose problème. Ce dernier a une erreur moyenne de presque 25% observée pour un historique de 60 mesures. Cela semble provenir de la position isolée du nœud capteur qui se retrouve à l'extrémité du troisième étage de l'ancien bâtiment. En effet, ce dernier et qui a des corrélations faibles avec le reste du réseau. Cela explique selon nous, l'erreur moyenne élevée pour ce nœud capteur.

Nous avons également déterminé l'erreur moyenne globale de tous les nœuds capteurs du réseau. Pour cela, nous avons fait varier le nombre de données prédites en fonction de la taille de l'historique. Nous considérons tout de même que le nombre de données à prédire est inférieur ou égal à la taille de l'historique.

La Figure 4.8 présente quatre cartes de chaleur pour des fréquences de mesure de 10, 20, 30 et 50 minutes. Tout d'abord, nous pouvons remarquer que plus le nombre de données à prédire est important, plus l'erreur moyenne est élevée. Cependant, nous retrouvons globalement les mêmes tendances que pour une période de mesure de 5 minutes. Pour les quatre fréquences différentes, nous observons une prédiction moins pertinente pour un historique de soixante mesures par rapport aux autres historiques.

4.3.2 Qualité de service du réseau de base sans prédiction

Par ailleurs, cette première expérimentation permet d'évaluer la perte de données due à un arrêt de fonctionnement des nœuds capteurs. Pour cela, nous calculons le pourcentage de

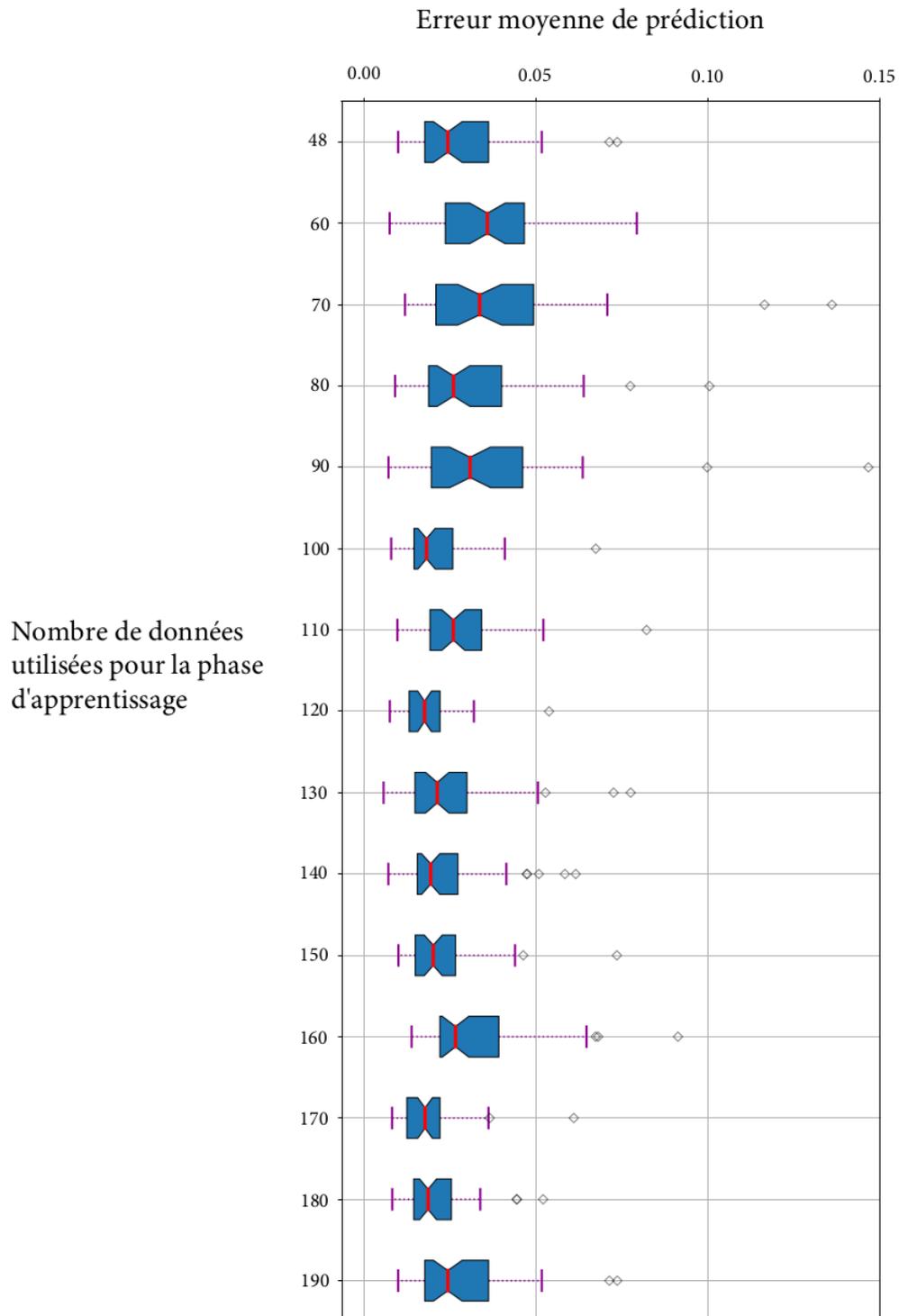


FIGURE 4.7 – Boîte à moustache récapitulant l'ensemble des erreurs pour des historiques différents

4.3. Analyse des résultats expérimentaux

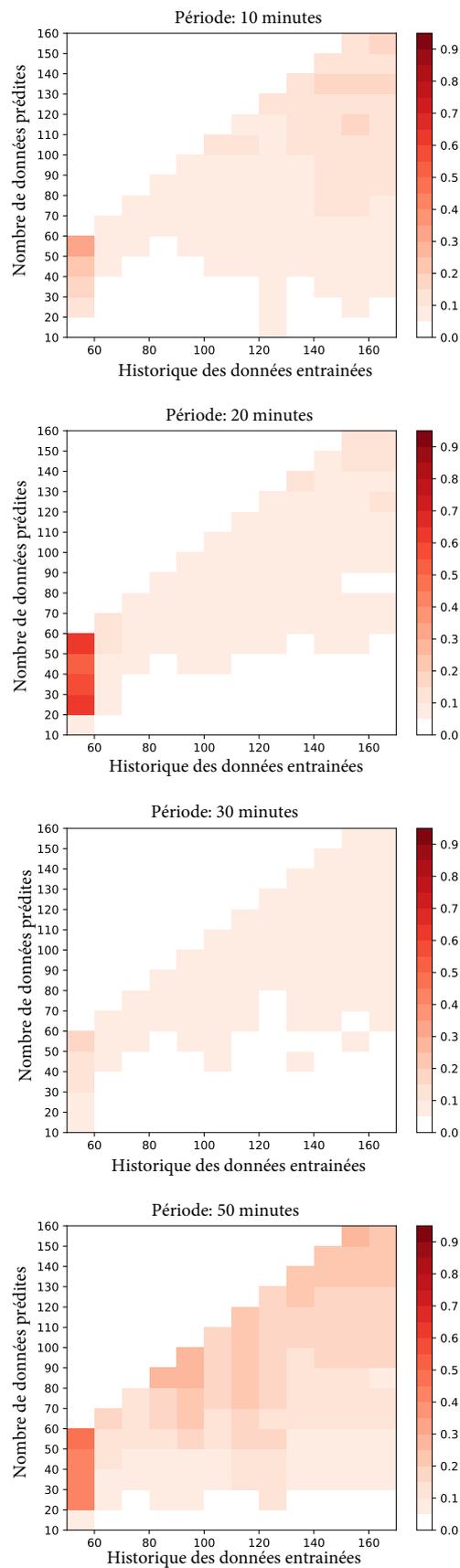


FIGURE 4.8 – Carte de chaleur (Heatmap) représentant l'erreur moyenne pour différentes tailles d'historiques

4.3. Analyse des résultats expérimentaux

Nœud capteur	Temps dans l'état E1 (%)	Temps dans l'état E4 (%)	Score (1-(E4/E1))
1	99.5	0.5	0.995
2	98.6	1.4	0.986
3	98.4	1.6	0.984
4	92.1	7.9	0.914
5	89.3	10.7	0.880
6	87.5	12.5	0.857
7	82.6	17.4	0.789
8	75.4	24.6	0.674
9	74.2	25.8	0.652
10	64.1	35.9	0.44
11	58.8	41.2	0.300
12	53.6	44.4	0.172

Tableau 4.1 – Synthèse des différents temps de fonctionnement dans les états E_1 et E_4 pour douze nœuds capteurs sans protocole de prédiction

temps en fonctionnement et celui dans le mode éteint. Ces deux types d'usage s'apparentent aux états E_1 et E_4 , correspondant à la meilleure et à la plus faible qualité de service.

Il est à noter que les grandeurs ont été calculées chaque semaine. Lors du déploiement, comme les batteries étaient chargées, nous étions à 100% de mesures effectuées et transmises. Ce n'est qu'à partir des semaines suivantes que nous avons pu observer l'implication du positionnement géographique de chaque nœud capteur sur leur fonctionnement au sein du réseau.

Le Tableau 4.1 récapitule les différents pourcentages de temps passé dans les états en fonctionnement (E_1) ou en arrêt (E_4). Les capteurs sont classés du meilleur au moins bon selon un critère score. Le score correspond à un rapport des pourcentages dans les deux états. Sa formule est la suivante :

$$\text{Score} = 1 - \left(\frac{\% \text{ de temps en état } E_4}{\% \text{ de temps en état } E_1} \right) \quad (4.1)$$

Plus le score est proche de 1, plus le nœud capteur se trouve dans l'état E_1 . Cela signifie que la qualité de service est élevée. Si ce score est égal à zéro, alors le capteur passe autant de temps dans l'état E_4 que dans l'état E_1 . Si le score est inférieur à 0, alors le capteur passe plus de temps dans l'état E_4 que dans l'état E_1 . La qualité de service est alors très mauvaise. L'objectif est que les nœuds capteurs aient tous un score le plus proche possible de 1.

Nous pouvons par un calcul de moyenne déterminer ce score sur la totalité du réseau et ainsi quantifier sa qualité de service. Nous obtenons pour l'expérimentation menée un score global de **0.705**. L'objectif du protocole de prédiction proposé est donc d'améliorer le score

Noeud capteur	Temps en état E1, E2 ou E3 (%)	Temps en état E4 (%)	Score (1-(E4/E1))
1	98.4	1.6	0.984
2	96.8	3.2	0.967
3	97.6	2.4	0.975
4	95.7	4.3	0.955
5	98.2	1.8	0.982
6	98.7	1.3	0.987
7	94.5	5.5	0.942
8	88.7	11.3	0.873
9	84.2	15.8	0.812
10	78.6	21.4	0.728
11	72.1	27.9	0.613
12	67.3	32.7	0.514

Tableau 4.2 – Synthèse des différents temps de fonctionnement dans les états E_1 , E_2 , E_3 et E_4 pour douze nœuds capteurs avec le protocole de prédiction.

global et de se rapprocher le plus possible de 1.

Ces différentes grandeurs permettent d’avoir une référence pour l’analyse de la pertinence du protocole de prédiction.

4.3.3 Qualité de service du réseau intégrant le protocole de prédiction

Dans un second temps, nous avons déployé au sein de notre réseau le protocole de prédiction présenté dans le Chapitre 3.

Comparaison du réseau avec ou sans protocole de prédiction

Nous considérons une configuration similaire à celle de la première expérimentation, avec une période entre deux mesures de cinq minutes.

Lors de l’ajout du protocole de prédiction, nous observons une amélioration des performances comme le montre la synthèse dans le Tableau 4.2. Nous regroupons dans ce tableau les états E_1 , E_2 et E_3 afin d’avoir une comparaison cohérente avec les résultats du Tableau 4.1. En effet, même si les états E_2 et E_3 proposent des qualités de service dégradées, des données sont obtenues. Le score du réseau complet passe alors de **0.705** à **0.861**. Cela représente un gain d’environ **15%** au niveau du score moyen.

Si nous considérons indépendamment chaque nœud capteur, nous observons des améliorations, mais aussi de légères dégradations de score. Par exemple pour le capteur numéro 12, le score est amélioré de **34.4%**. Nous obtenons donc bien une amélioration significative de

4.3. Analyse des résultats expérimentaux

Nœud capteur	Score pour 5 min	Score pour 10 min	Score pour 20 min
1	0.984	0.987	0.990
2	0.967	0.971	0.989
3	0.975	0.974	0.983
4	0.955	0.964	0.978
5	0.982	0.980	0.982
6	0.987	0.988	0.985
7	0.942	0.961	0.978
8	0.873	0.900	0.942
9	0.812	0.856	0.889
10	0.728	0.789	0.867
11	0.613	0.768	0.771
12	0.514	0.643	0.713

Tableau 4.3 – Synthèse des scores obtenus par les douze nœuds capteurs avec le protocole de prédiction pour des périodes de mesure de 5, 10 et 20 minutes

la qualité de service de ce nœud capteur. Cette tendance a été observée pour la majorité des nœuds capteurs. Cela est obtenu grâce au protocole de prédiction et de ses techniques d'estimation. Par ailleurs, la légère baisse de score des premiers nœuds capteurs peut s'expliquer. En effet, ces derniers étant en majorité sélectionnés comme nœuds estimateurs, une charge de calcul supplémentaire leur est attribuée. Celle-ci induit alors une surconsommation qui implique que le nœud capteur peut alors passer plus souvent dans l'état de qualité de service fortement faible.

Néanmoins, nous pouvons conclure que leur score reste très satisfaisant. En conclusion, le protocole de prédiction proposé permet une amélioration significative du score de l'ensemble du réseau.

Effet des fréquences de mesure et de transmission

Nous allons maintenant étudier l'effet des fréquences de mesure et de transmission sur le réseau. Pour cela, nous avons réalisé un autre type d'expérimentation avec des périodes de 10 et 20 minutes entre deux sollicitations d'un nœud capteur.

La diminution de la fréquence de transmission permet de réduire le nombre de sollicitations d'un nœud capteur. Ainsi, il passe plus de temps en mode *endormi*. Cela signifie que sa consommation énergétique est plus faible.

La Tableau 4.3 récapitule les différents scores obtenus par chaque nœud suivant différentes fréquences de sollicitation. Ce paramètre est doublé puis quadruplé, divisant par deux et quatre le nombre de mesures et transmissions. Comme nous pouvons le noter, le coefficient multiplicateur appliqué à la période de transmission ne se répercute pas directement sur l'augmentation des valeurs de scores.

4.3. Analyse des résultats expérimentaux

Cependant, nous constatons une amélioration des durées de vie des nœuds capteurs à travers l'amélioration des scores.

4.4 Analyse et conclusions

L'ensemble des expérimentations que nous avons réalisées permettent d'évaluer l'impact de nos contributions.

Tout d'abord, le passage à une architecture comprenant une batterie, une cellule photovoltaïque et une wake-up radio permet aux nœuds capteurs d'être autonomes énergétiquement. De plus, ce passage facilite grandement le choix de positions pour le déploiement du réseau. En effet, le déploiement n'est plus contraint par la disponibilité de prise électrique. Nous avons tout même observé une baisse de la qualité de service lorsqu'un nœud capteur se retrouve avec une récupération d'énergie insuffisante pour le maintenir à 100% opérationnel.

C'est pour cette raison que nous avons proposé l'intégration d'un protocole de prédiction comme présenté dans le Chapitre 3. Il permet de passer de deux à quatre états de fonctionnement. Nous avons ainsi une perte de qualité de service progressive, réduisant les périodes de non fonctionnement.

Durant les expérimentations, nous avons déterminé des scores de fonctionnement du réseau sans l'ajout du protocole de prédiction. Nous observons que selon la position du capteur, il y a une variation du score qui représente le rapport entre les temps passés avec une qualité de service forte et un défaut de qualité de service. Cela est dû à la capacité de chaque nœud capteur à récupérer de l'énergie. Celle-ci est variable de par leur positionnement. Nous rappelons aussi que les panneaux photovoltaïques ne sont pas tous les mêmes. Il est à souligner que les capteurs avec les plus grandes cellules ne sont pas forcément ceux avec les meilleures capacités à récupérer de l'énergie. Ces différents résultats montrent que c'est l'éclairage qui est le facteur principal. Ainsi, un capteur orienté Sud au bord d'une fenêtre récupère bien plus d'énergie qu'un autre mal orienté, même si le panneau solaire est plus petit.

Le Tableau 4.2 de la Sous-Section 4.3.3 récapitule les scores obtenus par un fonctionnement du réseau avec le protocole de prédiction. Ici, la fréquence de sollicitation est la même que précédemment, soit 5 minutes entre deux mesures. Nous observons une amélioration globale du score du réseau. Pour cela nous considérons les états E_1 , E_2 et E_3 ensemble afin de comparer aux résultats précédents. Nous partons de ce principe, car malgré une qualité de service décroissante, ce sont des états qui permettent à la passerelle de récupérer des données même si elles peuvent être décalées dans le temps. De par la sursollicitation de certains nœuds capteurs, nous observons une baisse de score pour quelques-uns d'entre eux. Mais le ratio reste tout de même très proche de 1, ce qui assure une très bonne qualité de service.

Il est d'ailleurs nécessaire de préciser que comme nous considérons un fonctionnement correct lorsque la donnée est bien reçue par la passerelle, les scores obtenus considèrent les possibles pertes de paquet causées par des interférences lors de transmissions.

Enfin, nous avons observé l'effet de la fréquence de sollicitation d'un nœud capteur sur son score. Nous avons constaté que cela permet une augmentation du score des nœuds capteurs. Un certain nombre de nœuds capteurs avait déjà un score supérieur à 0.95, soit très proche de 1. Pour ceux-là, une augmentation du temps entre deux mesures n'est pas forcément pertinente, malgré une légère amélioration. En revanche, l'effet de ce paramètre est notable pour les nœuds capteurs numéro 8 à 12.

Conclusion

Pour conclure, cette série d'expérimentations a permis de valider nos propositions. Tous d'abord comparé à un réseau existant, l'intérêt a été observé par la flexibilité du réseau et de son architecture. Néanmoins, il demeure dépendant de la récupération d'énergie d'un nœud capteur, et donc de son positionnement.

Pour pallier à cela, nous avons observé l'effet de l'ajout d'un protocole de prédiction sur les nœuds capteurs et le réseau. Une amélioration significative a été obtenue grâce aux méthodes de prédictions associées à une variation progressive de qualité de service.

Conclusion et Perspectives

Conclusion

Les travaux de recherche effectués au cours de cette thèse se sont focalisés sur l'étude et la conception de nœuds capteurs autonomes et intelligents pour un campus durable responsable et fortement connecté.

Les réseaux de capteurs permettent de connecter des bâtiments et de fournir de nouveaux services à leurs usagers. Différentes propositions de réseaux de capteurs et d'améliorations de leurs composants ont été faites dans la littérature. Un état de l'art sur des thématiques de recherche qui relèvent de ce domaine a été présenté dans le Chapitre 1. Une présentation des généralités sur les réseaux de capteur et de leurs composantes permettent une bonne compréhension des défis qui étaient à relever dans le cadre de ces travaux de thèse. Ce chapitre aborde également différentes techniques d'amélioration de la durée de vie d'un nœud capteur. Enfin, l'intérêt de méthodes d'apprentissage dans ces réseaux est discuté.

Le modèle architectural de nœuds capteurs proposé est décrit dans le Chapitre 2. Il est basé sur les principes de récupération d'énergie et de radio de réveil. Les différents éléments qui composent cette proposition permettent d'obtenir un nœud capteur autonome. Cette autonomie est tout de même dépendante des conditions de l'environnement de déploiement. Il est également proposé un modèle de consommation énergétique qui permet de faciliter la caractérisation d'un nœud capteur préalable au déploiement. La pertinence de ce modèle de consommation a été vérifiée à l'aide d'expérimentations. Plus généralement, les travaux ont permis de valider l'intérêt du modèle architectural qui a une durée de vie théorique qui peut être considérée comme illimitée. Néanmoins, l'autonomie implique une variabilité de la qualité de service du système.

Afin de pallier à cette variabilité, et donc aux problèmes de dysfonctionnement, nous avons proposé un protocole de prédiction associé à l'architecture du réseau. Notre approche permet d'augmenter la Qualité de Service. Pour cela, le système passe de deux niveaux de Qualité de Service à quatre niveaux différents. Ainsi, en plus des niveaux fort et faible, nous avons deux niveaux supplémentaires, faiblement fort et faiblement faible. Ils permettent une variation progressive de la QoS. Pour cela, nous proposons l'utilisation d'estimation de données, qui deviennent une alternative aux données réelles tout en limitant les erreurs induites.

Enfin, les expérimentations décrites tout au long du Chapitre 4 ont permis de valider les propositions. Pour cela, un réseau de capteur de taille réduite (12 nœuds capteurs) a été déployé au sein d'un bâtiment universitaire. Nous avons ainsi pu obtenir une première comparaison avec un réseau existant. La flexibilité du réseau et de son architecture a pu être observée, comme sa dépendance à la récupération d'énergie. Enfin, les atouts du protocole de prédiction ont pu être mis en exergue.

Perspectives

À la suite de ces travaux de thèse, plusieurs perspectives de recherche à court et moyen terme se dégagent :

1. Lors de l'utilisation de l'estimation de séries temporelles dans le protocole de prédiction, les choix réalisés ont été faits selon un type de données, à savoir des mesures de température. L'étude de l'intercorrélation entre différents types de mesure doit permettre d'affiner et d'améliorer l'efficacité du protocole de prédiction. En effet, l'intégration par exemple de données concernant l'humidité et/ou la pression pour la reconstruction d'une température est une possibilité à investiguer.
2. Les différentes études et expérimentations réalisées dans les travaux de thèse ont été faites à l'aide d'un réseau de taille réduite au niveau du nombre de nœuds capteurs. Il serait donc intéressant de faire une mise à l'échelle du réseau expérimental. Nous pourrions, par exemple, déployer un réseau sur plusieurs bâtiments. Cela permettrait d'affiner les résultats en tirant profit à plus grande échelle de l'hétérogénéité de données.
3. Dans même, il faudrait concevoir un circuit spécifiquement pour ce réseau intégrant l'ensemble des éléments électroniques de la carte actuelle. Les nœuds capteurs ont été réalisés en utilisant des composants discrets. Les performances sont donc réduites par rapport à celles d'un circuit dédié. Les résultats obtenus et présentés dans le cadre de travaux de thèse devraient alors être améliorés.
4. A moyens termes, il serait intéressant d'étudier l'effet d'un traitement hétérogène des nœuds capteurs d'un réseau. Pour le protocole de prédiction proposé, les paramètres des différents capteurs sont les mêmes. Lorsque configurées, les fréquences de mesure et de transmissions de données sont identiques pour tous les nœuds capteurs. De plus, une augmentation de l'hétérogénéité matérielle peut être intéressante à étudier. Associer différentes configurations peut potentiellement apporter une amélioration des performances globales du réseau.
5. Par ailleurs, un enrichissement des nœuds de capteurs au niveau des fonctionnalités est possible. Pour le moment seules des mesures de température, d'humidité et de pression sont faites. Un ajout de grandeurs mesurables permettrait d'augmenter le spectre applicatif du réseau. Par exemple, l'ajout d'un capteur de CO₂ donnerait des informations sur la qualité de l'air d'une pièce d'un bâtiment. De plus, l'ajout de différents types de mesures permettrait d'augmenter les sources disponibles pour de potentielles reconstructions de séries temporelles. En plus d'applications supplémentaires, le réseau atteindrait potentiellement une meilleure qualité de service en proposant des estimations plus fines.
6. Enfin, une étude de l'ajout de techniques de récupération d'énergie alternative serait pertinente. Dans le cadre de la thèse, nous avons utilisé l'énergie solaire et l'éclairage artificiel. L'association de sources énergétiques alternatives augmenterait l'autonomie des nœuds capteurs. Cela limiterait alors les pertes de qualité de services observées. Que ce soit l'énergie thermique, l'énergie mécanique ou encore l'énergie RF comme déjà réalisé par [Nic21], la multiplicité de ces sources peut être étudiée afin de s'assurer des apports mais également des limitations résultantes.

Bibliographie

- [Sch02] Chana R SCHOENBERGER. “The internet of things chips at the checkout counter”. In : *Forbes* 169.6 (2002), p. 155-161 (cf. p. 1).
- [VKR21] Karthik Kumar VAIGANDLA, Radha Krishna KARNE et Allanki Sanyasi RAO. “A Study on IoT Technologies, Standards and Protocols”. In : *IBMRD’s Journal of Management & Research* 10.2 (2021), p. 7-14 (cf. p. 1).
- [Wan+21] Jianxin WANG, Ming K LIM, Chao WANG et Ming-Lang TSENG. “The evolution of the Internet of Things (IoT) over the past 20 years”. In : *Computers & Industrial Engineering* 155 (2021), p. 107174 (cf. p. 1).
- [Insa] Transforma INSIGHTS. “Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2030, by vertical”. In : (). URL : <https://www.statista.com/statistics/1194682/iot-connected-devices-vertically/> (cf. p. 1).
- [Bou+18] Taoufik BOUGUERA, Jean-François DIOURIS, Jean-Jacques CHAILLOUT, Randa JAOUADI et Guillaume ANDRIEUX. “Energy consumption model for sensor nodes based on LoRa and LoRaWAN”. In : *Sensors* 18.7 (2018), p. 2104 (cf. p. 1).
- [Des11] Denis DESSALES. “Conception d’un réseau de capteurs sans fil, faible consommation, dédié au diagnostic in-situ des performances des bâtiments en exploitation”. Thèse de doct. Poitiers, 2011 (cf. p. 8).
- [Sema] Nordic SEMICONDUCTOR. “nRF52840 - Bluetooth 5.2 SoC”. In : (). URL : <https://www.nordicsemi.com/Products/nRF52840> (cf. p. 10).
- [STM] STMICROELECTRONICS. “STM32 Ultra Low Power MCUs”. In : (). URL : <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-ultra-low-power-mcus.html> (cf. p. 10).
- [Mic] MICROCHIP. “32-bit PIC® and SAM Microcontrollers”. In : (). URL : <https://www.microchip.com/en-us/products/microcontrollers-and-microprocessors/32-bit-mcus> (cf. p. 10).
- [MLW12] Elke MACKENSEN, Matthias LAI et Thomas M WENDT. “Bluetooth Low Energy (BLE) based wireless sensors”. In : *SENSORS, 2012 IEEE*. IEEE. 2012, p. 1-4 (cf. p. 11).
- [Gis08] Drew GISLASON. *Zigbee wireless networking*. Newnes, 2008 (cf. p. 11).
- [Sun+14] Weiping SUN, Okhwan LEE, Yeonchul SHIN, Seongwon KIM, Changmok YANG, Hyoil KIM et Sunghyun CHOI. “Wi-Fi could be much more”. In : *IEEE Communications Magazine* 52.11 (2014), p. 22-29 (cf. p. 11).
- [Mek+19] Kais MEKKI, Eddy BAJIC, Frederic CHAXEL et Fernand MEYER. “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment”. In : *ICT express* 5.1 (2019), p. 1-7 (cf. p. 11).

- [Semb] SEMTECH. *LoRa PHY*. URL : <https://fr.semtech.com/lora/what-is-lora>.
- [LPP19] Alexandru LAVRIC, Adrian I PETRARIU et Valentin POPA. “Sigfox communication protocol : The new era of iot ?” In : *2019 International Conference on Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI)*. IEEE. 2019, p. 1-4 (cf. p. 11).
- [MSD17] Sergio Huertas MARTINEZ, PhD Octavio J SALCEDO et Brayan Steven Reyes DAZA. “IoT application of WSN on 5G infrastructure”. In : *2017 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*. IEEE. 2017, p. 1-6 (cf. p. 11).
- [Insb] Texas INSTRUMENTS. “CC2420”. In : (). URL : <https://www.ti.com/product/CC2420> (cf. p. 17).
- [Rou03] Shadrach Joseph ROUNDY. *Energy scavenging for wireless sensor nodes with a focus on vibration to electricity conversion*. University of California, Berkeley, 2003 (cf. p. 18).
- [Arm+05] Steven W ARMS, CP TOWNSEND, DL CHURCHILL, JH GALBREATH et SW MUNDELL. “Power management for energy harvesting wireless sensors”. In : *Smart Structures and Materials 2005 : Smart Electronics, MEMS, BioMEMS, and Nanotechnology*. T. 5763. International Society for Optics et Photonics. 2005, p. 267-275 (cf. p. 18).
- [BW10] Stephen BEEBY et Neil M WHITE. *Energy harvesting for autonomous systems*. Artech House, 2010 (cf. p. 18).
- [CTS08] Kimberly A COOK-CHENNAULT, Nithya THAMBI et Ann Marie SASTRY. “Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems”. In : *Smart materials and structures* 17.4 (2008), p. 043001 (cf. p. 19).
- [GB08] James M GILBERT et Farooq BALOUCHI. “Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks”. In : *International Journal of automation and computing* 5.4 (2008), p. 334-347 (cf. p. 19).
- [Mat+08] Cian O MATHUNA, Terence O’DONNELL, Rafael V MARTINEZ-CATALA, James ROHAN et Brendan O’FLYNN. “Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks”. In : *Talanta* 75.3 (2008), p. 613-623 (cf. p. 19).
- [Lan06] Jean-Daniel LANGLOIS. “Modélisation et étude des performances des systèmes éoliens hors réseau”. Thèse de doct. École de technologie supérieure, 2006 (cf. p. 19).
- [Buc+14] Bernhard BUCHLI, Felix SUTTON, Jan BEUTEL et Lothar 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*. 2014, p. 31-45 (cf. p. 19).
- [SJ16] Minchul SHIN et Inwhee JOE. “Energy management algorithm for solar-powered energy harvesting wireless sensor node for internet of things”. In : *Iet Communications* 10.12 (2016), p. 1508-1521 (cf. p. 19).
- [Cha+16] Salar CHAMANIAN, Hasan ULUŞAN, Özge ZORLU, Sajjad BAGHAEE, Elif UYSAL-BIYIKOGLU et Haluk KÜLAH. “Wearable battery-less wireless sensor network with electromagnetic energy harvesting system”. In : *Sensors and Actuators A : Physical* 249 (2016), p. 77-84 (cf. p. 19).

- [HKB99] Wendi Rabiner HEINZELMAN, Joanna KULIK et Hari BALAKRISHNAN. “Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks”. In : *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. 1999, p. 174-185 (cf. p. 21).
- [CLL06] Yuanzhu Peter CHEN, Arthur L LIESTMAN et Jiangchuan LIU. “A hierarchical energy-efficient framework for data aggregation in wireless sensor networks”. In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 55.3 (2006), p. 789-796 (cf. p. 21).
- [SKS17] Sunil Kumar SINGH, Prabhat KUMAR et Jyoti Prakash SINGH. “A survey on successors of LEACH protocol”. In : *Ieee Access* 5 (2017), p. 4298-4328 (cf. p. 21).
- [MA02] Arati MANJESHWAR et Dharma P AGRAWAL. “APTEEN : A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks”. In : *Parallel and distributed processing symposium, international*. T. 3. Citeseer. 2002, 0195b-0195b (cf. p. 21).
- [GS+14] Jitender GROVER, Mohit SHARMA et al. “Optimized GAF in wireless sensor network”. In : *Proceedings of 3rd International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization*. IEEE. 2014, p. 1-6 (cf. p. 21).
- [CE04] Alberto CERPA et Deborah ESTRIN. “ASCENT : Adaptive self-configuring sensor networks topologies”. In : *IEEE transactions on mobile computing* 3.3 (2004), p. 272-285 (cf. p. 21).
- [Als+15] M. A. ALSHEIKH, S. LIN, D. NIYATO et H. -P. TAN. “Machine learning in wireless sensor networks : Algorithms, strategies, and applications”. In : ACM, 2015, p. 36-43. DOI : 10.1145/2802130.2802136 (cf. p. 21, 22).
- [BAS18] Seyed Saber BANIHASHEMIAN, Fazlollah ADIBNIA et Mehdi A SARRAM. “A new range-free and storage-efficient localization algorithm using neural networks in wireless sensor networks”. In : *Wireless Personal Communications* 98.1 (2018), p. 1547-1568 (cf. p. 22).
- [Sun+17] Baoming SUN, Yan GUO, Ning LI et Dagang FANG. “Multiple target counting and localization using variational Bayesian EM algorithm in wireless sensor networks”. In : *IEEE Transactions on Communications* 65.7 (2017), p. 2985-2998 (cf. p. 22).
- [ZMA17] Salah ZIDI, Tarek MOULAHY et Bechir ALAYA. “Fault detection in wireless sensor networks through SVM classifier”. In : *IEEE Sensors Journal* 18.1 (2017), p. 340-347 (cf. p. 22, 25).
- [ZLK16] Haibin ZHANG, Jiajia LIU et Nei KATO. “Threshold tuning-based wearable sensor fault detection for reliable medical monitoring using Bayesian network model”. In : *IEEE Systems Journal* 12.2 (2016), p. 1886-1896 (cf. p. 22).
- [Meh+17] Amjad MEHMOOD, Zhihan LV, Jaime LLORET et Muhammad Muneer UMAR. “ELDC : an artificial neural network based energy-efficient and robust routing scheme for pollution monitoring in WSNs”. In : *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing* 8.1 (2017), p. 106-114 (cf. p. 22).
- [Kaz+14] Fatemeh KAZEMEYNI, Olaf OWE, Einar Broch JOHNSEN et Ilango BALASINGHAM. “Formal modeling and analysis of learning-based routing in mobile wireless sensor networks”. In : *Integration of Reusable Systems*. Springer, 2014, p. 127-150 (cf. p. 22).

- [SK18] Amandeep SHARMA et Ajay KAKKAR. “Forecasting daily global solar irradiance generation using machine learning”. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018), p. 2254-2269 (cf. p. 22, 24).
- [MPV21] Douglas C MONTGOMERY, Elizabeth A PECK et G Geoffrey VINING. *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons, 2021 (cf. p. 22).
- [GMJ19] Paulo GIL, Hugo MARTINS et Fábio JANUÁRIO. “Outliers detection methods in wireless sensor networks”. In : *Artificial Intelligence Review* 52.4 (2019), p. 2411-2436 (cf. p. 23).
- [RD16] Anindita RAY et Debashis DE. “Energy efficient clustering protocol based on K-means (EECPK-means)-midpoint algorithm for enhanced network lifetime in wireless sensor network”. In : *IET Wireless Sensor Systems* 6.6 (2016), p. 181-191 (cf. p. 23).
- [Qin+16] Jiahu QIN, Weiming FU, Huijun GAO et Wei Xing ZHENG. “Distributed k-means algorithm and fuzzy c-means algorithm for sensor networks based on multiagent consensus theory”. In : *IEEE transactions on cybernetics* 47.3 (2016), p. 772-783 (cf. p. 23).
- [ZG09] Xiaojin ZHU et Andrew B GOLDBERG. “Introduction to semi-supervised learning”. In : *Synthesis lectures on artificial intelligence and machine learning* 3.1 (2009), p. 1-130 (cf. p. 23).
- [YKK15] Jaehyun YOO, Woojin KIM et Hyoun Jin KIM. “Distributed estimation using online semi-supervised particle filter for mobile sensor networks”. In : *IET Control Theory & Applications* 9.3 (2015), p. 418-427 (cf. p. 23).
- [ZC15] Mingbo ZHAO et Tommy WS CHOW. “Wireless sensor network fault detection via semi-supervised local kernel density estimation”. In : *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE. 2015, p. 1495-1500 (cf. p. 23, 25).
- [Kos16] Selahattin KOSUNALP. “A new energy prediction algorithm for energy-harvesting wireless sensor networks with Q-learning”. In : *IEEE Access* 4 (2016), p. 5755-5763 (cf. p. 24).
- [AGB18] Fayçal Ait AOUDIA, Matthieu GAUTIER et Olivier BERDER. “RLMan : An energy manager based on reinforcement learning for energy harvesting wireless sensor networks”. In : *IEEE Transactions on Green Communications and Networking* 2.2 (2018), p. 408-417 (cf. p. 24).
- [Men+17] Weizhi MENG, Wenjuan LI, Yang XIANG et Kim-Kwang Raymond CHOO. “A bayesian inference-based detection mechanism to defend medical smartphone networks against insider attacks”. In : *Journal of Network and Computer Applications* 78 (2017), p. 162-169 (cf. p. 25).
- [Li+15] Chunlin LI, Xiaofu XIE, Yuejiang HUANG, Hong WANG et Changxi NIU. “Distributed data mining based on deep neural network for wireless sensor network”. In : *International Journal of Distributed Sensor Networks* 11.7 (2015), p. 157453 (cf. p. 25).
- [AS16] Abdullah ALGHAMDI et Sachin SHETTY. “Survey toward a smart campus using the internet of things”. In : *2016 IEEE 4th international conference on future internet of things and cloud (FiCloud)*. IEEE. 2016, p. 235-239 (cf. p. 26).

- [SW16] Nyoman Putra SASTRA et Dewa Made WIHARTA. “Environmental monitoring as an IoT application in building smart campus of Universitas Udayana”. In : *2016 International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS)*. 2016, p. 85-88. DOI : 10.1109/ICSGTEIS.2016.7885771 (cf. p. 26).
- [Hen+16] Kristian HENTSCHEL, Dejice JACOB, Jeremy SINGER et Matthew CHALMERS. “Supersensors : Raspberry Pi devices for smart campus infrastructure”. In : *2016 IEEE 4th International conference on future internet of things and cloud (FiCloud)*. IEEE. 2016, p. 58-62 (cf. p. 26, 30).
- [Ras] RASPBERRYPI. *Raspberry Pi 3 Model B*. URL : <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/> (cf. p. 30).
- [Car+14] Ricardo C. CARRANO, Diego PASSOS, Luiz C. S. MAGALHAES et Celio V. N. ALBUQUERQUE. “Survey and Taxonomy of Duty Cycling Mechanisms in Wireless Sensor Networks”. In : *IEEE Communications Surveys Tutorials* 16.1 (2014), p. 181-194. DOI : 10.1109/SURV.2013.052213.00116 (cf. p. 31).
- [GS05] Lin GU et John A STANKOVIC. “Radio-triggered wake-up for wireless sensor networks”. In : *Real-Time Systems* 29.2-3 (2005), p. 157-182 (cf. p. 31).
- [Hos+20] Seyyedali HOSSEINALIPOUR, Christopher G. BRINTON, Vaneet AGGARWAL, Huaiyu DAI et Mung CHIANG. “From Federated to Fog Learning : Distributed Machine Learning over Heterogeneous Wireless Networks”. In : *IEEE Communications Magazine* 58.12 (2020), p. 41-47. DOI : 10.1109/MCOM.001.2000410 (cf. p. 33).
- [Ber16] Florent BERTHIER. “Conception d’un processeur ultra basse consommation pour les noeuds de capteurs sans fil”. Thèse de doct. Université Rennes 1, 2016 (cf. p. 33).
- [LC10] Sami M. LASASSMEH et James M. CONRAD. “Time synchronization in wireless sensor networks : A survey”. In : *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2010 (SoutheastCon)*. 2010, p. 242-245. DOI : 10.1109/SECON.2010.5453878 (cf. p. 34).
- [Wan+19] Shoubin WANG, Mingxing SHI, Donghui LI et Tao DU. “A Survey of Time Synchronization Algorithms for Wireless Sensor Networks”. In : *2019 Chinese Control Conference (CCC)*. 2019, p. 6392-6397. DOI : 10.23919/ChiCC.2019.8866385 (cf. p. 34).
- [HS17] Josiah HESTER et Jacob SORBER. “The future of sensing is batteryless, intermittent, and awesome”. In : *Proceedings of the 15th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*. 2017, p. 1-6 (cf. p. 37).
- [Yaq+19] Adeel YAQOUB, Muhammad Adeel ASHRAF, Faria FEROOZ, Ahmad Hassan BUTT et Yaser Daanial KHAN. “WSN operating systems for internet of things (IoT) : A survey”. In : *2019 International Conference on Innovative Computing (ICIC)*. IEEE. 2019, p. 1-7 (cf. p. 38).
- [Eur] Comission EUROPENNE. *Photovoltaic Geographical Information System (PV-GIS)*. URL : <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis> (cf. p. 41).

- [Dri+18] A. DRIEMEL, J. AUGUSTINE, K. BEHRENS, S. COLLE, C. COX, E. CUEVAS-AGULLÓ, F. M. DENN, T. DUPRAT, M. FUKUDA, H. GROBE, M. HAEFFELIN, G. HODGES, N. HYETT, O. IJIMA, A. KALLIS, W. KNAP, V. KUSTOV, C. N. LONG, D. LONGENECKER, A. LUPI, M. MATURILLI, M. MIMOUNI, L. NTSANGWANE, H. OGIHARA, X. OLANO, M. OLEFS, M. OMORI, L. PASSAMANI, E. B. PEREIRA, H. SCHMITHÜSEN, S. SCHUMACHER, R. SIEGER, J. TAMLYN, R. VOGT, L. VUILLEUMIER, X. XIA, A. OHMURA et G. KÖNIG-LANGLO. “Baseline Surface Radiation Network (BSRN) : structure and data description (1992–2017)”. In : *Earth System Science Data* 10.3 (2018), p. 1491-1501. DOI : 10.5194/essd-10-1491-2018. URL : <https://essd.copernicus.org/articles/10/1491/2018/> (cf. p. 42).
- [AWI] AWI. *Alfred-Wegener-Institut*. URL : <https://www.awi.de/en/> (cf. p. 42).
- [Pro] Zephyr PROJECT. *Zephyr Project*. URL : <https://zephyrproject.org/> (cf. p. 42).
- [Jeta] JETPERCH. *The most affordable and easy-to-use precision DC energy analyzer*. URL : <https://www.joulescope.com/> (cf. p. 42).
- [SIR] SIRTA. *Site Instrumental de Recherche par télédétection Atmosphérique*. URL : <https://sirta.ipsl.fr/index.html> (cf. p. 44).
- [Jetb] JETPERCH. *Bordeaux INP*. URL : <https://www.bordeaux-inp.fr/fr> (cf. p. 46).
- [Ard] ARDUINO. *Arduino MKR WAN 1300 (LoRa connectivity)*. URL : <https://store.arduino.cc/products/arduino-mkr-wan-1300-lora-connectivity> (cf. p. 47).
- [DBO16] Gabriel Martins DIAS, Boris BELLALTA et Simon OECHSNER. “A survey about prediction-based data reduction in wireless sensor networks”. In : *ACM Computing Surveys (CSUR)* 49.3 (2016), p. 1-35 (cf. p. 53).
- [JBM20] Yiye JIANG, Jérémie BIGOT et Sofian MAABOUT. “Sensor selection on graphs via data-driven node sub-sampling in network time series”. In : *arXiv preprint arXiv :2004.11815* (2020) (cf. p. 55).
- [Mad04] Samuel MADDEN. “Intel Lab Data”. In : (2004). URL : <http://db.csail.mit.edu/labdata/labdata.html> (cf. p. 56, 57).
- [JAK21] Khushboo JAIN, Arun AGARWAL et Anoop KUMAR. “A novel data prediction technique based on correlation for data reduction in sensor networks”. In : *Proceedings of international conference on artificial intelligence and applications*. Springer. 2021, p. 595-606 (cf. p. 57).
- [Zha+12] Jijun ZHAO, Hao LIU, Zhihua LI et Wei LI. “Periodic data prediction algorithm in wireless sensor networks”. In : *China Conference on Wireless Sensor Networks*. Springer. 2012, p. 695-701 (cf. p. 57).
- [Semc] SEMTECH. “Semtech SX1276”. In : (). URL : <https://fr.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1276> (cf. p. 71).
- [Inf] INFLUXDATA. “InfluxDB : Open Source Time Series Database”. In : (). URL : <https://www.influxdata.com/> (cf. p. 72).
- [Lab] Grafana LABS. “Grafana : The open observability platform”. In : (). URL : <https://grafana.com/> (cf. p. 72).
- [Nic21] John NICOT. “Remote Powering of Wireless IoT Nodes”. Thèse de doct. Université de Bordeaux, 2021 (cf. p. 90).



Publications Personnelle

1. Yassine Faize, Jérémie Crenne, Nicolas Hanusse et Christophe Jego. "Projet Smart-campus porté par Sysnum". Dans : IEEE Sensors France Chapter Workshop. 2021. <https://ieeesensorsfrance2021.wordpress.com/>
2. Yassine Faize, Jérémie Crenne, Nicolas Hanusse et Christophe Jego. "Architecture de Nœud basse Consommation et Intelligent pour des Réseaux de Capteur". Dans : Colloque sur les Objets et systèmes Connectés-COC'2021. 2021 (cf. p. 3).
3. Yassine Faize, Jeremie Crenne, Nicolas Hanusse et Christophe Jego. "An Energy Efficient and Scalable Node Architecture for Sensor Network". Dans : 2021 19th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS). IEEE. 2021, p. 1-4 (cf. p. 3).