Réalisation d'une plate-forme pour l'optimisation de réseaux de capteurs sans fil appliqués au bâtiment intelligent

Frank Itoua Engoti

▶ **To cite this version:**

Frank Itoua Engoti. Réalisation d'une plate-forme pour l'optimisation de réseaux de capteurs sans fil appliqués au bâtiment intelligent. Electronique. Université de Limoges, 2018. Français. NNT : 2018LIMO0018 . tel-01792640

HAL Id: tel-01792640
https://theses.hal.science/tel-01792640

Submitted on 15 May 2018

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

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

Thèse de doctorat

Université de Limoges

Université de Limoges

École Doctorale Sciences et Ingénierie pour l'Information, Mathématiques (ED 521)

XLIM, UMR CNRS 7252

Thèse pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Limoges

Sciences et Ingénierie pour l'Information

Présentée et soutenue par

Frank ITOUA ENGOTI

Le 12 mars 2018

Réalisation d'une plate-forme pour l'optimisation de réseaux de capteurs sans fil appliqués au bâtiment intelligent

Thèse dirigée par Raymond Quéré, Michèle Lalande, Fabien Courrèges

JURY :

Président du jury

M. Christian PERSON, Professeur, IMT Atlantique

Rapporteurs

Mme Marion BERBINEAU, Directrice de Recherche, IFSTTAR Lille

M. Christian PERSON, Professeur, IMT Atlantique

Examinateurs

M. Florin HUTU MCF CitiLab Lyon

M. Jacques SOMBRIN, Ingénieur TESA Toulouse

M. Rodolphe VAUZELLE Professeur, XLIM, Université de Poitiers

M. Fabien COURREGES, MCF XLIM

M. Raymond QUERE, Professeur émérite XLIM

Invitée

Mme Michèle LALANDE, Professeur, XLIM

BY-NC-ND

Rien n'est jamais perdu tant qu'il reste quelque chose à trouver
Pierre Dac

BY-NC-ND

Remerciements

Ce projet a été développé au sein de l'IUT du limousin, site de Brive-la-Gaillarde dans le bâtiment GEII, au sein du laboratoire Xlim (XLIM - CCSNL, UMR CNRS 7252).

Plus précisément, ma thèse a été réalisée au sein des Axes Système RF et SRI (Systèmes de Réseau Intelligent).

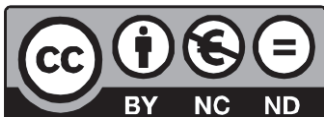
Elle a été dirigée par le Professeur Raymond QUERE, Michèle LALANDE, Fabien COURREGES que je remercie vivement pour leur accueil au sein du laboratoire. Ils ont su me conseiller, me recadrer et partager leur expertise scientifique au moment opportun.

J'adresse également mes remerciements à l'ensemble de ma famille qui m'a soutenu et encouragé dans les moments les plus difficiles.

BY-NC-ND

Droits d'auteurs

Cette création est mise à disposition selon le Contrat : « **Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** » disponible en ligne : *http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/*



BY-NC-ND

Table des matières

Table des figures 7
Liste des tableaux 11
Liste des acronymes 12
Chapitre I. Généralités sur les réseaux de capteurs 20
I.1. Introduction 20
I.2. Caractéristiques principales des réseaux de capteurs 20
I.3. Description d'un réseau de capteurs : 23
I.4. Conclusion 46
Chapitre II. L'optimisation d'un réseau de capteurs sans fil 48
II.1. Introduction 48
II.2. Description du nœud de capteur sans Fil dans le contexte d'une optimisation énergétique: 48
II.3. Optimisation de la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil: 56
II.4. Mis en place d'un RCSF pour la modélisation de l'amphithéâtre 73
II.5. Conclusion 87
Chapitre III. Déploiement d'une plate-forme d'expérimentation de RCSF sur campus Brive-la-Gaillarde 88
III.1. Introduction 88
III.2. Architecture du système SMART GRID 88
III.3. Installation du réseau MEDYBAT 91
III.4. Optimisation des nœuds du réseau MEDYBAT 100
III.5. Les avantages du système SMART GRID 114
III.6. Conclusion 117
Chapitre IV. Optimisation de la couche application via le Compressive sensing 119
IV.1. Introduction 119
IV.2. Compressive sensing 119
IV.3. Application du CS pour l'acquisition des données des capteurs du réseau 130
IV.4. Application du CS sur les nœuds de capteurs du réseau 143
IV.5. CS spatio-temporel 149
IV.6. Conclusion 156
Conclusion 157
Références bibliographiques 159
Publications et communications relatives à ce travail 168

BY-NC-ND

Table des figures

Figure 1 Les domaines d'applications des RCSF 6
Figure 2 Smart grid campus Brive-la-Gaillarde 7
Figure I-1 Les catégories de réseaux sans fil 20
Figure I-2 La topologie étoile 25
Figure I-3 La topologie arborescente ou hiérarchique 26
Figure I-4 La topologie maillée 27
Figure I-5 Organisation du groupe 802 28
Figure I-6 La pile protocolaire de la norme 802.15.4 30
Figure I-7 Chaine de transmission entre deux nœuds 32
Figure I-8 Méthode accès au canal de la couche MAC 36
Figure I-9 Algorithme de CSMA/CA non-slotté de la norme IEEE 802.15.4 38
Figure I-10 Echange de trame en CSMA/CA non slotté 38
Figure I-11 Structure de la super-trame [31] 40
Figure I-12 Vue schématique de la trame beacon [17] 41
Figure I-13 Vue schématique de la trame de données [17] 42
Figure I-14 Vue schématique de la trame ACK [17] 42
Figure I-15 Vue schématique de la trame de commande [17] 43
Figure I-16 La pile protocolaire du Zigbee 44
Figure II-1 Architecture nœud de capteur 49
Figure II-2 Différents nœuds de capteurs 50
Figure II-3 Transducteur analogique 50
Figure II-4 Capteurs passifs 51
Figure II-5 Capteurs actifs 52
Figure II-6 Capteur analogique MCP9700A 52
Figure II-7 Capteur numérique 53
Figure II-8 Technique de réduction d'énergie 56
Figure II-9 Mesure de la récupération d'énergie 60
Figure II-10 Module bq25504 61
Figure II-11 Banc de mesure de la récupération d'énergie 61
Figure II-12 Niveau de courant récupéré 62
Figure II-13 a) La luminosité dans une pièce éclairée b) La luminosité naturelle dans une pièce 63

BY-NC-ND

Figure II-14 RECTENA 63
Figure II-15 Le niveau de champs à la position A 65
Figure II-16 Le niveau de champs à la position B 65
Figure II-17 Le niveau de champs à la position C 66
Figure II-18 Optimisation inter-couches 66
Figure II-19 Blocs fonctionnels transmission/réception 68
Figure II-20 Capteur a) DHT 22 b) SHT 75 68
Figure II-21 Canaux utilisable par le WIFI et le 802.15.4 71
Figure II-22 Interférence des canaux entre WIFI / 802.15.4 71
Figure II-23 Transmission en réseau étoile 72
Figure II-24 Situation schématique de l'amphithéâtre : données d'entrées mesurées/prévisibles et grandeurs de sortie mesurées [Source : Laboratoire GEMH] 74
Figure II-25 Calibration en température 76
Figure II-26 Calibration en humidité 77
Figure II-27 Capteur de débit thermique sans fil 78
Figure II-28 Capteur de débit thermique (FS5) 79
Figure II-29 Décalage de tension DC 80
Figure II-30 Conversion DC / DC 80
Figure II-31 Condition de mesure de Flux d'air 81
Figure II-32 Banc de mesure pour la calibration du capteur de flux d'air 82
Figure II-33 Linéarité constatée entre vitesse débitante / vitesse mesurée 83
Figure II-34 Extraction de l'équation de calcul du flux 84
Figure II-35 Mesure de débit d'air avec capteur sans fil à faible coût 84
Figure II-36 Mesure de la consommation du nœud 85
Figure II-37 Comparaisons entre résultats de simulation et mesures 86
Figure III-1 Architecture informatique bâtiment intelligent 89
Figure III-2 Le réseau « RAMCES » 90
Figure III-3 Réseau de capteurs dans le bâtiment GEII 91
Figure III-4 Module Waspmote V1.2 a) Vu de face b) Vu de dos 92
Figure III-5 Module Xbee pro S1 94
Figure III-6 Niveau de puissance de Xbee pro S1 95
Figure III-7 Canaux de transmission Xbee pro S1 95
Figure III-8 Meshlium 96
Figure III-9 Occupation spectrale de la bande 2.4 GHz 97

BY-NC-ND

Figure III-10 a) Position nœuds tests b) Niveau du RSSI des nœuds tests....98
Figure III-11 Programme des nœuds synchrones....99
Figure III-12 Programme des nœuds asynchrones....100
Figure III-13 Banc de mesure de la consommation....100
Figure III-14 Consommation nœud synchrone....101
Figure III-15 Consommation du nœud avant optimisation....103
Figure III-16 Consommation du nœud avec la Co-conception hardware / software....104
Figure III-17 Décharge de la batterie en fonction du temps (capacité: 6,6Ah)....105
Figure III-18 Consommation du nœud avec un nouveau transducteur....106
Figure III-19 Paquets reçus en 16 et 64 Bits....107
Figure III-20 La mesure des transmissions 16 et 64 Bits....108
Figure III-21 Transmission du module Xbee pro S1....109
Figure III-22 Retransmission trame avec BE=0....110
Figure III-23 Retransmission trame avec BE=1....111
Figure III-24 Retransmission trame avec BE=2....112
Figure III-25 Retransmission trame avec BE=3....113
Figure III-26 Niveaux de transmissions par rapport aux BE....114
Figure III-27 Vue graphique du bâtiment intelligent....115
Figure III-28 Actionneur ou alarme visuelle....115
Figure III-29 Consommation électrique du Campus de Brive....116
Figure III-30 Gestion des données du système....116
Figure IV-1 Méthode de compression....120
Figure IV-2 Les étapes du CS....121
Figure IV-3 Représentation d'un signal creux dans le domaine de la transformation Ψ....123
Figure IV-4 Arbre d'ondelettes....125
Figure IV-5 Résolution du problème $\min xxp\ sous\ la\ contrainte\ A \cdot x = b$ dans les différentes normes L_0, L_1, et L_2....128
Figure IV-6 Processus du CS....131
Figure IV-7 Signal température d'un capteur....132
Figure IV-8 Reconstruction du signal capteur1 a) en DCT / b) en DFT....132
Figure IV-9 Représentation du PRD en fonction du CF....133
Figure IV-10 Coefficient de la corrélation....134
Figure IV-11 a) Signal d'origine (Bleu) et signal échantillonné (Rouge), b) Répartition fréquentielle des échantillons....136
Figure IV-12 Echantillonnage aléatoire....136

BY-NC-ND

Figure IV-13 a) Signal d'origine (Bleu) et signal échantillonné (Rouge), b) Répartition fréquentielle des échantillons 137
Figure IV-14 Etapes de reconstruction de x_i 137
Figure IV-15 Signal de température.....138
Figure IV-16 Reconstruction du signal avec un CF=2.....139
Figure IV-17 Reconstruction du signal avec un CF=3.....140
Figure IV-18 Reconstruction du signal avec un CF=4.....141
Figure IV-19 Reconstruction du signal avec un CF=5.....142
Figure IV-20 Exécution du code CS dans les Nœuds.....144
Figure IV-21 Signal d'origine (Bleu) et signal échantillonné (Rouge) 145
Figure IV-22 Reconstruction du signal avec un CF=4,03.....146
Figure IV-23 Niveau de batterie.....147
Figure IV-24 Reconstruction prédictive.....148
Figure IV-25 Reconstruction temporelle des mesures au niveau d'un nœud avec L= 4 et N= 13 151
Figure IV-26 : Ensemble des mesures des capteurs placés au 3ème étage entre le 20/09/2016 à 0h00 et le 21/09/2016 à 23h59 152
Figure IV-27 : Spectre du vecteur champ spatio-temporel obtenu par la transformation ***W***. On retrouve N ilots de fréquences spatio-temporelles qui correspondent aux N valeurs singulières de la transformation SVD. Le nombre de composantes dont la valeur est supérieure à 1% de la valeur maximum est de 323 dans ce cas. 153
Figure IV-28 Comparaison des signaux initiaux et reconstruits avec un facteur de compression de 5. 154
Figure IV-29 Comparaison des signaux initiaux et reconstruits avec un facteur de compression de 10. 155

BY-NC-ND

Liste des tableaux

Tableau I-1 Bandes de fréquences utilisables pour le 802.15.4 21
Tableau I-2 Comparaison des normes WI-FI 22
Tableau I-3 Les performances comparées entre le Bluetooth classique et BLE 29
Tableau I-4 Comparaison PHY entre 802.15.4-2003 et 802.15.4-2006 34
Tableau II-1 Résultats des mesures de récupération d'énergie 60
Tableau II-2 Comparatif entre DHT 22 et SHT 75 69
Tableau II-3 Comparatif entre SensorTag TI et Waspmote 69
Tableau III-1 Caractéristiques carte Waspmote 93
Tableau III-2 Consommation des différents modes de fonctionnement 93
Tableau III-3 Niveau tension/courant du Waspmote 94
Tableau III-4 Caractéristiques du module Xbee pro S1 94
Tableau III-5 Résultats d'analyses des canaux 97
Tableau III-6 Fonctionnement du nœud synchrone 102
Tableau IV-1 Qualité de reconstruction 130
Tableau IV-2 Les résultats de reconstructions 143

BY-NC-ND

Liste des acronymes

ACK : *Acknowledgment*
ACL : *Access Control List*
AES : Advanced Encryption Standard
AODV : *Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing*
API : *Application Programming Interface*
ASK : *Amplitude shift keying*
BE : *Backoff Exponent*
BLE : *Bluetooth Low Energy*
BPSK : Binary phase-shift keying
BR : *Bluetooth classique*
BSN : *beacon sequence number*
CAP : *Contention Access Period*
CCA : *Clear channel assessment*
CFP : *Contention Free Period*
CO2 : *Dioxyde de carbone*
CRC : *Code de Redondance Cyclique*
CSMA-CA : *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*, : *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*, : *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*, : *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*
dB : *Décibel*
DSR : *Dynamic Source Routing*
DSSS : Direct-sequence spread spectrum
ED : *Energy detection*
FCS : *frame check sequence*
FFD : *Full Function Device*
FHSS : *Frequency Hopping Spread Spectrum*
GFSK : *Gaussian Frequency Shift Keying*
GPRS : *General Packet Radio Service*
GSM : *Global System for Mobile Communication*
GTS : *Guaranteed Time Slot*
HiperLAN : *High Performance Local Area Network*
HSDPA : *High Speed Downlink Packet Access*
IEEE : *Institute of Electric and Electronics Engineers*
LAN : *Local Area Network*
LLC : *Logical Link Control*
LOS : *Line Of Sight*
LQI : *Link quality indicator*
LRWPAN : *Low Rate Wireless Personal Area Network*
MAC : *Media Access Control*
MAN : *Metropolitan Area Network*
MEDYBAT : *Modélisation Energétique DYnamique d'un BATiment*
MFR : *MAC footer*
MHR : *MAC header*
MPDU : *MAC protocol data unit*
MSDU : *MAC Service Data Unit*
NB : *Number of Backoffs*
NLOS : *Non line of sight*
OLSR : *Optimized Link State Routing*
OQPSK : Offset quadrature phase-shift keying
OSI : *Open Systems Interconnection*

BY-NC-ND

PD-SAP : Physical Data - Service Access Point
PLME *: Physical Layer Management Entity*
PLME-SAP *: Physical Layer Management Entity - Service Access Point*
PPDU *: PHY protocol data unit*
PSDU *: PHY service data unit*
PSSS : Parallel Sequence Spread Spectrum
QDS : Qualité De Service
RAMCES *: Réseau Avancé de Mesure de Consommation Energétique et supervision*
RCSF *: Réseaux de Capteurs Sans Fil*
RF *: Radio-fréquence*
RFD *: Reduced Function Device*
RSSI *: Received Signal Strength Indication*
SAP *: Service Access Point*
SCADA *: Supervisory Control And Data Acquisition*
SFD *: Start-of-frame delimiter*
SHR *: Synchronization header*
SNR *: Signal to Noise Ratio*
SSP *: Security Service Provider*
TEB : Taux d'Erreur Bit
TEP : Taux d'Erreur Paquet
UHF *: Ultra hautes fréquences*
UMTS *: Universal Mobile Telecommunication System*
VHF *: Supra hautes fréquences*
Wi-Fi *: Wireless-Fidelity*
Wimax *: Worldwide interoperability for Microwave Access*
WLAN *: Wireless Local Area Network*
WMAN *: Wireless metropolitan area network*
WPAN *: Wireless Personal Area Network*
WWAN *: wireless wide area network*

BY-NC-ND

BY-NC-ND

Introduction

De nombreuses applications nécessitent de prendre en compte les paramètres environnementaux et plus précisément de mesurer des phénomènes physiques pour prendre une décision, comme par exemple pour les applications [1] de supervision de volcan, de séisme et [2] de tsunami. Toutes ces applications nécessitent des réseaux de capteurs sans fil qui doivent être fiables pour assurer la sécurité des personnes. Connaissant l'importance cruciale des applications de surveillance environnementale, le réseau doit pouvoir fournir rapidement, sans interruption et sans intervention humaine, les informations sur les phénomènes physiques se produisant dans son environnement.

Par exemple, la grande barrière de corail, l'un des systèmes environnementaux les plus précieux et sensibles, s'est vu dotée d'une nouvelle infrastructure technologique pour un contrôle efficace de l'environnement du milieu marin. Le projet mené par deux équipes de chercheurs Italiens et Australiens [3] est basé sur la technologie de « réseau de capteurs sans fil». Dans ce RCSF un ensemble de nœuds de surveillance (insérés dans des bouées) se configure automatiquement grâce à un nœud central qui est le coordinateur du réseau. Cette unité fait un traitement local des informations puis transmet les informations traitées à une station distante pour le stockage, le traitement ultérieur des données et l'interprétation. Dans ce RCSF, tous les problèmes liés à l'acquisition de données, des protocoles de communication, le stockage des données en temps réel, la visualisation de grands volumes de données, la tolérance de panne et de robustesse de chaque nœud et au niveau du réseau, la consommation d'énergie et la gestion de l'énergie ont été abordés et améliorés. Un système d'alimentation nouveau basé sur les mécanismes de récupération d'énergie solaire efficaces a été intégré dans les nœuds ; de plus, une gestion logicielle optimale a été intégrée dans la programmation des nœuds. Cette technologie peut aller bien au-delà du contrôle de la grande barrière de corail comme l'illustre la figure 1, pouvant couvrir un grand spectre d'applications de surveillance civile et de l'environnement (par exemple, des ponts, des tunnels, des routes et des infrastructures civiles, la surveillance de la distribution d'alimentation, la protection civile et la sécurité intérieure, la gestion des urgences, etc.).

BY-NC-ND

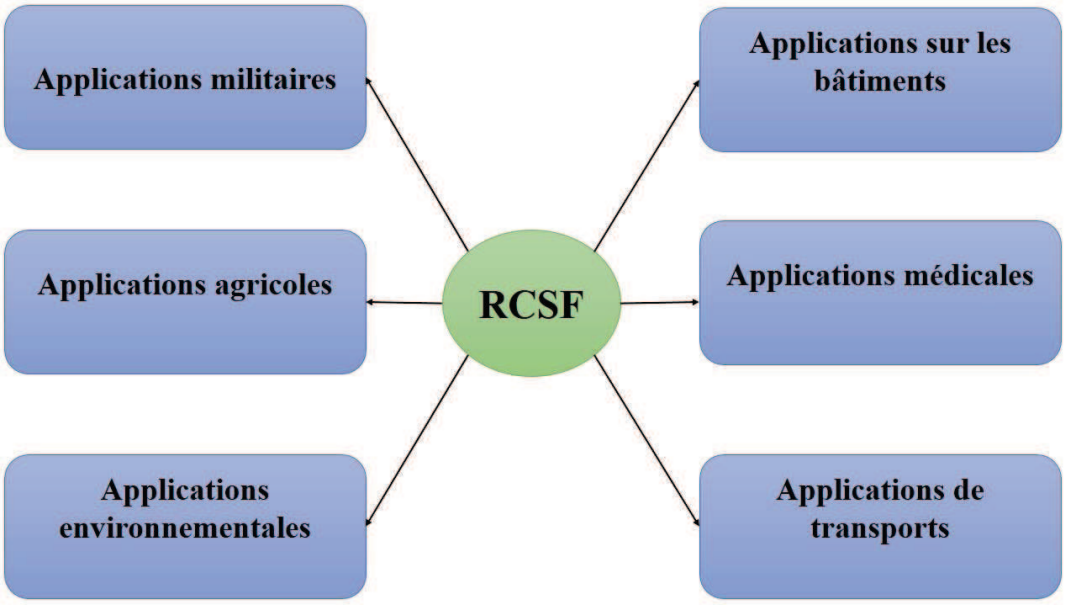


Figure 1. Les domaines d'applications des RCSF

Aussi Vana Jelicic et al. [4] ont développé un réseau de capteurs sans fil pour surveiller la qualité de l'air intérieur. Cette surveillance de la qualité de l'air est cruciale pour le confort, la santé et la sécurité des personnes, car on passe un grand pourcentage de temps dans des environnements intérieurs. La grande préoccupation dans ce réseau est l'efficacité énergétique étant donné le caractère énergivore des capteurs de gaz pour les mesures. Le nœud de capteurs doit fonctionner sans cesse pendant plusieurs années sur une alimentation de batterie. La plus grande contrainte sur tous les réseaux de capteurs sans fil est son autonomie énergétique et c'est sur ce point que les travaux de la thèse porteront.

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont des réseaux ad hoc[1] constitués des dispositifs électroniques appelés nœuds de capteurs pouvant communiquer entre eux par liaison radio ou optique [5]. Le domaine de la recherche scientifique porte un grand intérêt à cette technologie très prometteuse notamment pour l'amélioration de sa partie logicielle (couches OSI, protocole, routage,…) et matérielle (capacité de traitement, stockage des données,…) et de ses performances énergétiques.

Cette contrainte énergétique influe directement sur la durée de vie du réseau, ainsi elle devient une préoccupation majeure, en particulier si les capteurs sont placés sur des zones de surveillance inaccessibles. Il est possible d'associer des organes de récupérations d'énergie (solaire, thermique, mécanique,…) aux nœuds pour pallier cette contrainte. Cependant il existe des zones de surveillances avec des contraintes environnementales particulières qui ne permettent pas d'installer des récupérateurs d'énergies pour recharger les batteries. Il se pose donc une problématique de préservation énergétique, particulièrement si l'application doit fonctionner longtemps tout en ayant un mode de fonctionnement temps-réel.

[1] Les réseaux ad hoc sont des réseaux sans fil ne bénéficie d'aucune infrastructure définie préalablement.

BY-NC-ND

Dans les RCSF, le choix de la topologie est très important car celle-ci peut engendrer de grandes latences et par la suite un faible niveau de qualité de service (QDS)[2]. Plus la charge ou la densité du réseau est grande, plus un nœud mettra de temps à accéder au canal pour transmettre ses données, entrainant ainsi des pertes de paquets. Toutes ces contraintes qui peuvent s'accumuler doivent être prises en compte avant le déploiement éventuel du réseau de capteurs sans fil.

Dans ce contexte particulier, pour apporter des solutions à cette contrainte énergétique des réseaux de capteurs, nous avons déployé une plate-forme de réseau de capteurs sans fil dédié aux bâtiments intelligents et nous présentons dans cette thèse les moyens d'optimisations de cette plate-forme. L'objectif est d'instrumenter un bâtiment existant pour faire un diagnostic énergétique, des économies et la gestion de production autonome d'énergie. Cette instrumentation d'un bâtiment tertiaire existant est composée, d'une part d'un RCSF de mesure de différents paramètres d'environnement interne/externe et également des mesures de la consommation énergétique. Cela passe par un réseau hybride qui associe plusieurs protocoles de communication tout en centralisant les données au niveau d'un point central s'appuyant sur un système SCADA comme le montre la figure 2.

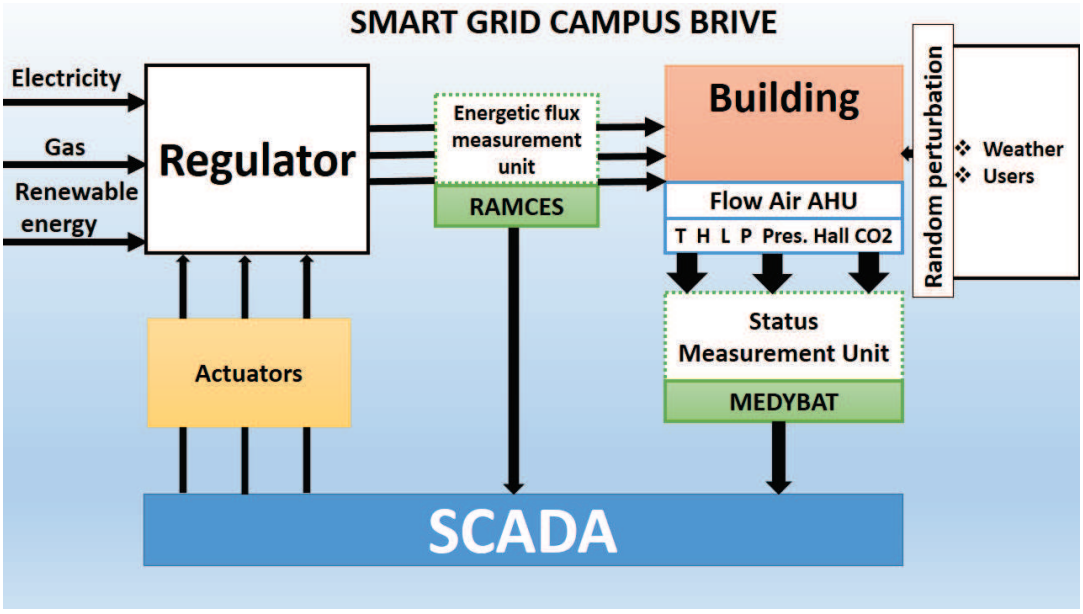


Figure 2. Smart grid campus Brive-la-Gaillarde

Le synoptique de la figure 2 montre les différentes parties du système qui a été déployé dans le bâtiment. Il est composé d'un logiciel de centralisation et de gestion de données (SCADA), d'un réseau de capteurs (MEDYBAT), d'un réseau de mesure d'énergie (RAMCES) et des actionneurs.

Aujourd'hui, le bâtiment est le secteur le plus consommateur d'énergie en France. Face à la perspective d'un épuisement inéluctable des ressources fossiles et à la contrainte de réduction des émissions de CO2, optimiser ces consommations est devenu une nécessité. Pour mieux

[2] La qualité de service (QDS) ou quality of service (QoS) permet de qualifier la performance d'un réseau de données en termes de disponibilité, débit, délais de transmission, taux de perte de paquets, pour un type de trafic donné.

BY-NC-ND

maîtriser et gérer les consommations énergétiques, diverses solutions sont à l'étude ou d'ores et déjà expérimentées. Dans les bâtiments existants, des aménagements et des travaux de réhabilitation, encouragés par des incitations financières, viennent compléter la diffusion des bonnes pratiques. Si le défaut d'isolation des logements est énergivore, les usages des occupants le sont également. Du côté des écoquartiers[3], la vision multi-énergie et smart grids[4] permettent notamment une meilleure maîtrise de ces consommations.

Maîtriser et gérer les consommations énergétiques par des smart grids est la solution que nous avons choisie. Ce système de gestion centralisée appelé « SMART GRID CAMPUS BRIVE » (figure 2) doit permettre l'évaluation des performances du bâtiment dans un premier temps. Le terme de performance pour un bâtiment englobe généralement 3 types de performances :

• Le confort (thermique, acoustique, visuel, ...)

• La consommation d'énergie (électricité, gaz, énergie renouvelable, …)

• Les impacts environnementaux (rejets, gestion des déchets, transports, ...)

Ici le système ne prendra pas en compte le troisième point cité. A l'heure actuelle, les méthodes qui permettent d'évaluer ces performances énergétiques sont la plupart du temps basées sur des modèles théoriques [6] en considérant de nouveaux matériaux de construction, une implémentation idéale, des phénomènes physiques simplifiés, ou encore des méthodes d'approximation numérique... D'autres méthodes sont basées sur des analyses expérimentales obtenues dans des conditions réelles mais souvent de courte durée et/ou limitées à certains aspects (analyse des consommations électriques, recherche des déperditions de chaleur par thermographie ...). En réalité, les performances d'un bâtiment sont très variables et dépendent de plusieurs facteurs : l'usage effectif et l'aménagement intérieur des locaux, le comportement des occupants, le vieillissement des matériaux et des équipements, …

Ce mémoire de thèse est organisé en quatre chapitres. Le chapitre 1 présente les généralités sur les réseaux sans fils (descriptif orienté vers les réseaux de capteurs et le protocole standard IEEE 802.15.4). Le chapitre 2 présente les différents types d'optimisations qui ont été proposées dans la littérature concernant les réseaux de capteurs sans fil. Le chapitre 3 présente l'étude, le déploiement du système « SMART GRID CAMPUS BRIVE » et les optimisations effectuées. Le chapitre 4 présente une nouvelle approche utilisée pour accroitre la durée de vie des réseaux de capteurs par la méthode de l'acquisition comprimée « Compressive sensing ».

Le dernier chapitre conclut cette thèse. Nous exposons également quelques perspectives de développements futurs à ce travail.

[3] Un écoquartier est un projet d'aménagement urbain qui respecte les principes du développement durable tout en s'adaptant aux caractéristiques de son territoire.

[4] Les réseaux intelligents ou « smart grids » sont des réseaux d'électricité qui, grâce à des technologies informatiques, ajustent les flux d'électricité entre fournisseurs et consommateurs.

BY-NC-ND

BY-NC-ND

Chapitre I. Généralités sur les réseaux de capteurs

I.1. Introduction

Aujourd'hui l'usine du futur, industrie 4.0 ou usine connectée [7] [8] n'est plus une utopie. Les progrès réalisés dans le domaine de la micro-électronique permettent de créer des produits miniaturisés, capables de faire des calculs complexes, moins gourmands en énergie et communiquant par liaison sans-fil.

L'usine connectée industrielle correspond à la généralisation des capteurs et agents intelligents permettant de connecter entre eux les machines, pièces, processus et opérateurs. Elle suggère un système global de communication efficace entre les différents modules de la prise de commande. Cette interaction globale entre les modules peut être faite via un réseau de capteurs. On parle alors de Smart Product. Comment pourrions-nous définir un réseau de capteurs sans fil ?

Dans ce chapitre nous donnerons une vue d'ensemble des réseaux de capteurs sans fil ainsi que leurs principales caractéristiques.

I.2. Caractéristiques principales des réseaux de capteurs

I.2.1. Les réseaux sans fil

Un réseau sans fil est un ensemble de dispositifs qui connecte différents postes ou systèmes entre eux par ondes électromagnétiques. Nous nous focaliserons ici sur les ondes radiofréquences. Il existe plusieurs catégories de réseaux sans fil qui se distinguent selon le périmètre géographique qu'ils couvrent ainsi que par les types d'applications supportées. Le schéma ci-dessous illustre les catégories des réseaux sans fil.

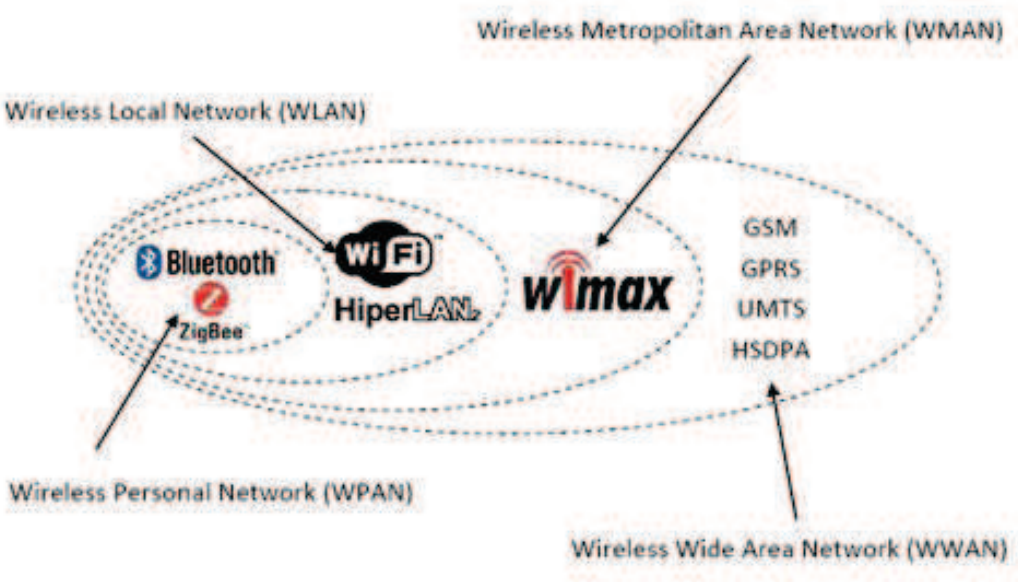


Figure I-1 Les catégories de réseaux sans fil

BY-NC-ND

I.2.1.1. Le réseau personnel sans fil (WPAN)

Il concerne les réseaux sans fil à faible portée de l'ordre d'une dizaines de mètres. Ce type de réseau est souvent utilisé pour relier des dispositifs comme l'imprimante, le téléphone portable, les appareils domestiques. Il existe plusieurs technologies utilisées pour les WPAN :

- La technologie Bluetooth :

Bluetooth est un standard de communication permettant l'échange bidirectionnel de données à très courte distance en utilisant des ondes radio UHF (Ultra hautes fréquences) sur une bande de fréquence autour de 2,4 GHz. Elle est connue aussi sous le nom de la norme IEEE 802.15.1. Cette technologie offre un débit brut de 1 Mbit/s avec une portée de 10 mètres (100 mètres avec amplification). Elle se caractérise par une grande robustesse et des moyens de transmission sécurisés qui permettent des échanges transparents de données entre divers équipements (synchronisation d'agendas ou de carnets d'adresses, par exemple). Le Bluetooth est une technologie peu onéreuse, grâce à sa forte intégration sur une puce extrêmement petite [9]; Elle présente également l'avantage de fonctionner sur des appareils à faible puissance d'où une faible consommation d'énergie.

- La technologie ZigBee :

ZigBee est un protocole de haut niveau permettant la communication radios à consommation réduite, basée sur la norme IEEE 802.15.4 pour les réseaux à dimension personnelle (WPAN). Le protocole 802.15.4 utilisé par ZigBee définit 3 bandes de fréquences utilisables, voir le tableau I-1 :

Bande	Disponibilité	Nombre de canaux	Vitesse maxi théorique
868 MHz	Europe	1	20 kbit/s
915 MHz	Amériques et Australie	10	40 kbit/s
2.4 GHz	Disponible partout	16	250 kbit/s

Tableau I-1 Bandes de fréquences utilisables pour le 802.15.4

Elle permet d'obtenir des liaisons sans fil à bas prix, avec une consommation d'énergie faible. Cela lui permet d'être facilement adapté pour intégrer de petits appareils électroniques (capteurs, appareils électroménagers...).

BY-NC-ND

I.2.1.2. Le réseau local sans fil (WLAN)

C'est un réseau permettant de relier entre eux les terminaux présents dans la zone de couverture d'une centaine de mètres environ. Il existe deux technologies concurrentes :

- Les réseaux Wi-Fi (Wireless-Fidelity) :

Le WI-FI est un ensemble de protocoles de communication sans fil régis par les normes du groupe IEEE 802.11. Il permet d'interconnecter par ondes radio plusieurs appareils informatiques au sein d'un réseau. Il utilise des ondes radio UHF et VHF (Supra hautes fréquences) sur les bandes de fréquences 2,4 GHz et 5 GHz.

IEEE 802.11 est la norme initiale publiée en 1997 qui offrait des débits de 1 ou 2 Mbit/s. Par abus de langage, on parle maintenant de la norme Wi-Fi. Des révisions ont ensuite été apportées à la norme originale afin d'augmenter le débit (c'est le cas des normes 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n et 802.11ac) ou de spécifier des fonctions de sécurité ou d'interopérabilité. Le tableau [2] présente le débit et la fréquence d'utilisation de chaque norme 802.11 :

Norme	Débit théorique (Mbit/s)	Débit réel (Mbit/s)	Fréquence Ghz
802.11a	54	27	5
802.11b	11	6	2.4
802.11g	54	25	2.4
802.11n	450	200	2.4 ou 5
802.11ac	1300	-	5

Tableau I-2 Comparaison des normes WI-FI

Les réseaux HiperLAN 2 (High Performance LAN 2.0) :

Le HiperLAN (ou HIgh PERformance radio LAN) est un standard européen de télécommunications créé par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) et développé par le groupe technique BRAN (Broadband Radio Access Networks). Ce standard est une alternative au groupe de normes IEEE 802.11 plus connu sous la dénomination Wi-Fi.

BY-NC-ND

Le HiperLAN 2 opère dans une bande passante comprise entre 5,4 GHz et 5,7 GHz, cette norme spécifie qu'il doit être possible d'établir des communications à différents débits de 6, 9, 12, 18, 27, 36 Mb/s et 54 Mb/s.

I.2.1.3. Le réseau métropolitain sans fil (WMAN)

Il est également connu sous le nom de Boucle Locale Radio, il permet de transmettre par voie hertzienne de la voix et des données à haut débit pour l'accès à l'internet et la téléphonie. Il existe plusieurs types de réseaux WMAN dont les plus connus sont :

- Les réseaux Wimax (Worldwide interoperability for Microwave Access) :

Ils émanent de la norme IEEE 802.16 et ont pour but de développer des liaisons hertziennes concurrentes aux techniques DSL (Digital subscriber line) terrestres. Ils sont utilisés comme mode de transmission et d'accès à Internet haut débit, portant sur une zone géographique étendue.

Le WiMAX procure des débits de plusieurs dizaines de mégabits par seconde sur une zone de couverture portant sur quelques dizaines de kilomètres au maximum. La norme 802.16-2004 spécifie cinq interfaces radio différentes, une pour la bande 10-66 GHz où la transmission est de type LOS (line of sight) et quatre pour la bande 2-11 GHz où la transmission est de type NLOS (non line of sight).

I.2.1.4. Le réseau étendu sans fil (WWAN)

Il est le plus répandu de tous les réseaux sans fils du fait de sa connectivité avec les téléphones mobiles. Les principales technologies sont les suivantes : GSM (Global System for Mobile Communication), GPRS (General Packet Radio Service), UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) autrement dit 3G+.

I.3. Description d'un réseau de capteurs :

Un réseau de capteurs sans fil est un réseau ad hoc avec un nombre important de nœuds qui sont des microcontrôleurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome grâce aux transducteurs. Ces nœuds appelés nœuds de capteurs, peuvent varier de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et d'envoyer l'information collectée à un point de collecte appelé coordinateur ou station de base, à l'aide d'une connexion sans fil.

Les réseaux de capteurs sont déployés avec des protocoles moins gourmands en énergie [10] comme le Bluetooth Low Energy (BLE), le 802.15.4, 6lowpan, Zigbee, …

I.3.1. L'Architectures d'un Réseau de capteurs:

Il existe plusieurs topologies pour les réseaux à communication radio. Indépendamment des topologies physiques, nous citons trois types de topologies (maillée, hiérarchique, étoile) qui se distinguent par le rôle de chaque nœud dans le réseau. On dispose de trois types de nœuds dans une topologie :

- ❖ Coordinateur (Coordinator) :

BY-NC-ND

Les réseaux de capteurs disposent toujours d'un seul dispositif de coordination, il est le point central ou station de base d'un réseau. Ce dispositif est chargé de démarrer le réseau. Il peut sélectionner le canal et l'identifiant réseau (PAN ID), distribue les adresses permettant aux autres dispositifs terminaux de rejoindre le réseau selon le protocole implémenté (Zigbee).

- Routeur (Router):

Un routeur est un nœud complet qui peut rejoindre les réseaux existants et envoyer, recevoir et acheminer des informations. Il permet à d'autres routeurs et dispositifs terminaux de se joindre au réseau. Il est toujours en écoute permanente pour bien exécuter son rôle.

- Dispositif terminal (End Device):

Un dispositif terminal est essentiellement une version réduite d'un routeur. Il peut rejoindre les réseaux existants et envoyer et recevoir des informations. Il ne peut pas relayer les messages provenant d'autres périphériques et autoriser d'autres appareils à rejoindre le réseau.

L'IEEE a mis en place deux types de rôles pour des nœuds participant à la création d'une topologie d'un réseau de capteurs :

- ✓ Le dispositif ayant toutes les fonctions possibles (FFD : Full Function Device) :

Le FFD peut avoir trois rôles dans un réseau : coordinateur, routeur ou dispositif terminal relié à un capteur.

- ✓ Le dispositif ayant des fonctions limitées (RFD : Reduced Function Device)

Le RFD est considéré comme un dispositif terminal (End Device). Il ne joue pas un rôle indispensable pour le réseau mais il exécute son rôle prévu dans l'application (signaler l'état d'un capteur, contrôler l'activation d'un actionneur).

Pour transmettre les informations dans un réseau, nous avons besoin d'avoir un FFD au moins et des RFD. Ces dispositifs doivent utiliser le même canal physique selon la bande de fréquence choisie. Le FFD peut communiquer avec des RFD et des FFD, tandis que le RFD dialogue uniquement avec un FFD. A partir des FFD et RFD, nous pouvons définir différentes types de topologies. Une comparaison des performances de deux de ces topologies est illustrée dans [11]:

BY-NC-ND

Topologie en étoile (Star):

Dans cette topologie une station de base peut communiquer de façon bidirectionnelle avec les autres nœuds du réseau. Ces nœuds du réseau peuvent uniquement envoyer ou recevoir des données de la station de base, il ne leur est pas permis de s'échanger des messages entre eux. Plus loin nous évoquerons pourquoi nous avons sélectionné cette topologie pour notre implémentation.

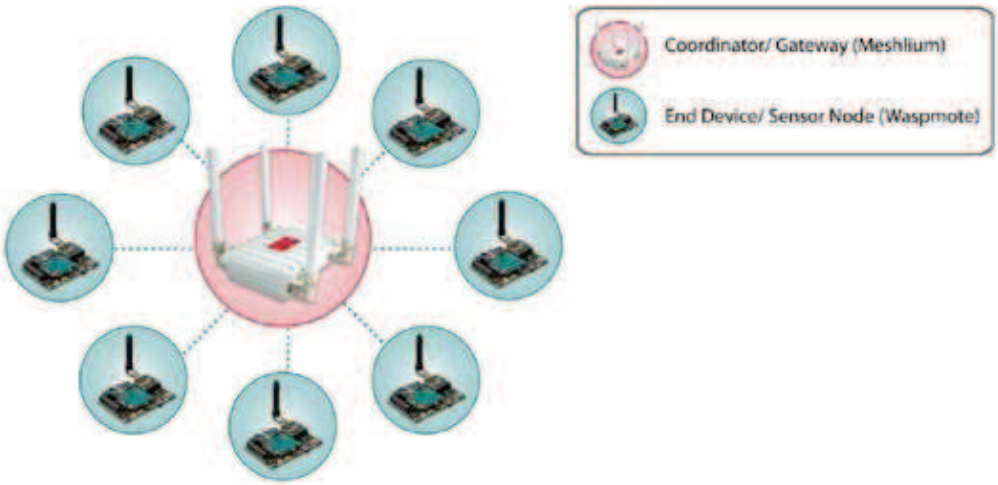


Figure I-2 La topologie étoile

Avantages : simplicité et faible consommation d'énergie des nœuds, moins de latence de communication entre les nœuds et la station de base.

Inconvénients : la station de base est vulnérable, car tout le réseau est géré par elle.

BY-NC-ND

- Topologie hiérarchique ou arborescente (Tree):

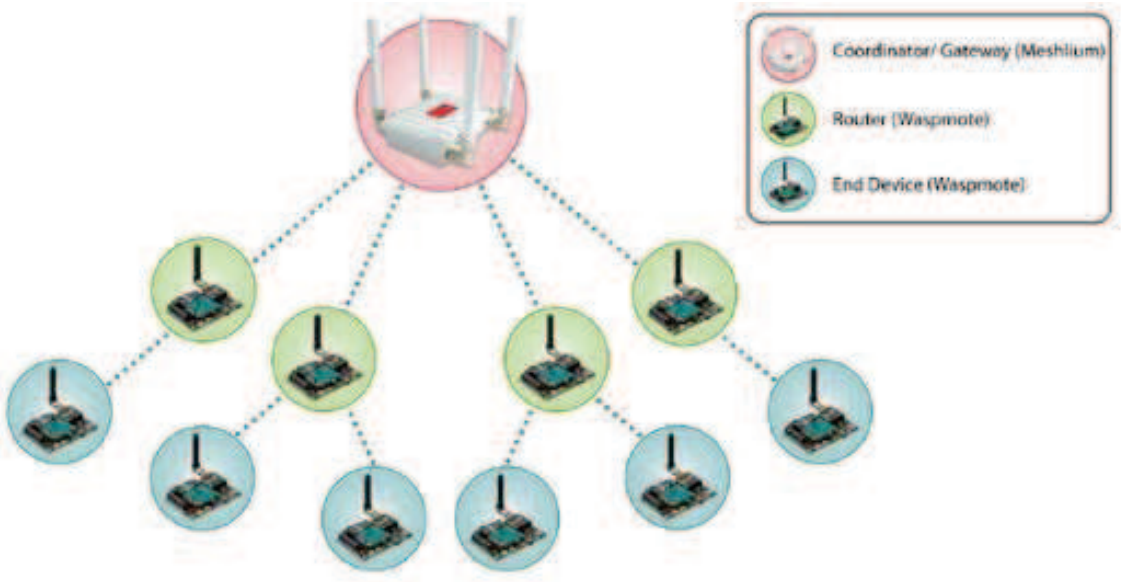


Figure I-3 La topologie arborescente ou hiérarchique

Aussi connu sous le nom de topologie arbre, le réseau est divisé en niveaux. Le coordinateur (le plus haut niveau) est connecté à plusieurs nœuds de niveau inférieur, dans la hiérarchie. Ces nœuds peuvent être eux-mêmes connectés à plusieurs nœuds de niveau inférieur. Le tout dessine alors un arbre, ou une arborescence.

Avantages : Un réseau d'arbre fournit assez de place pour l'expansion future du réseau.

Inconvénients : L'inconvénient majeur avec cette topologie, est que si un lien casse, tous les nœuds connectés se trouvant à un niveau inférieur seront paralysés.

- Topologie maillée (Mesh) :

Dans la topologie Mesh ou dite « communication multi-sauts », chaque nœud peut dialoguer avec n'importe quel autre nœud du réseau (s'il est à portée de transmission). Un nœud qui souhaite émettre un message à un autre nœud hors de sa portée, peut se servir des nœuds intermédiaires pour envoyer son message au nœud destinataire.

BY-NC-ND

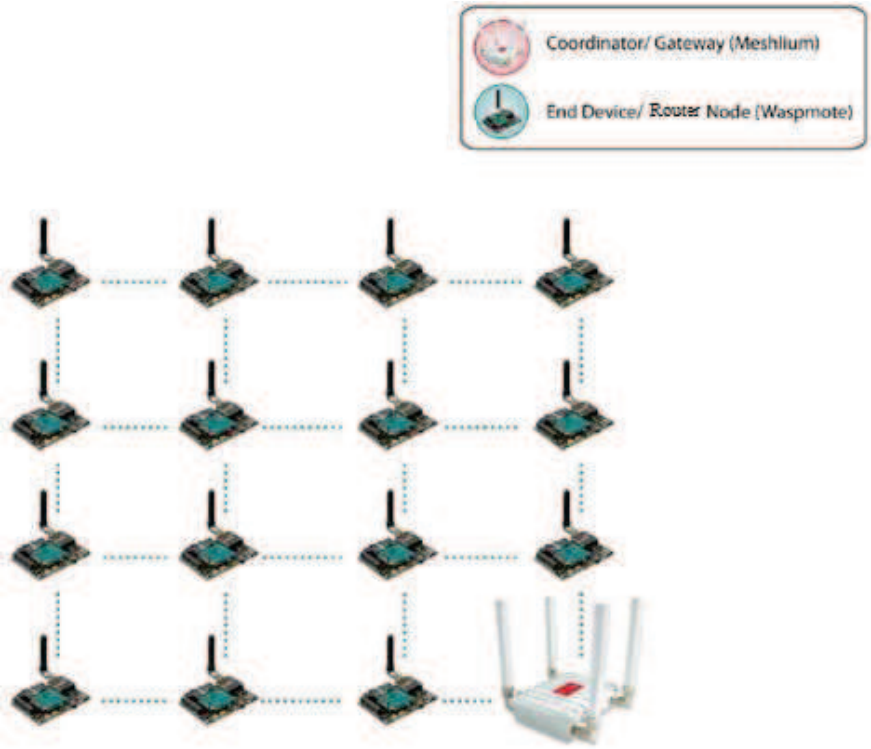


Figure I-4 La topologie maillée

Avantages : Possibilité de passer à l'échelle du réseau, avec redondance et tolérance aux pannes.

Inconvénients : Une consommation d'énergie plus importante est induite par la communication multi-sauts.

La topologie sélectionnée pour déployer un réseau de capteurs dépend du type de protocole implémenté. Rappelons que le standard IEEE 802.15.4 est un protocole qui est basé sur les couches basses du modèle OSI. Il ne peut pas apporter le côté dynamique de choix de route dans le réseau de capteurs, il peut gérer un réseau en étoile. Pour pouvoir avoir un réseau maillée ou hiérarchique, il est nécessaire de choisir un protocole qui prend en charge les couches supérieures du modèle OSI comme par exemple les protocoles Zigbee et 6LoWPAN. Notons que la topologie en étoile est la moins gourmande en énergie [12].

I.3.2. Le groupe IEEE 802:

L'IEEE (Institute of Electric and Electronics Engineers) est une association professionnelle qui joue un rôle très important dans l'établissement de normes.

IEEE 802 Standard Association est un comité de l'IEEE qui décrit une famille de normes relatives aux réseaux locaux (LAN) et métropolitains (MAN) pour la transmission de données numériques assurée par des liaisons filaires ou sans fil, voir la figure I-5. L'IEEE 802 est constituée de plusieurs secteurs. Chaque secteur est dédié à un groupe de travail spécifique. Ainsi le secteur IEEE 802.15 est consacré aux réseaux privés sans fil (WPAN) comme le Bluetooth, Zigbee,…

BY-NC-ND

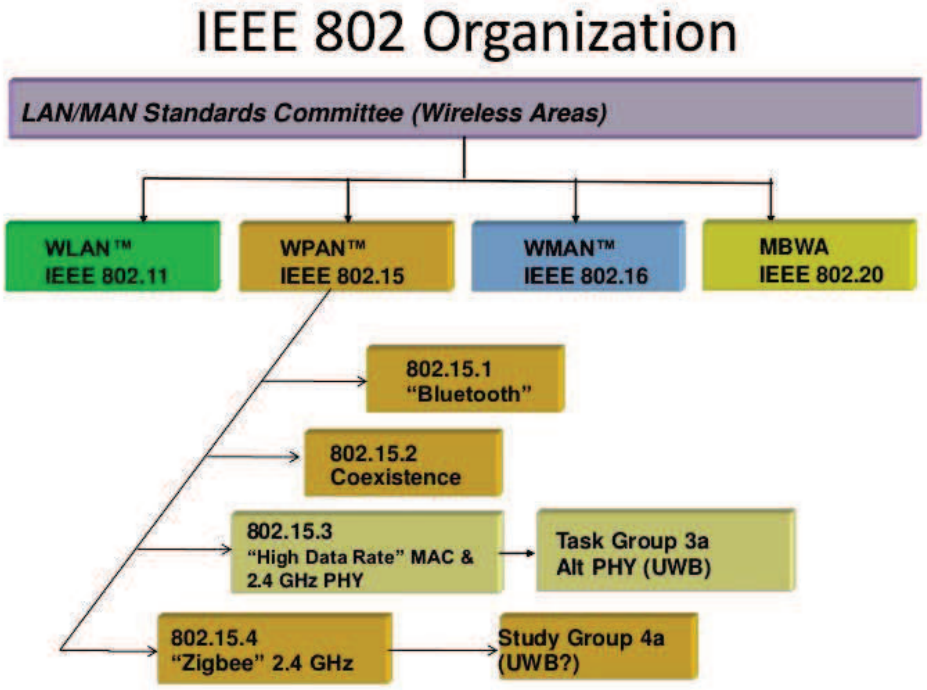


Figure I-5 Organisation du groupe 802

Le groupe IEEE 802 a mis en œuvre plusieurs normes des réseaux LAN et MAN, on peut notamment évoquer la norme 802.11 (le Wi-Fi), la norme 802.15 (WPAN) qui elle-même définit la norme 802.15.1 (le Bluetooth) ou la norme 802.15.4 (Low Rate Wireless Personal Area Network ou LRWPAN). On trouve aussi la norme 802.3 (Ethernet), la norme 802.16 (le WiMax) qui est une technologie sans fil haut débit. Dans ce document, nous nous intéressons à la norme 802.15.

Les réseaux de capteurs font partie de cette norme qui décrit les WPANs. Parmi les protocoles des réseaux de capteurs existants, nous avons des protocoles propriétaires comme par exemple l'alliance ZigBee ou non propriétaires comme le protocole standard IEEE 802.15.4, 6LowPAN (protocole basé sur le standard 802.15.4), Bluetooth.

I.3.3. Bluetooth Low Energy (BLE) :

Aussi connu sous le nom commercial de Bluetooth Smart, le BLE est une technique de transmission sans fil créée par Nokia en 2006 sous forme d'un standard ouvert basé sur Bluetooth.

Comparé au Bluetooth classique, le BLE permet un débit du même ordre de grandeur (1 Mb/s) pour une consommation d'énergie 10 fois inférieure à celle de son prédécesseur [13]. Cela permet d'intégrer cette technique de communication dans de nouveaux types d'équipements (montres, appareils de surveillance médicale ou capteurs…). Moonok Choi et al. [14] ont développé un système de gestion de l'énergie (des bureaux intelligents) qui utilise des balises Bluetooth Low Energy (BLE), des prises intelligentes et une application mobile, ce système

BY-NC-ND

fournit un service d'économie d'énergie sans intervention de l'utilisateur pour réduire efficacement la consommation d'énergie.

La technologie Bluetooth Low Energy opère dans la bande libre ISM 2.4 GHz (usage Industriel, Scientifique, Médical). Cette technologie est basée sur une radio à saut de fréquence pour lutter contre les interférences et les insensibilités des canaux. Elle fournit de nombreuses porteuses FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum). Une modulation simple (Gaussian Frequency Shift Keying – GFSK) est choisie pour réduire la complexité de la radio.

Le tableau I-3 illustre une comparaison des performances entre le Bluetooth classique et le Bluetooth Low Energy.

Caractéristiques techniques	Classic Bluetooth	BLE
Portée	100 m	50 m
Débit	1-3 Mbit/s	1 Mbit/s
Débit d'application	0.7–2.1 Mbit/s	0.27 Mbit/s
Sécurité	56/128 bits et la couche d'application définie par l'utilisateur	AES 128 bits
Latence	100 ms	6 ms
La consommation crête en courant	<30 mA	<15 mA

Tableau I-3 Les performances comparées entre le Bluetooth classique et BLE

Les différences entre la technologie Bluetooth Low Energy (BLE) et la technologie Bluetooth classique commencent au niveau des couches inférieures, où la couche physique (le PHY) Bluetooth Low Energy est une version allégée et optimisée du PHY Bluetooth classique (BR).

Le PHY BR (Bluetooth Basic Rate) effectue sa sélection de canal par saut de fréquence sur 79 canaux (réductibles à un minimum de 20 canaux par saut de fréquence adaptatif) et exécute la découverte sur 32 canaux, tandis que le PHY Bluetooth Low Energy n'a que 37 canaux et exécute la découverte sur 3 canaux. La technologie Bluetooth Low Energy ayant beaucoup moins de canaux à examiner lors de la découverte, ce processus est beaucoup plus rapide. Une connexion peut être établie en quelques millisecondes au lieu des quelques secondes nécessaires avec la technologie Bluetooth classique. L'espacement des canaux de Bluetooth Low Energy est de 2 MHz, contre 1MHz pour le BR, ce qui a pour effet de réduire les contraintes de filtrage RF. Au niveau des couches supérieures, les connexions Bluetooth Low Energy sont

BY-NC-ND

globalement similaires au mode BR appelé « sniff sub-rating». Il en résulte, pour la technologie Bluetooth Low Energy, un moyen éco-énergétique de maintenir les connexions tout en gardant la radio désactivée autant que possible.

I.3.4. Caractéristique du Standard IEEE 802.15.4 :

Le standard 802.15.4 est un protocole de communication défini par l'IEEE. Il sert de base à de nombreux autres protocoles parmi lesquels le protocole 6LoWPAN, Zigbee,… Il est utilisé dans le cadre des réseaux LRWPAN du fait de sa faible consommation, de sa faible portée et du faible débit des dispositifs utilisant ce protocole.

La norme IEEE 802.15.4 [15] spécifie une couche physique (notée PHY) et une sous-couche de contrôle d'accès au médium (notée MAC) pour les réseaux LRWPANs. La dernière version de cette norme, présentée dans [16], prend en charge une variété de caractéristiques physiques permettant son adaptation à de nombreuses applications. La figure I-6 montre les différentes couches et leurs interactions qui seront détaillées dans les paragraphes suivants.

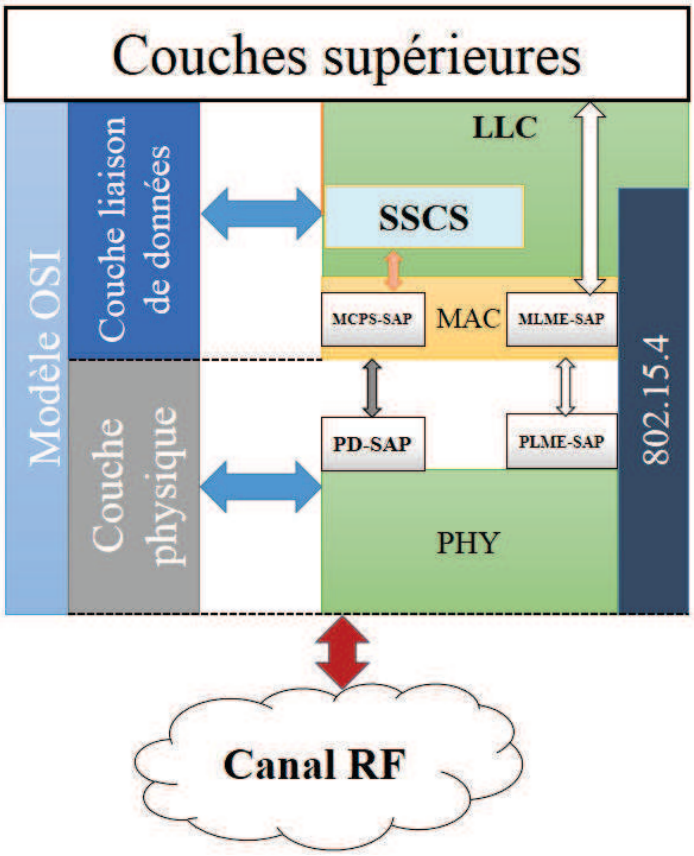


Figure I-6 La pile protocolaire de la norme 802.15.4

I.3.5. La couche physique PHY de 802.15.4

La couche PHY [17] définit les bits qui sont réellement transmis sur le support physique. Elle est responsable des tâches suivantes:

BY-NC-ND

- Activation et désactivation de l'émetteur-récepteur radio
- Détection d'énergie (Energy detection : ED) dans le canal actuel
- La qualité du signal (Link quality indicator : LQI) pour les paquets reçus
- Ecoute du canal (Clear channel assessment : CCA) pour le CSMA – CA
- Sélection de la fréquence du canal
- Transmission et réception de données.

Le couche PHY fournit deux services, accessibles via deux SAP (Service Access Point) : le service de données PHY, accessible via PD-SAP (Physical Data - Service Access Point) et le service de gestion PHY, accessible via PLME-SAP (Physical Layer Management Entity - Service Access Point):

- ✓ Le service de données PHY (PD-SAP) permet la transmission et la réception des données du protocole à travers le canal radio physique. Le PD-SAP prend en charge le transport de trames entre les entités de sous-couche MAC
- ✓ La PLME fournit les interfaces de service de gestion de couche par lesquelles les fonctions de gestion de couche peuvent être invoquées. Le PLME est également responsable du maintien d'une base de données d'objets gérés appartenant à la PHY. Le PLME-SAP permet le transport de commandes de gestion entre le MLME et le PLME.

La couche PHY fournit une interface entre la sous-couche MAC et la chaîne de radio physique, via le firmware RF et le matériel RF.

I.3.5.1. Canal de transmission

Un canal de transmission s'appuie sur un support de transmission pour envoyer un message entre un émetteur et un récepteur. Dans notre cas (Figure I-7), il permet donc de transmettre un signal émis e(t) en un signal reçu r(t) par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques en utilisant le canal de propagation. Une caractérisation du canal de propagation est nécessaire avant le déploiement des systèmes de communications sans fil. A la différence du canal de transmission, le canal de propagation ne prend en compte que les différentes interactions subies par les ondes électromagnétiques dans l'environnement. Le canal de transmission ajoute la contribution des antennes d'émission et de réception.

BY-NC-ND

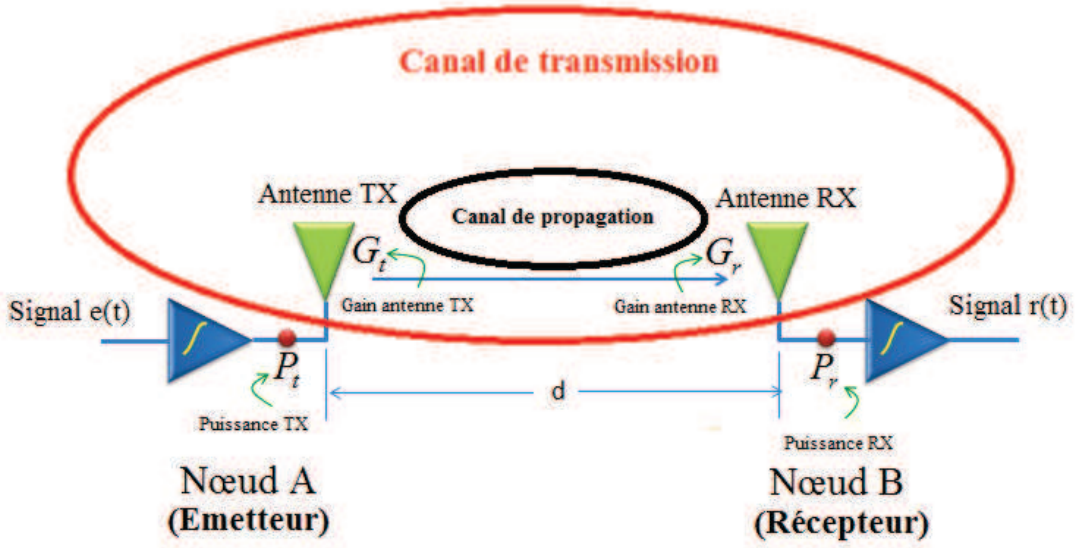


Figure I-7 Chaine de transmission entre deux nœuds

Au fur et à mesure qu'une onde électromagnétique s'éloigne de sa source, son amplitude diminue. Cette décroissance est due aux phénomènes naturels de propagation et d'interactions onde-matière (réflexion, transmission, diffraction, diffusion) existants dans le canal. Ces interactions sont la cause de propagations multi-trajets. L'amplitude des atténuations du signal peut être modélisée par une loi de Rayleigh dans le cas d'une transmission NLOS(non-line-of-sight) (les puissances de tous les trajets sont assez proches), ou bien alors par une loi de Rice dans le cas d'une transmission LOS (line-of-sight) (un trajet prédomine en termes de puissance parmi tous les autres) [18].

Pour déterminer l'atténuation en espace libre, on utilise la formule de FRIIS [19] donnant l'affaiblissement d'une liaison entre deux antennes séparées par une distance d. Cette distance est supposée suffisamment grande pour permettre l'utilisation de l'expression en champ lointain. De plus, les polarisations des deux antennes sont supposées être similaires.

$$P_r = P_t \times G_t \times G_r \times \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \tag{I.1}$$

$$\lambda = \frac{C}{f} \tag{I.2}$$

P_t est la puissance en watts (W) délivrée à l'antenne d'émission

- P_r est la puissance en watts (W) collectée sur l'antenne de réception
- G_t est le gain de l'antenne d'émission

BY-NC-ND

- G_r est le gain linéaire de l'antenne de réception

- d est la distance en mètres (m) séparant les deux antennes

- λ lambda est la longueur d'onde en mètres (m) correspondant à la fréquence de travail

- c = 300 000 km/s vitesse de la lumière dans l'air (célérité)

- f est la fréquence.

Il paraît alors évident que le niveau de puissance reçue pour une transmission donnée dépend non seulement de la distance séparant l'émetteur et le récepteur mais également de la fréquence de transmission, le choix de la fréquence doit tenir compte des réglementations. L'article de F. Touvat et al. [20] travaillant sur les techniques de localisations d'un capteur par rapport au niveau de puissance du signal à la réception (RSSI : Received Signal Strength Indication) fournit le résultat d'un test effectué avec des nœuds sans fils fonctionnent sur la bande 868 MHz et 2.4 GHz. Les nœuds fonctionnant à la fréquence 2.4 GHz en intérieur et extérieur ont moins d'atténuation qu'à la fréquence 868 Mhz avec des conditions de test particulières.

En plus des pertes en espace libre, il existe d'autres types de pertes que l'on peut décomposer en pertes de désadaptations, de dépointage à l'émission et à la réception, de filtrage, de dépolarisation, etc. selon le système étudié. Dans ce document toutes ces pertes sont considérées comme nulles dans le système. Par contre des pertes générées en intérieur sont prises en compte comme par exemple les pertes créées par le déplacement des humains, les obstacles, etc. Ali Kara et Henry L. Bertoni [21] ont étudié différentes types d'atténuations en intérieur montrant que les différents obstacles dans l'environnement, tels que le mobilier et le corps humain à proximité du récepteur et / ou de l'émetteur, provoquent des fortes atténuations qui limitent la portée et les performances des systèmes sans fil. Il est également important de gérer des interférences possibles entre des systèmes cohabitant dans le même écosystème fonctionnant dans la même bande de fréquence, tels que les réseaux locaux sans fil et Bluetooth. Des valeurs d'atténuations de 20 dB à 30 dB ont été mesurées pour certains liens en raison de la présence humaine dans un environnement de type bureau. Toutes les informations qui transitent dans le canal sont des trames du protocole IEEE 802.15.4. Nous allons décrire les différents types de trames qui circulent dans le canal de transmission.

I.3.5.2. Les fréquences utilisées et les canaux

Le protocole IEEE 802.15.4 peut être utilisé sur trois bandes de fréquences différentes situées autour de : 868 MHz pour la région Europe, 915 MHz pour l'Amérique du Nord, et 2,4 GHz pour une couverture mondiale. La norme prévoit deux couches physiques différentes (PHY), une pour le 868/915 MHz (PHY868/915) et une seconde pour le 2,4 GHz (PHY2450). Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques et les paramètres des deux couches physiques proposées (PHY868/ 915 et PHY2450).

BY-NC-ND

Norme	Bande (MHz)	Modulation	Etalement	Débit (Kbits/s)
IEEE 802.15.4-2003	868/915	BPSK	DSSS	20 à 868 MHz / 40 à 915 MHz
	2400	OQPSK	DSSS	250
IEEE 802.15.4-2006	868/915	BPSK	DSSS	20 à 868 MHz / 40 à 915 MHz
	868/915	OQPSK	DSSS	100 à 868 MHz / 250 à 915 MHz
	868/915	BPSK/ ASK	PSSS	250
	2400	OQPSK	DSSS	

Tableau I-4 Comparaison PHY entre 802.15.4-2003 et 802.15.4-2006

I.3.5.3. Modulations et étalement de spectre

Comme beaucoup d'autres technologies WLAN/WPAN, IEEE 802.15.4 mettent en œuvre une modulation à spectre étalé. La technique d'étalement de spectre est une méthode de transmission de signal dans laquelle l'énergie émise avec une porteuse est délibérément étalée ou distribuée dans le domaine fréquentiel.

Une modulation utilisant une méthode unique d'étalement de spectre séquentiel (DSSS) [22] permet d'améliorer l'immunité du signal au bruit, le rendant résistant aux brouillages et aux interférences rencontrées lors de la transmission. Ainsi il est possible que plusieurs équipements partagent la même fréquence porteuse. Grâce à un code pseudo-aléatoire de chaque équipement on peut distinguer le signal de chaque équipement. De plus, grâce au codage réalisé par la séquence pseudo-aléatoire, qui permet de réaliser l'étalement, la confidentialité des échanges est améliorée.

La couche PHY868/915 est relativement simple et basique : les symboles sont binaires, grâce à l'emploi d'une modulation BPSK. Le débit est peu élevé (20 Kbits/s pour le 868 MHz, 40 Kbits/s pour le 915 MHz). En revanche, la couche PHY2450 propose une modulation à codage orthogonal plus complexe, O-QPSK, qui permet une efficacité plus élevée et un débit plus important.

BY-NC-ND

I.3.5.4. Portée, puissance d'émission et sensibilité du récepteur

IEEE 802.15.4 prévoit une portée classique de quelques dizaines de mètres. La puissance maximale émise par un module 802.15.4 ou ZigBee n'est pas définie par la norme ; celle-ci est laissée d'une part à l'appréciation de l'autorité de régulation de la zone où est effectuée la transmission, et d'autre part au constructeur pour des questions évidentes d'autonomie énergétique du système dans lequel il est implanté. Néanmoins, la puissance typique recommandée est de 1 mW, soit 0 dBm et la sensibilité du récepteur doit être meilleure que -85 dBm à 2,4 GHz pour un TEP [23] (taux d'erreur paquet) ≤ 1%.

La sensibilité d'un système de réception correspond à la puissance minimale reçue garantissant un niveau de qualité spécifié. Ce niveau de qualité peut en général s'exprimer par le rapport signal sur bruit (SNR).

$$TEP = 1 - (1 - TEB)^{l_p} \tag{I.3}$$

TEB : taux d'erreur bit

l_p : Longueur de la trame

En pratique, un nœud ZigBee a une portée de quelques dizaines de mètres, jusqu'à une centaine de mètres en extérieur et sans obstacle. Notons que, de par la robustesse de la couche physique, les portées d'un émetteur-récepteur 802.15.4 sont comparables à celles d'un émetteur-récepteur 802.11, mais avec une puissance d'émission plus faible : à rapport signal sur bruit (SNR) égal, 802.15.4 dispose d'un taux d'erreur bit (TEB) [23] meilleur que les autres technologies sans fil proposées par l'IEEE. Le TEB est lié au TEP par l'expression (I .3).

Remarquons également que comme pour toutes les technologies de réseau sans fil, la portée effective d'un émetteur-récepteur 802.15.4 est liée à sa puissance d'émission. Certains modules sont dotés d'un étage amplificateur HF en sortie et/ou d'un amplificateur à faible bruit en entrée, ce qui permet d'étendre considérablement la portée radio.

Par exemple, les modules XBeePro [24] [25] [26] [27] fabriqués par la société MaxStream ont une portée de 40 m en intérieur et 100 m en extérieur. Ils peuvent avoir une portée théorique supérieure à ce qui est annoncé selon l'antennes utilisée.

I.3.6. La couche liaison de 802.15.4

De façon très similaire au modèle défini par le groupe 802 de l'IEEE, le niveau liaison de IEEE 802.15.4 (niveau 2 OSI) comprend une sous-couche d'accès au médium MAC et une sous-couche de convergence LLC.

I.3.6.1. La sous-couche MAC :

La sous-couche MAC gère tout l'accès à la chaîne de radio physique et est responsable des tâches suivantes:

- Génération des balises réseau si l'appareil est un coordinateur.

BY-NC-ND

- Synchronisation avec les balises.
- Support de l'association réseau et de la dissociation.
- Support de la sécurité du périphérique.
- Utilisation du CSMA-CA [28] pour le mécanisme d'accès au canal.
- Manipulation et maintien du mécanisme GTS (Guaranteed Time Slot).
- Fournir un lien fiable entre deux entités MAC homologues.

La sous-couche MAC comprend conceptuellement une entité de gestion appelée MLME. Cette entité fournit les interfaces de service par lesquelles les fonctions de gestion de la couche peuvent être invoquées comme par exemple le type d'adresse utilisée 16 bits ou 64 bits. Le MLME est également responsable du maintien d'une base de données d'objets appartenant à la sous-couche MAC.

❖ L'accès au canal :

802.15.4 propose deux modes pour l'accès au canal : un mode non coordonné ou non-beacon (totalement CSMA/CA) et un mode coordonné, ou beacon, disponible uniquement dans une topologie étoile où le coordinateur envoie périodiquement des trames balises (beacon) pour synchroniser les nœuds du réseau. L'accès au canal se fait selon le mode de fonctionnement du réseau comme présente la figure I-8.

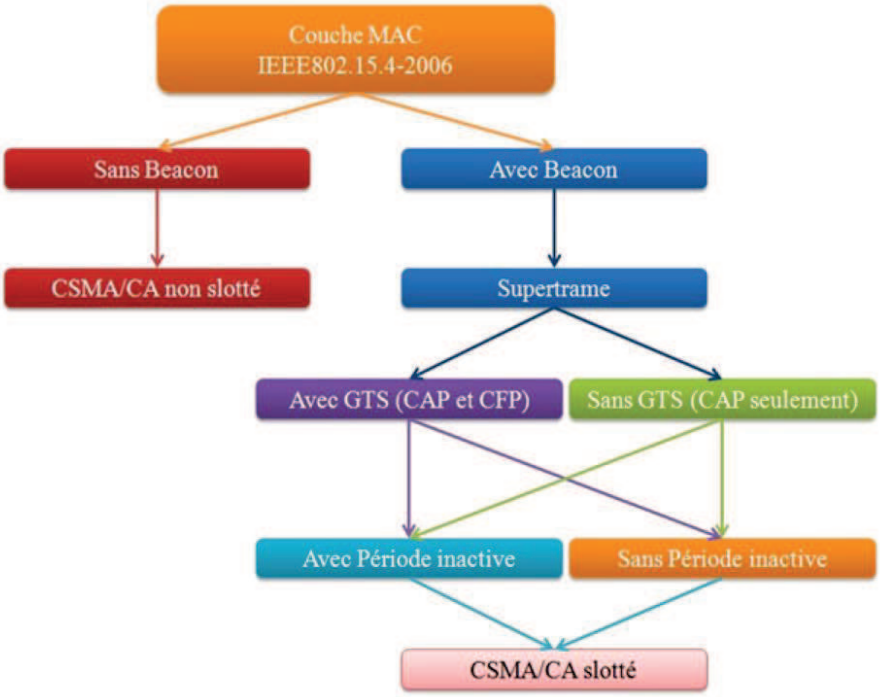


Figure I-8 Méthode accès au canal de la couche MAC

BY-NC-ND

Mode non coordonné ou sans balise/beacon (non-beacon):

Dans le mode non coordonné, le coordinateur reste par défaut dans l'état d'attente de données. Il n'y a pas d'émission de balise donc pas de synchronisation entre les différents nœuds du réseau. Les nœuds voulant émettre des données doivent utiliser le protocole CSMA/CA [29] « non-slotté », c'est-à-dire que le début d'une émission se fait dès que le canal est détecté comme libre. Il n'est pas nécessaire d'attendre un intervalle de temps dédié, si le canal est libre il transmet sinon il attend une période aléatoire (défini dans le protocole IEEE 802.15.4).

Dans l'article [30], le mode IEEE 802.15.4 MAC non-beacon est utilisé. Les nœuds utilisent une opération CSMA / CA non slotté pour l'accès au canal et la transmission de paquets. Deux variables principales qui sont nécessaires pour l'algorithme d'accès au canal sont BE (Back Off Exponent) et NB (Number of Backoffs). Chaque nœud doit maintenir les variables NB et BE pour chaque tentative de transmission effectuée.

- NB: nombre de fois l'algorithme CSMA/CA fait un backoff durant la tentative de transmission en cours.

BE: détermine le temps de périodes backoff qu'un nœud doit attendre avant de tenter d'accéder au canal.

L'algorithme de CSMA/CA non-slotté est exécuté pour l'envoi des données dans un réseau fonctionnant dans un mode dite non-beacon. Il se base essentiellement sur trois paramètres qui sont le NB, BE et CCA.

La figure I-9 présente les différentes étapes du CSMA/CA non-slotté. L'algorithme débute par une phase d'initialisation, les paramètres des variables BE = macMinBE (valeur minimum que peut prendre BE) et NB = 0. Puis, on effectue un tirage aléatoirement un nombre entier de périodes de backoff. Après exécution de la période du backoff, la couche MAC demande à la couche PHY d'effectuer un CCA c'est-à-dire l'écoute du canal. Si la couche PHY détecte le canal libre, la couche MAC commencera immédiatement la transmission de données ("Succès" pour accéder au canal). Si le canal est jugé occupé, la sous-couche MAC incrémente NB et BE en vérifiant que BE reste inférieur ou égal à macMaxBE (la valeur maximum que peut prendre BE). Si NB est inférieur au macMaxCSMABackoffs (nombre maximum que l'algorithme CSMA/CA peut s'exécuter), l'algorithme CSMA / CA revient sur le tirage d'un nouveau backoff. Si la valeur de NB est supérieure à macMaxCSMABackoffs, l'algorithme CSMA / CA se terminera par un "échec", ce qui signifie que le nœud n'a pas réussi à accéder au canal.

BY-NC-ND

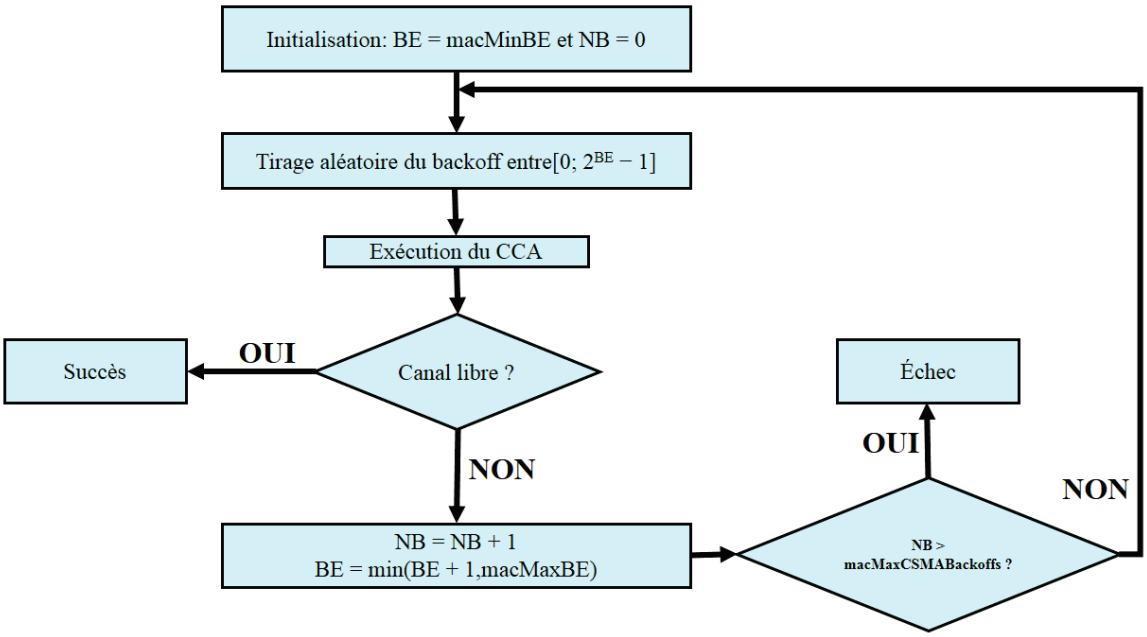


Figure I-9 Algorithme de CSMA/CA non-slotté de la norme IEEE 802.15.4

Cependant, même si l'algorithme est dit « non-slotté », il se base tout de même sur une unité temporelle discrète appelée période de backoff (temporisation) pour pouvoir retarder plus ou moins l'émission d'une trame et éviter les collisions. Lorsque le coordinateur a des données à transmettre à un dispositif, il attend que le dispositif rentre en contact et lui demande les données. Le coordinateur envoie alors un accusé de réception de la requête. Si des données sont en suspens, le coordinateur transmet les données en utilisant le même principe (CSMA/CA), comme indiqué figure I-10.

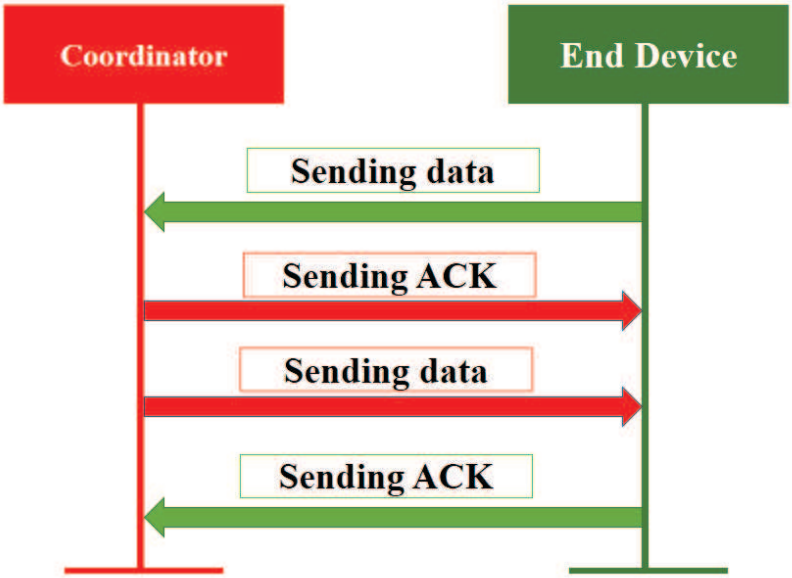


Figure I-10 Echange de trame en CSMA/CA non slotté

BY-NC-ND

Le mode non-beacon est généralement utilisé pour les capteurs qui dorment la majorité du temps. Quand un événement survient, les capteurs se réveillent instantanément et envoient une trame. Le coordinateur dans ce type de réseau doit être alimenté sur secteur, car il ne dort jamais. Il est par défaut dans l'état d'écoute permanente.

Cette solution a pour avantage d'optimiser l'autonomie des batteries des capteurs et d'utiliser le canal uniquement lorsqu'il est nécessaire de transmettre des données utiles. Avec l'utilisation du CSMA/CA, l'accès au canal n'est pas garanti dans une période donnée (tout dépend de la densité du réseau et du nombre de dispositifs voulant transmettre en même temps).

- ❖ Mode coordonné, beacon ou balisé

Dans le mode coordonné, le coordinateur du réseau diffuse périodiquement des trames appelées balise ou beacon. Tout membre du réseau qui entend cette balise l'utilise pour se synchroniser avec le coordinateur. Le CSMA/CA slotté est utilisé dans ce mode. Ici le coordinateur envoie une super-trame qui peut inclure une période de CAP, une période de CFP et une période d'inactivité.

- ✓ La période CAP (Contention Access Period) est similaire au mode sans beacon. Tous les dispositifs peuvent transmettre de façon aléatoire, mais en respectant la durée d'un slot.

- ✓ La période CFP (Contention Free Period) permet de garantir l'accès au canal à un dispositif pendant une durée déterminée en nombre de slots, appelée GTS (Guarantee Time Slot).

- ✓ La période d'inactivité comme son nom l'indique c'est la période où le coordinateur entrera en mode sommeil.

Lors de la réception de cette balise, tous les dispositifs sont informés de la durée de la super-trame et à quel moment ils peuvent transmettre des données. Ils recevront aussi une indication à partir de quel moment le coordinateur rentrera en inactivité et pour quelle durée. Les dispositifs savent alors quand ils peuvent rentrer en sommeil ou transmettre. L'envoi régulier d'un beacon permet de resynchroniser l'ensemble des dispositifs et les informer des changements dans la super-trame.

BY-NC-ND

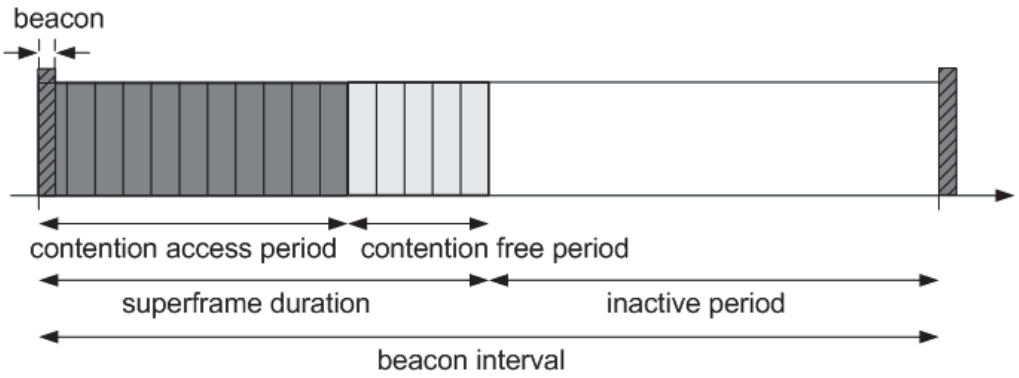


Figure I-11 Structure de la super-trame [31]

Dans [32], les auteurs trouvent un taux élevé de collisions en début de la super-trame, ce qui se répercute sur la consommation des nœuds. Wang [33, p. 4] a comparé le CSMA slotté et non slotté du protocole IEEE 802.15.4 et a constaté que CSMA non slotté a une meilleure transmission et une plus grande probabilité de transmission que la CSMA slotté.

I.3.6.2. La sous-couche de convergence (LLC) :

Conformément à la famille des standards IEEE 802, le 802.15.4 propose une sous-couche de convergence de type LLC pour normaliser l'interfaçage des couches décrites par le standard 802.15.4 avec la couche de niveau supérieur, typiquement une couche de niveau 3 compatible LLC. Cette convergence est assurée par la sous-couche SSCS qui est décrite par le standard IEEE 802.15.4. Une couche de convergence joue plusieurs rôles dans le standard IEEE 802.15.4 :

- La vérification de l'intégrité des données reçues avant la remise à la couche supérieure, par exemple par utilisation conjointe d'un Code de Redondance Cyclique (CRC) et d'un mécanisme d'acquittement.

- Le contrôle de puissance.

- La retransmission des données après le contrôle d'erreurs.

- Le contrôle de flux, afin d'éviter la saturation des tampons de réception et la perte éventuelle de données ou les débordements de mémoire.

- La convergence d'adressage, c'est-à-dire la correspondance qu'il faut effectuer entre les adresses de niveau 3 (au niveau réseau, l'adressage est généralement globalisé sur tout le réseau) et les adresses de niveau 2 (au niveau liaison, l'adressage est parfois local et spécifique à un seul brin filaire ou à la zone de couverture radio de chaque cellule utilisée...). La convergence d'adressage permet également la gestion des procédés de diffusion (broadcast) et de diffusion limitée ou diffusion dirigée (multicast).

Les paquets échangés dans la norme 802.15.4 se présentent sous différents types de trames, nous allons définir ces types de trames.

BY-NC-ND

I.3.7. Types de trames IEEE 802.15.4 :

Les trames IEEE 802.15.4 ont été conçues pour enlever la complexité du protocole, ce qui les rend suffisamment robustes pour la transmission sur un canal bruyant. Chaque couche de protocole successif ajoute à la structure des en-têtes et des données de fins d'encapsulations (pieds de trame) spécifiques à la couche. Le LR-WPAN définit quatre structures de trame:

- Une trame de balise :

La figure I-12 montre la structure de la trame de balise, qui provient de la sous-couche MAC. Un coordinateur peut transmettre des balises dans un réseau en mode beacon. L'unité de données de service MAC (MSDU) contient la spécification de super-trame, les champs d'adresse, la liste d'adresses et la charge utile de balise. Le MSDU est préfixé avec un en-tête MAC (MHR) et terminé par un champ de fin de trame MAC (MFR). Le MHR contient les champs de contrôle de trame MAC, le numéro de séquence de balise (BSN) et les champs d'information d'adressage. Le MFR contient une séquence de vérification de trame de 16 bits (FCS). Les MHR, MSDU et MFR forment ensemble la trame de balise MAC (MPDU).

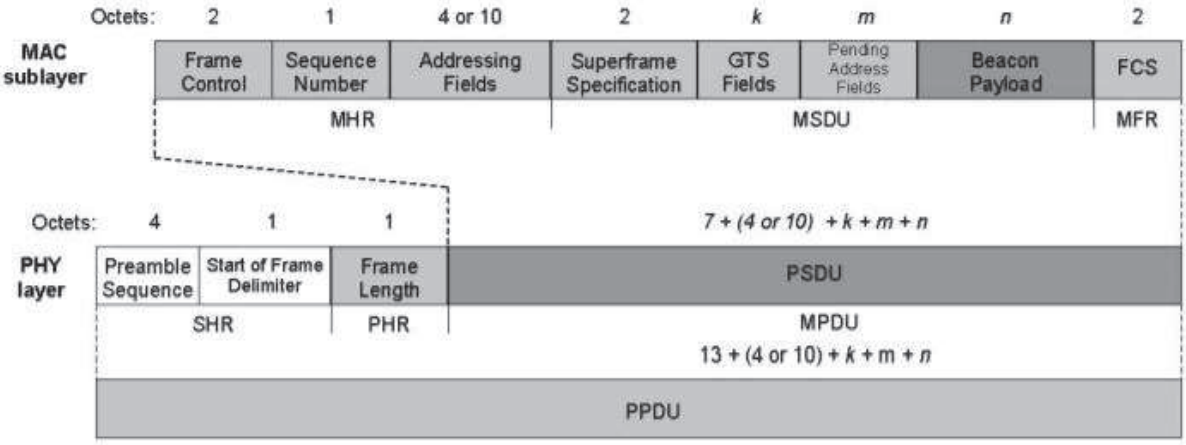


Figure I-12 Vue schématique de la trame beacon [17]

Le MPDU est ensuite transmis au PHY en tant que données utiles de la couche PHY (PSDU). Le PSDU est préfixé par un en-tête de synchronisation (SHR), contenant la séquence de préambule et les champs de délimiteur de démarrage (SFD), et un en-tête PHY (PHR) contenant la longueur de la PSDU en octets. La séquence de préambule permet au récepteur d'obtenir la synchronisation des symboles. Le SHR, le PHR et le PSDU forment ensemble le paquet de balise PHY (PPDU).

- Une trame de données :

La donnée utile est transmise à la sous-couche MAC et est appelée MSDU. Le MSDU est préfixé avec un MHR et terminé par un MFR. Le MHR contient les champs de contrôle de trame, de numéro de séquence et d'adressage. Le MFR est composé d'un FCS de 16 bits. Les MHR, MSDU et MFR forment ensemble la trame de données MAC (MPDU).

Le MPDU est transmis à la couche PHY en tant que données utiles de la couche PHY (PSDU). Le PSDU est préfixé par un SHR, contenant la séquence de préambule et les champs SFD, et un PHR contenant la longueur de la PSDU en octets. La séquence de préambule et la SFD de

BY-NC-ND

données permettent au récepteur d'obtenir la synchronisation des symboles. Le SHR, le PHR et le PSDU forment ensemble le paquet de données PHY (PPDU).

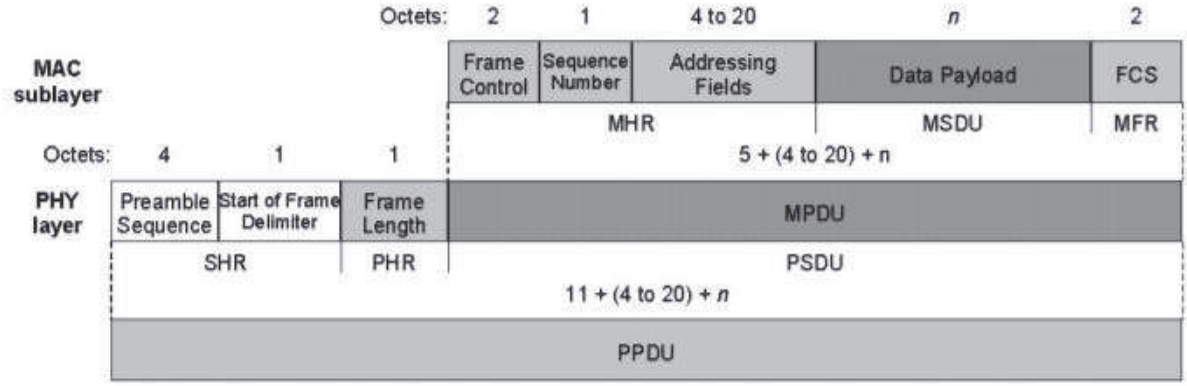


Figure I-13 Vue schématique de la trame de données [17]

- Une trame d'accusé de réception :

La figure ci-dessous montre la structure de la trame d'accusé de réception, qui provient de la sous-couche MAC. La trame d'accusé de réception MAC est construite à partir d'un MHR et d'un MFR. Le MHR contient les champs de contrôle de trame MAC et numéro de séquence de données. Le MFR est composé d'un FCS de 16 bits. Les MHR et MFR forment ensemble la trame d'accusé de réception MAC (MPDU).

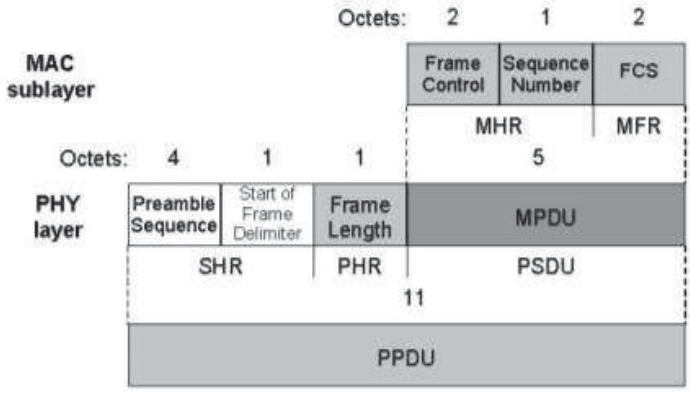


Figure I-14 Vue schématique de la trame ACK [17]

Le MPDU est transmis à la couche PHY en tant que donnée utile de la trame d'accusé de réception à la couche PHY (PSDU). Le PSDU est préfixé avec le SHR, contenant la séquence de préambule et les champs SFD, et le PHR contenant la longueur de la PSDU en octets. Le SHR, le PHR et le PSDU forment ensemble le paquet d'accusé de réception PHY (PPDU).

- Une trame de commande MAC:

C'est une trame qui permet de récupérer les informations de la couche MAC comme le canal utilisé, ID réseaux…

BY-NC-ND

La figure ci-dessous montre la structure de la trame de commande MAC, qui provient de la sous-couche MAC. La MSDU contient le champ de type de commande et la commande de données spécifiques, appelée donnée utile de la commande. Le MSDU est préfixé avec un MHR et terminé par un MFR. Le MHR contient le code de la trame MAC, le numéro de séquence de données et les champs d'information d'adressage. Le MFR contient un FCS de 16 bits. Les MHR, MSDU et MFR forment ensemble la trame de commande MAC (MPDU).

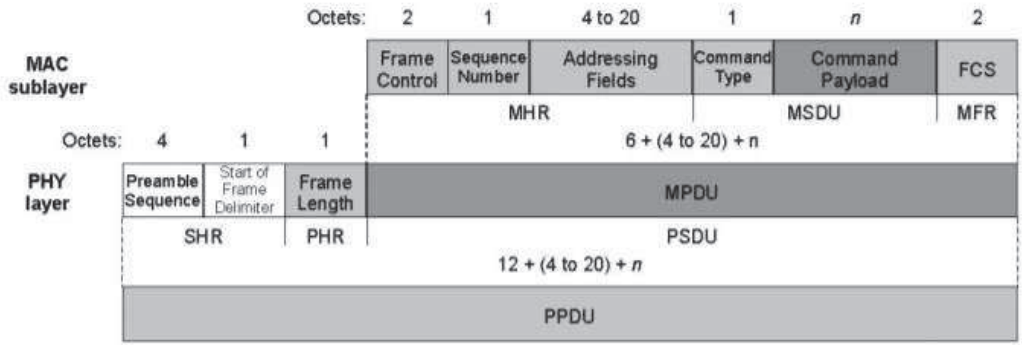


Figure I-15 Vue schématique de la trame de commande [17]

Le MPDU est ensuite transmis à la couche PHY en tant que donnée utile de la trame PHY (PSDU). Le PSDU est préfixé avec un SHR, contenant la séquence de préambule et les champs SFD, et un PHR contenant la longueur de la PSDU en octets. La séquence de préambule permet au récepteur d'obtenir la synchronisation des symboles. Le SHR, le PHR et le PSDU forment ensemble le paquet de commande PHY (PPDU).

I.3.8. Le protocole Zigbee :

ZigBee est un protocole de haut niveau permettant la communication inter nœuds, un maillage du réseau, à consommation réduite, basée sur la norme IEEE 802.15.4 pour les réseaux WPAN. Il est contrôlé par une organisation appelée Alliance ZigBee.

L'alliance ZigBee est une organisation d'entreprises travaillant ensemble pour définir une norme globale ouverte pour la création de réseaux sans fil à faible puissance. [34] [35]. Les couches réseaux du modèle OSI concernées par le protocole ZigBee sont : La couche réseau et la couche Application.

BY-NC-ND

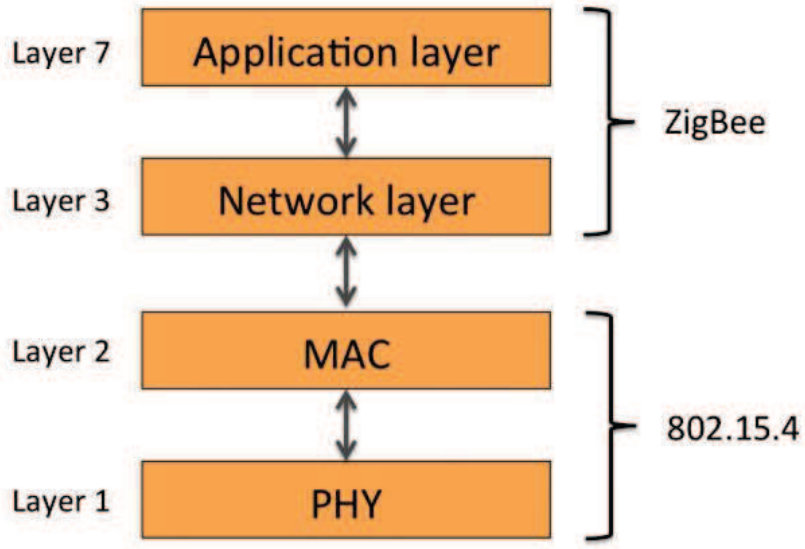


Figure I-16 La pile protocolaire du Zigbee

I.3.8.1. La couche réseau

La couche « Network » (NWK) est responsable de la topologie telle que la topologie étoile, arbre, maillée permettant à un nœud de communiquer avec un autre grâce à un routage. Elle fournit des mécanismes pour joindre, quitter et former un réseau, sécuriser le routage et la transmission des trames, identifier les chemins entre les équipements connectés, découvrir le voisinage, la gestion des types de services applicatifs, etc.

Selon la topologie, chaque nœud peut participer au routage du réseau pour transmettre les informations de la source à un nœud de destination (station de base). Ou bien le routage peut être appliqué par des sauts multiples. Il existe différentes techniques de protocoles de routages, ce sont des applications implémentées dans la couche application des nœuds de capteurs pour définir le comportement de ces derniers lors des calculs du chemin optimal, du routage de données.

Nous pouvons définir deux types de protocole de routage selon la topologie du réseau et le modèle de trafic :

Les protocoles de routage non hiérarchiques :

- Les protocoles de routages proactifs :

Ce sont des protocoles qui construisent leurs tables de routage avant que la demande en soit effectuée, ils se basent suivant l'état des liens (distances, obstacles, nombre de sauts, énergie restante des nœuds destinataires, etc) entre le nœud émetteur et les autres nœuds. Il identifie la topologie du réseau à chaque instant. En cas de problème de pertes de données ou erreurs de transmission de bout en bout, la technique traditionnelle de retransmission est appliquée.

BY-NC-ND

Chaque nœud met à jour sa table de routage en échangeant des paquets de contrôle avec les nœuds voisins.

Nous pouvons citer l'exemple du protocole OLSR (Optimized Link State Routing) [36] [37], Comme son nom l'indique c'est un protocole à état de lien optimisé. C'est un protocole proactif spécialement adapté aux réseaux de grande échelle. Ici tous les nœuds du réseau peuvent jouer le rôle de relais et le protocole maintient sur chaque nœud une table de routage complète (comprenant une entrée pour tous les autres nœuds du réseau).

Les protocoles de routage réactifs:

Ce sont des protocoles qui construisent une table de routage lorsqu'un nœud en effectue la demande. Il ne connait pas la topologie du réseau, il détermine le chemin à prendre pour accéder à un nœud du réseau lorsqu'on lui demande. Ils tiennent compte de l'évolution des trafics et beaucoup d'autres paramètres dans le réseau afin de déduire le chemin optimal pour transmettre l'information d'un nœud à un autre. Un nœud qui veut transmettre des données à un autre nœud, commence d'abord par faire une requête à tous les membres de réseau. Après la réception de la requête, le nœud destination envoie un message réponse qui remonte vers la source (méthode Backward Learning [38]). Alors le nœud source peut transmettre les données en suivant le chemin suivi par la réponse à la requête.

Les protocoles AODV [39] (Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing), DSR [40] (Dynamic Source Routing) sont basés sur un routage réactif. AODV est un protocole à vecteur de distance, l'objectif du protocole AODV est de fournir un service complètement orienté sur le principe de la route à la demande, puisque- qu'il ne demande une route que lorsqu'il en a besoin. Ces protocoles sont techniquement très efficaces mais aussi très énergivores. Navodaya Garepalli et al. [41] ont démontré qu'en supprimant les messages de contrôle un algorithme de routage réactif, les performances peuvent être compétitives par rapport aux protocoles AODV et DSR tout en réduisant considérablement la complexité du protocole.

- Les protocoles de routages hiérarchiques:

Le protocole de routage hiérarchique est un protocole qui se base sur le partitionnement dynamique du réseau en un ou plusieurs sous-ensembles. Il doit assurer un fonctionnement optimal du réseau par minimisation de la consommation des ressources en termes d'énergie et des délais d'acheminement de l'information. Dans ce type de protocoles, la vue du réseau devient locale ; des nœuds spéciaux peuvent avoir des rôles supplémentaires.

Après avoir défini la route ou le prochain nœud de destination vers lequel on doit véhiculer l'information, le rôle de la couche MAC est de définir la technique d'accès au canal de communication afin de connecter le nœud émetteur et le nœud récepteur.

I.3.8.2. La couche Application

La couche application (APS) est la plus haute de la pile protocolaire. Elle détermine la façon dont toutes les couches inférieures se comportent. Elle fait l'interface du système et les utilisateurs finaux. Elle comprend la majorité des composants ajoutés par la spécification de ZigBee.

BY-NC-ND

Dans le Zigbee, elle est associée les modules comme :

- La sous-couche Application Support Sub-Layer (APS) assure l'interface entre la couche de réseau et la couche d'application à travers un ensemble de services. Elle gère le maintien des tables de routage, le transfert des messages entre les appareils reliés, le management des adresses, le mapping des adresses étendues de 64 bits en adresse de 16 bits pour la couche NWK, la fragmentation et réassemblage des paquets, ou encore dispose d'un mécanisme de multiplexage (cas de plusieurs applications sur la même adresse) ;

- L'Application Framework (AF) qui accueille les différents profils d'application. Elle propose également des API pour les développeurs. Chaque application dispose d'une adresse sur le nœud ZigBee comprise entre 0 et 255 ;

- Le module Security Service Provider (SSP) qui s'occupe de fournir des services de sécurité aux couches NWK et APS ;

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait un état de l'art des réseaux sans fils notamment sur la norme 802.15.4 et le protocole Zigbee. Cette mise au point sur les réseaux sans fils va nous permettre de comprendre la suite de ce document. Notre choix se portera sur une topologie en étoile et sur la norme 802.15.4, nous expliquerons les raison de ces choix dans la suite du document. Le chapitre qui suit présente les différents types d'optimisation des réseaux de capteurs présentés dans la littérature. Nous nous limiterons à la norme IEEE 802.15.4.

BY-NC-ND

BY-NC-ND

Chapitre II. L'optimisation d'un réseau de capteurs sans fil

II.1. Introduction

L'optimisation du déploiement d'un réseau de capteurs est définie comme une contrainte majeure et un point clé lors de la conception et la réalisation du réseau. Pour assurer un meilleur fonctionnement du RCSF, il est nécessaire d'avoir une bonne qualité de couverture de la zone de surveillance, connectivité du réseau, taux et délai de livraison des données et la durée de vie du réseau de capteurs.

Optimiser un réseau de capteurs revient à optimiser les nœuds de capteurs selon leurs fonctionnalités. Anouar Darif et al [12] ont fait une étude de la consommation d'énergie d'un réseau de capteurs dans le cas de la topologie étoile, les résultats obtenus sont comparés à une topologie maillée. Les résultats de cette étude montrent que la topologie en étoile est la moins gourmande en énergie, sachant qu'un réseau ayant principalement une fonction de supervision peut être déployé avec une structure en étoile si tous les nœuds arrivent à joindre directement le nœud central (coordinateur). En partant de l'hypothèse que notre réseau aura une topologie en étoile, nous allons voir dans la littérature les optimisations effectuées dans les réseaux ZigBee sans nous attarder sur la couche réseau, car les réseaux en étoile utilisent le standards IEEE 802.15.4. Dans ce document, l'optimisation d'un réseau de capteurs reviendra à améliorer la durée de vie du réseau c'est-à-dire améliorer l'autonomie des nœuds.

Nous avons défini l'optimisation du RCSF sur trois parties :

- ✓ L'optimisation de la durée de vie du réseau en ajoutant un organe de récupération d'énergie à chaque nœud.
- ✓ L'optimisation inter-couche du RCSF.
- ✓ La Co-conception Hardware/Software
- ✓ La compression des données.

Avant d'aborder les différents types d'optimisations, nous allons faire une description du nœud de capteur sans fil.

II.2. Description du nœud de capteur sans Fil dans le contexte d'une optimisation énergétique:

Un « nœud capteur » est un dispositif électronique qui contient quatre unités de base : l'unité de mesure, l'unité de traitement, l'unité de transmission, et l'unité de contrôle d'énergie. Selon le domaine d'application, il peut aussi contenir des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation (GPS) ; un nœud de capteurs peut ainsi avoir une structure modulaire. L'architecture générale d'un nœud de capteur est illustrée sur la figure II-1 ci-dessous.

BY-NC-ND

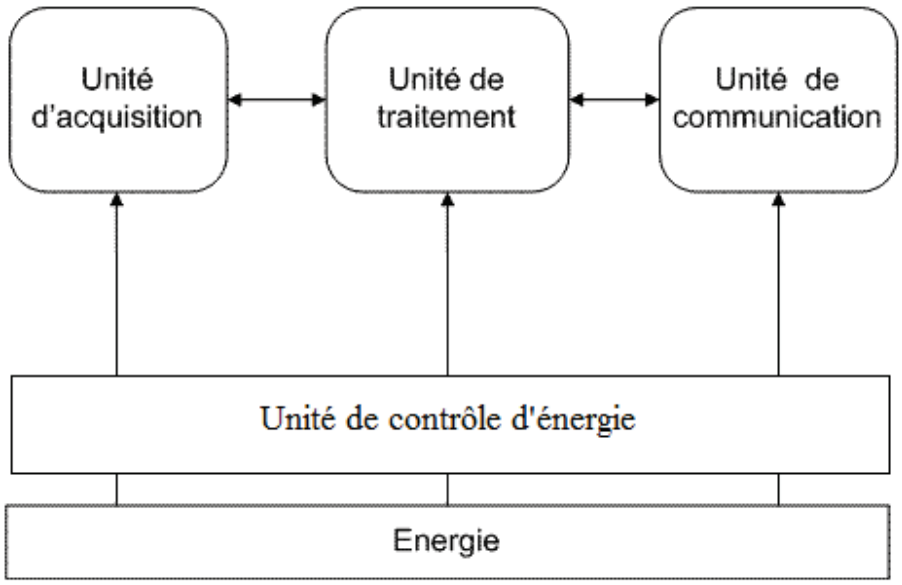


Figure II-1 Architecture nœud de capteur

Selon les types d'applications, la position des nœuds peut avoir une grande importance. En effet, pour identifier correctement l'environnement surveillé, il est important d'associer aux informations recueillies, la position géographique des nœuds. Ceci est surtout valable pour les nœuds mobiles. Cependant pour les applications ou les nœuds de capteurs sont immobiles comme par exemple la supervision d'un bâtiment, la position géographique n'est pas nécessaire. Il suffit de localiser chaque nœud par un identifiant unique.

Akyildiz et Vuran [42] ont passé en revue différents nœuds de capteurs disponibles sur le marché jusqu'en 2010, ainsi que les prototypes proposés dans la littérature. Dans ce listing deux points communs reviennent sur tous les nœuds : le facteur taille et les contraintes énergétiques. La figure II-2 présente quelques types de nœuds de capteurs sans fils qui existent sur le marché.

BY-NC-ND

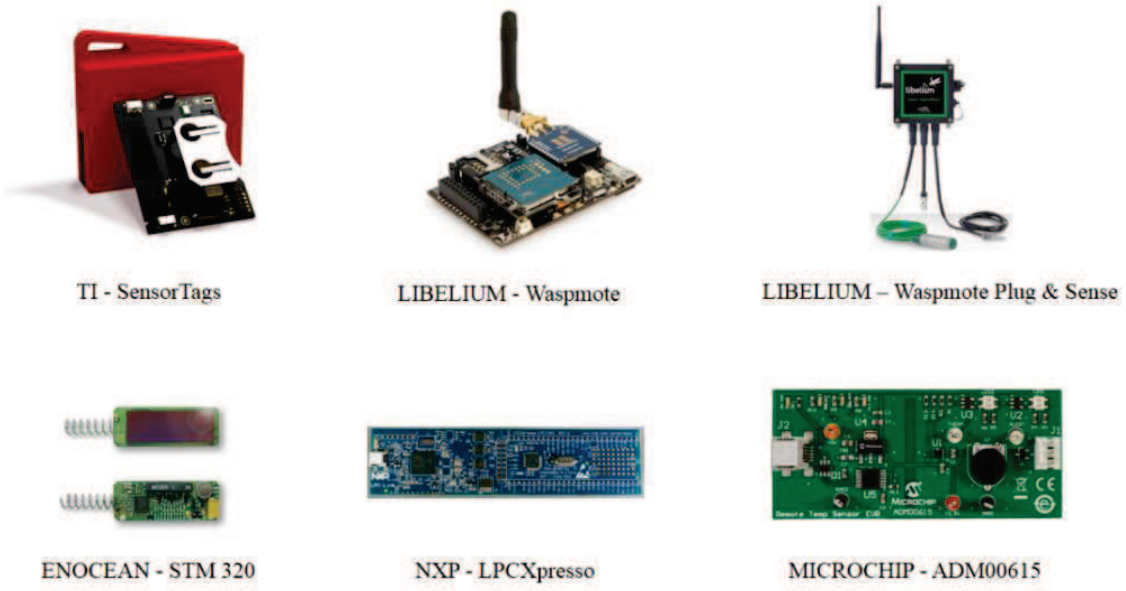


Figure II-2 Différents nœuds de capteurs

II.2.1. L'unité d'acquisition :

Couramment appelé capteur, l'unité d'acquisition est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable, telle qu'une tension électrique, une hauteur de mercure, une intensité ou la déviation d'une aiguille. On fait souvent la confusion entre capteur et transducteur : le capteur est au minimum constitué d'un transducteur.

Figure II-3 Transducteur analogique

Le capteur est généralement composé de deux sous-unités :

- Le récepteur, cette sous-unité est souvent utilisée dans des capteurs chimiques ou biochimiques qui sont des dispositifs d'analyses qui fournissent des informations sur la composition chimique de son environnement, qui peuvent être à l'état gazeux, liquide ou solide.

BY-NC-ND

- Un transducteur est un dispositif convertissant un signal physique en un autre signal; par exemple un signal lumineux en signal électrique (photorécepteur).

Souvent, les deux fonctions sont intimement liées. Un capteur fournissant des signaux analogiques liés à un phénomène observé va transformer ces signaux en signaux numériques compréhensibles par l'unité de traitement. Cette conversion se fait par un convertisseur Analogique/Numérique.

Un convertisseur Analogique/Numérique est un montage électronique dont la fonction est de traduire une grandeur analogique en une valeur numérique (codée sur plusieurs bits), proportionnelle au rapport entre la grandeur analogique d'entrée et la valeur maximale du signal pour une bonne compréhension au niveau de l'unité de traitement.

Il existe deux types de capteurs :

- Certains ont besoin d'un apport en énergie pour fonctionner « capteurs passifs » :

Ils ont besoin dans la plupart des cas d'apport d'énergie extérieure pour fonctionner (thermistance, photorésistance, potentiomètre, …). Ce sont des capteurs modélisables par une impédance. Une variation du phénomène physique mesuré entraine une variation de l'impédance. Il faut leur appliquer une tension pour obtenir un signal de sortie.

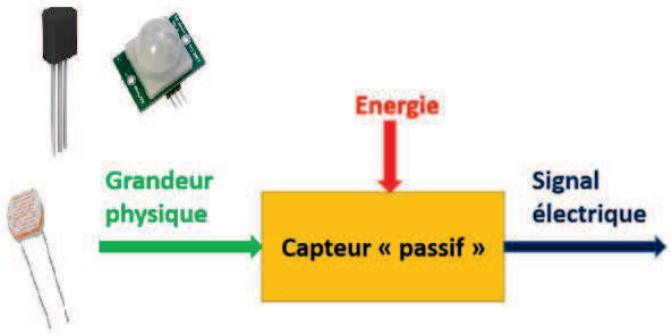


Figure II-4 Capteurs passifs

- D'autres fonctionnent sans avoir besoin d'être alimentés « capteurs actifs » :

Un capteur est dit actif lorsque le phénomène physique qui est utilisé pour déterminer la mesure s'effectue directement par la transformation en grandeur électrique qui est associé au signal de sortie du capteur.

BY-NC-ND

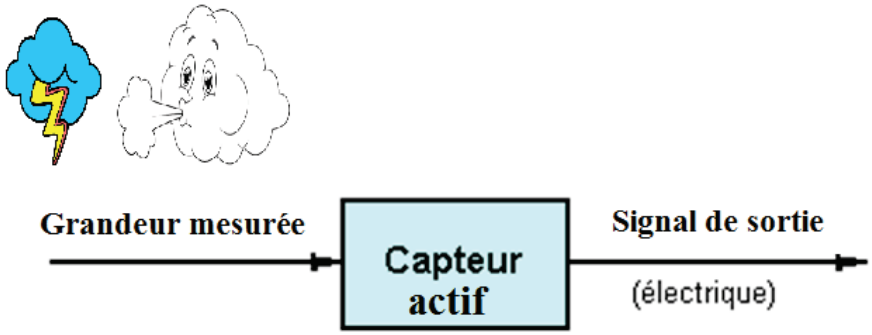


Figure II-5 Capteurs actifs

Le point commun de ces deux types de capteurs est la nature de leur signal de sortie qui est un signal électrique. Le signal de sortie des capteurs peut faire l'objet d'une classification par type de sortie :

- ✓ Capteurs analogiques :

La sortie est une grandeur électrique dont la valeur est une fonction de la grandeur physique mesurée par le capteur. La sortie peut prendre une infinité de valeurs continues. Le signal des capteurs analogiques peut être du type tension, courant, etc. Par exemple, le capteur de température MCP9700A fournit une tension proportionnelle à la température.

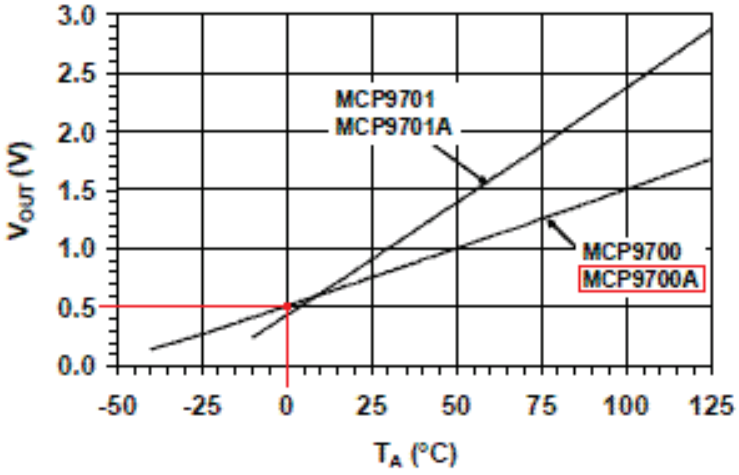


Figure II-6 Capteur analogique MCP9700A

- ✓ Capteurs numériques :

La sortie est une séquence d'états logiques qui, en se suivant, forment un nombre. Le signal des capteurs numériques peut être du type train d'impulsions, avec un nombre précis d'impulsions ou avec une fréquence précise, code numérique binaire, etc. Par exemple, les signaux fournis par le capteur de thermo-hydrique SHT75 sont présentés figure II-7.

BY-NC-ND

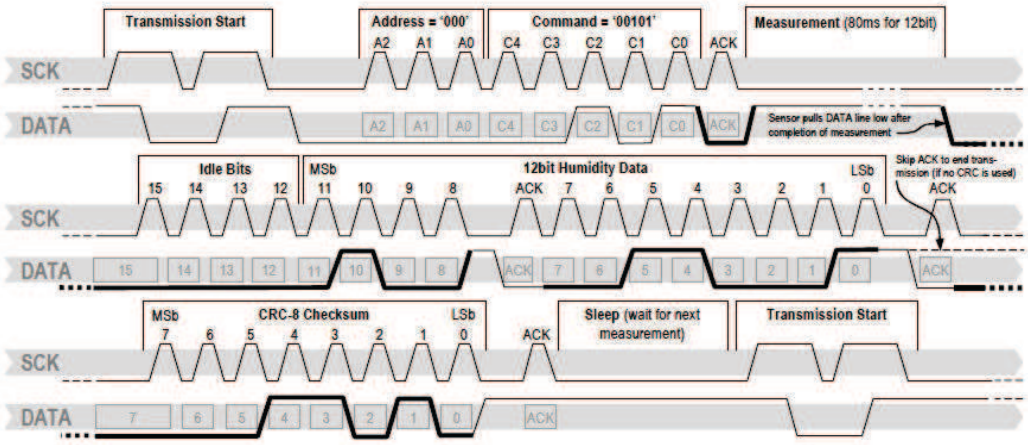


Figure II-7 Capteur numérique

- ✓ Capteurs logiques :

Ces sont des capteurs tout ou rien. La sortie est un état logique que l'on note 1 ou 0. Le signal des capteurs logiques peut être du type courant présent/absent dans un circuit, le potentiel 3.3 V/0 V, etc. Nous pouvons citer l'exemple de capteur de présence, ouverture,….

II.2.2. L'unité de traitement et sa consommation d'énergie :

Elle comprend un processeur généralement associé à une petite unité de stockage de données pour les traiter avec une consommation d'énergie minimale [43] . Elle fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les micro-capteurs (comme par exemple Contiki, ERIKA Enterprise, Nano-RK, DuinOS, TinyOS, MantisOS, RETOS, Senses, Cormos, LiteOS, NanoQplus). Elle exécute les protocoles de communications qui permettent de faire collaborer le nœud avec les autres nœuds du réseau. Le type d'unité de traitement dans un nœud de capteur est choisi en fonction de la complexité de ses tâches et sa consommation. Du point de vue matériel, l'unité de traitement peut être de type microcontrôleur, de type microprocesseur, ou encore de type FPGA ou les deux à la fois.

Nous citons quelques exemples d'unité de traitement parmi celles utilisées dans les WSN :

- 8051 MCU est un microcontrôleur (MC) développé par Intel en 1980 pour être utilisé dans des produits embarqués. C'est encore une architecture populaire, le CC2550 de chez Texas Intrument (TI) qui est parmi les plateformes de nœud de capteurs les plus utilisées, s'est doté d'un 8051 MCU amélioré. Consommation ?

- Le ARM Cortex-M3 [44] est une famille de processeurs RISC 32-bits d'architecture ARM servant à la fois de microprocesseur et de microcontrôleur à destination de l'embarqué. La nouvelle carte de TI, le CC2650 orienté IOT contient un processeur

BY-NC-ND

ARM Cortex-M3 32 bits qui fonctionne à 48 MHz comme processeur principal et un ensemble de fonctionnalités périphériques. La carte en matériel libre Arduino est aussi équipée d'un Cortex-M3. Consommation ?

- Mica est un microcontrôleur CISC 8 bits utilisé dans les études universitaires. Sa consommation dépend de son mode de fonctionnement, elle varie de 0.8 mW sous 1V jusqu'à 77 mW sous 3.5 V [https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00319073/document].

II.2.3. L'unité de communication et les contraintes énergétiques :

Elle effectue toutes les émissions et réceptions des données sur un médium sans-fil. Elle est de type radiofréquence dans notre cas du faite d'utilisation d'un réseau sans fil. Les unités de transmission de type radiofréquence comprennent des circuits de modulation, démodulation, filtrage et multiplexage, certains types de nœuds de capteurs les intègrent directement sur la carte. D'autres les utilisent comme un module complémentaire du fait de leur structure modulaire.

Concevoir des unités de transmission de type radiofréquence avec une faible consommation d'énergie est un défi car pour qu'un nœud ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant et donc une énergie consommée importante. Du fait de cette contrainte d'énergie nous nous sommes orientés sur les nœuds de capteurs ZigBee.

Pour faire des économies d'énergie, l'unité de transmission peut éteindre certains de ses dispositifs selon le degré de mise en veille qu'il souhaite activer [45] [46].

II.2.4. L'unité de contrôle d'énergie :

Un nœud de capteur est muni généralement d'une batterie. Étant donné sa petite taille, cette ressource énergétique est limitée. L'énergie est la ressource la plus précieuse d'un réseau de capteurs, car elle influe directement sur la durée de vie des nœuds de capteurs et donc du réseau entier. Une batterie seule ne peut pas alimenter un capteur puisque sa tension d'alimentation diminue dans le temps si bien que les modules ayant besoin d'une tension constante ne pourront pas fonctionner. L'unité de contrôle d'énergie qui effectue une conversion du courant en continu-continu (DC-DC) est donc une partie essentielle du système. Elle doit répartir l'énergie disponible dans la batterie [47] aux autres modules, de manière optimale. Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement.

II.2.5. Energie :

Lorsqu'on parle d'énergie, souvent on fait allusion à la batterie. C'est l'unité la plus importante dans le nœud de capteurs. Elle doit avoir une très grande capacité tout en gardant un poids et une taille raisonnable. Sa capacité limitée [48] en charge doit permettre le fonctionnement des différents modules car un nœud peut avoir plusieurs consommations en puissance différentes

BY-NC-ND

selon l'activation des modules. Elle permet aussi de stocker l'énergie d'un organe de récupération d'énergie (une source externe : cellules solaires, température, vibration, etc) [49]. Un des paramètres les plus importants dans le choix d'une batterie est son pourcentage d'autodécharge. Il doit être le plus faible possible pour espérer une durée de vie la plus longue possible.

Dans la littérature scientifique, il existe de nombreux modèles de batterie [50] [51] [52] qui permettent de prendre en compte le comportement de ces batteries dans l'estimation de la durée de vie d'un système. Le modèle est variable selon le type de batterie (Alkaline, Lithiumion, Ni-Cd, Ni-Mh ...) et selon le degré de précision de la modélisation des phénomènes physiques liés à sa technologie.

Une étude expérimentale menée dans l'article [53] effectuée sur des échantillons de piles et de batteries de différentes technologies révèle que la durée de décharge d'un élément peut varier de 30% entre un mode de décharge continu ou discontinu. Ces différences proviennent des caractéristiques de non linéarité des batteries et d'un autre phénomène qui est l'effet de relaxation qui engendre une récupération partielle de l'énergie. Une autre étude théorique menée dans [52] indique que l'effet de relaxation lors d'une décharge discontinue apporte une amélioration de la durée de vie d'une batterie.

Plusieurs nœuds de capteurs sont équipés d'un détecteur de faible tension, permettant au système d'envoyer une alarme lorsque la tension de la batterie atteint un seuil bas. Pour espérer avoir un temps assez long avant la réception d'alarme, nous devons faire un bon choix de batterie et de sa capacité.

La meilleure solution pour alimenter les nœuds de capteurs sans fils est la batterie au lithium. En effet, la grande capacité des batteries au lithium nous permet de négliger l'effet de la capacité en raison du courant élevé nécessaire au système. D'autres avantages des batteries au lithium par rapport aux batteries alcalines sont leur très faible taux d'autodécharge [54] et leur tension très stable.

Ainsi nous nous baserons sur la même formule donnée par l'article [55] sur le modèle d'une batterie pour déterminer son temps à vide autrement dit la durée de vide du nœud. Il s'agit d'un modèle simple qui permet de prendre en compte l'effet d'autodécharge en considérant une perte de puissance en pourcentage (k%) de l'énergie totale (E) de la batterie pour une année/un mois/une heure.

Le temps à vide où la batterie est considérée épuisée est alors donné par l'équation suivante :

$$T_v = \frac{E}{P + P_{fuite}} = \frac{E}{24 \times 365 \times P_{moy.H} + k\% \times E} [\text{années}] \quad \text{(II.1)}$$

T_v : *Temps à vide de la batterie ou durée de vie du nœud*

E : *Energie totale de la batterie*

BY-NC-ND

$P_{moy.H}$: *La puissance moyenne consommée en* 1H

P_{fuite} : *Perte de puissance du à l'autodécharge*

k : *Pourcentage d'autodécharge*

P : *Puissance moyenne consommée*

$P = U \times I_{moy}$

U : *La tension d'alimentation du nœud*

I_{moy} : *Le courant moyen consommé*

II.3. Optimisation de la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil:

La durée de vie d'un réseau de capteurs est définie comme étant le temps durant lequel le réseau de capteurs maintient encore ses capacités de connectivité, ses capacités à couvrir la zone de captage ou à garder son taux de perte de nœud inférieur à un certain niveau. Il peut y avoir d'autres définitions de la durée de vie du réseau liées à d'autres paramètres du réseau. Etant dans une topologie étoile où il n'y a pas de routage, la durée de vie d'un réseau de capteurs est donc liée à la durée de vie des nœuds. Et la durée de vie d'un nœud dépend principalement de la durée de vie de sa batterie. Ainsi la durée de vie de la batterie dépend des énergies consommées par les différents modules qui constituent le nœud de capteurs et dépend aussi de la technologie de la batterie. La figure II-8 montre les différentes techniques d'optimisation d'un RCSF.

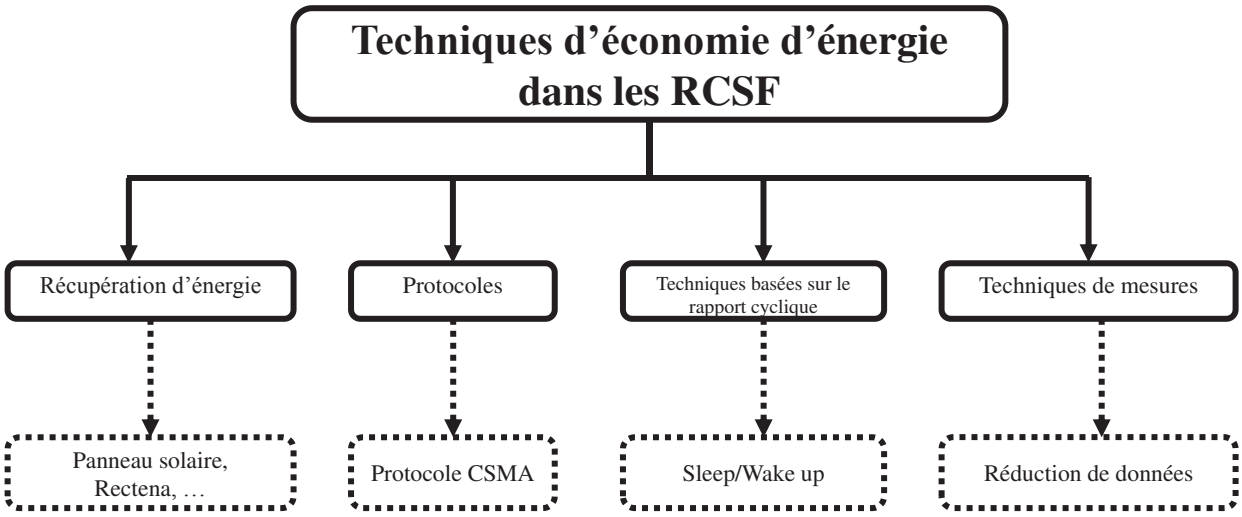


Figure II-8 Technique de réduction d'énergie

BY-NC-ND

Dans la littérature, plusieurs définitions de durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil ont été proposées :

- Certains auteurs dans la littérature définissent la durée de vie d'un réseau de capteurs étant comme une durée durant laquelle un certain nombre de nœuds de capteurs épuisent la capacité de leur batterie :

Ici les auteurs que nous citons considèrent que la perte d'un seul nœud du réseau engendre la fin de la durée de vie du réseau. A. Giridhar et P. R. Kumar [56] disent que la durée de vie d'un réseau de capteurs est définie comme le nombre maximal de fois qu'une certaine fonction ou tache de collecte de données peut être effectuée sans qu'un nœud soit épuisé. Donc pour eux, la perte d'un seul nœud équivaut à la fin de vie du réseau. V. P. Mhatre et al [57] quant à eux étudient la consommation d'un cluster qui utilise le routage multi sauts pour atteindre la tête de clusters. Ils définissent la durée de vie comme le nombre de cycles de collecte de données réussis réalisables jusqu'à ce que la connectivité et / ou la couverture soient perdues. Perdre la connectivité en routage multi sauts signifie qu'un ou plusieurs nœuds dans la chaine de routage se sont épuisés.

Les articles [58] [59] définissent la durée de vie d'un réseau de capteurs comme une durée où il ne reste qu'une petite partie des nœuds actifs dans le réseau. L'article [60] attend compte à lui que tous les nœuds du réseau soient épuisés en énergie pour parler de fin de vie du réseau.

- D'autres auteurs dans la littérature définissent la durée de vie d'un réseau de capteurs en faisant analogie à la zone de couverture :

Cette définition est vraie pour des réseaux utilisant un protocole de routage. Pour un réseau ayant plusieurs zones de couvertures, la durée de vie peut être définie par le temps où un certain nombre de nœuds sont encore actifs dans cette zone [61], ce nombre pouvant atteindre l'unité [62] [63].

- Et enfin d'autres auteurs se contentent de définir la durée de vie d'un réseau de capteurs en pourcentage de nœuds qui ont épuisés leurs batteries, ou en fonction de taux acceptable de détection d'événements, ou encore la durée pendant laquelle le réseau satisfait continuellement les besoins de l'application [64].

Parmi ces définitions de durée de vie proposées, les différences entre elles sont moindres. On peut dire que certaines définitions ne sont que des cas particuliers des autres. Cependant, la plupart de ces définitions donnent un lien entre la durée de vie de réseau de capteurs et la notion de consommation d'énergie de ses nœuds capteurs. Ainsi nous définissons la durée de vie du réseau de capteurs comme étant un pourcentage de nœuds ayant épuisés leurs énergie c'est-à-dire leurs batteries.

BY-NC-ND

II.3.1. Ajout d'un organe de récupération d'énergie à chaque nœud:

Le moissonnage d'énergie ou la récupération d'énergie (energy harvesting en anglais) est le processus par lequel de l'énergie provient de sources externes (solaire, éolienne, thermique, vibratoire, cinétique, chimique, etc.) [65] souvent en petites quantités, puis emmagasinée pour servir au fonctionnement autonome d'appareils comme par exemple les nœuds de capteurs sans fils.

Les systèmes récupérateurs d'énergie fournissent en général de très faibles quantités de courant électrique à des circuits électroniques à basse consommation, qui vont booster cette quantité pour pouvoir alimenter ou stocker l'énergie d'un nœud de capteur.

Voici quelques-unes des techniques de récupération d'énergie qui sont en développement :

- la piézoélectricité : récupération de l'énergie générée lorsqu'une pression est exercée sur un matériau piézoélectrique. Les vibrations peuvent également être transformées ainsi en électricité.

- la thermoélectricité : récupération de l'énergie résultant de la différence de température entre deux éléments.

- le photovoltaïque : récupération de l'énergie solaire mais aussi recyclage de la lumière artificielle.

- l'énergie cinétique : énergie issue des mouvements d'un corps.

- l'électromagnétisme : collecte de l'énergie véhiculée par les ondes électromagnétiques.

Avec ces différents moyens de récupérer l'énergie, l'idée est de rendre des équipements totalement autonomes. Sachant que nous travaillerons avec un réseau de capteurs en in-situ, nous sommes limités à quelques techniques de récupération d'énergies, notamment l'énergie photovoltaïque du fait de la luminosité interne et l'électromagnétisme avec l'utilisation des bornes wifi. Quelques études préliminaires ont montré que l'énergie photovoltaïque interne est plus avantageuse que l'énergie électromagnétique, car la limitation en puissance émission in-situ des équipements sans fils fait que la puissance récoltée est très faible par rapport à la puissance de l'énergie photovoltaïque. En plus selon la fréquence wifi (2.4 Ghz ou 5 Ghz) on aura des modules de récupérations plus ou moins encombrants.

II.3.1.1. L'énergie photovoltaïque

Plusieurs auteurs ont étudié les possibilités de faire la récupération d'énergie photovoltaïque in-situ pour les nœuds de capteurs. L'environnement intérieur peut être éclairé par des rayonnements solaires (indirects) ou sources artificielles (des lampes fluorescentes, des lampes incandescentes ou LED). Le spectre intérieur est donné par la superposition de la lumière

BY-NC-ND

artificielle et de la lumière du soleil. L'intensité du spectre en intérieur est de l'ordre de 1 mW / cm² et l'extérieure d'environ 0,1 W / cm² [66]. L'efficacité d'un système de moissonnage d'énergie, pour l'environnement intérieur, dépend principalement de la performance du transducteur (un dispositif photovoltaïque). L'utilisation d'un dispositif photovoltaïque est conditionnée par la détermination des conditions d'éclairement. Il est important de caractériser une source d'énergie pour choisir le type de cellule photovoltaïque. Parmi les différentes cellules solaires existantes, on peut constater que les cellules solaires de silicium amorphe sont adaptées à l'utilisation dans l'environnement intérieur, car elles sont les plus sensibles à la lumière artificielle [67]. Cependant, ils ont une faible efficacité (environ 12,5%), par rapport aux cellules de silicium multi-cristallin (20,4%) ou aux cellules de silicium monocristallin (25%) [66]. L'efficacité d'un système est définie par la formule suivante :

$$\eta[\%] = \frac{P_s}{P_e} \times 100 \qquad \text{(II.2)}$$

η : Rendement P_s : Puissance en entrée P_e : Puissance en sortie

Alessandro Liberale et al [68] dans leur article ont étudié un système d'exploitation d'énergie photovoltaïque pour une application de réseau de capteurs sans fil sur le corps humain. Le dispositif est capable de stocker dans une batterie ou super condensateur l'énergie produite par le récupérateur d'énergie, d'acquérir des données à partir d'un capteur de corps générique et de transmettre l'information sans fil à un point central. Le système est alimenté par un module photovoltaïque à couche mince (PowerFilm SP3-12), capable d'assurer un bon fonctionnement du système, même dans les conditions d'éclairement intérieur. L'énergie est accumulée dans un super condensateur, et une fois que le seuil de référence d'énergie est atteint, les données du capteur sont collectées et transmises au récepteur.

Le module photovoltaïque flexible PowerFilm SP3-12 est une cellule de 12.7 x 64 mm², en silicium amorphe, elle garantit une bonne efficacité de conversion d'énergie même lorsque le niveau d'irradiation direct est très faible, comme dans le cas de l'éclairage intérieur. Ces cellules solaires sont particulièrement bon marché et offrent un grand nombre d'avantages, comme la haute fiabilité, une longue durée de vie active, un faible impact environnemental. Une caractérisation du module photovoltaïque a été effectuée à l'aide de la méthode SVO (Single-Variable Optimization method) [69]. Ainsi, il a été possible d'évaluer le courant délivré par ce module dans différentes conditions environnementales. Les tests ont été effectués sous éclairage artificiel et naturel, car le système a été conçu pour fonctionner à la fois à l'intérieur et à l'extérieur [68].

Ainsi, nous avons effectué l'évaluation du courant de la cellule solaire (Solar Cell Module YH-39X35 max 4V 35 mA) associée à un convertisseur DC-DC élévateur (booster bq25504) comme montre la figure II-9.

BY-NC-ND

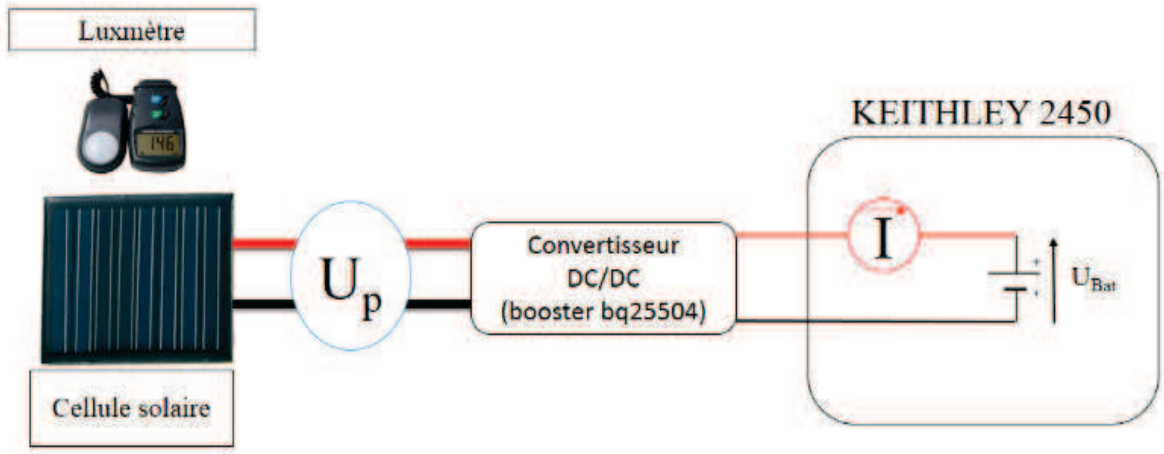


Figure II-9 Mesure de la récupération d'énergie

A partir de la tension de la cellule solaire (U_p tension d'entrée), on veut mesurer le courant de recharge pour une batterie de tension U_{Bat}, voir figure II-9.

Le tableau ci-dessous nous donne les résultats des mesures en fonction du taux de luminosité.

Luxmètre (Lux)	U_p (V)	U_{Bat} (V)	I (mA)
4530	3.4	3	$12*10^{-3}$
20500	3.76	3	1.2
32500	3.88	3	3.5
40000	3.9	3	5.47
76500	4.1	3	9
…	4.2	0	12

Tableau II-1 Résultats des mesures de récupération d'énergie

Le module bq25504 est un convertisseur DC-DC élévateur, il est fabriquée par Texas Instruments (Figure II-10). Le bq25504 est spécialement conçu pour acquérir et gérer efficacement des puissances DC de l'ordre de quelques milliwatts (mW). Il ne requiert que quelques microwatts de puissance continue pour commencer à fonctionner.

BY-NC-ND

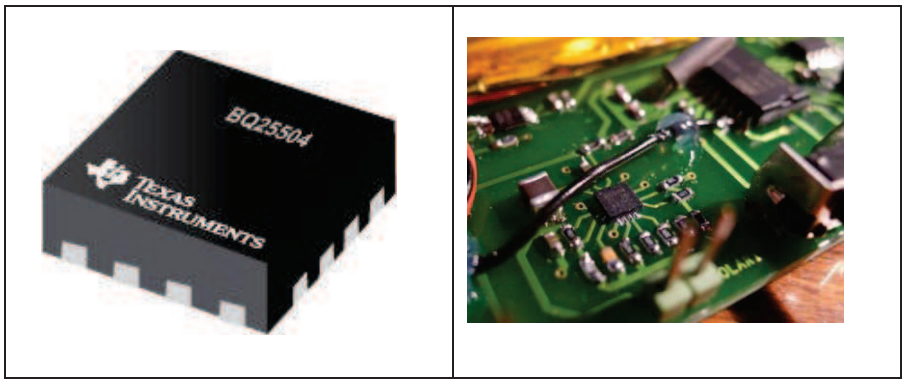


Figure II-10 Module bq25504

Le convertisseur élévateur peut être mis en démarrage avec une tension d'entrée V_{IN} de 330 mV minimum, et une fois démarré, peut continuer à fonctionner même avec des tensions V_{IN} qui peuvent descendre jusqu'à 80 mV.

Afin de maximiser la puissance extraite à partir d'une source de récupération d'énergie, le bq25504 effectue une régulation du courant fournie à la batterie.

Nous avons effectué un test pour voir le fonctionnement du système de récupération d'énergie avec la tension U_{Bat} à différents niveaux. U_{Bat} est générée par la Keithley 2450 puis on mesure le courant I (figure II-11).

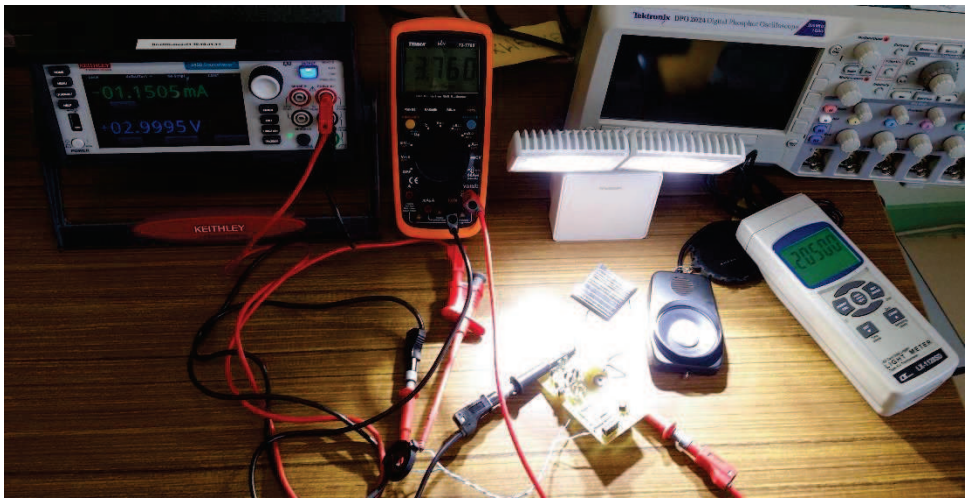


Figure II-11 Banc de mesure de la récupération d'énergie

Les résultats du test dans la figure II-12 montrent une diminution progressive du courant par rapport à la tension U_{Bat}. Quand la tension U_{Bat} est supérieure à 3.8 V, le convertisseur DC DC arrête de fournir un courant à la batterie.

BY-NC-ND

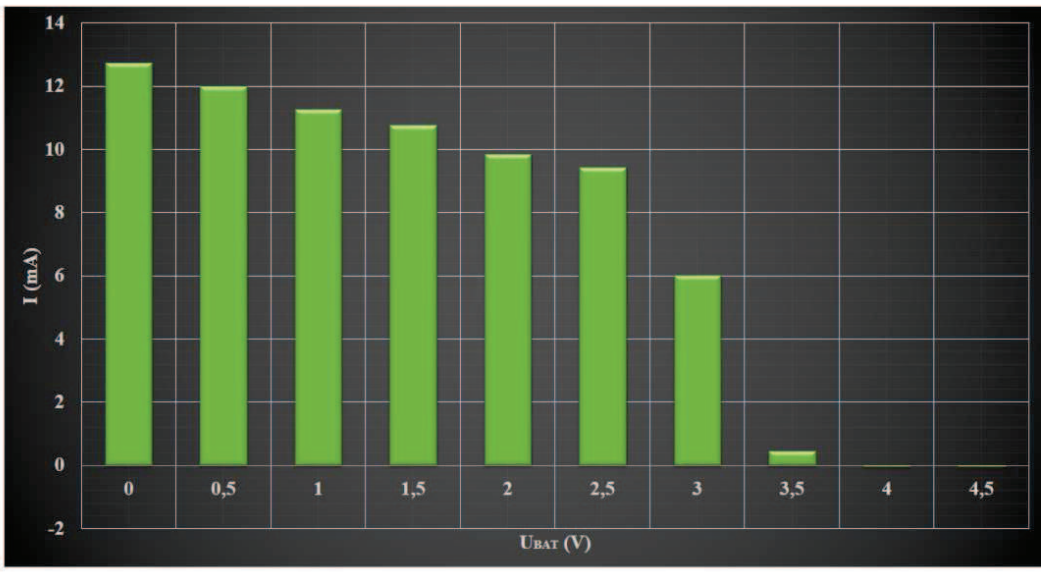
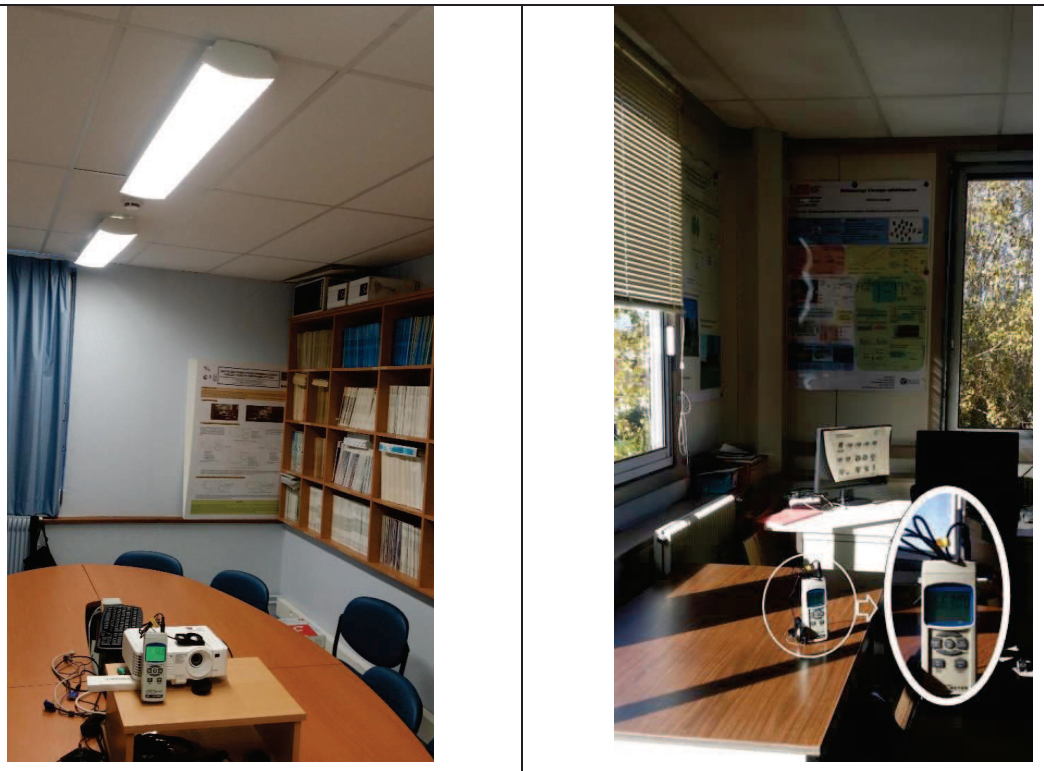


Figure II-12 Niveau de courant récupéré

Nous avons mesuré la luminosité d'une pièce éclairée par la lumière artificielle (figure II-13-a), nous avons obtenu 560 lux à 2 m de la source et plus de 20.000 lux à moins de 1 m. Sachant que pour avoir 1,2 mA de courant récupéré, il nous faut environ 20.000 lux. Il est possible de recharger notre batterie s'il en se place à moins d'un mètre de la source lumineuse.

Nous avons aussi mesuré la luminosité d'une pièce éclairée par la lumière naturelle (figure II-13-b), nous avons obtenu des valeurs de 550 à 6000 lux à l'ombre. Sachant que des journées ensoleillées nous avons des taux de luminosités qui dépassent les 50.000 lux en extérieur. La mesure du taux de lux dans la pièce sur des surfaces ensoleillées donne un max de 56300 lux. Il est donc possible de recharger la batterie soit par la lumière naturelle ou artificielle des pièces.

BY-NC-ND



a) b)

Figure II-13 a) La luminosité dans une pièce éclairée b) La luminosité naturelle dans une pièce

II.3.1.2. L'énergie des ondes Radiofréquences (RF):

La récupération d'énergie RF consiste à transformer l'énergie des ondes électromagnétiques contenues dans les sources RF ambiantes en une tension électrique continue. Ce type de système est appelé rectifying antenna ou rectenna (figure ci-dessous). Une rectenna typique se compose d'une antenne de réception suivie d'un réseau d'adaptation d'impédance, un redresseur, un filtre dc ainsi qu'une charge représentant l'impédance équivalente du capteur à alimenter.

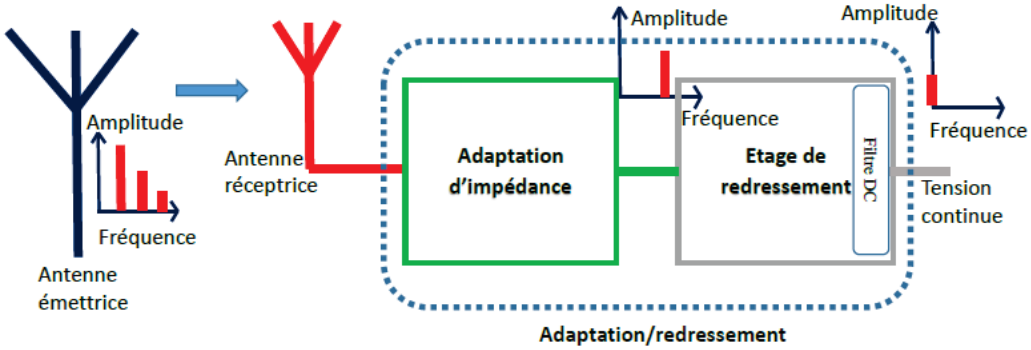


Figure II-14 RECTENA

L'énergie RF ambiante est l'une des sources de récupération d'énergie dont on peut disposer un peu partout.

BY-NC-ND

La première source d'énergie RF de l'environnement est l'énergie RF émise par les services des télécommunications. Lors du moissonnage d'énergie dans la bande GSM ou WLAN, on doit faire face à des niveaux de densité de puissance beaucoup plus faibles. Pour des distances de 25-100 m à partir d'une station de base GSM, des densités de puissance de 0,1 à 1,0 mW / m² peuvent être attendues [70] pour des fréquences GSM 900 et GSM 1800. Pour les bandes de fréquences descendantes totales GSM, ces niveaux peuvent être augmentés de un à trois selon la densité de trafic. Vu les faibles niveaux de puissances reçues, coupler plusieurs récupérateurs RF semble être la solution. Ainsi Dinh-Khanh Ho et al [71] présentent une technique rectenna à double bande pour le système de moissonnage d'énergie RF. Cette rectenna est créée à partir d'une antenne à double bande et d'un redresseur à double bande qui fonctionne à des bandes GSM (900 MHz et 1800 MHz). L'antenne monopôle imprimée est miniaturisée par deux lignes méandres (en contour). Le signal reçu de l'antenne de réception est redressé par un doubleur de tension à l'aide de la diode Schottky SMS-7630. Cette rectenna peut récupérer la tension de 183 mV à 415 mV lorsqu'il fonctionne dans un champ proche et en environnement ambiant. L'efficacité de la rectenna est de 40,8% et 20% à 1834 MHz et 890 MHz, respectivement avec une puissance incidente de - 20 dBm.

L'article [72] présente une nouvelle rectenna large bande pour le moissonnage d'énergie sans fil ambiante sur la bande de fréquences de 1,8 à 2,5 GHz. Tout d'abord, les caractéristiques de l'énergie radiofréquence ambiante ont été étudiées. Les résultats ont ensuite été utilisés pour faciliter la conception de l'antenne. Un nouveau circuit d'adaptation d'impédance à deux branches a été introduit pour améliorer les performances et l'efficacité du rectenna. Cette adaptation permet de récupérer les puissances de 3 fréquences (1.8 Ghz, 2.1 Ghz et 2.4 Ghz). La puissance de sortie de la rectenna proposée est d'environ -15 dbm, il est meilleur que les autres modèles de rectenna publiés avec une taille d'antenne similaire dans la même condition ambiante.

La seconde source de l'énergie RF est le WIFI, vu son utilisation massive dans les habitations ou bâtiments publics. Les mesures dans un environnement WLAN indiquent des niveaux de densité de puissance moindre que ceux du GSM [73].

Vu les faibles niveaux de densité de puissance WIFi et ceux GSM mono bande, il est difficile d'alimenter un nœud de capteur sans fil, à moins qu'une grande surface ne soit utilisée pour le récupérateur d'énergie. Ceci a été clairement démontré par Alanson et Smith [74]. L'énergie transmise par une station de télévision à proximité (distance: 4 km) a été utilisée pour alimenter un capteur de température grâce à une antenne d'environ 30 cm sur 20 cm. L'alternative à cette méthode est d'utiliser une source RF dédiée positionnée à proximité (à quelques mètres) du nœud du capteur, en respectant le niveau de puissance d'émission règlementaire. La puissance reçue au niveau d'un dispositif RF (placé à une distance R d'une antenne émettrice à la puissance de transmission P_t) est décrite par l'équation [I-1] définie précédemment.

Afin d'avoir une cartographie des ondes électromagnétiques présentes dans notre zone de surveillance, nous avons effectué une analyse de fréquence allant de 1.5 Ghz à 2 Ghz en utilisant une antenne K ainsi qu'un analyseur de spectre. Grace aux facteurs d'antennes on peut déduire le niveau de champ ambiant (E) en sortie d'antenne puis en déduire la tension de sortie [75].

BY-NC-ND

$$Fa = \sqrt{\frac{480\pi^2}{\lambda^2 \times G_k} \times \frac{1}{R_e}} \quad \text{(II.3)}$$

R_e = *Impédance de sortie de l'analyseur de spectre*

G_k = Gain antenne K

$$E = Fa \times U \quad \text{(II.4)}$$

U = *Amplitude de la tension sortie*

Les résultats sont classés selon 3 emplacements différents dans la zone de monitoring.

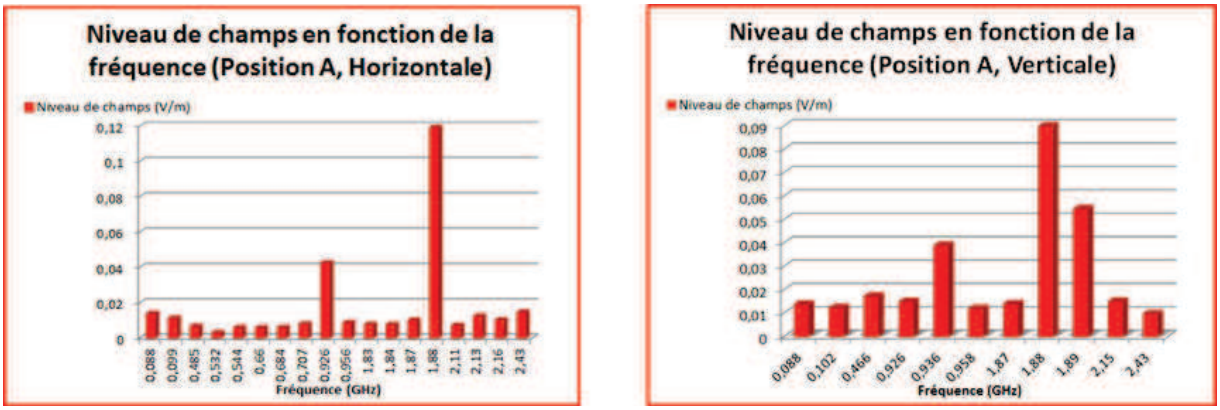


Figure II-15 Le niveau de champs à la position A

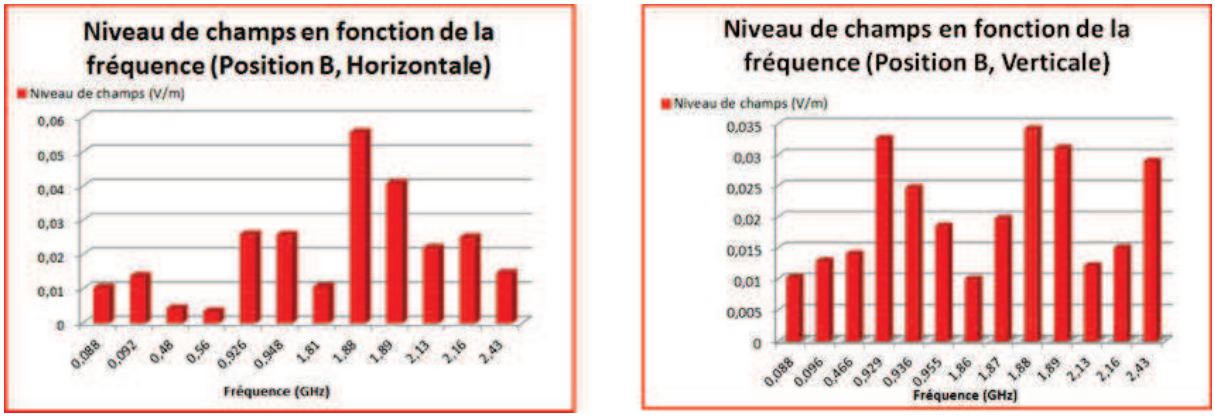


Figure II-16 Le niveau de champs à la position B

BY-NC-ND

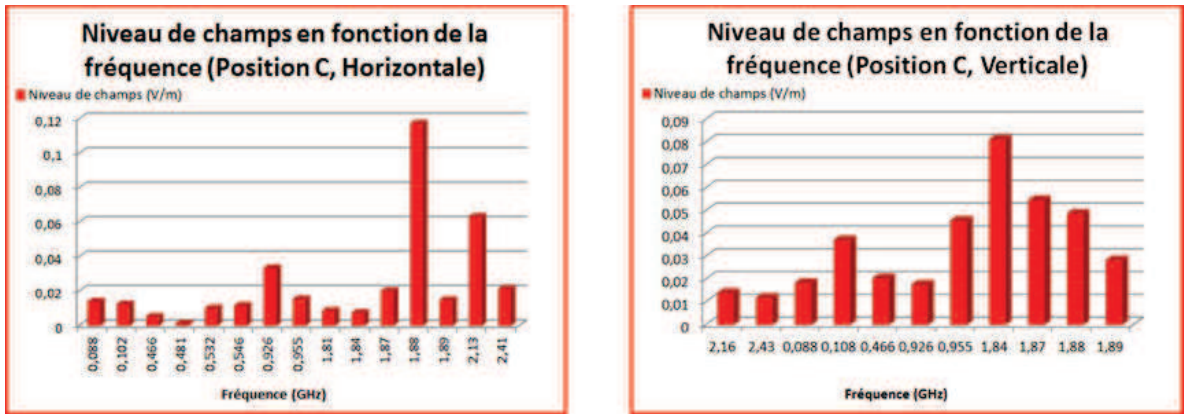


Figure II-17 Le niveau de champs à la position C

On remarque que des différents niveaux de champs analysés, le GSM 900, 1800 et le WIFI offrent des niveaux intéressants mais pas assez pour alimenter un convertisseur élévateur.

II.3.2. L'optimisation du RCSF par les couches du protocole

A partir de la généralité sur les réseaux de capteurs sans fils, nous avons vu que le protocole IEEE 802.15.4 ne s'étendait que sur deux couches (physique, liaison de données) du modèle OSI. Les performances énergétiques de chaque couche du modèle OSI sont interdépendantes. Faire une optimisation inter-couches d'IEEE 802.15.4 demande un équilibre parfait entre les couches pour éviter une surconsommation au niveau de chaque couche. Par exemple en réduisant la puissance d'émission, on perd en sensibilité et cela peut engendrer des retransmissions. La figure ci-dessous montre les niveaux d'interactions sur lesquels une optimisation inter-couches est nécessaire pour améliorer l'efficacité énergétique d'un nœud utilisant le protocole IEEE 802.15.4.

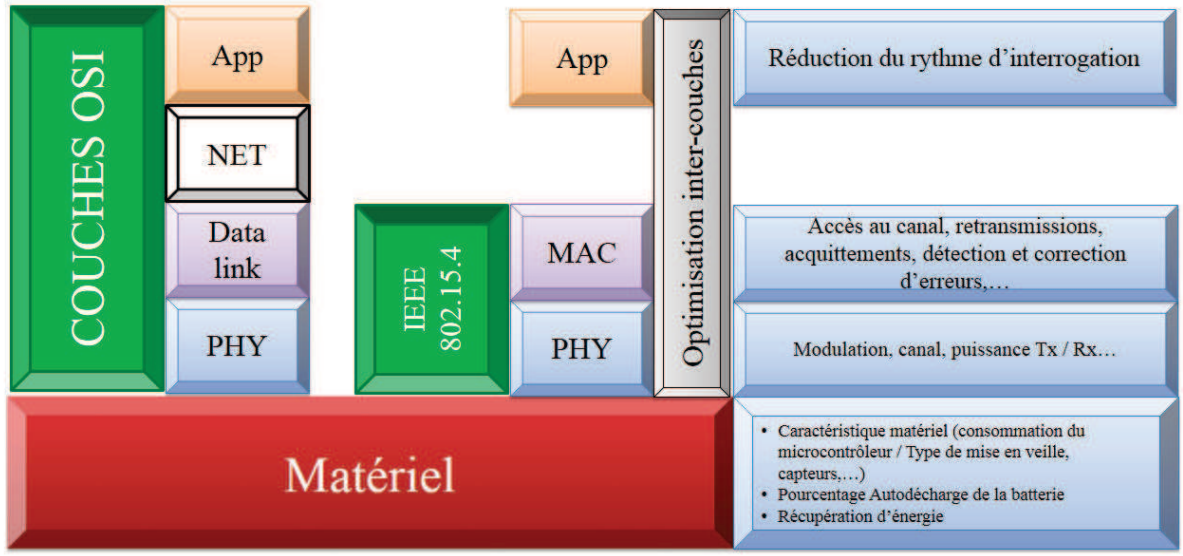


Figure II-18 Optimisation inter-couches

BY-NC-ND

D’après cette figure, l’optimisation de chaque couche est indépendante mais leurs performances sont liées. L’optimisation inter-couches peut être presque divisée en deux sections :

- la première traite de l’interaction entre la couche physique PHY et le contrôle d'accès au medium MAC.

- la seconde exploite les interactions entre la couche MAC et la couche application.

Dans la littérature, il existe de nombreuses études qui tiennent compte de l'utilisation de réseau de capteurs sans fil dans les applications de surveillance environnementale et l’évaluation des performances des IEEE 802.15.4. Dans les études récentes [76] [77], l'importance de la fiabilité, de la rapidité et de la qualité du service (QDS) dans les communications sur les réseaux intelligents a également été montrée, et principalement sur la couche de contrôle d'accès medium (MAC). Ces performances changent en faisant varier les paramètres MAC selon les procédures effectuées sur la couche d'application. La couche MAC fait un pont entre les exigences de la couche application et les conditions du réseau de la couche PHY.

II.3.2.1. Optimisation de la couche PHY :

Comme nous l’avons noté dans le chapitre précédent, la couche PHY du protocole 802.15.4 gère principalement l’activation et la désactivation du module radio avec un mécanisme de contrôle de la qualité du signal, détection d'énergie et CCA, le test du médium, la transmission des trames et leur réception.

L’exécution de ce mécanisme est effective grâce aux matériels présents sur la couche PHY. Pour avoir une efficacité énergétique il est donc nécessaire d’étudier les différentes techniques de traitement associées à la mise en œuvre de cette couche physique.

Ces techniques doivent être les moins gourmandes possibles en énergie et doivent permettre d’adapter le signal radio au canal de propagation et d’améliorer la qualité des transmissions en diminuant le nombre de bits erronés en réception. Ainsi nous avons défini les blocs fonctionnels qui sont effectués sur la couche PHY, comme illustre la figure [II-19].

BY-NC-ND

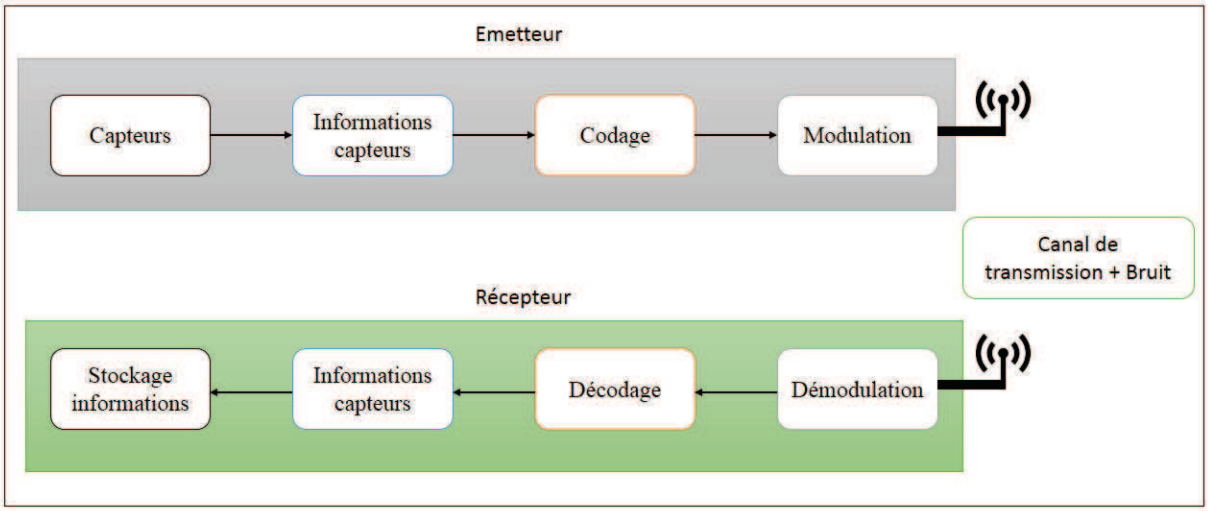


Figure II-19 Blocs fonctionnels transmission/réception

La partie réception étant une station de base alimentée électriquement, nous n'étudierons que les blocs de l'émetteur.

- Le bloc capteurs :

Le bloc capteurs est l'ensemble des dispositifs ou transducteurs qui vont transformer l'état des grandeurs physiques observées en grandeurs utilisables par le microcontrôleur (MCU). Le choix des transducteurs ne doit pas se faire aléatoirement. Il est nécessaire de faire une étude sur leur consommation et le temps de réaction nécessaire pour effectuer une mesure. Le tableau ci-dessous montre une étude entre deux capteurs thermo-hygrométriques: le SHT75 [78] et le DHT22 [79].

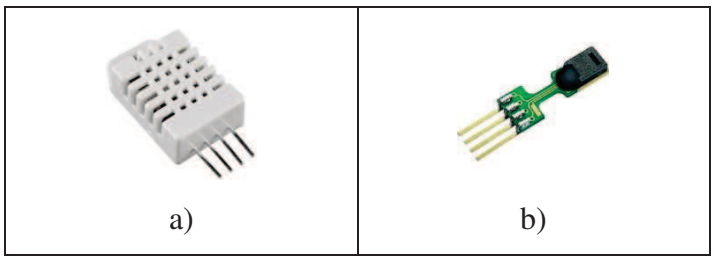


Figure II-20 Capteur a) DHT 22 b) SHT 75

Model	DHT22	SHT75
Power supply	3.3-6V DC	2.4-5.5V DC

BY-NC-ND

Current supply Measuring	Min : 1 mA Max :1.5 mA	Typ : 0.55 mA Max :1 mA
Response time	2s	5s
Output signal	digital signal	digital signal
Accuracy	Humidity:+-2-5%RH; temperature <+-0.5Celsius	Humidity:+-1.8%RH; temperature :=<+-0.3Celsius

Tableau II-2 Comparatif entre DHT 22 et SHT 75

- Informations capteurs:

Ce bloc-ci est la partie effectuant les calculs dans le nœud de capteur. Il inclut un microcontrôleur qui permet de traiter les signaux provenant des transducteurs. Ainsi choisir un nœud de capteurs revient à choisir un dispositif qui a un microcontrôleur moins gourmand en énergie et qui offre plusieurs modes de fonctionnement. Le tableau II-3 montre une comparaison entre le microcontrôleur du nœud SensorTags [80] de chez Texas Instruments et celui du Waspmote [81] de chez Libelium.

Model	CC2650 - SensorTag	Waspmote
CPU	ARM Cortex-M3	ATmega1281
Frequency	>48 MHz	14.74 MHz
SRAM	20 kB	8 kB
EEPROM	8 KB	4 kB
FLASH	>128 kB	128 kB
Power consumption (On)	17 mA	≈5 mA
Low Power consumption mode	Yes	Yes

Tableau II-3 Comparatif entre SensorTag TI et Waspmote

BY-NC-ND

- Le Bloc codage :

Le codage de l'information concerne les moyens de formaliser l'information afin de pouvoir la manipuler, la stocker ou la transmettre. Il ne s'intéresse pas au contenu mais seulement à la forme et à la taille des informations à coder. Il peut s'appliquer en protégeant l'information émise contre les perturbations du canal de transmission (DSSS) susceptibles de modifier son contenu. Il peut aussi rajouter de la redondance afin de pouvoir détecter et corriger les erreurs lors de la réception comme le codage CRC [82].

- Le Bloc modulation :

Avant la transmission de l'information dans le canal RF, le système effectue une modulation qui permet de transformer la forme du signal d'origine en une forme adaptée au canal de transmission. Le choix du type de modulation est décisif et déterminant pour optimiser la robustesse et la consommation inférée par la couche physique.

La forme la plus utilisée de modulation est la transmission sur une porteuse dont le principe est fait en variant les paramètres d'amplitude et d'argument (phase/fréquence):

$$x(t) = a(t)\cos\left(w(t) + \phi(t)\right) \tag{II.5}$$

Où a(t) représente l'amplitude du signal modulé, f(t) = ω(t)/2Π sa fréquence et ϕ(t) sa phase.

Le Bloc canal de transmission et bruit:

Le canal de transmission est un bloc de la couche physique qu'il est important d'étudier avant un déploiement de réseau de capteurs. Le bruit et les interférences générés dans la zone de couverture doivent être connus pour pouvoir adapter les niveaux de puissance des nœuds. Le niveau de puissance des nœuds étant faible en comparaison à d'autres systèmes exploitant la même bande ISM de 2,4 GHz comme la norme IEEE 802.11, Bluetooth et micro-ondes, le réseau est potentiellement susceptible d'interférences.

Le déploiement étendu d'appareils Wi-Fi dégrade considérablement les performances de l'IEEE 802.15.4 comme montre la figure II-21 des canaux utilisable par le WIFI et le 802.15.4.

BY-NC-ND

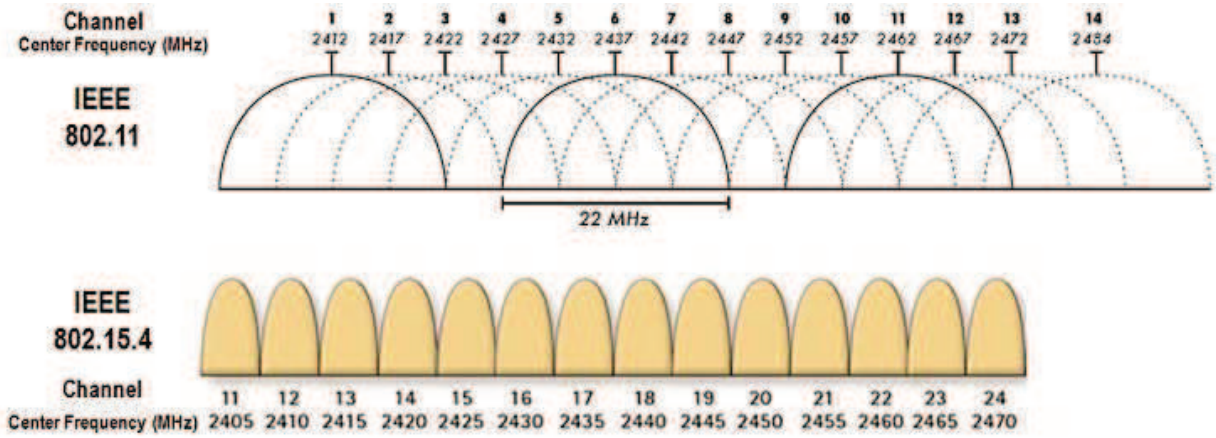


Figure II-21 Canaux utilisable par le WIFI et le 802.15.4

Le changement de canal comme stratégie d'installation de réseau de capteurs est une solution pour augmenter la puissance de transmission et faire face au bruit. Mais tous les protocoles n'ont pas la possibilité d'exploiter cette solution. On peut voir sur la figure II-21 les interférences entre les canaux WIFI et 802.15.4.

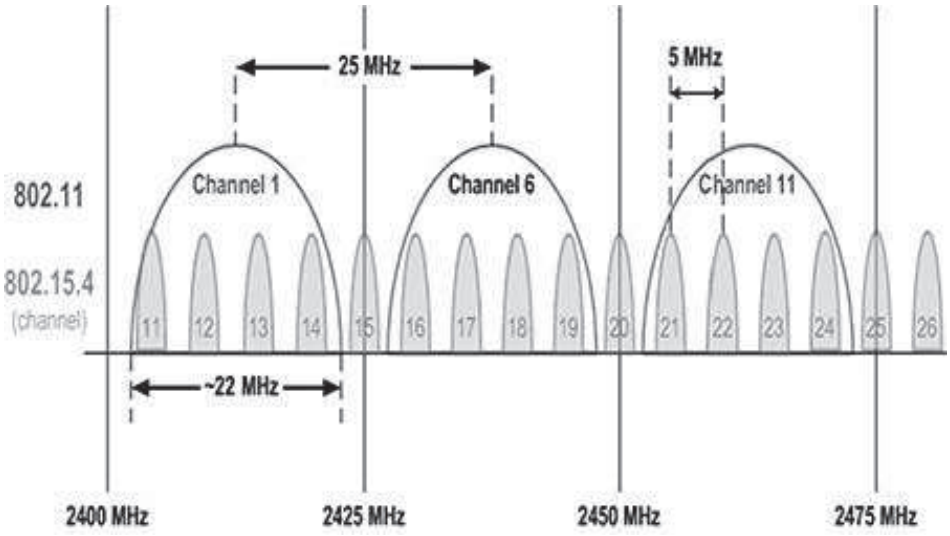


Figure II-22 Interférence des canaux entre WIFI / 802.15.4

Ainsi pour IEEE 802.15.4 l'analyse des performances du canal à sélectionner est nécessaire. L'article [83] analyse la performance de l'IEEE 802.15.4 sous l'influence du WIFI, les résultats montrent une variation du TEP jusqu'à 80% selon les cas d'étude. A. Berger et al. [84] quant à eux ont développé une procédure de gestion de canal pour les WSN à évolutions dynamiques des scénarios d'interférence. Une courte période de surveillance est utilisée pour échantillonner les valeurs d'indication de la force du signal reçu d'un ensemble de bandes de fréquences. Une campagne de mesure approfondie est effectuée et plusieurs méthodes d'analyse sont comparées et le choix du canal est appliqué après ce processus. Cette méthode a permis une réduction de la consommation d'énergie de nœud d'environ 15%.

BY-NC-ND

II.3.2.2. Optimisation de la couche MAC

Comme défini dans le chapitre précédent, la sous couche MAC est responsable de plusieurs tâches dont le CSMA-CA pour d'accès au canal. Parmi les différentes tâches existantes sur cette sous couche, le CSMA-CA est l'une des tâches susceptible d'être modifiée et ainsi apporter une amélioration sur la couche. L'optimisation de cette couche peut se faire pour améliorer plusieurs paramètres comme le débit, le TEP, la consommation énergétique,…

Les nœuds du réseau de capteurs utilisant le CSMA-CA non slotté comme la méthode d'accès au canal exploitent trois paramètres principaux, voir figure II-23 :

- ✓ CCA
- ✓ Back-off (NB et BE)
- ✓ ACK

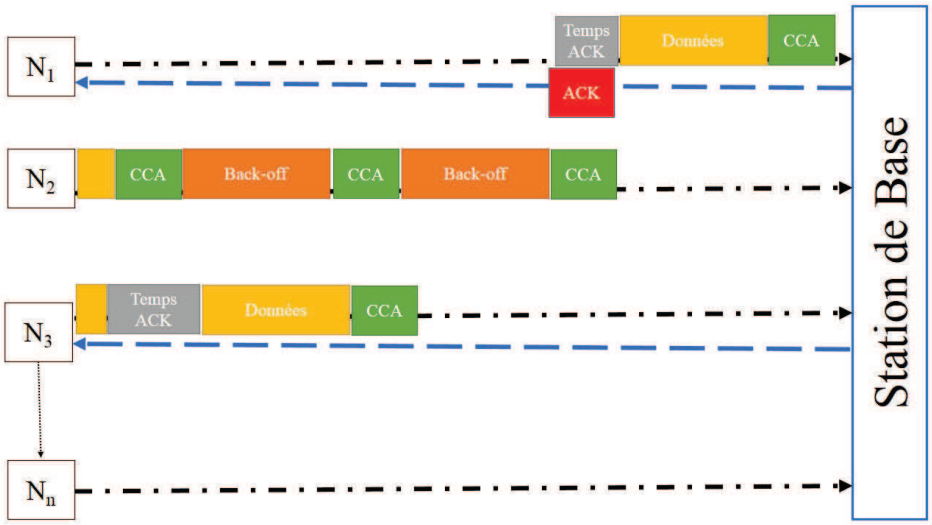


Figure II-23 Transmission en réseau étoile

La couche MAC du protocole IEEE 802.15.4 a été étudiée en profondeur par des analyses [85], [30, p. 4], [86], [87], [88], [89], [90], des simulations [91], [92] et des expériences réelles [92], [93], [94]. La plupart de ces études portent sur le mode d'accès au canal CSMA / CA slotté, tandis que peu sont consacrées au mode d'accès au canal CSMA / CA non slotté.

Dans [95] [96] [97, p. 4], les auteurs ont proposé de nombreuses solutions pour améliorer les performances en fonction des approches de l'algorithme Back-off modifié. Cependant, ces paramètres de performance sont plus efficaces que ceux de l'algorithme traditionnel seulement dans certaines conditions. InesEl Korbi et Leila Azouz [28] proposent une analyse de la consommation d'énergie de la CSMA / CA non slotté basée sur une modélisation discrète de Markov du back-off.

BY-NC-ND

Dans notre étude, nous nous baserons sur une méthode conjointe entre la modification des paramètres impliqués dans le CSMA-CA et la consommation énergétique.

II.3.2.3. Optimisation de la couche Application

Le rôle de couche application est de servir d'interface entre le réseau de capteurs et les utilisateurs. C'est ici que les utilisateurs voient le rythme et les paramètres mesurés dans le réseau. Dans un réseau de capteurs, le rythme des mesures peut être effectué grâce à différentes méthodes (périodiquement, aléatoirement, par interruption, par seuil, ou à la demande).

La consommation des nœuds diffère selon le type de mesure et son rythme. Dans les applications de monitoring, les données sont souvent récoltées d'une manière synchrone. Cependant certains paramètres (température, humidité,…) ont une variation lente par rapport au temps. Effectuer un échantillonnage périodique entraine un surcout d'énergie du fait de la redondance de certaines mesures. Ainsi réduire le nombre d'échantillonnage est la méthode appliquée à la couche application pour améliorer l'efficacité énergétique des réseaux de capteurs sans fil. Nous appliquerons pour cela la méthode de compressive sensing [98] (acquisition comprimée).

II.4. Mis en place d'un RCSF pour la modélisation de l'amphithéâtre

L'objectif à terme de la modélisation de l'amphithéâtre est d'élaborer des stratégies de conduite des équipements thermiques visant à optimiser leur dépense énergétique. Ce projet regroupe les laboratoires XLIM et GEMH GC&D de l'Université de Limoges pour un démonstrateur d'outil de diagnostic énergétique dans un bâtiment public. Dans ce type de bâtiments publics, une part importante des scénarios d'usage est prévisible, de sorte qu'il peut être envisagé d'anticiper les actions, à condition de pouvoir prévoir la conséquence de chacune d'elles sur l'évolution future des conditions de confort hygrothermique et des consommations. Le recours à la Simulation Thermique Dynamique (STD) permet ce type de prévision, et donc l'optimisation des actions, dans le cadre d'une analyse inverse.

Pour ce faire, nous utilisons un outil ouvert et polyvalent de STD développé au laboratoire GEMH GC&D qui repose sur un modèle de parois en différences finies 1D, uni-zone. A ce stade, la simulation se limite à une zone d'intérêt du bâtiment qu'est son Amphithéâtre. La présente étude montre une première étape de validation du modèle. A partir de conditions initiales et limites données par les mesures, les résultats numériques en termes de conditions ambiantes intérieures sont confrontés aux mesures effectives.

II.4.1. Modélisation thermique dynamique de l'Amphithéâtre

Le modèle de paroi aux différences finies repose sur l'équation de diffusion de la chaleur unidimensionnelle pour étudier la transmission de la chaleur à travers des parois planes, constituées d'une succession de couches de matériaux. La paroi est discrétisée spatialement en éléments d'égale épaisseur, chacun des plans constituant une surface isotherme. Pour la discrétisation temporelle nous choisissons d'utiliser la méthode d'Euler explicite en partie courante, peu gourmande en temps de calcul, mais non inconditionnellement stable ce qui nécessite de satisfaire un critère de convergence, compromis entre la finesse spatiale et

BY-NC-ND

temporelle. Pour l'équation d'échange à la surface d'une paroi, nous considérons que les conditions aux limites à la surface d'une paroi en contact avec une ambiance sont du type Newton. L'obtention du coefficient d'échange superficiel repose sur une hypothèse de linéarisation des échanges par convection et par rayonnement, dans la plage de température qui nous concerne. La surface peut également absorber une partie du rayonnement Courte Longueur d'Onde (CLO) d'origine solaire.

Il s'agit d'une Simulation Dynamique uni-zone. Les conditions hygrothermiques et de teneur en CO2 dans le local sont supposées uniformes, ce qui revient à considérer un brassage parfait de l'air intérieur. Le modèle vise à calculer les évolutions de la température T, de l'humidité relative HR et de la teneur en CO2 dans la zone. A ces trois grandeurs correspondent trois équations de bilan, respectivement thermique, hygrique et de CO2.

Données d'entrée mesurées :

- T — Température extérieure
- Hr — Humidité relative extérieure
- Sol — Flux solaire horizontal
- T — Température locaux adjacents
- Pe — Puissance électrique consommée
- T — Températures entrée/sortie radiateurs
- T — Température air soufflé
- Hr — Humidité relative air soufflé
- V — Vitesse air soufflé dans la gaine → débit
- Po — Ouverture des portes
- Pr — Présence
- Lum — Luminosité

Données d'entrée prévisibles :

- Oc — Nombre d'occupants (d'après emploi du temps)

Grandeurs de sortie mesurées :

- T — Température amphi
- Hr — Humidité relative amphi
- CO2 — Taux de CO2 amphi

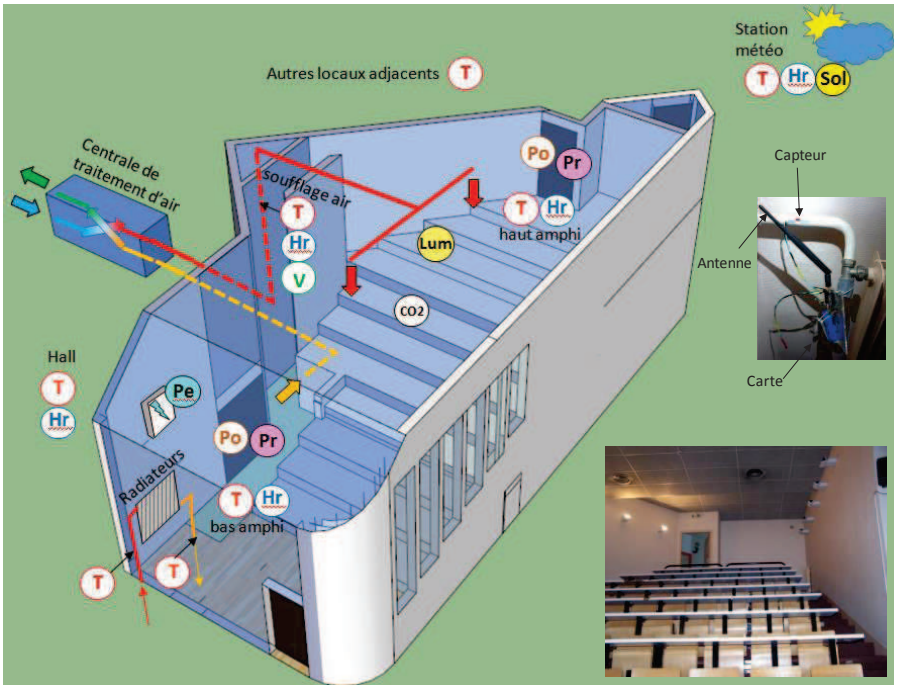


Figure II-24 Situation schématique de l'amphithéâtre : données d'entrées mesurées/prévisibles et grandeurs de sortie mesurées [Source : Laboratoire GEMH]

Pour le bilan thermique de la zone, le système étudié est l'air intérieur, considéré comme un corps de température uniforme. On procède à l'inventaire des flux thermiques échangés par l'air avec la surface interne des parois opaques et vitrées délimitant l'enveloppe, la surface des cloisons intérieures et du mobilier, les ponts thermiques. Interviennent aussi dans le bilan la part convective des apports internes et les apports par introduction d'air. On procède également à la gestion du rayonnement en considérant le flux solaire absorbé par les parois opaques externes et la distribution sur les parois internes du flux solaire pénétrant par les vitrages

Pour le bilan hygrique de la zone, la modélisation néglige les phénomènes de diffusion et de stockage de l'humidité dans les parois, ce qui est justifié étant donné le caractère faiblement hygroscopique des matériaux et revêtements de surface utilisés. Le système étudié est toujours l'air intérieur de la zone dont on effectue un bilan massique des quantités d'eau « entrant ». On procède à l'inventaire des flux hygriques apportés à l'air que sont les apports massiques internes et ceux dus au renouvellement d'air. Le bilan hygrique permet de calculer directement

BY-NC-ND

l'humidité spécifique de l'air intérieur. Les relations entre grandeurs hygrothermiques permettent alors de recalculer l'humidité relative.

Des tests de validation ont été menés à l'échelle de la paroi (sensibilité au maillage et à la discrétisation temporelle pour des régimes transitoires élémentaires tels que créneau ERF et sinus) et de la zone (sur des régimes permanents).

La modélisation proposée doit tenir compte des diverses caractéristiques de la zone étudiée :

- données « géométriques » générales : surfaces et orientation des parois opaques et des vitrages, nature de l'espace adjacent (extérieur, hall, salles de cours, local technique…), volume intérieur ;

- propriétés des parois : composition des couches, propriétés thermiques des matériaux, facteurs solaires des vitrages, états de surface, coefficients de déperditions linéiques des ponts thermiques ;

- les flux associés à l'ensemble des équipements tels que le réseau de soufflage alimenté par la CTA, le chauffage statique (radiateurs), l'éclairage et les processus).

Les données d'entrée du modèle sont mesurées à partir du réseau de capteurs (figure II-24). Elles comprennent d'une part les conditions aux limites externes à l'enveloppe de la zone (données météorologiques, températures des locaux adjacents), et d'autre part les charges internes mesurables (puissance électrique dissipée) et les apports énergétiques et massiques dus aux équipements de chauffage et de traitement d'air (radiateurs, CTA). Les charges internes dues aux occupants ne pouvant pas être mesurées directement, celles-ci sont déduites du planning d'occupation de la salle et de l'effectif théorique des étudiants (logiciel de planification ADE). Leur calcul s'appuie sur des valeurs conventionnelles d'apports sensibles et latents pour des individus assis. Des capteurs binaires de présence et d'ouverture des portes donnent des informations complémentaires qui peuvent être corrélées à des anomalies constatées par rapport au planning.

La détermination du modèle de l'amphithéâtre se base sur une multitude de mesures différentes (température, humidité, CO2, flux entrée/sortie à la CTA,…). Pour ne pas générer des erreurs dans le modèle, certains capteurs sensibles pour la modélisation thermique à venir ont fait l'objet de calibrations supplémentaires en chambre climatique (température, humidité relative) ou sur banc de soufflage (vitesse d'air dans la gaine) afin de s'assurer d'une bonne fiabilité des mesures.

II.4.2. Calibrage thermo-hydro

La modélisation thermique de l'amphithéâtre a besoin de mesures fiables pour sa modélisation. Pour se faire certains capteurs thermo-hydro ont fait l'objet de calibrations supplémentaires en chambre climatique.

BY-NC-ND

➢ calibrations supplémentaires en température des différents capteurs :

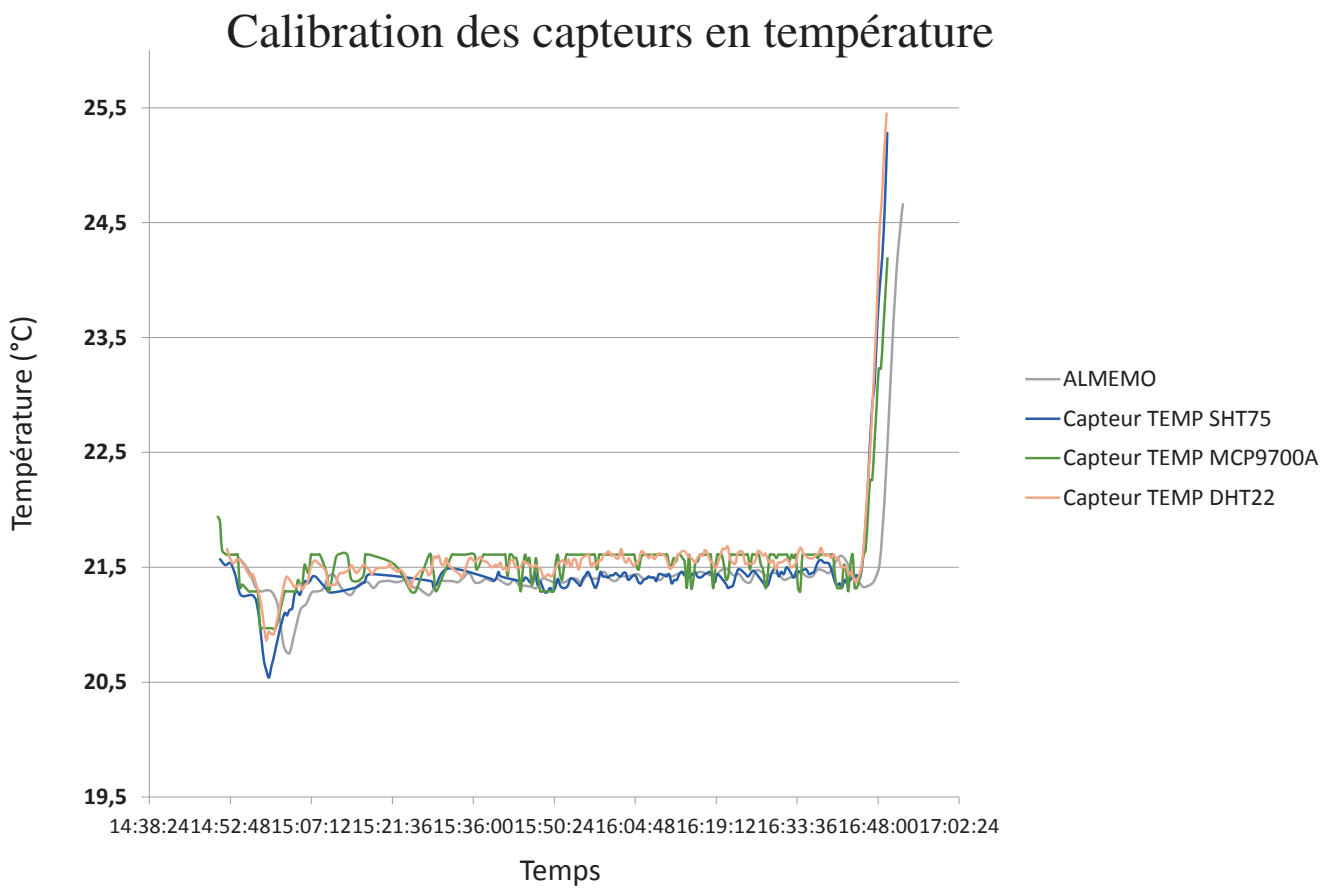


Figure II-25 Calibration en température

La figure II-25 montre les mesures de différents capteurs effectuées dans une chambre climatique à partir d'une consigne de 21,5 °C.

BY-NC-ND

➢ calibrations supplémentaires en humidité des différents capteurs :

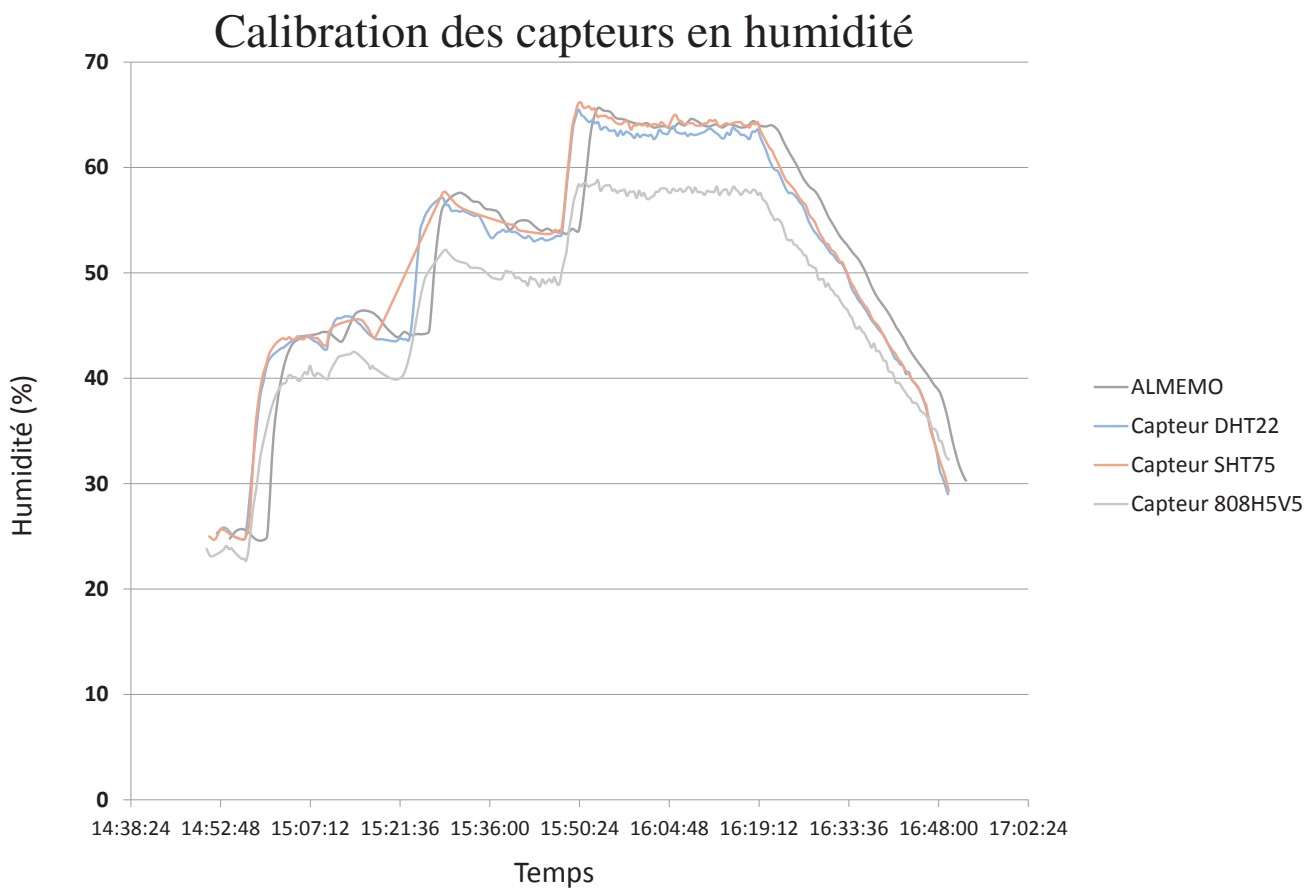


Figure II-26 Calibration en humidité

La figure II-26 montre les mesures de différents capteurs effectuées dans une chambre climatique à partir de différentes consignes d'humidité (25%, 45%, 55% et 65 %). La calibration a montré que même avec un temps de réponse assez important, le capteur 808H5V5 n'est pas précis.

II.4.3. Mesure CTA (Centre de traitement d'air)

Actuellement, plusieurs systèmes de surveillance de l'environnement intérieur sont disponibles sur le marché, conformes aux normes en vigueur. Cependant le coût d'installation de ces équipements est assez conséquent surtout sur les anciens bâtiments.

Ainsi notre nœud de capteur Zigbee low-cost qui mesure des paramètres de confort (température, humidité et flux d'air) est la solution pour le monitoring des CTA dans les anciens

BY-NC-ND

bâtiments. Le nœud est facile à installer dans la VMC et communique sans-fil avec la station de base.

Nous avons utilisé deux types de capteurs pour les mesures:

- SHT75 : Pour la mesure de la température et l'humidité.
- Le FS5 + Flow module : Pour la mesure du flux d'air.

➢ Le capteur de Flux d'air :

Il existe différents types de sondes de mesure de flux d'air, qui sont classés selon leur gamme de mesure qui s'étend de 0 à 100 m/s. Les sondes thermiques peuvent couvrir toute cette gamme de mesure mais sont souvent utilisées pour une plage de vitesse inférieure à 20 m/s, pour des mesures de précision et pour des flux laminaires.

Le principe d'une sonde thermique est basé sur la régulation en température d'un élément; celui-ci étant refroidi par le flux d'air. La régulation de l'élément est effectuée de manière à ce que la température revienne à son niveau initial. L'énergie nécessaire à cette régulation est l'image du flux d'air. Notre capteur de flux d'air sans fil est composé de 4 parties comme décrit la figure II-27.

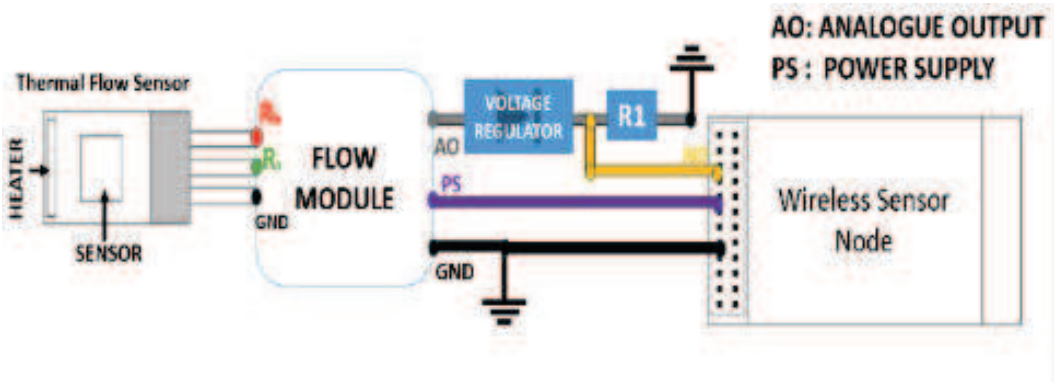


Figure II-27 Capteur de débit thermique sans fil

➢ Capteur de flux à fil chaud:

Le Capteur de flux à fil chaud (FS5) [figure II-28] est un capteur de flux thermique basé sur le même principe qu'une sonde thermique. Il comprend deux résistances de platine sur une seule puce. Une petite résistance (heater) est utilisée comme dispositif de chauffage, une résistance plus élevée (sensor) est utilisée pour la mesure de la température du milieu.

BY-NC-ND

Figure II-28 Capteur de débit thermique (FS5)

- Flow Module :

Le Flow Module est le dispositif de régulation de la température du heater. L'élément chauffant (heater) entraine un transfert de chaleur sur le sensor, ce transfert de chaleur est constant (ΔT =30K) quel que soit le milieu. Quand le flux est nul le signal de sortie vaut 3V. Lorsque la vitesse de flux d'air augmente, il y a refroidissement du heater. Cet effet conduit à une variation du coefficient de transfert de chaleur ΔT. Par conséquent, la puissance fournie au heater pour garder ΔT=30K (constante) est fonction du flux d'air comme décrit la loi de L.V King [ITO 2].

$$P_h = \left(A + BV^n\right) \times \Delta T \tag{II.5}$$

P_h= Puissance du heater.

V=Vitesse (n=0.5, A et B sont des constantes d'étalonnage empiriques).

Par convention et pour simplifier, l'équation peut être écrite sous la forme suivante [99]:

$$U = U_0 \times \sqrt{1 + h \times V^n} \tag{II.6}$$

U = Signal de sortie dépendant de la vitesse.

h = Sonstante dépendant du fluide (par calibration).

U_0 = Signal de sortie quand la vitesse est nulle.

BY-NC-ND

- DC voltage shifter (DCVS):

Le DCVS conçu à partir de diodes 1N4148 et une résistance (R1) comme sur la figure II-29, permet d'adapter la tension initiale du flux d'air U_0 à une tension plus basse pour élargir la bande de mesure sur le nœud de capteurs sans fil, sachant que les entrées analogiques du nœud de capteurs sans fil peuvent lire au maximum une tension de 3,3V.

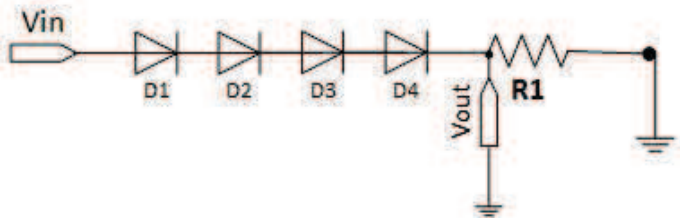


Figure II-29 Décalage de tension DC

Le DCVS permet de faire décaler le niveau de la tension de 2V pour R1=10kΩ. La conversion DC to DC est linéaire comme le montre la figure II-30 ce qui permet d'assurer une fiabilité des mesures. De plus ce système est moins gourmand en énergie que les systèmes intégrants un amplificateur.

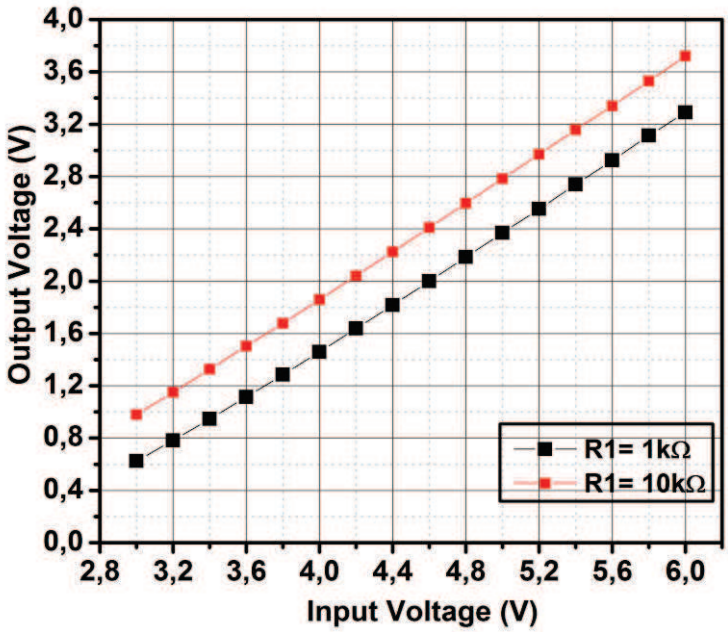


Figure II-30 Conversion DC / DC

- Technique de mesure de flux d'air :

Il est nécessaire d'utiliser des sections de conduits exemptées de perturbations tant avant qu'après le plan de mesure selon la norme NFX 10-112. Cette norme permet d'avoir un plan de

BY-NC-ND

mesure de Flux d'air sans perturbations. La figure II-31 nous montre une des conditions que l'on peut choisir pour mener à bien les mesures de flux d'air.

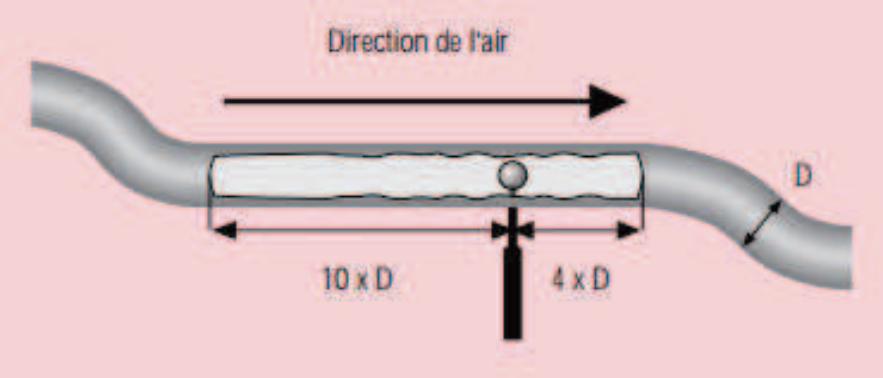


Figure II-31 Condition de mesure de Flux d'air

- Calibration du capteur de Flux d'air :

La calibration [100, p. 23] [101] de ce dispositif nécessite la mise au point d'un banc d'essai qui permet de faire circuler de l'air à certaines vitesses :

- Contrôlées par des anémomètres calibrés de marque AhlBorn (distribués par Wimesure) servant de mesure de référence : deux gammes de vitesses couvertes : 0-2m/s et 2-20m/s.

- Compatibles avec celles attendues dans la gaine de la CTA : débit nominal annoncé de 1500m3/h (fonctionnement à petite vitesse) ce qui est compatible avec les vitesses mesurées in-situ avec un anémomètre calibré d'environ 2,5m/s en différents points de la section.

BY-NC-ND

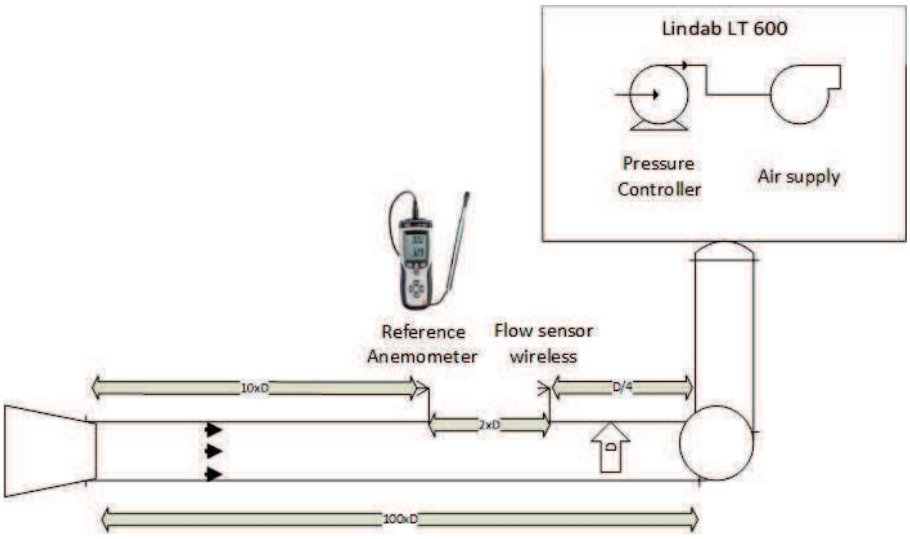


Figure II-32 Banc de mesure pour la calibration du capteur de flux d'air

Le banc d'essai se compose :

- d'un système d'aspiration à débit contrôlé (de 0 à 60L/s) ;
- d'un tuyau de 3m de longueur et 10cm de diamètre dans lequel l'air circule ;
- de dispositifs de mesure de la vitesse de l'air (anémomètre calibré et capteur de flux de gaz à calibrer) en deux endroits distincts du tuyau percé pour accéder au milieu de sa section.

Le montage proposé tient compte de la norme NFX 10-112 vis-à-vis du diamètre du tuyau employé et des distances séparant les extrémités, les obstacles (jonction aspiration/tuyau : rétrécissement, coude…) et les positions des capteurs, afin de travailler sur un flux d'air qui ne soit pas sujet à des perturbations mettant à mal la représentativité des mesures.

La linéarité constatée entre la vitesse débitante (débit imposé par Lindab LT 600 divisé par la section du tuyau) et la vitesse mesurée (anémomètre calibré au centre de la section) confirme le bon fonctionnement du banc d'essai pour des vitesses allant de 0 à 10,5m/s.

BY-NC-ND

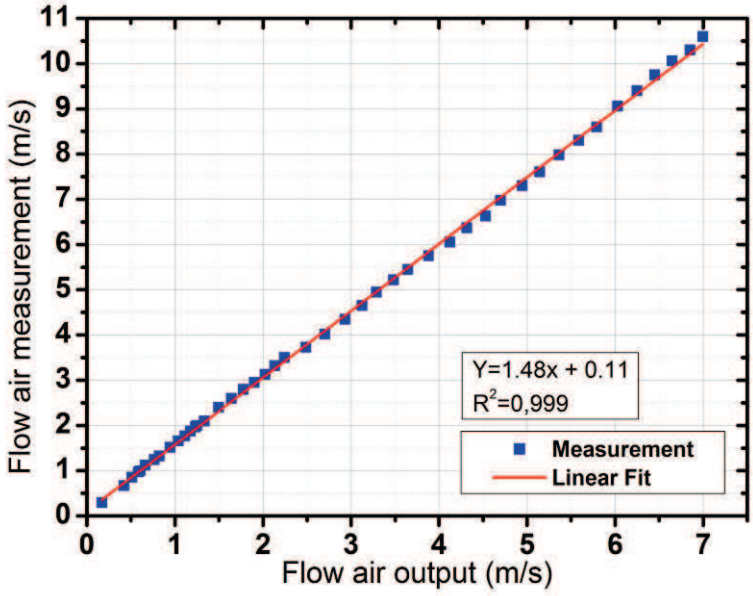


Figure II-33 Linéarité constatée entre vitesse débitante / vitesse mesurée

Les tensions de sortie du dispositif de capteur de flux d'air permettent d'obtenir une loi de calibration afin de les convertir en vitesse de l'air. Le modèle empirique donné par l'équation ci-dessous nous permet de déterminer le flux d'air en fonction de la tension dans la gamme de mesure de 0,5 m/s à 11 m/s.

$$Y = A_1 \times e^{\left(-\frac{x}{t_1}\right)} + A_2 \times e^{\left(-\frac{x}{t2}\right)} + A_3 \times e^{\left(-\frac{x}{t3}\right)} + B \qquad \text{(II.7)}$$

$$\mathbf{A_1 = 0,112;\ A_2 = 0,13;\ A_3 = 0,144;\ t_1 = t_2 = t_3 = -0,725\ ;\ B = -2,282}$$

Avec un coefficient de détermination R2=0,997, cette équation permet de calculer le flux dans la gamme de mesure définie en calibrage.

BY-NC-ND

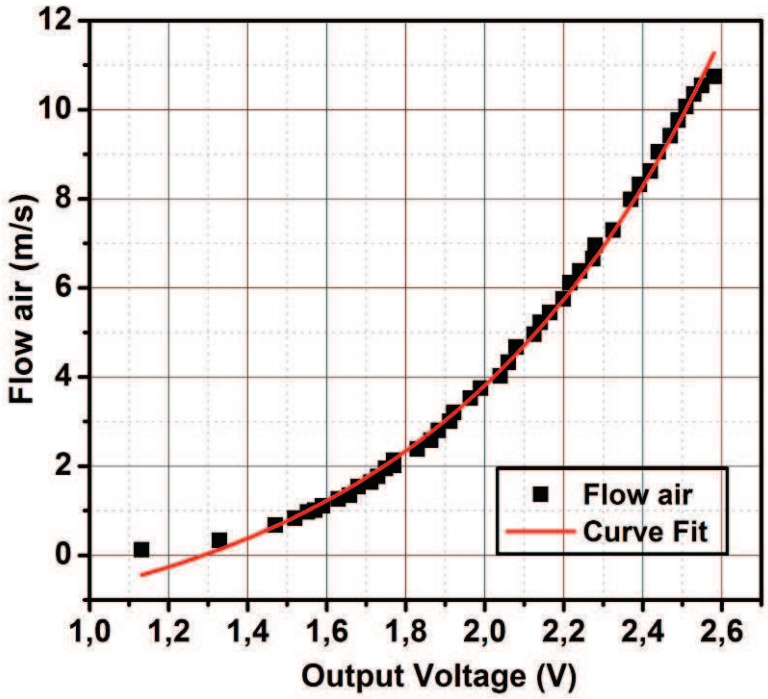


Figure II-34 Extraction de l'équation de calcul du flux

Enfin, le dispositif ainsi calibré, nous avons voulu comparer ses mesures dans la gaine de la CTA qui souffle à petite vitesse un débit nominal annoncé de 1500m3/h par le constructeur. En divisant le débit nominal par la surface de la section on arrive à une vitesse d'environ 2,5m/s dans la CTA. Les mesures faites avec le capteur de flux calibré confirment cette vitesse en différents points de la section de la CTA lorsque l'air est soufflé en journée (hors week end). Par calibration nous avons trouvé h=0.44.

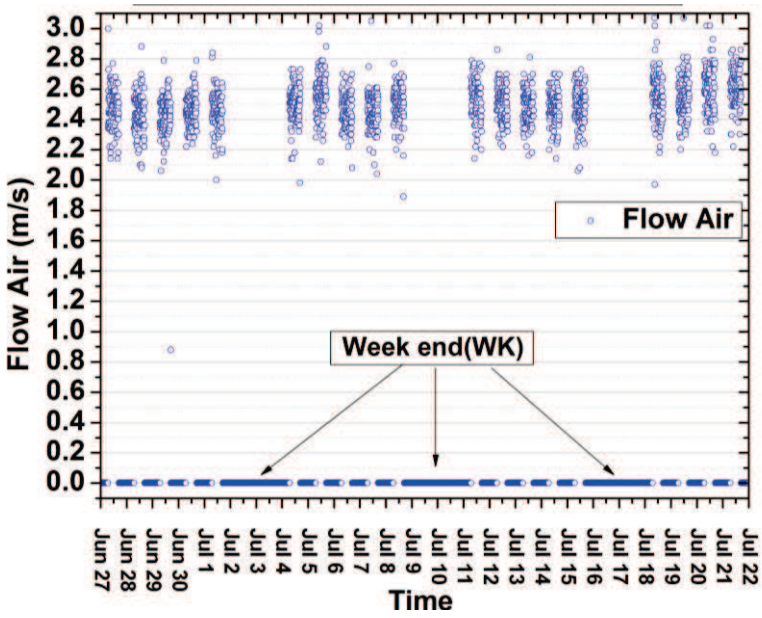


Figure II-35 Mesure de débit d'air avec capteur sans fil à faible coût

BY-NC-ND

- Mesure de consommation du capteur de Flux d'air :

Après la programmation du nœud Zigbee, nous avons effectué une mesure de sa consommation. Nous avons mis le capteur de flux dans une section de tuyau avec au bout un ventilateur qui souffle à 8 m/s quand il est activé. Le résultat est présenté dans la figure II-36.

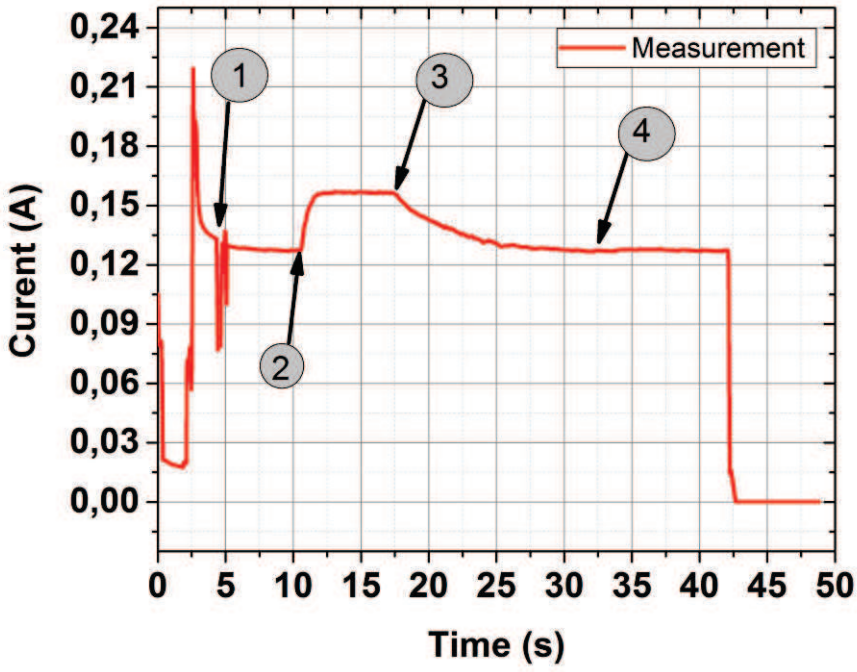


Figure II-36 Mesure de la consommation du nœud

La courbe de la figure II-36 présente la consommation du nœud de mesure de flux pendant un cycle. De 0 à 5 s nous avons le démarrage du nœud et la configuration réseau. A partir de l'étape 1 on commence la mesure du flux avec le ventilateur à off (0 m/s). On actionne le ventilateur à l'étape 2 qui génère un flux de 8 m/s, on voit immédiatement une hausse de consommation qui correspond à la régulation de la ΔT entre le heater et le sensor. Au niveau de l'étape 3 on arrête le ventilateur, on assiste à une baisse progressive de la consommation jusqu'à atteindre sa consommation à 0 m/s à l'étape 4.

Alors on peut affirmer que la mesure du flux d'air est l'image de l'énergie nécessaire à la régulation de ΔT.

II.4.4. Résultats du modèle thermique:

Nous confrontons les grandeurs de sortie mesurées dans l'amphithéâtre avec les résultats du modèle. Nous nous focalisons ici sur l'exemple d'une semaine de cours en période hivernale. Nous notons un comportement globalement satisfaisant du modèle thermique. L'évolution théorique de température ambiante reste comprise entre les courbes mesurées en partie haute et basse de la zone, qui sont écartées de 2 à 3K. Le modèle uni zone ne permet pas de tenir compte de ce phénomène de stratification thermique.

BY-NC-ND

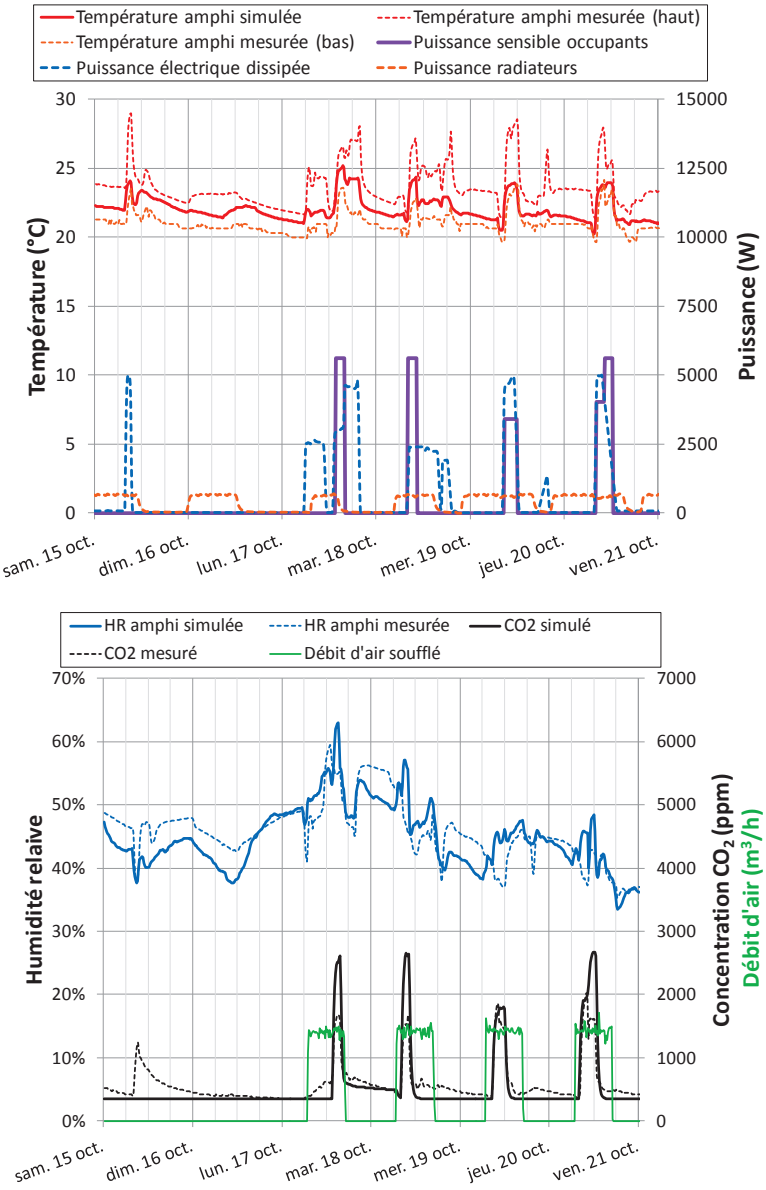


Figure II-37 Comparaisons entre résultats de simulation et mesures
(à gauche: températures et apports internes, à droite: humidité relative et CO2).

Même si les allures générales des évolutions simulées de l'humidité et du taux de CO2 sont globalement cohérentes par rapport aux mesures, des écarts significatifs sont constatés à des périodes particulières. Une première explication réside dans des différences d'occupation effective par rapport au planning théorique : écarts quantitatifs (étudiants absents), ou temporels (confirmés par les indications des détecteurs de présence et d'ouverture des portes). Pour des séquences de cours se terminant au-delà de l'heure programmée d'arrêt de la ventilation (17h00), la simulation produit des élévations d'humidité et de CO2 très supérieures à la mesure. Les influences sur le renouvellement d'air de la perméabilité et de l'ouverture simultanée ou non des deux portes semblent donc significatives mais restent difficiles à quantifier. Des études

BY-NC-ND

de sensibilité et d'analyse inverse sont à entreprendre pour mieux évaluer l'influence de l'ouverture des portes sur le débit d'air balayant la zone sous l'effet du tirage thermique.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu les différents types d'optimisation qui peuvent être appliqués à un réseau de capteurs. En analysant toutes les améliorations qui peuvent être faites sur chaque couche du protocole 802.15.4, il est possible de déployer un réseau de capteurs autonome. L'application de modélisation de l'amphithéâtre constitue une étape clé pour le développement d'un outil prédictif à même d'optimiser en temps réel la conduite des équipements pour réduire les consommations énergétiques. Les conditions aux limites définissant les données d'entrée sont actuellement circonscrites à la zone de l'amphithéâtre, et le bon comportement de la STD a été prouvé. En observant la courbe de consommation de la figure II-36, on se rend compte que l'optimisation est nécessaire sur les nœuds de capteurs pour rendre le réseau autonome. Le chapitre suivant présente le déploiement du système bâtiment intelligent campus Brive-la-Gaillarde et les optimisations du protocole 802.15.4 du réseau de capteurs.

BY-NC-ND

Chapitre III. Déploiement d'une plate-forme d'expérimentation de RCSF sur campus Brive-la-Gaillarde

III.1. Introduction

Ce chapitre vise à montrer la démarche de déploiement et de mise en œuvre d'un réseau de capteur dans un bâtiment public de grande dimension, afin d'établir un diagnostic fin du bilan énergétique. La démonstration pratique de ce travail a été réalisée dans l'un des bâtiments universitaires du campus de BRIVE.

Ce diagnostic permettra d'identifier les relations entre la consommation d'énergie et les usages de ce bâtiment. Il nécessite une analyse approfondie de l'état, thermique, hygrométrique et lumineux du bâtiment ainsi que la détection d'évènements liés à son usage. Pour ce faire il est nécessaire d'instrumenter le bâtiment avec de nombreux capteurs. Dans un bâtiment existant le recours à un réseau sans fil est pertinent du fait de sa relative facilité de déploiement quand on dispose de capteurs autonomes. Cependant, pour simplifier la maintenance, la durée de vie de chaque nœud du réseau doit être garantie tout au long de l'utilisation de ce réseau, c'est-à-dire sur plusieurs années. Il est également fondamental, pour des questions de coût, de complexité et de facilité de déploiement, de minimiser le nombre de capteurs à installer.

Par ailleurs, un modèle thermique du bâtiment, réalisé par une équipe de Génie Civil (section II-4), nous a permis de connaître l'évolution thermo-hydrique selon les utilisations.

Ainsi la problématique de ce travail a été d'installer un réseau de capteurs optimisé afin de minimiser la consommation énergétique des nœuds du réseau.

III.2. Architecture du système SMART GRID

Comme le montre la figure 2 de l'introduction générale, le SMART GRID du campus de Brive est composé de plusieurs blocs. Nous avons un système basé sur un logiciel de type SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) qui est chargé de récupérer les mesures par le réseau de capteurs MEDYBAT (Modélisation Energétique DYnamique d'un BATiment) et le réseau d'automates RAMCES (Réseau Avancé de Mesure de Consommation Energétique et supervision). Avec les mesures, il a la possibilité de contrôler le bloc des automates pilotant les actionneurs du bâtiment

BY-NC-ND

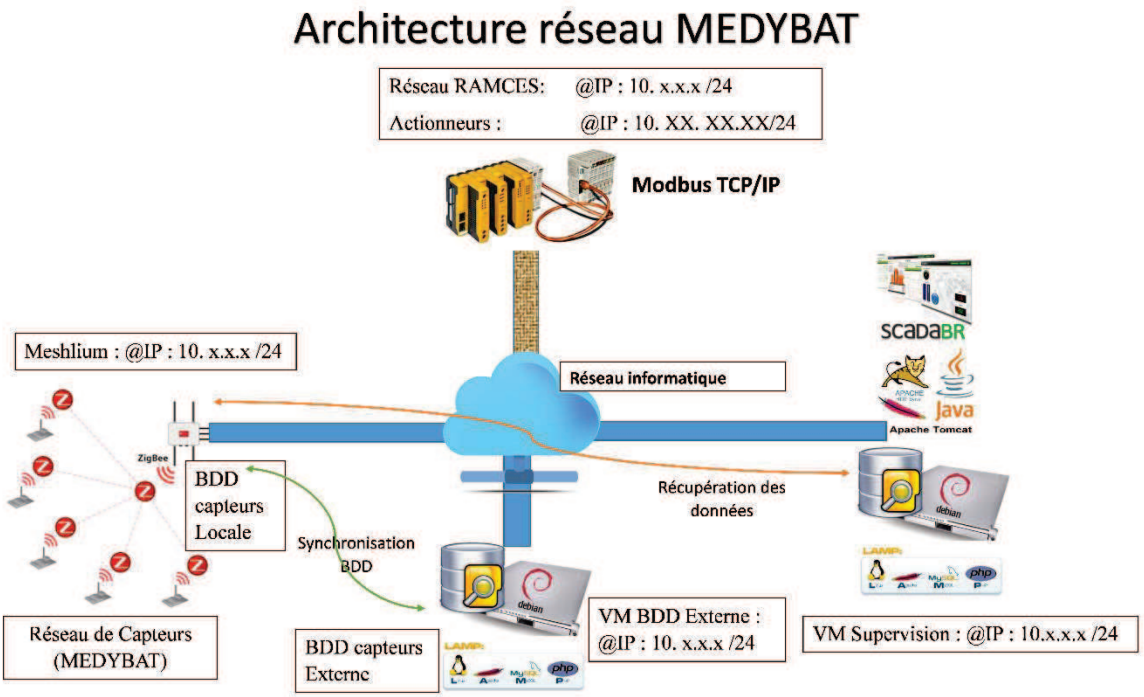


Figure III-1 Architecture informatique bâtiment intelligent

III.2.1. Centralisation des mesures avec SCADA

Les systèmes SCADA [102] [103] servent d'interface entre l'utilisateur et les procédés impliqués dans le système, tels que des machines industrielles, des contrôleurs automatiques et des capteurs.

Les systèmes SCADA peuvent être utilisés pour de simples applications de détection et de contrôle ou plus complexes comme un des systèmes centralisés de monitoring et de contrôle des bâtiments intelligents.

Un système SCADA fourni des pilotes de communication avec différents équipements, un système d'enregistrement continu de données et une interface utilisateur graphique appelée «HMI» ou Human Machine Interface. Les graphiques HMI sont disponibles en tant que boutons, icônes et affichages représentant le processus réel surveillé ou contrôlé.

Les fonctions les plus couramment utilisées dans les systèmes SCADA sont:

- ✓ Génération de graphiques et de rapports avec des données historiques;
- ✓ Détection des alarmes et enregistrement automatique des événements;
- ✓ Contrôle des processus, y compris l'envoi à distance de paramètres et de points de consigne;

BY-NC-ND

- ✓ Équipement de commande et de contrôle;

- ✓ Utilisation des langages de script pour développer l'automatisation logique.

Le système de centralisation des mesures considéré dans notre application, est basé sur le logiciel ScadaBR [104] open source dédié à l'IoT (internet of things) et au M2M (machine to machine) qui est le centre de stockage et de traitement des mesures. Il intègre un grand nombre de protocoles industriels (OPC, Modbus série et TCP/IP, ASCII, DNP3, IEC101, Bacnet, …) ce qui lui permet de récupérer les données d'un réseau de capteurs (MEDYBAT), du réseau d'automates (RAMCES) et du contrôle des actionneurs.

Grace aux différents protocoles intégrés dans le logiciel ScadaBR, il est possible de récupérer les données de différents réseaux. Il permet de gérer des équipements, d'automatiser les systèmes, de visualiser des tendances graphiques, de gérer des alarmes.

III.2.2. Le réseau RAMCES et d'actionneurs

C'est un réseau d'automates qui est constitué de centrales de mesures fournissant les mesures électriques (tensions, courants, puissances, phase,…), paramètres chaufferie et de consommation en gaz. Ces centrales de mesures sont installées à chaque étage du bâtiment Universitaire. RAMCES apporte les détails sur les besoins en puissances du bâtiment, notamment celui de l'amphithéâtre pour sa modélisation (section II.4).

Le réseau d'automates esclaves est implémenté à l'aide du protocole modbus TCP/IP. Ces automates commandent des relais qui à leur tour vont gérer l'alimentation de différents modules.

La figure III-2 montre la disposition des nœuds de mesures dans le campus universitaire.

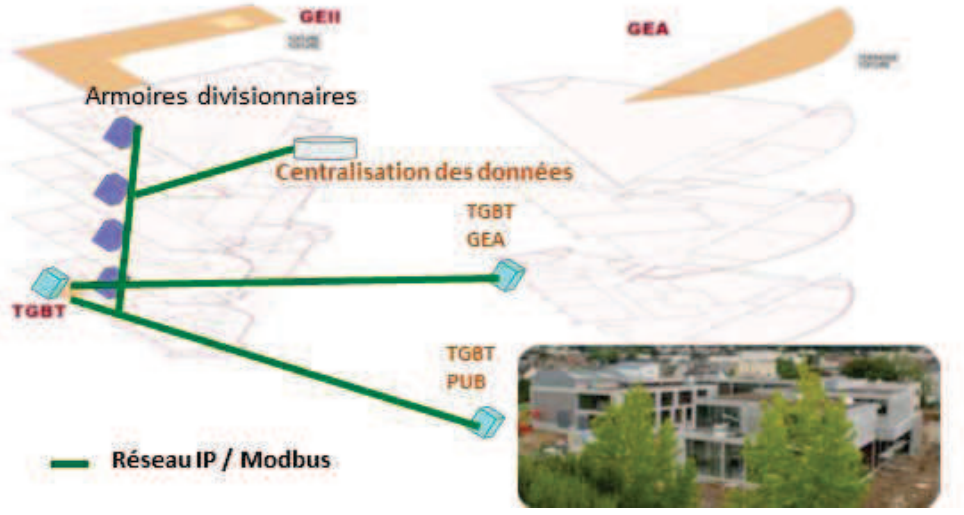


Figure III-2 Le réseau « RAMCES »

BY-NC-ND

III.2.3. Réseau MEDYBAT

Le réseau MEDYBAT (Modélisation Energétique DYnamique d'un BATiment) est le réseau de capteur du bâtiment GEII, il permet de mesurer les paramètres comme la température, l'humidité, la luminosité, la présence…

Il sert à mesurer les paramètres d'ambiance (température, humidité relative (HR), présence, ouverture, CO2, et paramètres météo: la vitesse du vent, température et HR extérieure, flux solaire,…) interne et externe du bâtiment. Il utilise le protocole Zigbee pour communiquer. Les données de mesures sont stockées dans la station de base puis synchronisées dans un serveur de base de données, qui a son tour l'envoie dans SCADA. Le réseau est implanté dans un bâtiment d'enseignement de 3 étages dont la structure est représentée à la figure III-3.

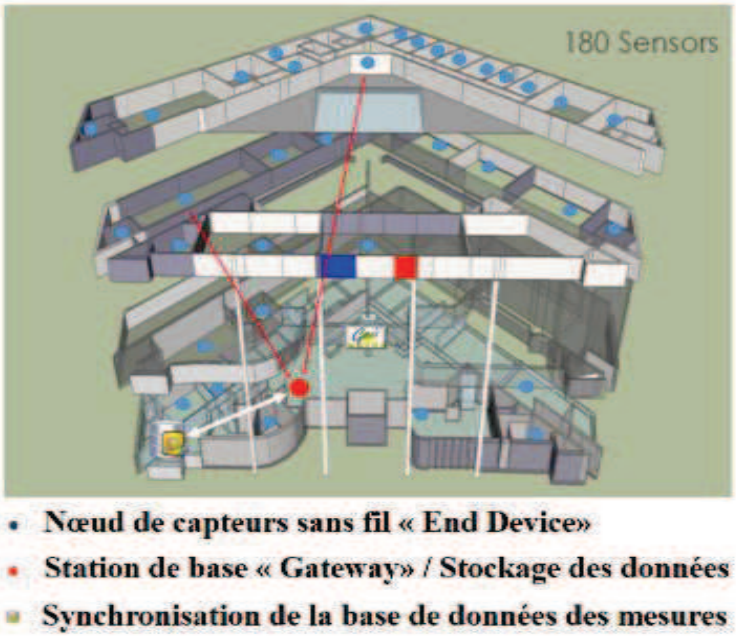


Figure III-3 Réseau de capteurs dans le bâtiment GEII

III.3. Installation du réseau MEDYBAT

III.3.1. Matériels utilisés

Déployer un réseau de capteurs nécessite des études préliminaires sur les matériels à utiliser et le milieu où on effectue l'installation. Dans notre cas l'installation se passe dans un bâtiment universitaire en structure en béton. Les prérequis de l'installation sont l'utilisation des dispositifs Zigbee. La disponibilité de nombreux dispositifs basés sur ce protocole Zigbee (802.15.4) permet le déploiement d'un réseau à moindre coût. Nous avons choisi un matériel disponible en «open source» «Waspmote » [81] comme End Device et le «Meshlium » [105] comme station de base pour implémenter notre réseau de capteurs.

BY-NC-ND

- Waspmote :

Le Waspmote V1.2 est un dispositif électronique intégrant le microcontrôleur ATmega1281, il est basé sur une architecture modulaire. L'idée est d'intégrer uniquement les modules nécessaires dans chaque nœud. Les nœuds peuvent être modifiés et développés selon les besoins. Les modules disponibles pour l'intégration dans Waspmote sont classés dans:

- ZigBee / 802.15.4 Modules XBee (2.4GHz, 868MHz, 900MHz)

- Module LoRaWAN (433/868 / 900MHz)

- Module LoRa (868 / 900MHz)

- Module Sigfox (868 / 900MHz)

- Module GSM / GPRS (Quadband: 850MHz / 900MHz / 1800MHz / 1900MHz)

- Module 3G / GPRS (Dual-Band WCDMA / UMTS 900/2100 MHz et Tri-Band GSM / GPRS / EDGE 850/900/1800 MHz)

- Module WiFi

- Modules Bluetooth: Bluetooth Low Energy et Bluetooth Pro

- Module NFC / RFID

- Modules de capteurs (cartes à capteurs)

- Module de stockage: carte mémoire SD

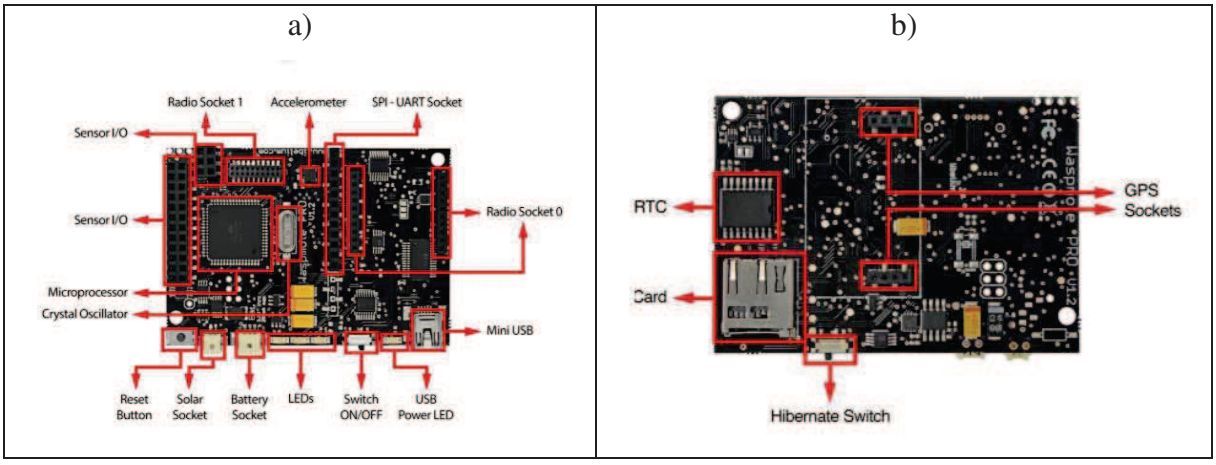


Figure III-4 Module Waspmote V1.2 a) Vu de face b) Vu de dos

Caractéristiques Waspmote :

BY-NC-ND

Microcontrôleur	Fréquence	SRAM	EEPROM	FLASH	Dimensions
ATmega1281	14.7456 MHz	8 Ko	4Ko	128Ko	73,5x51x13 mm

Tableau III-1 Caractéristiques carte Waspmote

Consommation :

ON	Sleep	Deep Sleep	Hibernate
15mA	55µA	55µA	1 - 0.07µA

Tableau III-2 Consommation des différents modes de fonctionnement

Waspmote dispose de 4 modes de fonctionnement.

- ON: Le mode de fonctionnement normal. Le microcontrôleur reste activer, la consommation dans cet état est 15mA.
- Sleep (Sommeil): Le programme principal est interrompu, le microcontrôleur passe en veille, à partir de laquelle il peut être réveillé par tous interruptions asynchrones et par l'interruption synchrone généré par le Watchdog. L'intervalle de cette durée d'état est de 32ms à 8s. Consommation dans cet état est 55µA.
- Deep Sleep (Sommeil profond): Le programme principal s'arrête, le microcontrôleur passe en veille à partir de laquelle il peut être réveillé par toute interruption asynchrone et par l'interruption synchrone déclenchée par le RTC. L'intervalle de ce cycle peut être à partir de secondes à quelques minutes, heures, jours. La consommation dans cet état est 55µA.
- Hibernate (Mise en veille prolongée): Le programme principal s'arrête, le microcontrôleur et tous les modules Waspmote sont complètement déconnectés. La seule façon de réactiver le dispositif est par l'alarme déjà programmée dans le RTC (interruption synchrone). L'intervalle de ce cycle peut être de quelques secondes à quelques minutes, heures, jours. Presque tous les appareils sont totalement déconnectés de la batterie: seul le RTC est alimenté par la batterie, à partir de laquelle il consomme 0.07µA.

BY-NC-ND

Données électriques:

Tension de la batterie	Tension de charge USB	Tension de charge de la cellule photovoltaïque
3.3 V - 4.2V	5 V - 100mA	6 - 12 V - 280mA

Tableau III-3 Niveau tension/courant du Waspmote

- La cellule photovoltaïque sert à alimenter ou rechercher la batterie de carte wapsmote.

Parmi les modules Waspmote possibles, nous utiliserons le module XBee-Pro 802.15.4 - 2.4GHz. Le module RF XBee-PRO 802.15.4 offre une solution adaptée aux déploiements des réseaux de capteurs. Ils apportent une connectivité radio économique pour une connexion sans fil (point à point).

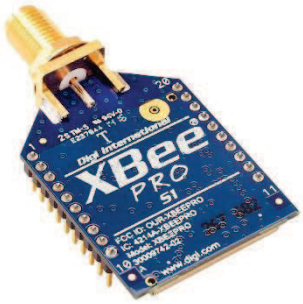


Figure III-5 Module Xbee pro S1

Module	Fréquence	TX Puissance	Sensibilité	Canaux	Distance
PRO	2.405 - 2.465GHz	63.1mW	-100dBm	12	7000m

Tableau III-4 Caractéristiques du module Xbee pro S1

Il est possible d'adapter la puissance d'émission aux besoins.

BY-NC-ND

Parameter	Tx XBee-PRO
0	10dBm
1	12dBm
2	14dBm
3	16dBm
4	18dBm

Figure III-6 Niveau de puissance de Xbee pro S1

La bande de fréquences ISM (Industriel, Scientifique et Médical) utilisée dans les modules Xbee, contient plusieurs canaux avec une bande passante de 5 MHz par canal.

Channel Number	Frequency	Supported by
0x0C – Channel 12	2,405 – 2,410 GHz	PRO
0x0D – Channel 13	2,410 – 2,415 GHz	PRO
0x0E – Channel 14	2,415 – 2,420 GHz	PRO
0x0F – Channel 15	2,420 – 2,425 GHz	PRO
0x10 – Channel 16	2,425 – 2,430 GHz	PRO
0x11 – Channel 17	2,430 – 2,435 GHz	PRO
0x12 – Channel 18	2,435 – 2,440 GHz	PRO
0x13 – Channel 19	2,440 – 2,445 GHz	PRO
0x14 – Channel 20	2,445 – 2,450 GHz	PRO
0x15 – Channel 21	2,450 – 2,455 GHz	PRO
0x16 – Channel 22	2,455 – 2,460 GHz	PRO
0x17 – Channel 23	2,460 – 2,465 GHz	PRO

Figure III-7 Canaux de transmission Xbee pro S1

- Meshlium

Meshlium est un routeur Linux qui fonctionne comme la passerelle à l'interface entre le réseau de capteurs et le réseau Ethernet. Il peut contenir 6 interfaces radio différentes: WiFi 2.4GHz, WiFi 5GHz, 3G / GPRS, Bluetooth, XBee et LoRa. De plus, le Meshlium peut également intégrer un module GPS pour les applications de localisation. Il analyse et stocke en local les informations envoyées par les capteurs.

BY-NC-ND

Figure III-8 Meshlium

III.3.2. Topologie du réseau MEDYBAT

Il existe plusieurs topologies pour les réseaux de capteurs sans fil qui varient selon le type de protocole. Nous avons sélectionné des nœuds intégrant la norme 802.15.4. Avec cette norme nous pouvons exclusivement faire des connexions points à points. Ainsi la topologie en étoile sera celle sélectionnée. Dans cette topologie le Meshlium envoie ou reçoit des messages via les différents nœuds du réseau. Les nœuds du réseau peuvent seulement envoyer ou recevoir un message de la station de base, il ne leur est pas permis de s'échanger des messages.

L'avantage de cette topologie est que les nœuds peuvent être arrêtés complètement sans se soucier du routage de paquets. Cela apporte déjà une forme d'optimisation du réseau puisque les protocoles de routage sont relativement consommateurs d'énergie.

III.3.3. Etude de la zone d'installation

Le bâtiment universitaire GEII est un bâtiment public qui reçoit environ 200 étudiants par jour. Un tel milieu dispose de plusieurs obstacles ou perturbateurs qui peut rendre obsolète notre réseau de capteurs. Le déplacement des étudiants va générer des atténuations, il faut faire face à des équipements multimédias comme les bornes WIFI et l'utilisation des connexions Bluetooth qui peuvent engendrer des retransmissions au niveau du réseau.

Avant de faire une étude de sélection du canal du réseau de capteurs, nous avons mené une analyse sur la bande ISM pour voir les canaux wifi interférés.

BY-NC-ND

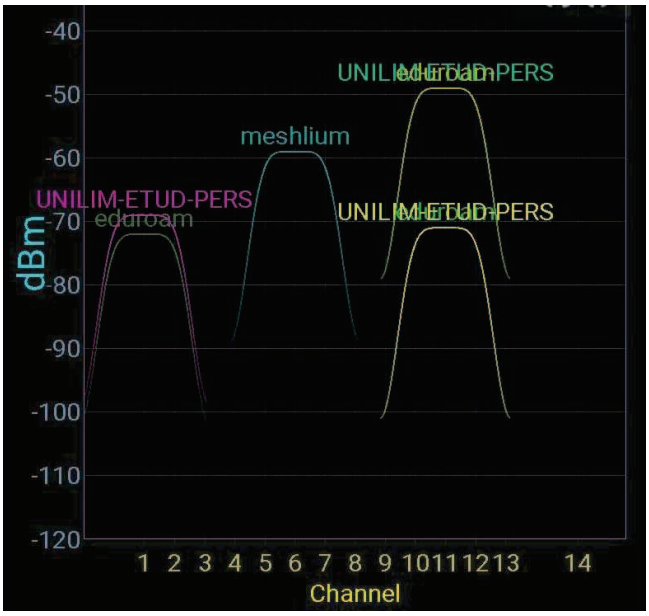


Figure III-9 Occupation spectrale de la bande 2.4 GHz

La figure III-9 montre l'occupation de la fréquence 2.4 Ghz par les bornes Wifi. Il y'a des bornes wifi qui occupent les canaux 1, 6,11 pour éviter les interférences. Nous avons vu dans le chapitres II que les canaux 15, 20 et 25 du 802.15.4 n'étaient pas perturbés par la couverture wifi des canaux 1, 6, 11.

Nous avons donc limité le choix de la sélection du canal du réseau de capteurs sur les canaux 15 et 20 car ils sont intégrés dans le module Xbee pro S1.

Nous avons utilisé le logiciel Spectrum Analyzer de XCTU, pour tester et mesurer le spectre du canal radio à sélectionner. L'analyse indique le niveau de bruit de chaque canal en donnant sa meilleure mesure, la plus mauvaise et la moyenne.

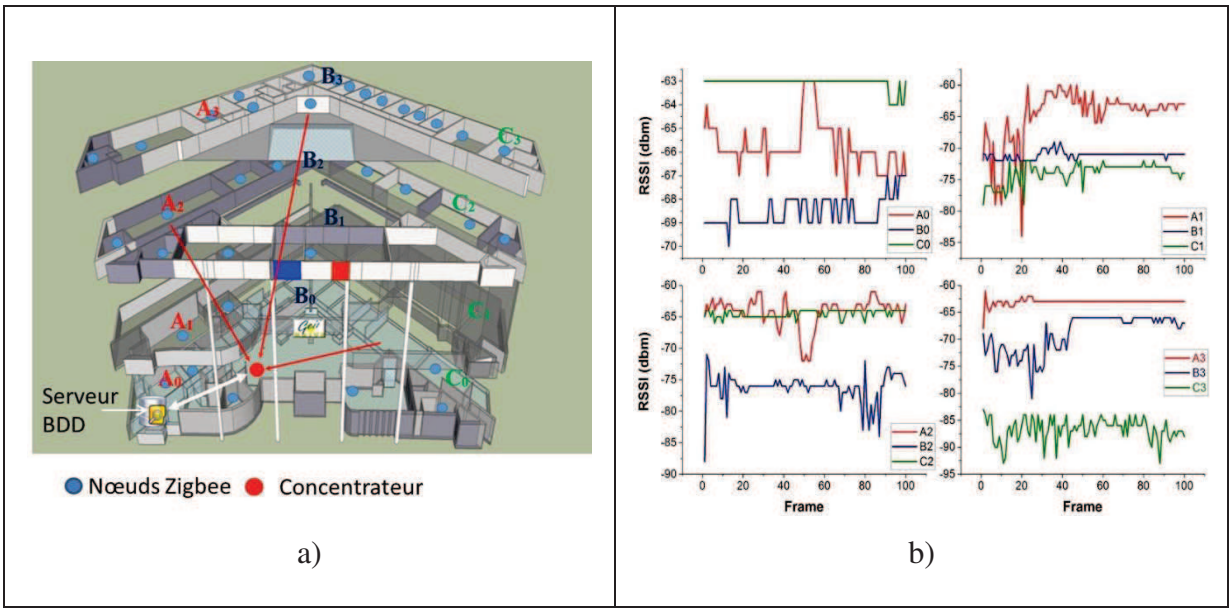
Canal	15	20
Niveau Bruit Min [dbm]	-96	-96
Niveau Bruit Max [dbm]	-34	-35
Niveau Bruit Moyen [dbm]	-79	-83

Tableau III-5 Résultats d'analyses des canaux

Les résultats de l'analyse des deux canaux sont donnés dans le tableau III-5 ci-dessus. On voit que le canal 20 est légèrement meilleur que le 15. C'est pourquoi nous avons déployé notre réseau dans ce canal.

BY-NC-ND

Pour s'assurer de la bonne communication entre les nœuds et la station de base et avoir un modèle statique du canal dans le bâtiment, nous mesurons le RSSI des nœuds A_n, B_n, C_n ($0 \leq n \leq 3$) du rez de chaussée aux 3 étages du bâtiment. La position de chaque nœud est indiquée dans la figure III-10 a).



a) b)

Figure III-10 a) Position nœuds tests b) Niveau du RSSI des nœuds tests

La figure III-10 b) nous montre que le RSSI reçu sur la station de base lorsque les nœuds An, Bn, Cn émettent avec une puissance de 18dBm. La puissance reçue est supérieure à la sensibilité de la station de base qui est de -100dBm pour chaque étage du bâtiment.

Nous vérifions le rapport RSSI et TEP (taux d'erreur paquet) en vérifiant les trames reçues au niveau de la station de base pendant une semaine pour chaque nœud (An, Bn, Cn). Chaque nœud envoie une trame toutes les 30 minutes. Avec le temps d'exécution du code, nous estimons à 329 le nombre de trames transmises par semaine.

Nous avons remarqué que lors que le RSSI est supérieur à -70dBm, le risque de perte de paquets est très faible (<0,3% TEP). Nous garantissons ainsi un taux de paquets reçus recommandé.

III.3.4. Création du Réseau de capteurs sans fil

Les études préliminaires ont permis de déterminer le canal à utiliser dans le réseau. Nous avons choisi comme station de base le Meshlium avec le protocole 802.15.4. Pour configurer un réseau de capteurs, il nous faut deux paramètres :

- ✓ Le PANID :

C'est un identificateur unique du réseau, il est commun à tous les périphériques du même réseau. Le coordinateur est responsable de la sélection du PAN ID (16 bits / 64 bits).

BY-NC-ND

- ✓ Le canal RF:

C'est le medium utilisé pour la transmission des données. Le coordinateur doit sélectionner un bon canal afin que le réseau puisse fonctionner correctement.

Nous effectuons la configuration du PAN ID et du canal dans le Meshlium en privilégiant le PAN ID 16 bit pour minimiser la longueur des trames.

Les End devices sont configurés avec les mêmes informations (PAN ID et canal) pour permettre une communication entre les nœuds et la station de base. Nous distinguons les nœuds synchrones et asynchrones selon les ends devices.

- Les nœuds synchrones :

Ce sont des nœuds équipés de capteurs d'ambiances (température : MCP9700A, humidité : 808H5V6 et luminosité : LDR). Ces types de nœuds envoient ces informations à la station de base périodiquement par le billet de l'horloge RTC qu'ils intègrent. Cette période est définie dans le programme exécuté par le nœud.

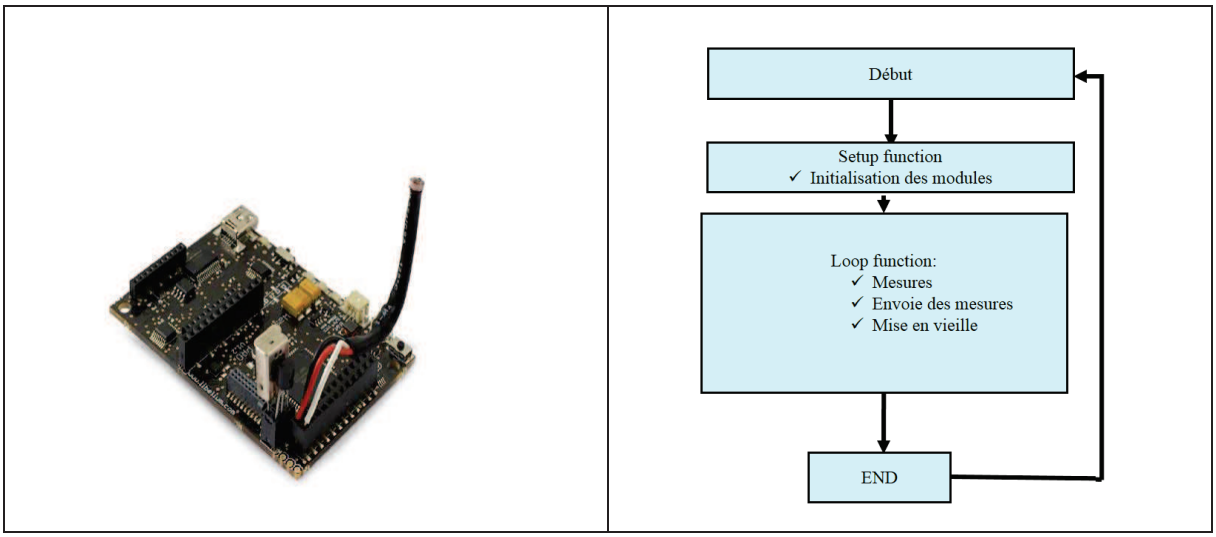


Figure III-11 Programme des nœuds synchrones

- Les nœuds asynchrones :

Ce sont des nœuds équipés de capteurs de surveillances (Présence et ouverture) hormis les capteurs d'ambiances. Les informations sont toujours envoyées de manière synchrone selon une période définie dans le programme. Mais quand il y a une interruption déclenchée par l'un des capteurs évènementiel, le nœud sort du mode vieille et envoie l'information.

BY-NC-ND

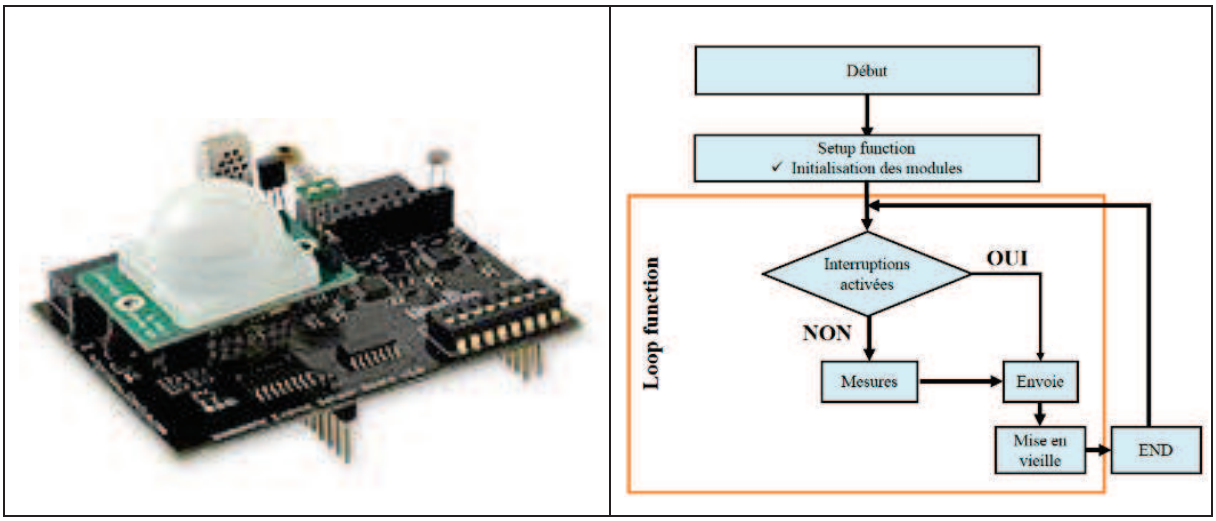


Figure III-12 Programme des nœuds asynchrones

III.4. Optimisation des nœuds du réseau MEDYBAT

Comme nous l'avions annoncé dans le chapitre II, l'optimisation d'un nœud de capteurs peut se faire sur différents niveaux des couches du modèle OSI en commençant par le matériel. Avant de commencer à voir comment optimiser nos nœuds, nous présentons ci-après l'analyse de la consommation des nœuds avant optimisation.

La mesure de consommation de nœud a été réalisée avec l'instrument de mesure KEITHLEY 2450. Le modèle 2450 de Keithley est un instrument appelé SourceMeter SMU (Source Measure Unit) de nouvelle génération qui permet de réaliser des tests réels (courant, tension et résistance) conformément à la loi d'Ohm. Nous mettons une résistance R de 37.3 Ω en parallèle de waspmote pour stabiliser les changements brutaux de courant du waspmote. Cette résistance permet d'avoir une consommation en courant très élevé par rapport à la consommation du waspmote pour éviter les changements brutaux de sa consommation. Il faut ainsi retrancher 99,18 mA de la mesure de courant, dû à la consommation de la résistance R pour une alimentation de 3.7V.

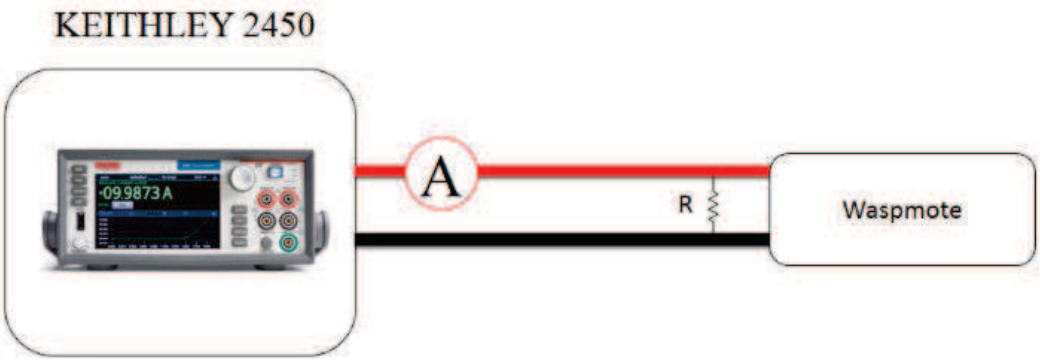


Figure III-13 Banc de mesure de la consommation

BY-NC-ND

Prenons l'exemple d'un nœud synchrone équipé de trois capteurs de base du constructeur :

- ✓ Température (MCP9700A)
- ✓ Humidité (808H5V5)
- ✓ Luminosité (LDR)

Ce nœud va mesurer et envoyer ces trois mesures à chaque cycle. Après chaque cycle d'envoi le nœud se mettra en hibernation. Le programme de base exécute l'algorithme de la figure III-11.

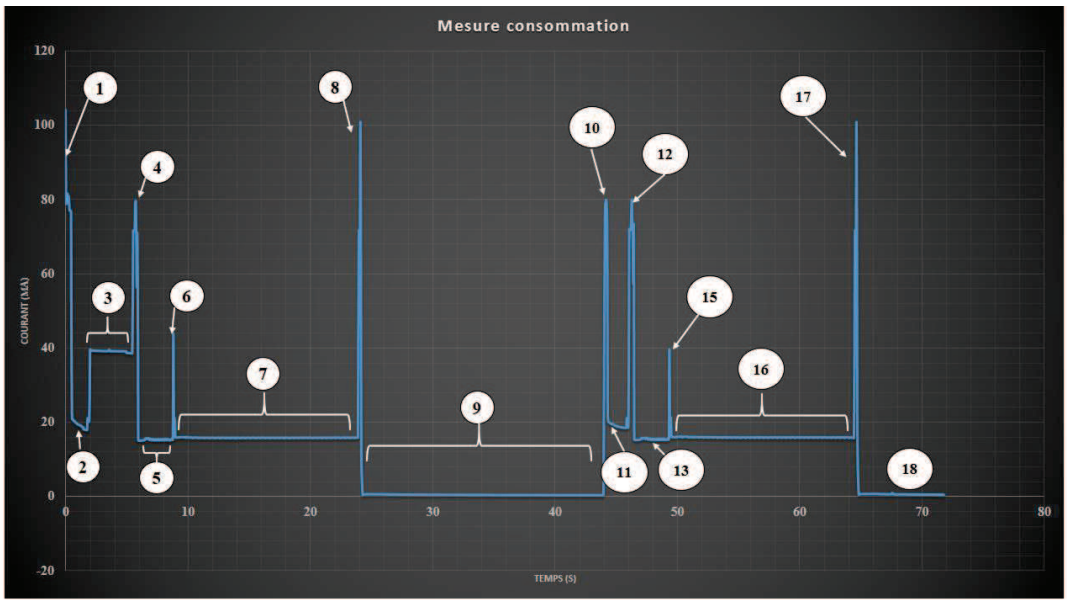


Figure III-14 Consommation nœud synchrone

La figure III-14 représente la consommation de deux cycles de mesures avec 20 secondes d'hibernation. La description détaillée des étapes des cycles est présentée dans le tableau III-6. Le premier cycle va de 0 à 24 secondes en passant par les étapes 1 à 8, puis est suivi de l'étape d'hibernation 9. Ensuite le deuxième cycle va de l'étape 10 à 17.

BY-NC-ND

Fonctions	Etapes	Description
Boot	1, 10	Mise en marche ou réveil
	2, 11	Initialisation CPU
Setup	3	Activation du mode hibernation (juste pour le 1^{ier} cycle)
	4, 12	Exécution de la fonction Setup (initialisation des modules)
Loop	5, 13	Lecture température (moyenne de 10 mesures) et luminosité
	6, 15	Alimentation capteur humidité en 5V
	7, 16	Temps de réponse et lecture d'humidité
	8, 17	Envoie des données et réception ACK
	9, 18	Mise en veille (hibernation)

Tableau III-6 Fonctionnement du nœud synchrone

Le premier cycle du nœud intègre la consommation de l'activation du mode d'hibernation, nous nous intéressons au deuxième cycle qui est représentatif de l'ensemble des cycles du nœud. La consommation du nœud est étalée sur trois fonctions comme montre le tableau III-1. Avec une consommation moyenne en courant de 18.72 mA par cycle de mesure exécuté en 20.71 secondes, une consommation moyenne d'environ 1 µA par cycle de veille en 30 minutes, nous pouvons déduire la consommation moyenne I_{moy} avec la formule ci-dessous :

$$I_{moy} = \frac{\left(I_{CM} \times T_{CM} + I_{CV} \times T_{CV}\right)}{\left(T_{CM} + T_{CV}\right)} \quad \text{(III.1)}$$

I_{CM}: Courant moyen cycle mesure

I_{CV}: Courant moyen cycle veille

T_{CM}: Temps cycle mesure

T_{CM}: Temps cycle veille

L'autodécharge de la batterie rechargeable donnée par le constructeur est de 3% à 10% par mois. Si on calcul la durée de vie pour un nœud qui envoie les données une fois après 30 minutes

BY-NC-ND

hibernation sans prendre en compte l'autodécharge, on obtient environ une durée de vie de 43 mois.

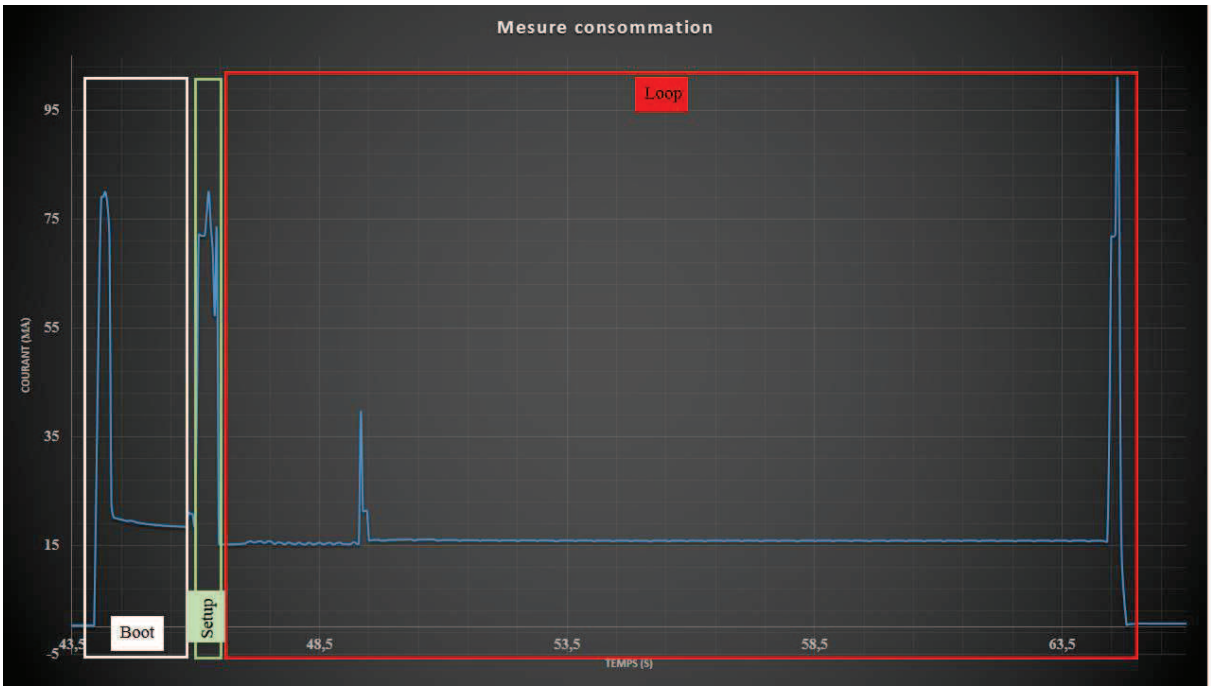


Figure III-15 Consommation du nœud avant optimisation

La fonction boot étant une fonction de démarrage du nœud, nous ne pouvons pas apporter d'amélioration conséquente sur celle-ci, sauf à minimiser la longueur du code pour faciliter le démarrage du nœud. Nous nous sommes plutôt orientés sur l'optimisation des deux autres fonctions.

III.4.1. Optimisation de la fonction setup :

La fonction setup () est appelée au démarrage du programme. Cette fonction est utilisée pour initialiser les variables, le sens des broches, les librairies utilisées et les modules. La fonction setup n'est exécutée qu'une seule fois, après chaque mise sous tension ou reset (réinitialisation) dans le mode de fonctionnement normal du waspmote. En passant en mode hibernation cette fonction est exécutée à chaque cycle, d'où l'intérêt de l'optimiser.

Dans notre cas la fonction setup sert à initialiser le module de communication Xbee pro. Nous configurons les paramètres réseaux (PAN ID, canal utilisé, nom du nœud, sécurité) dans cette fonction, mais comme cette fonction est exécutée à chaque cycle elle devient énergivore dans notre programme. Pour optimiser la fonction Setup, nous avons appliqué la méthode de co-conception hardware / software sur le nœud. Cette méthode consiste à déporter une partie des fonctionnalités du programme logiciel vers une implémentation matérielle.

Les modules Xbee permettent de programmer le réseau Zigbee directement dans le CPU, ce qui élimine l'exécution du code Setup et améliorera la consommation de chaque cycle. En

BY-NC-ND

procédant ainsi, nous améliorons la consommation du nœud (figure III-15). Cela réduit le temps d'exécution de la mesure à 19,83 secondes avec une consommation moyenne en courant de 18,55 mA par cycle de mesure.

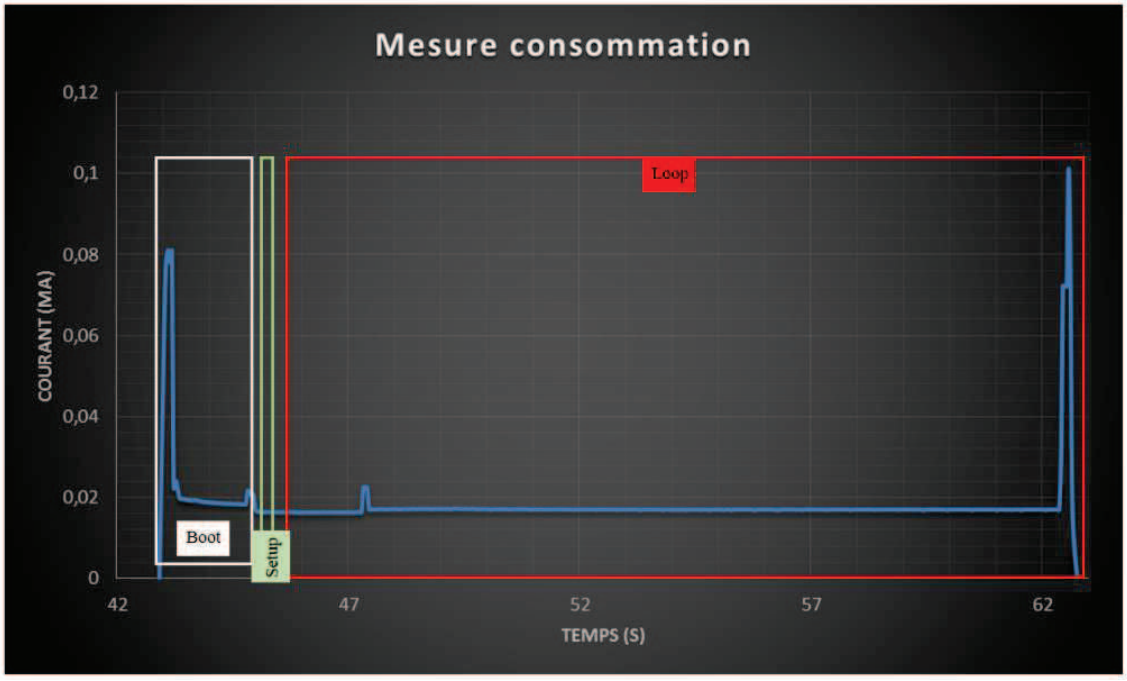


Figure III-16 Consommation du nœud avec la Co-conception hardware / software

En appliquant la Co-conception hardware / software sur le nœud, si on calcule à nouveau la durée de vie du nœud on obtient environ 45,12 mois.

Les premiers nœuds installés dans le réseau ont profité de ce type d'optimisation. Avec la durée de vie calculée en fonction de la capacité de la batterie et du courant moyen consommé par le nœud, nous pouvons déduire le pourcentage réel d'autodécharge connaissant la durée de vie réelle de nos nœuds (figure III-17).

BY-NC-ND

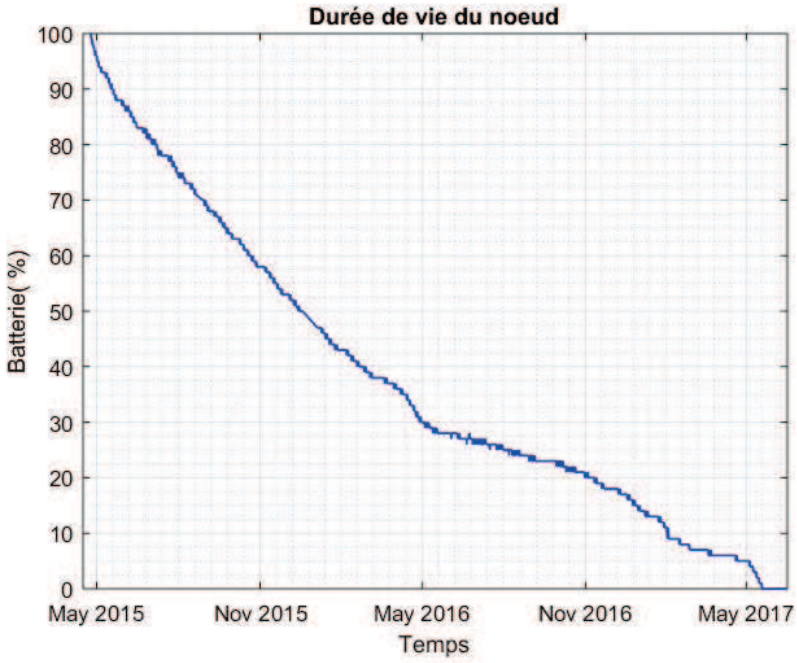


Figure III-17 Décharge de la batterie en fonction du temps (capacité: 6,6Ah)

La durée de vie des nœuds installés avec l'optimisation Co-conception hardware / software est de 2 ans 1 mois 21 jours 18 heures 23 minutes (25,718 mois). Ainsi le coefficient d'autodécharge dont l'expression est donnée par l'équation III-2 est égale à k=0.56.

$$k = \frac{DV_{réel}}{DV_{calculée}} \qquad \text{(III.2)}$$

DV : Durée de vie

III.4.2. Optimisation de la fonction Loop :

La fonction de Loop () est une fonction qui s'exécute en boucle infinie selon la programmation normale. Le but de cette fonction est de mesurer, d'envoyer l'information et de faire des économies d'énergie afin d'entrer dans un état de faible consommation. En étant en mode hibernation cette fonction ne s'exécute plus en boucle suite à l'arrêt du microcontrôleur. A chaque période le nœud exécute les deux fonctions (Setup () et Loop()). Dans cette fonction nous remarquons deux types de consommation, la première due aux capteurs (transducteurs) pour la mesure et la deuxième due à l'envoie des mesures.

Optimisation du choix du transducteur :

Nous avons remarqué que l'utilisation des capteurs analogiques pour la température et l'humidité demandaient plus de temps pour la lecture des mesures. Le capteur de température (MCP9700A) a besoin d'un temps de réponse inferieur à une seconde, mais il lui faut une moyenne de mesure (10 mesures) pour minimiser les erreurs, ce qui peut rajouter 1 à 2 secondes à la mesure de la température. Quant au capteur d'humidité (808H5V5), son temps de mesure

BY-NC-ND

est tel que l'énergie consommée par la mesure est supérieure à celle nécessaire à la transmission de la donnée.

Nous remplaçons nos capteurs de température et d'humidité par un capteur thermo hydrique (DHT22) qui effectue sa mesure en 2 secondes.

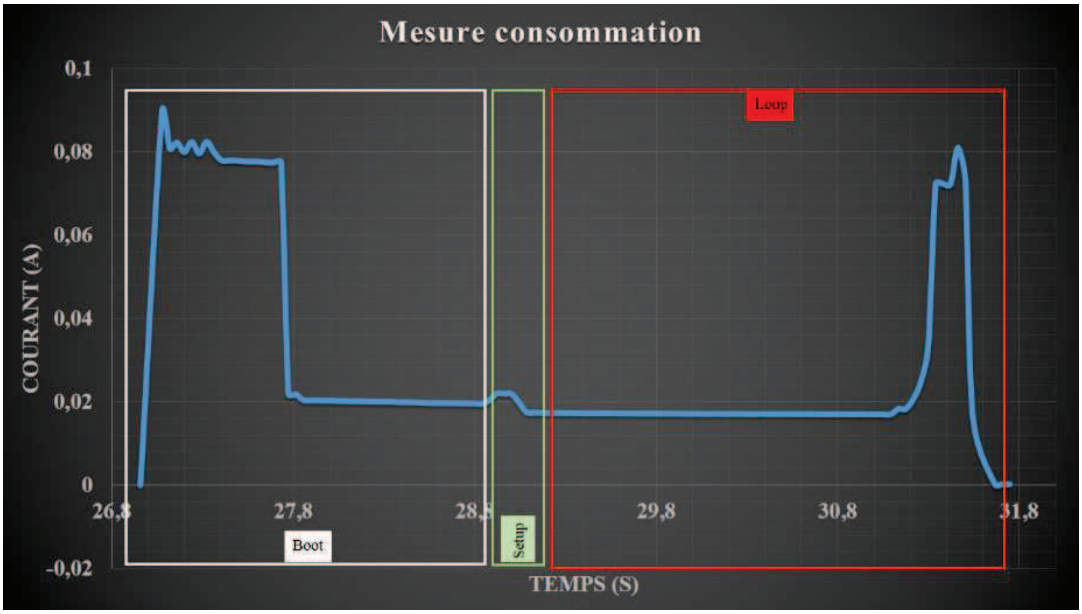


Figure III-18 Consommation du nœud avec un nouveau transducteur

En appliquant l'optimisation Co-conception hardware / software et en sélectionnant un autre transducteur, la durée de vie des nœuds est de 64,7 mois. Cette durée de vie est calculée en prenant en compte le coefficient d'autodécharge k=0.56 et un temps d'hibernation de 30 minutes. Si on choisit un temps d'hibernation de 10 minutes, la durée de vie tombe à 21,86 mois.

- Optimisation du nombre de bits à transmettre :

Nous considérons ici que les nœuds synchrones du réseau ont un temps d'hibernation de dix minutes. Cela signifie qu'il y a une transmission toutes les 10 minutes par nœud. Nous savons que la consommation à l'émission des paquets est directement liée au nombre d'octets, à la méthode CSMA-CA et aux retransmissions.

Le module de transmission Xbee pro S1 a un taux de transmission de 250 Kbps à 2.4 GHz de fréquence pour le protocole 802.15.4. Sa charge utile maximale est de 100 octets et prend 32 µs pour transmettre un octet soit 4 µs par bit.

La couche PHY 802.15.4 permet un maximum de 127 octets par paquet, y compris la charge utile. Nous cherchons à réduire au maximum la longueur des paquets envoyés par les nœuds. Les données utiles peuvent être réduites en utilisant des méthodes de compression, mais cela augmentera du temps de traitement et donc de la consommation. Nous allons optimiser la taille de l'en-tête du paquet. En passant de la communication par adresse MAC vers une

BY-NC-ND

communication par adressage 16 bits, on réduit de 12 octets la trame dans le champ d'adresse (figure III-19). On gagne ainsi 384 µs sur le temps de transmission.

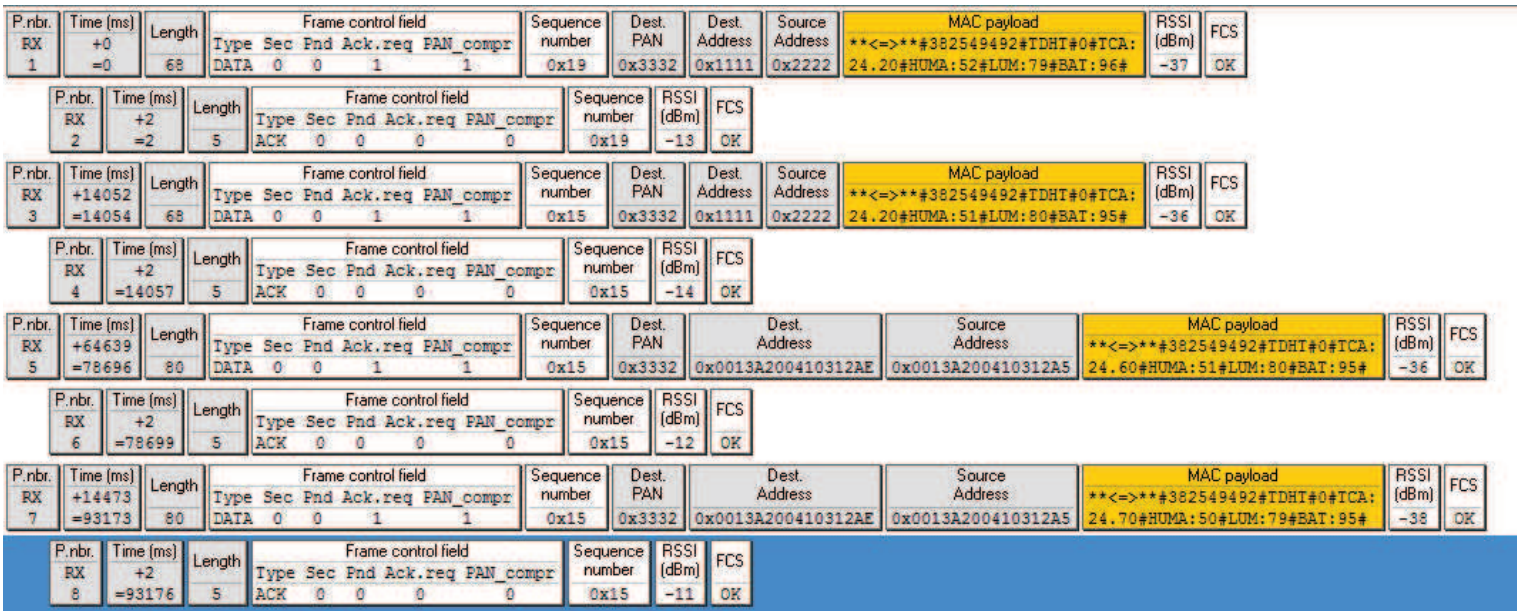


Figure III-19 Paquets reçus en 16 et 64 Bits

Dans la trame envoie, les données utiles ont une longueur de 55 octets. En utilisant l'adressage 16 bits l'entête de la trame est passé de 25 octets à 13 octets. Ainsi nous pouvons calculer le temps de transmission de chaque type de trame.

$$T_{tr} = \left(L_h + L_p\right) \times 32\mu s \qquad \text{(III.3)}$$

T_{tr} : Temps de transmission, L_h : Longueur header (entête), L_p : Longueur payload (données utiles).

Théoriquement, le nœud mettra 2,176 ms pour effectuer une transmission avec l'adressage 16 bits et 2,56 ms pour l'adressage 64 bits. En procédant ainsi, nous gagnons environ 0 ,4 ms sur le temps de transmission. En pratique le temps d'émission est associé à l'algorithme CSMA-CA qui sélectionne un temps aléatoire pour l'écoute au canal. La figure III-19 montre que la transmission 16 Bits prend moins de temps et consomme moins par rapport à la transmission 64 Bits.

BY-NC-ND

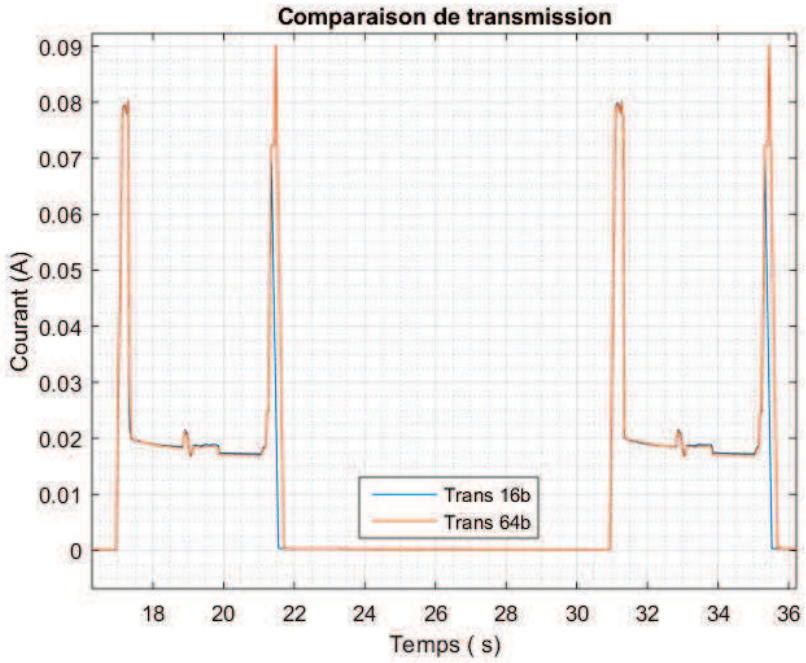


Figure III-20 La mesure des transmissions 16 et 64 Bits

Nous avons calculé et démontré que la transmission en 16 bits était plus efficace que celui à 64 bits. Sauf que le temps total nécessaire pour transmettre un paquet en 802.15.4 comprend le temps pour l'algorithme CSMA-CA et les tentatives d'écoute ou de retransmission.

Nous savons que le protocole CSMA-CA écoute le canal de transmission pour s'assurer qu'il soit libre avant de transmettre les données. Cette étape est appelée le CCA (Clear Channel Assessment). S'il détecte une activité suffisamment forte sur le canal, il introduira un délai aléatoire (backoff), puis réessaiera avec un autre CCA. L'exécution du CCA prend 0,128 ms.

Le délai aléatoire backoff est défini par le paramètre BE (macMinBE=0 and macMaxBE=3). La valeur du BE est configurable à partir du paramètre RN du module Xbee pro S1.

La valeur du backoff est alors calculée par T_{BCK} = ([0 2] ^ BE - 1) * 0.32 ms, par défaut elle est désactivée et configurée à 0. Après l'envoi d'une trame, le nœud attend un acquittement (signal ACK) avant de transmettre à nouveau la même trame.

Nous allons analyser comment le protocole CSMA-CA se comporte selon différentes valeurs de BE. Le Xbee pro S1 par default retransmet une trame trois fois de suite s'il ne reçoit pas ACK, voir figure III-21. A chaque retransmission il fait appel au protocole CSMA-CA.

BY-NC-ND

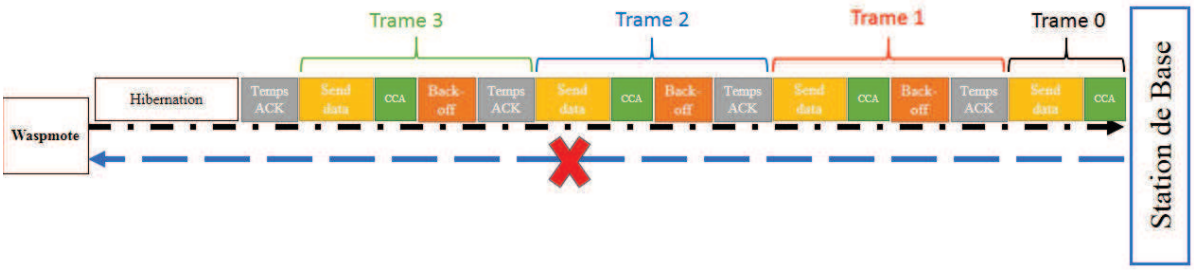


Figure III-21 Transmission du module Xbee pro S1

La figure III-21 présente un nœud qui envoie ses mesures (Trame 0) à une station de base qui n'est pas joignable. Quand le temps de réception ACK est dépassé le nœud fait une retransmission jusqu'à 3 fois. Les backoffs qui interviennent sur les trames (1, 2 et 3) varient selon la valeur de BE.

Le temps qui s'écoule entre la trame 0 et la trame 1 de la mesure 1 est égal à la somme des temps suivant :

$$T_{IT} = T_{ACK} + T_{BCK} + T_{CCA} + T_{Send} \quad \text{(III.4)}$$

T_{IT} : Temps inter-trames, T_{BCK} : Temps backoff,T_{ACK} : Temps d'attente ACK, T_{CCA} : Temps d'écoute, T_{send} : Temps d'envoi de la trame,

BY-NC-ND

- Configuration de BE=0 :

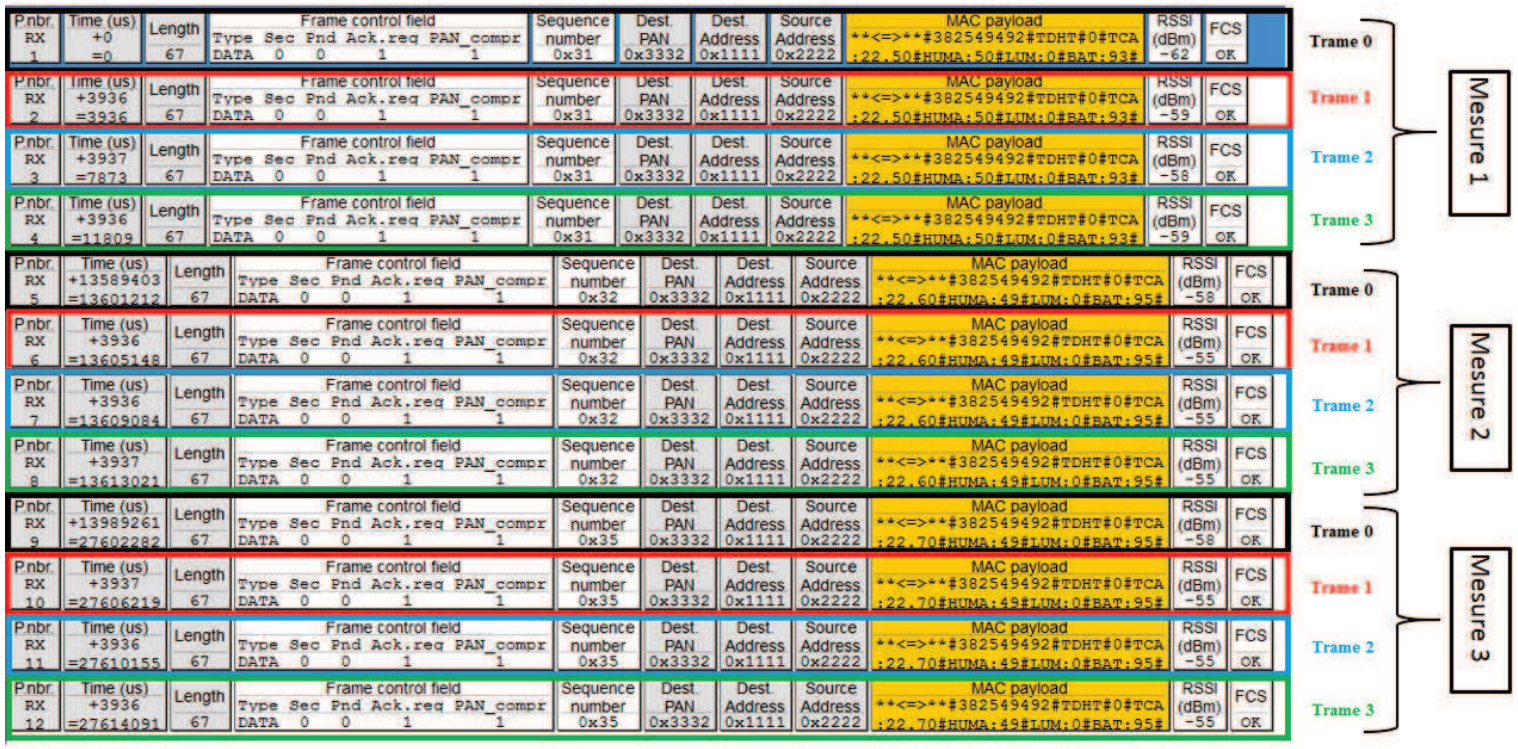
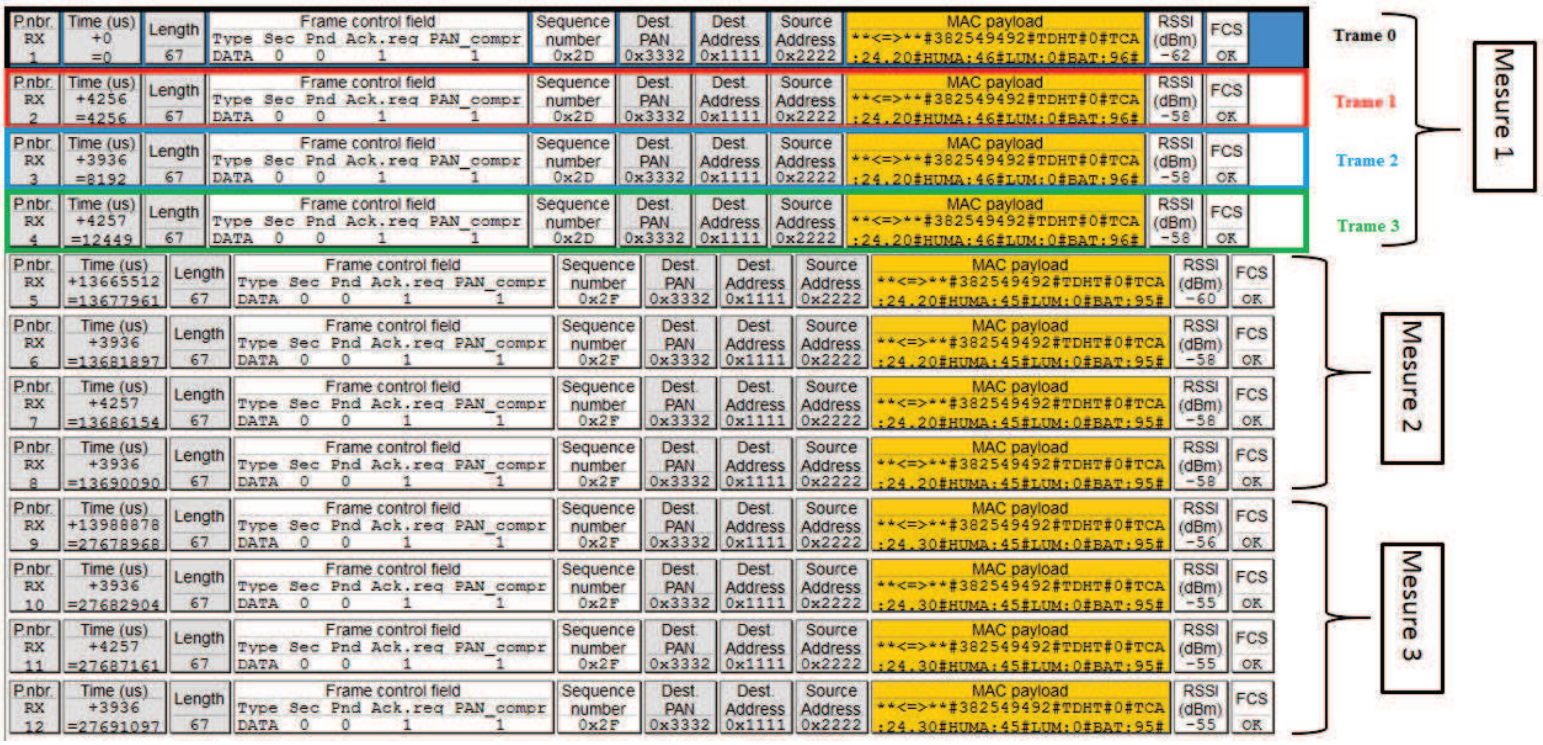


Figure III-22 Retransmission trame avec BE=0

Quand BE est nul, on trouve une seule valeur (3936 µs) pour le T_{IT}. Cette valeur étant constante, en cas de collision les nœuds vont avoir le même backoff pour retransmettre. Cela peut entrainer des collisions en boucles.

BY-NC-ND

- Configuration de BE=1 :



P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	RSSI (dBm)	FCS
RX 1	+0 =0	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2D	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.20#HUMA:46#LUM:0#BAT:96#	-62	OK
RX 2	+4256 =4256	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2D	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.20#HUMA:46#LUM:0#BAT:96#	-58	OK
RX 3	+3936 =8192	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2D	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.20#HUMA:46#LUM:0#BAT:96#	-58	OK
RX 4	+4257 =12449	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2D	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.20#HUMA:46#LUM:0#BAT:96#	-58	OK
RX 5	+13665512 =13677961	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2F	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.20#HUMA:45#LUM:0#BAT:95#	-60	OK
RX 6	+3936 =13681897	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2F	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.20#HUMA:45#LUM:0#BAT:95#	-58	OK
RX 7	+4257 =13686154	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2F	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.20#HUMA:45#LUM:0#BAT:95#	-58	OK
RX 8	+3936 =13690090	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2F	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.20#HUMA:45#LUM:0#BAT:95#	-58	OK
RX 9	+13988878 =27678968	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2F	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.30#HUMA:45#LUM:0#BAT:95#	-56	OK
RX 10	+3936 =27682904	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2F	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.30#HUMA:45#LUM:0#BAT:95#	-55	OK
RX 11	+4257 =27687161	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2F	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.30#HUMA:45#LUM:0#BAT:95#	-55	OK
RX 12	+3936 =27691097	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2F	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.30#HUMA:45#LUM:0#BAT:95#	-55	OK

Figure III-23 Retransmission trame avec BE=1

Quand BE=1, le backoff peut faire un tirage aléatoire entre deux valeurs. On trouve alors un T_{IT} de 3936 µs ou 4256 µs.

BY-NC-ND

- Configuration de BE=2 :

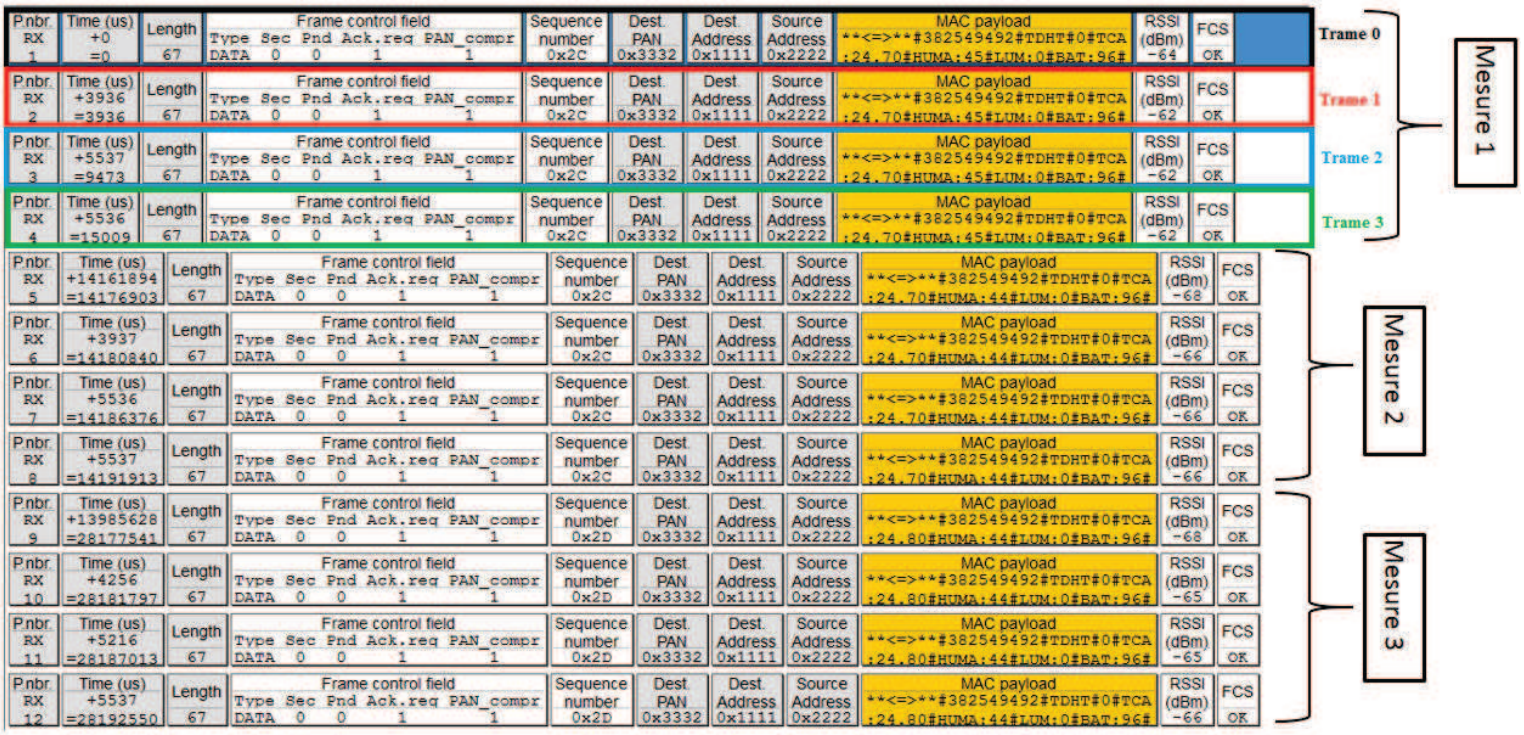
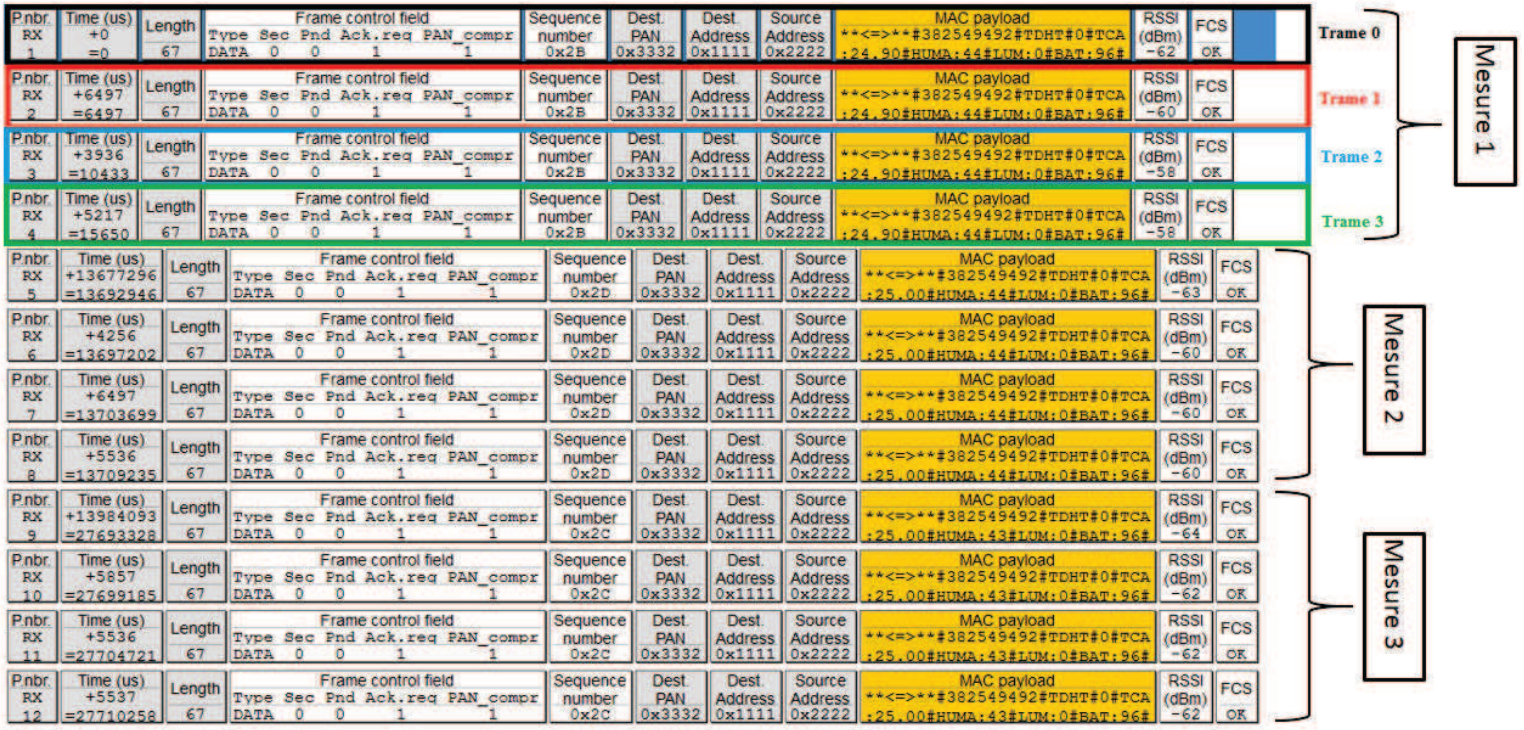


Figure III-24 Retransmission trame avec BE=2

Quand BE=2, le backoff peut faire un tirage aléatoire entre trois valeurs. On trouve alors un T_{IT} de 3936 µs, 4256 µs, 5216 ou 5536 µs.

BY-NC-ND

- Configuration de BE=3 :



P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	RSSI (dBm)	FCS	
RX 1	+0 =0	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2B	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.90#HUMA:44#LUM:0#BAT:96#	-62	OK	Trame 0
RX 2	+6497 =6497	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2B	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.90#HUMA:44#LUM:0#BAT:96#	-60	OK	Trame 1
RX 3	+3936 =10433	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2B	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.90#HUMA:44#LUM:0#BAT:96#	-58	OK	Trame 2
RX 4	+5217 =15650	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2B	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :24.90#HUMA:44#LUM:0#BAT:96#	-58	OK	Trame 3
RX 5	+13677296 =13692946	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2D	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :25.00#HUMA:44#LUM:0#BAT:96#	-63	OK	
RX 6	+4256 =13697202	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2D	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :25.00#HUMA:44#LUM:0#BAT:96#	-60	OK	
RX 7	+6497 =13703699	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2D	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :25.00#HUMA:44#LUM:0#BAT:96#	-60	OK	
RX 8	+5536 =13709235	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2D	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :25.00#HUMA:44#LUM:0#BAT:96#	-60	OK	
RX 9	+13984093 =27693328	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2C	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :25.00#HUMA:43#LUM:0#BAT:96#	-64	OK	
RX 10	+5857 =27699185	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2C	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :25.00#HUMA:43#LUM:0#BAT:96#	-62	OK	
RX 11	+5536 =27704721	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2C	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :25.00#HUMA:43#LUM:0#BAT:96#	-62	OK	
RX 12	+5537 =27710258	67	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x2C	0x3332	0x1111	0x2222	**<=>**#382549492#TDHT#0#TCA :25.00#HUMA:43#LUM:0#BAT:96#	-62	OK	

Mesure 1

Mesure 2

Mesure 3

Figure III-25 Retransmission trame avec BE=3

On observe que plus BE croît, plus il y'a des valeurs différentes du backoff. Dans l'article [32], il a été démontré que plus la valeur du BE est élevée meilleure est la probabilité de succès par rapport à la charge du réseau. Comme le temps de transmission de nos données est de 2144 µs, nous privilégions un BE qui donne des backoff supérieur au T_{tr}. La performance énergétique des différentes configurations de BE est donnée en figure III-26.

BY-NC-ND

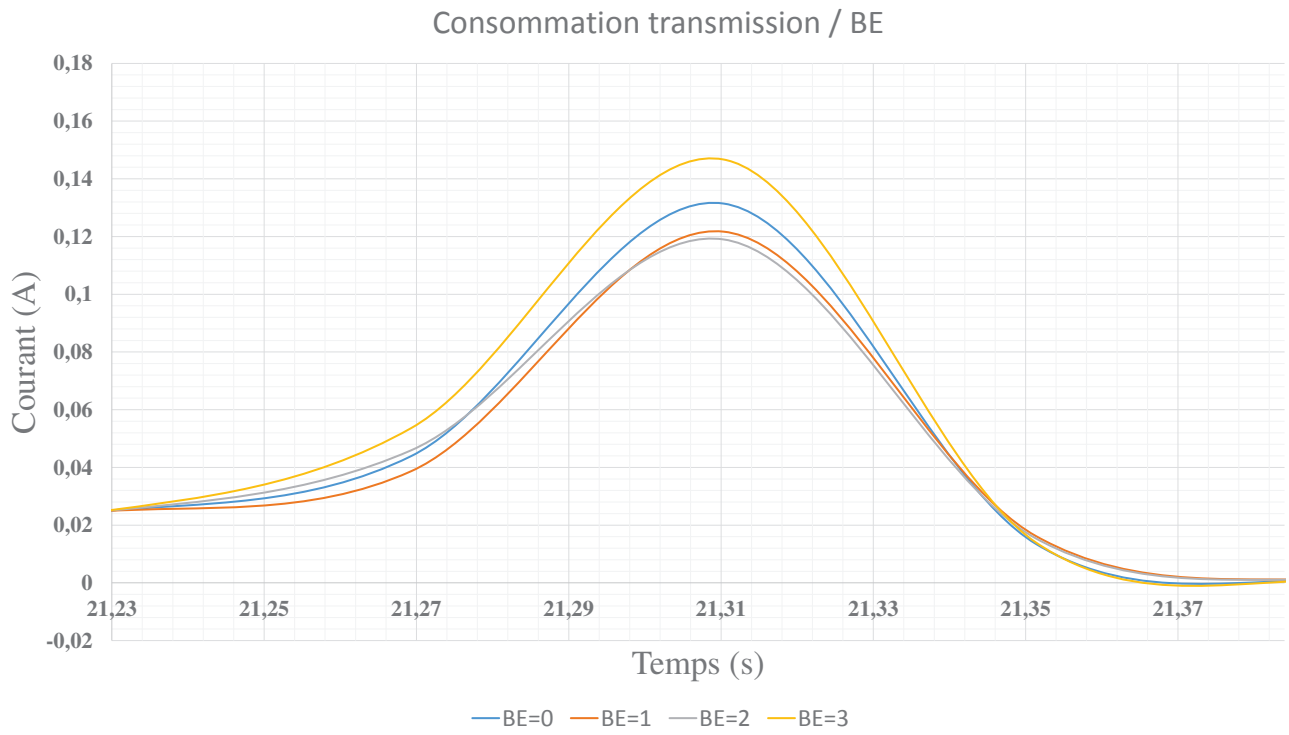


Figure III-26 Niveaux de transmissions par rapport aux BE

En observant les courbes de consommation, on constate que les différences de consommation sur différentes valeur de BE sont insignifiantes comparées au temps de transmission de données. Ainsi nous privilégions une configuration des nœuds de capteur avec un BE=3.

III.5. Les avantages du système SMART GRID

III.5.1. Application de gestion du bâtiment

Le système de gestion du bâtiment ainsi installé, nous pouvons alors évaluer la fiabilité de ces services. Le système permet de fusionner toutes les mesures pour la supervision et le contrôle du bâtiment. Il permet de visualiser en toute simplicité les données collectées par les différents réseaux.

BY-NC-ND

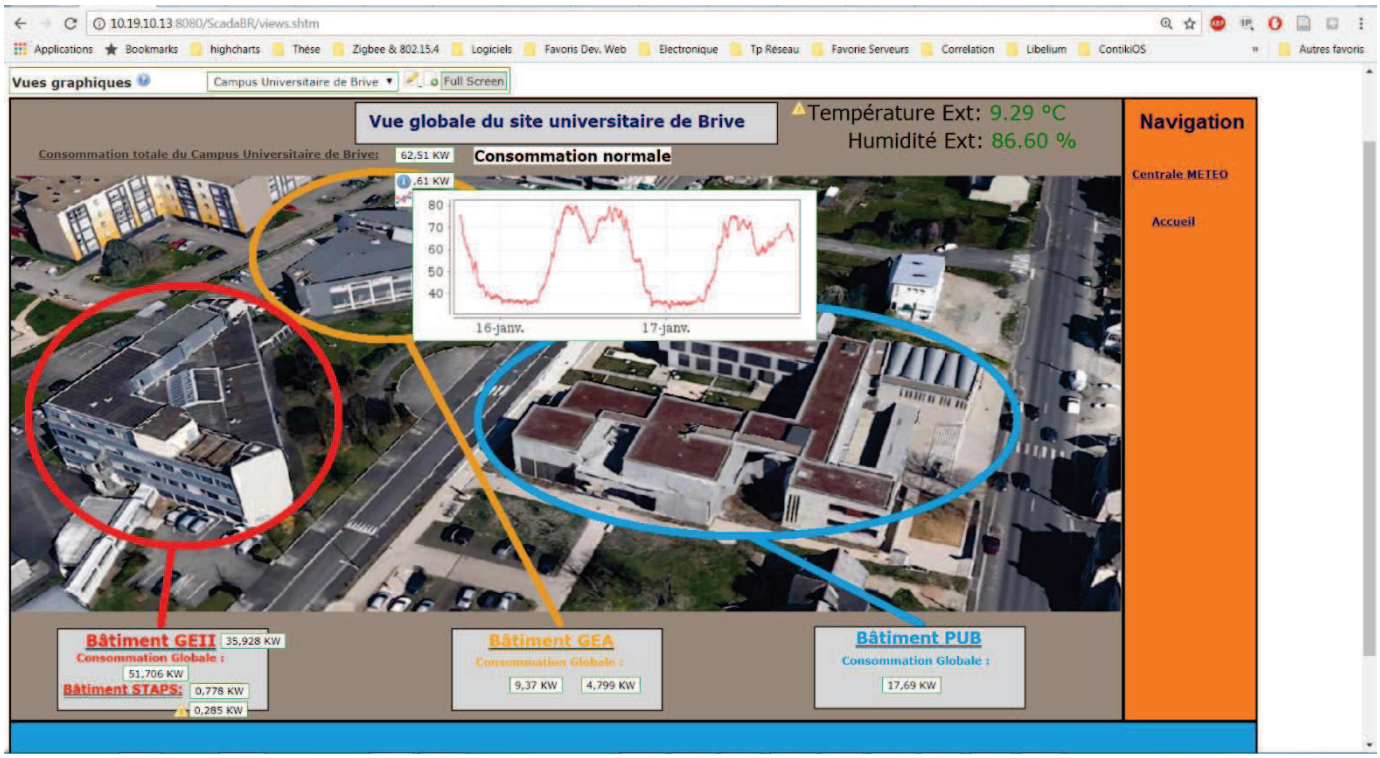


Figure III-27 Vue graphique du bâtiment intelligent

Le système fournit une visualisation graphique simple et dynamique. Grâce à la performance temps réel du système, il est possible de générer des alarmes (sonores, visuelles ou même par mail). Cela permet d'informer les utilisateurs ou les responsables du bâtiment d'une situation critique du bâtiment. La capacité du système à interagir avec d'autres équipements nous a permis de l'interfacer avec un automate qui est relié à trois leds (verte, jaune et rouge) sur son module sortie. L'automate est notre actionneur et les trois leds représentent les consignes de consommation électrique du campus de Brive.

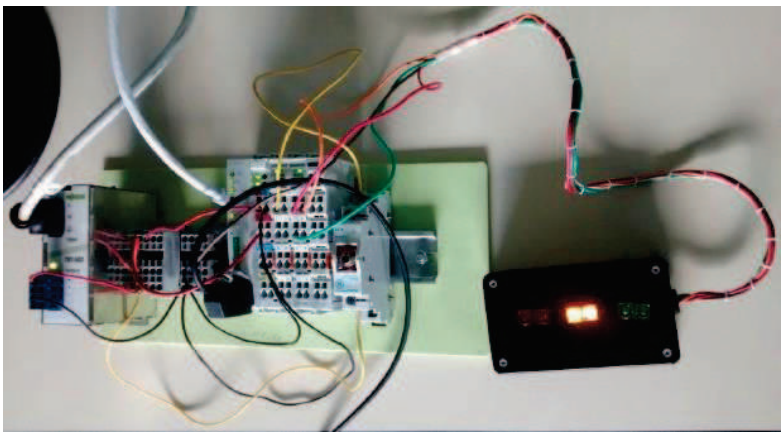


Figure III-28 Actionneur ou alarme visuelle

BY-NC-ND

En faisant une analyse temps réel de la consommation du campus universitaire de Brive, nous avons pu détecter les dépassements de consommation relatifs à l'abonnement, en effectuant des moyennes plus courtes en temps (7 minutes) au lieu de 15 minutes sur le compteur EDF.

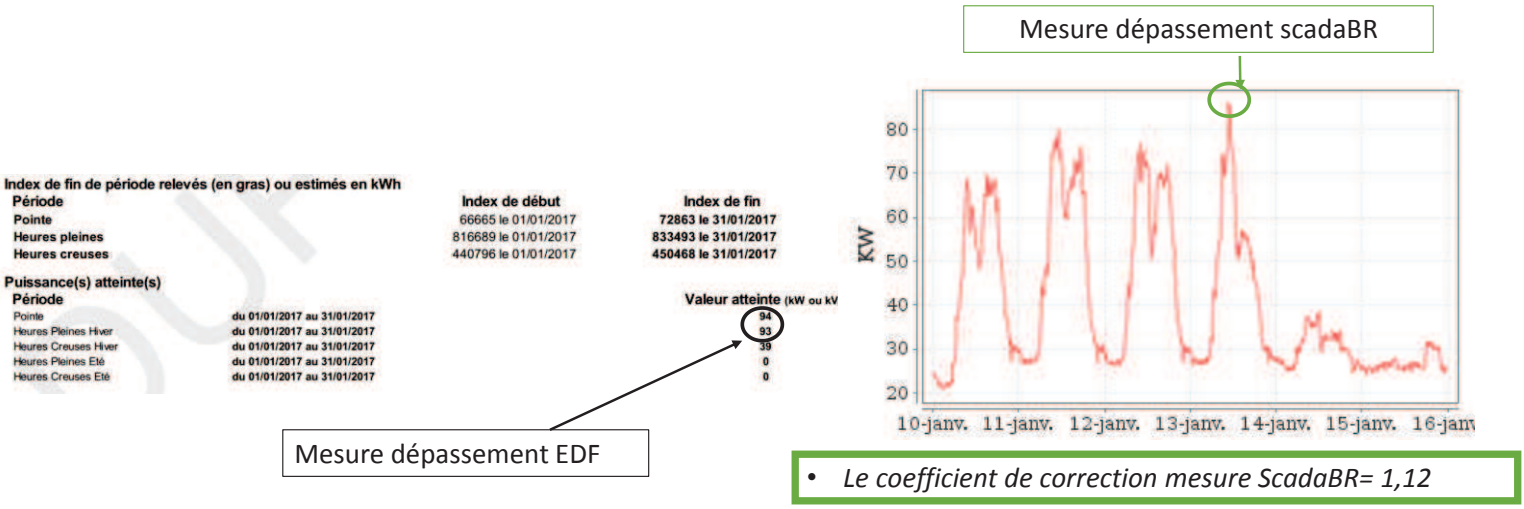


Figure III-29 Consommation électrique du Campus de Brive

La figure III-29 montre le dépassement détecté par le système de mesure. Le pic de consommation capté par le système correspond bien à celui détecté par EDF. Grace à l'alarme visuelle le responsable du bâtiment a pu intervenir rapidement pour minimiser le coup du dépassement.

III.5.2. Exploitation des données du système

Exploitation des données provenant du réseau de capteurs sans fil est basée sur une synchronisation de différentes bases de données (Figure III-1). Ce système de synchronisation de bases de données permet d'améliorer la récupération des données par le système et de minimiser la problématique de big data.

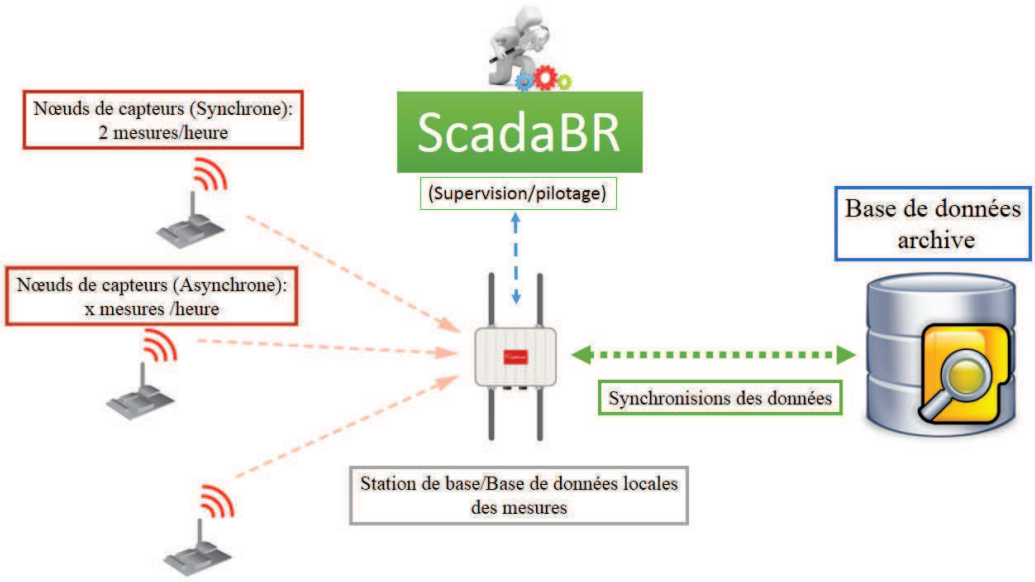


Figure III-30 Gestion des données du système

BY-NC-ND

Avec environ plus de 60 nœuds de capteurs, on mesure 3 paramètres deux fois par heure contenant environ 50 octets de données utiles par mesure. Si on considère que les nœuds asynchrones envoient leurs données au même rythme, on se retrouve avec environ 140 Ko données ou 2880 trames par jour dans la base de données. Cela devient problématique, plus en aura de données, moins le serveur de base de données répondra aux requêtes de ScadaBR.

Ainsi le système de synchronisation des bases de données permet d'archiver l'ensemble des données du réseau de capteurs dans la base de données archives, qui sera accessible à la demande mais pas en temps réel. Et la base de données locale de la station de base sera vidée chaque semaine pour permettre un accès temps réel à ScadaBR.

La plateforme installée est actuellement opérationnelle et contient une base de données dense de plusieurs paramètres. Ces données sont ouvertes à tous avec un accès web, elles ont déjà permis à l'équipe Xlim Poitiers d'étudier les algorithmes de machine Learning, et aussi à l'équipe Xlim limoges pour d'exploitation des corrélations spatiales du réseau de capteurs à appliquer au compressive sensing.

III.6. Conclusion

Nous avons installé, puis configuré notre réseau de capteurs avec deux types de nœuds (synchrones et asynchrones). Les différentes optimisations effectuées sur les nœuds synchrones ont amélioré la durée de vie du réseau (environ 22 mois) avec une transmission toutes les 10 minutes. Une des applications issues de ce réseau de capteurs est la modélisation de l'amphithéâtre par le laboratoire GEMH de l'université de Limoges que nous expliquons dans l'annexe. Le réseau ainsi fonctionnel, nous avons par la suite appliqué une optimisation sur la couche application par la méthode du « compressive sensing », présentée dans le chapitre suivant.

BY-NC-ND

BY-NC-ND

Chapitre IV. Optimisation de la couche application via le Compressive sensing

IV.1. Introduction

Au cours des dernières années, la compression de données pour une collecte efficace a attiré beaucoup d'attention sur les réseaux de capteurs sans fil. De nombreux travaux de recherche ont été entrepris pour concevoir des réseaux de capteurs efficaces énergétiquement grâce à l'acquisition comprimée [98] (AC en français ou Compressive Sensing : CS en anglais). Selon le théorème d'échantillonnage Nyquist-Shannon, le taux d'échantillonnage doit être d'au moins deux fois la largeur de bande du signal pour récupérer parfaitement le signal d'origine. Si la fréquence maximale du signal est égale à f_{max}, alors la fréquence d'échantillonnage f_e sera supérieure ou égale à $2f_{max}$ ($f_e \geq 2\ f_{max}$). Cette fréquence minimale d'échantillonnage est appelée fréquence de Nyquist (f_N), $f_N = 2f_{max}$. De très nombreuses applications (appareils photos, le signal audio, les caméscopes, …) utilisant des signaux numériques appliquent encore cette méthode d'échantillonnage.

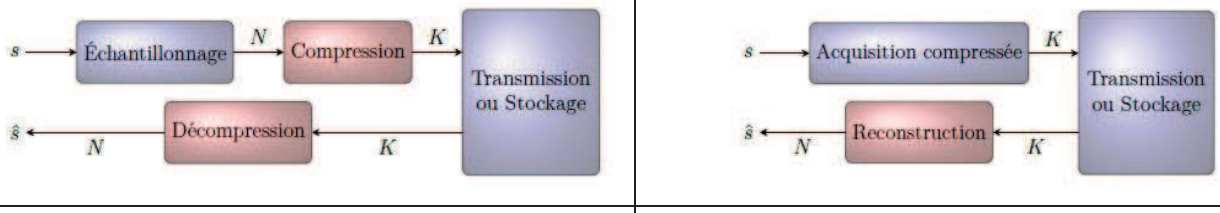
Le théorème Nyquist-Shannon est appliqué à des signaux respectant des critères bien définis. Cependant en raison de l'augmentation considérable des données, le traitement et la transmission d'un signal quelconque, l'application au théorème du type Nyquist-Shannon devient un défi sérieux. La théorie du CS indique qu'en utilisant un d'échantillonnage sous-Nyquist, nous pouvons reconstruire de façon précise le signal d'origine à partir de beaucoup moins d'échantillons que par la méthode traditionnelle. La théorie CS repose entièrement sur le principe de parcimonie et de l'incohérence existant entre les matrices utilisées dans le traitement du CS [98].

La suite de ce chapitre est découpée en deux parties. La première, traitera de l'aspect théorique du CS où son principe de base sera détaillé. La seconde partie sera orientée sur l'application du CS dans un réseau de capteurs.

IV.2. Compressive sensing

L'acquisition comprimée est une discipline récente de la théorie du signal et de l'information. Elle est apparue à la suite des articles fondateurs de Candès, Tao et Donoho [106] [107]. Le principe de ce dernier est de réaliser l'échantillonnage et la compression en même temps, contrairement à la méthode traditionnelle où le signal est d'abord échantillonné à un taux plus grand ou égal au taux de Nyquist puis compressé. Le CS regroupe les opérations d'acquisition, d'échantillonnage et de compression en une seule étape comme le montre la figure IV-1.

BY-NC-ND



Méthode traditionnelle | CS

Figure IV-1 Méthode de compression

IV.2.1. Principe du CS

Le CS permet la reconstruction d'un signal de grande dimension $x \in \mathbb{R}^N$ en utilisant un petit nombre de mesures M<<N, sélectionnées en appliquant la transformation suivante au signal x :

$$y = \Phi \times x \tag{IV.1}$$

Tel que $y \in \mathbb{R}^M$ et $\Phi \in \mathbb{R}^{MxN}$ Avec

$$x = \Psi \times \alpha \tag{IV.2}$$

$\alpha \in \mathbb{R}^N$

$$y = A \times \alpha \quad avec \quad A = \Phi \times \Psi \tag{IV.3}$$

A : Matrice de reconstruction

Φ : Matrice de mesures

Ψ : Matrice de la base de représentation

y : Mesures (Signal compressé)

α : Signal creux

$\tilde{\alpha}$: Approximation du signal creux

Ainsi le CS est basé sur l'hypothèse que le signal x est parcimonieux dans une certaine base de représentation codée par la matrice Ψ de sorte que α soit un signal creux.

La figure IV-2 présente les différentes phases d'acquisition et de reconstruction du CS. Le signal d'entrée $x \in R^N$ est supposé creux dans un domaine Ψ. Le vecteur $y \in R^M$ représente les mesures de la phase d'acquisition. Par soucis de simplicité, on suppose idéalement ici que les mesures ne sont pas affectées de bruit.

BY-NC-ND

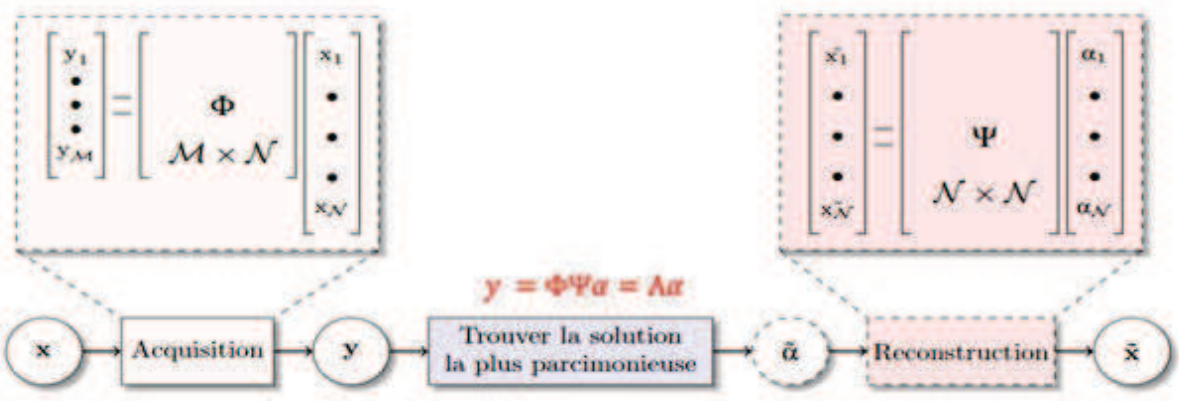


Figure IV-2 Les étapes du CS

La recherche de solution pour trouver l'approximation du signal creux $\tilde{\alpha}$ peut se faire avec plusieurs méthodes. Une des solutions utilisée est la l_P norme que nous allons définir à la suite de ce document. L'algorithme de reconstruction renvoie en sortie l'approximation du signal noté $\tilde{x}$. Le vecteur $\tilde{x} \in \mathbb{R}^N$, qui est résultat de la deuxième étape de la phase de reconstruction, représente une estimation du signal x.

Le CS s'appuie donc sur deux principes :

- La parcimonie du signal à acquérir.
- L'incohérence qui existe entre la matrice de mesure et la base de représentation parcimonieuse.

IV.2.1.1. L_p Norme

Une norme est une taille totale ou une longueur de tous les vecteurs dans un espace ou des matrices vectoriels. La norme peut prendre plusieurs formes et plusieurs noms, les plus connues sont: la distance euclidienne, erreur moyenne quadratique, etc.

La l_p norme de x est défini comme:

$$\|x\|_p = \sqrt[p]{\sum_i |x_i|^p} \quad où\ p \in \mathbb{R} \tag{IV.4}$$

BY-NC-ND

Chaque lp norme est très similaire, mais leurs propriétés mathématiques sont très différentes et donc leur application aussi. Nous allons définir certaines de ces normes :

- La « norme » L_0 :

En réalité la norme L_0 n'est pas réellement une norme, plutôt une quasi-norme. Il est définit comme le nombre d'entrées non nulles du vecteur x. Au niveau du CS la minimisation de la norme l_0 est formulée comme :

$$\min \|x\|_0 \quad tel\ que\ A.x = b \tag{IV.5}$$

La minimisation de la norme l_0 est trop complexe et presque impossible à résoudre. Dans de nombreux cas, le problème de la minimisation l_0 est transformé par un problème de norme d'ordre supérieur tel que la minimisation de la norme l_1 et la norme l_2.

- La norme L_1 :

La définition de la norme l_1 est définie comme :

$$\|x\| = \sum_i |x_i| \tag{IV.6}$$

- La norme L_2 :

Le plus populaire de toutes les normes est la norme l_2, elle est bien connue comme une norme euclidienne. La norme l_2 est définie comme :

$$\|x\| = \sqrt{\sum_i x_i^2} \tag{IV.7}$$

IV.2.1.2. Parcimonie :

Un signal est dit parcimonieux ou creux [108] s'il comprend seulement quelques éléments significatifs ou non nuls. Si on donne la définition suivante d'un signale parcimonie :

Soit N et s deux entiers tels que $1 \leq s \leq N$. Soit $x \in \mathbb{R}^N$. Le support de x est l'ensemble

$$\text{supp}(x) = \{j \in \{1,\ldots\ldots N\} : \chi_j \neq 0\},$$

où pour tout $1 \leq j \leq N$, x_j est la j-ième coordonnée de x. La taille du support de x est notée

$$\|x\|_0 = |\text{supp(x)}|,$$

BY-NC-ND

C'est le nombre de coordonnées non nulles dans x. On dit qu'un vecteur est s-sparse (ou parcimonieux) quand $\|x\|_0 \leq s$ et on note par Σ_s l'ensemble de tous les vecteurs s-sparse de R N: $\sum_s = \{x \in \Re^N : \|x\|_0 \leq s\}$

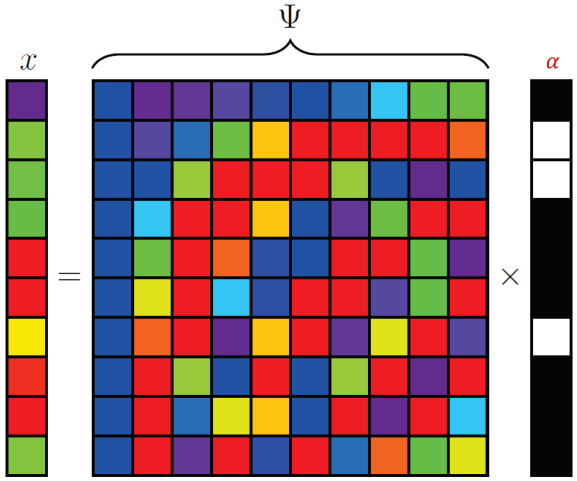


Figure IV-3 Représentation d'un signal creux dans le domaine de la transformation Ψ

La figure IV-3 montre une représentation d'un signal quelconque x dans un domaine de représentation définit par la transformation linéaire Ψ. Le signal x n'étant pas creux dans son domaine d'origine, on fait sa transformée dans un domaine où il sera creux [98] [109]. α est la transformée de x dans le domaine définit par Ψ. Dans la représentation vectorielle de α seuls les cases en blancs (x_k) sont les coefficients non nuls (Norme L_0).

$$\|\alpha\|_0 = k \quad \text{, et } k \ll N \tag{IV.8}$$

Ainsi on peut dire que le signal x est alors k-parcimonieux dans la base de représentation Ψ.

IV.2.1.3. Domaine de parcimonie

Le domaine de parcimonie est une base de transformée (DFT, DCT, ondelette,…) permettant de représenter un signal donné avec un minimum de valeurs non nulles. Le degré de parcimonie ρ du signal x est défini comme suit :

$$\rho = \frac{k}{N} \tag{IV.9}$$

Plus le degré de parcimonie ρ est faible, plus on peut compresser le signal. Il est alors possible de reconstruire le signal avec moins d'échantillons. Le nombre de mesures M [98] nécessaires pour une reconstruction précise doit satisfaire :

$$M \geq c \times k \times \log_{10}\left(N/k\right) \tag{IV.10}$$

BY-NC-ND

Ou c est une constante qui permet d'accroitre ou réduire le nombre d'échantillons.

Le pourcentage du degré de parcimonie [110] $\rho_{[\%]}$ est défini comme suit :

$$\rho[\%] = (1 - \frac{k}{N}) * 100 \tag{IV.11}$$

Le domaine de parcimonie est défini par une transformée temps-fréquence comme les ondelettes, DFT, DCT. Dans l'article [111] Zhang et al proposent une approche alternative qui génère la matrice Ψ à partir d'un algorithme d'apprentissage qui s'adapte aux caractéristiques du signal à mesurer.

- Transformée de Fourier discrète (DFT)

La DFT est calculée à partir de l'algorithme de la transformée de Fourier rapide (FFT) [112]. La DFT permet d'évaluer une représentation spectrale d'un signal. La DFT d'un signal X de longueur n, noté Y=DFT(X) est représentée par la formule ci-dessous:

$$Y(\mathrm{k}) = \sum_{j=1}^{n} X(j)\, \mathrm{W}_n^{(j-1)(\mathrm{k}-1)} \tag{IV.12}$$

$$\text{Avec} \quad W_n = e^{(-2\pi i)/n}$$

- Transformée en cosinus discrète

La transformée en cosinus discrète ou DCT est l'une des transformées les plus utilisées dans la compression d'images ou de vidéos [113].

En particulier, une DCT est une transformation similaire à la transformée de Fourier discrète (DFT), mais en utilisant uniquement des nombres réels. La forme la plus utilisée de la transformée en cosinus discret est la DCT type-II, généralement appelée «DCT ». La DCT peut être traitée sur plusieurs dimensions : 1-D, 2-D et 3-D. La matrice DCT-II 1-D est représentée comme suit :

$$\Psi_{ij} = C \times \cos(i(1+2j)\frac{\pi}{2N}) \tag{IV.13}$$

$\Psi_{i,j}$ (matrice DCT) où i et j représentent respectivement les numéros de ligne et de colonne de la matrice. Ils varient entre 0 et N – 1. C est une constante définie comme suit :

$$C = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}} & lorsque \quad i = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & lorsque \quad i \neq 0 \end{cases}$$

- Transformée en ondelettes

BY-NC-ND

La transformée en ondelettes est issue du besoin de modifier les coefficients d'une analyse de Fourier lorsque les caractéristiques fréquentielles du signal varient au cours du temps notamment lors d'une analyse temps fréquence. Cet outil a été généralisé en analyse d'image pour obtenir une transformée multi-résolution. Mathématiquement la transformée en ondelettes d'un signal continu $x(t) \in \mathbb{C}$ peut être définie par :

$$g(s,\tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{-\infty} x(t) \cdot \psi_{s,\tau}^{*}(t) \cdot dt \qquad \text{(IV.11)}$$

Où $\psi_{s,\tau}(t) = \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right)$ est la fonction de base dérivée d'une fonction génératrice $\Psi(t)$ par translation d'une durée τ et contraction/dilatation d'un facteur s. $()^{*}$ représente l'opération de conjugaison complexe.

Numériquement les valeurs de s et τ sont des valeurs discrètes telles que $s = 2^{-m}s_0$ et $\tau = n\tau_0$ et la transformée en ondelettes discrète est donnée par :

$$g(m,n) = \frac{1}{\sqrt{2-m_{s_0}}} \int_{-\infty}^{-\infty} x(t).\psi_{m,n}^{*}(t).dt = \frac{1}{\sqrt{2-m_{s_0}}} \int_{-\infty}^{-\infty} x(t).\Psi\left(\frac{t-\eta\tau_0}{2-m_{s_0}}\right).\mathrm{dt} \qquad \text{(IV.12)}$$

Cette expression peut être interprétée comme le produit de convolution du signal $x(t)$ avec la fonction $\Psi(-\frac{t}{2^{-m}s_0})$. Concrètement la transformée en ondelettes utilise deux filtres (un filtre G passe-bas et un filtre H passe-haut) et la décomposition peut se faire sur plusieurs niveaux. La figure IV-4 montre les coefficients qui sont générés hiérarchiquement à travers une transformée en ondelettes de niveau 3 [114].

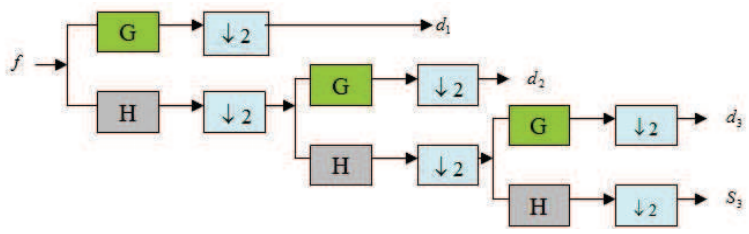


Figure IV-4 Arbre d'ondelettes

IV.2.1.4. L'incohérence

La théorie du CS repose sur le principe d' « incohérence » entre la matrice relative aux mesures $\Phi \in \mathbb{R}^{MxN}$ et celle de la base du domaine parcimonieux Ψ. Afin que chaque mesure puisse apporter une information globale sur l'ensemble des coefficients, il est important de respecter

BY-NC-ND

cette incohérence. Pour garantir cela, l'utilisation des matrices aléatoires [115] pour constituer Φ, offre une grande probabilité sur le degré d'incohérence, quelle que soit la base Ψ.

Par exemple, les processus ci-dessous sont souvent utilisés pour générer la matrice de mesure Φ et permettent de garantir une incohérence avec la base parcimonieuse Ψ.

- ✓ Un processus gaussien identique et indépendamment distribué (i.i.d).
- ✓ Un processus aléatoire équiprobable.

La cohérence mutuelle entre Φ et Ψ est définie comme suit [98]:

$$\mu(\Phi,\Psi) = \sqrt{N}\max_{i,j}\left|\left\langle \phi_i,\psi_j \right\rangle\right| \tag{IV.13}$$

Où ϕ_i et ψ_j représentent respectivement les vecteurs lignes de Φ et les vecteurs colonnes de Ψ.

La cohérence mutuelle est une valeur bornée par les limites suivantes [98] :

$$1 \le \mu(\Phi,\Psi) \le \sqrt{N}$$

Si μ(Φ,Ψ)=1, nous obtenons alors un maximum d'incohérence [116] entre Φ et Ψ.

Dans l'article [117] de A et B, les auteurs calculent la cohérence mutuelle entre les matrices Φ et Ψ avec une formule normalisée :

$$\mu(\Phi,\Psi) = \sqrt{N}\max_{i,j}\frac{\left|\left\langle \phi_i,\psi_j \right\rangle\right|}{\left\|\phi_i\right\|_2\left\|\psi_j\right\|_2} \tag{IV.14}$$

Dans le cas du calcul avec une formule normalisé est appliqué μ(Φ,Ψ) varie entre 0 et 1. Quand μ(Φ,Ψ)=0, on dit qu'il y a une incohérence maximum entre les matrices Φ et Ψ. Et si μ(Φ,Ψ)=1, il y'a une cohérence mutuelle entre les deux matrices.

Nous avons calculé la cohérence entre Φ et Ψ sur plusieurs gammes de tailles d'échantillons N (N=1000 ; N=800 ; N=500) aléatoires. Ce calcul est basé sur la méthode de l'article [98]. Quand Ψ est une base de Fourier, nous avons obtenu une valeur de 1, il y a donc une incohérence totale entre la matrice de mesure et le domaine de Fourier. Nous avons refait la même opération dans la base DCT, nous avons obtenu une valeur de 1,41. Il est ainsi évident qu'il y'a une grande incohérence avec la base DCT.

BY-NC-ND

IV.2.1.5. Matrice Mesure et reconstruction

L'outil qui permet de faire la compression du signal dès l'étape d'acquisition est la matrice de mesure Φ. Elle peut être catégorisée selon ses propriétés ou structures internes, on peut citer par exemple [110]:

- Aléatoire : les éléments de la matrice sont générés à partir d'un processus aléatoire.
- Déterministe : les éléments de la matrice sont générés à partir d'un processus déterministe.
- Ternaire : les éléments de la matrice prennent seulement trois valeurs possibles.
- Binaire : les éléments de la matrice prennent seulement deux valeurs possibles.
- Toeplitz : les éléments de la matrice sur une diagonale descendant de gauche à droite sont les mêmes.
- Bloc-diagonale : une matrice possédant des blocs sur la diagonale principale, tels que les blocs non-diagonaux soient des matrices nulles.

L'utilisation des matrices binaires {0, 1} est notamment répondue du fait qu'elle est moins complexe et facilite la réalisation des dispositifs électroniques. Dans l'article [118], il a été démontré que les matrices de mesure ayant une structure Toeplitz présentent des avantages.

Ainsi nous allons utiliser une matrice de mesure binaire avec une structure descendante de gauche à droite, la matrice de mesure Φ est une matrice de dimension (MxN) où M et N sont des lignes et des colonnes dans la matrice. Elle est composée de 1 et de 0 où chaque 1 représente la période que le nœud a transmis de façon aléatoire.

L'étape de reconstruction du signal x s'effectue selon l'hypothèse suivante : les M valeurs de y, la matrice de mesure Φ utilisée ainsi que le domaine Ψ sont supposés connus. L'algorithme de reconstruction cherche à retrouver les coefficients de $\tilde{\alpha}$ par une approche optimale sous contrainte basée sur l'hypothèse que $\tilde{\alpha}$ est un signal creux :

$$\min_{\tilde{\alpha}} \left\| \tilde{\alpha} \right\|_0 \; Tel\ que\ y = A \times \tilde{\alpha} \tag{IV.15}$$

Dans le cas où y est la mesure d'un signal issue d'un processus naturel, il est nécessaire de relâcher la contrainte d'égalité pour permettre une tolérance d'erreur $\varepsilon \geq 0$, ce qui permet de prendre en compte que l'observation est contaminée par un bruit.

L'équation IV.11 devient :

BY-NC-ND

$$\min_{\tilde{\alpha}} \left\|\tilde{\alpha}\right\|_0 \; Tel\; que \left\| y - A\tilde{\alpha} \right\|_2 \leq \varepsilon \qquad \text{(IV.16)}$$

ε est l'amplitude du bruit.

La résolution de l'équation IV.15 demande une recherche complète de la solution la plus parcimonieuse $\tilde{\alpha}$. Plusieurs algorithmes et leurs dérivés ont été proposés pour contourner ce problème de la norme L_0. Nous présentons deux types groupes qui résolvent ce problème [119]:

i. Les algorithmes convexes :

Les algorithmes convexes résolvent les problèmes d'optimisations par programmation linéaire [120] pour obtenir une reconstruction. Le nombre de mesures requises pour la reconstruction exacte est petit mais les méthodes sont complexes en termes de calcul. Il a été démontré que l'optimisation basée sur la norme L_0 est équivalente à une optimisation en norme L_1 [121] [122]. Ces algorithmes permettent de retrouver exactement un signal K-parcimonieux. De ce fait, le problème posé par l'équation IV.15 peut se réduire en un problème d'optimisation linéaire, comme le montre la figure IV-5, l'optimisation de la norme L_1 reconstruit bien la même solution que dans le cas de la norme L_0. Alors que la minimisation L_2 donne une solution grossière très différente de celle en norme L_0. La poursuite de base ou « basis pursuit (BP) » [123] est un des algorithmes qui traite les problèmes d'optimisation linéaire.

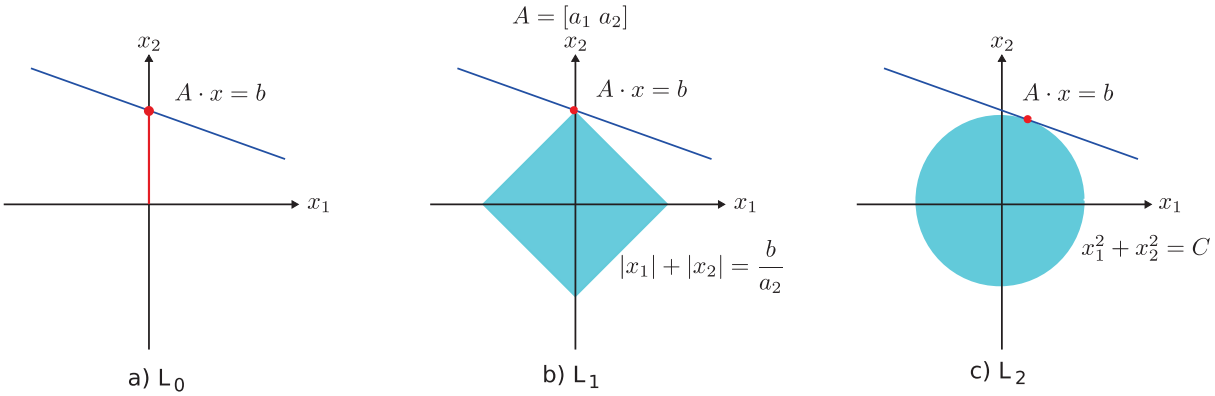


Figure IV-5 Résolution du problème $\min_x \|x\|_p$ *sous la contrainte* $A \cdot x = b$ dans les différentes normes L_0, L_1, et L_2.

a) norme L0 : le nombre minimal de composantes satisfaisant $A \cdot x = b$ est 1 et la solution est $x = \left[0\,;\, \frac{b}{a_2}\right]$

b) norme L1 : La solution est le point de contact entre la droite d'équation $A \cdot x = b$ et la courbe définie par $|x_1| + |x_2| = C$ la solution est identique à celle obtenue en norme L_0.

BY-NC-ND

c) norme L2 : La solution est obtenue par le cercle tangent à la droite d'équation $A \cdot x = b$. Elle est différente de la solution en norme L0.

ii. Les algorithmes gloutons :

Ce sont des algorithmes itératifs qui à chaque itération cherchent une solution optimale. Par exemple la poursuite adaptative ou « matching pursuit (MP) » [124] proposée par Mallat et Zhang qui consiste à sélectionner à chaque itération l'élément du dictionnaire le plus en corrélation avec le signal puis de réitérer ce procédé avec le vecteur résiduel. L'orthogonal matching pursuit (OMP) [125] est une amélioration du MP sur la sélection des éléments dans le dictionnaire. D'autres algorithmes reposant sur le même principe sont proposés : le Stagewise OMP (StOMP) [126], le Regularized OMP (ROMP) [127] et le CoSaMP [128]

IV.2.1.6. Les méthodes d'évaluation de la qualité de reconstruction

La qualité du signal reconstruit est évaluée en mesurant la distorsion entre le signal original x et celui reconstruit $\tilde{x}$.

Dans l'article [129] on a défini deux paramètres : le PRD « percentage root-mean-square deviation» et le SNR « signal to noise ratio » sont définis pour mesurer la qualité de reconstruction d'un signal. Les auteurs des articles [110], [130] utilisent le SNR pour mesurer la précision de correspondance entre le signal original x et celui reconstruit. Le SNR est défini comme suit :

$$SNR[\mathrm{dB}] = 20\log_{10}\frac{\left\|x\right\|_2}{\left\|x-\tilde{x}\right\|_2} \tag{IV.17}$$

où x et $\tilde{x}$ représentent respectivement le signal original et celui reconstruit.

Le PRD quant à lui, mesure aussi la qualité de la reconstruction. Il est défini en pourcentage:

$$\mathrm{PRD}[\%] = \frac{\left\|x-\tilde{x}\right\|_2}{\left\|x\right\|_2}\times 100 \tag{IV.18}$$

$$SNR[\mathrm{dB}] = -20\log_{10}\left(0.01\times \mathrm{PRD}[\%]\right) \tag{IV.19}$$

Yaniv Zigel et al. [129] ont défini des intervalles PRD qui permettent de définir la qualité du signal reconstruit, voir le tableau IV-1.

BY-NC-ND

PRD[%]	Qualité
0 – 2	Très bonne
2 – 9	Bonne
9 – 19	Assez bonne
19 – 60	Mauvaise

Tableau IV-1 Qualité de reconstruction

Nous définissons le taux de compression (« compression ratio (CR) ») et le facteur de compression (« compression factor (CF) ») comme suit :

Le CS capture M mesures au lieu de N échantillons du signal d'origine, le facteur de compression est défini par :

$$CF = \frac{N}{M} \tag{IV.20}$$

Le taux de compression « Compression Ratio -CR » est défini comme suit :

$$CR[\%] = \left(\frac{N - M}{N} \right) \times 100 \tag{IV.21}$$

Où, M et N sont aussi respectivement les nombres de lignes et de colonnes de la matrice de mesure Φ.

IV.3. Application du CS pour l'acquisition des données des capteurs du réseau

L'application du CS dans un réseau de capteurs sans fil doit permettre de réduire le taux d'échantillonnage et donc de baisser la consommation du nœud. Avant d'appliquer le CS dans le réseau nous devons déterminer les différents paramètres qui interviennent dans le CS. La figure IV-6 illustre l'application du CS d'un signal d'origine x aux instants d'échantillonnage i ∈ ℕ.

BY-NC-ND

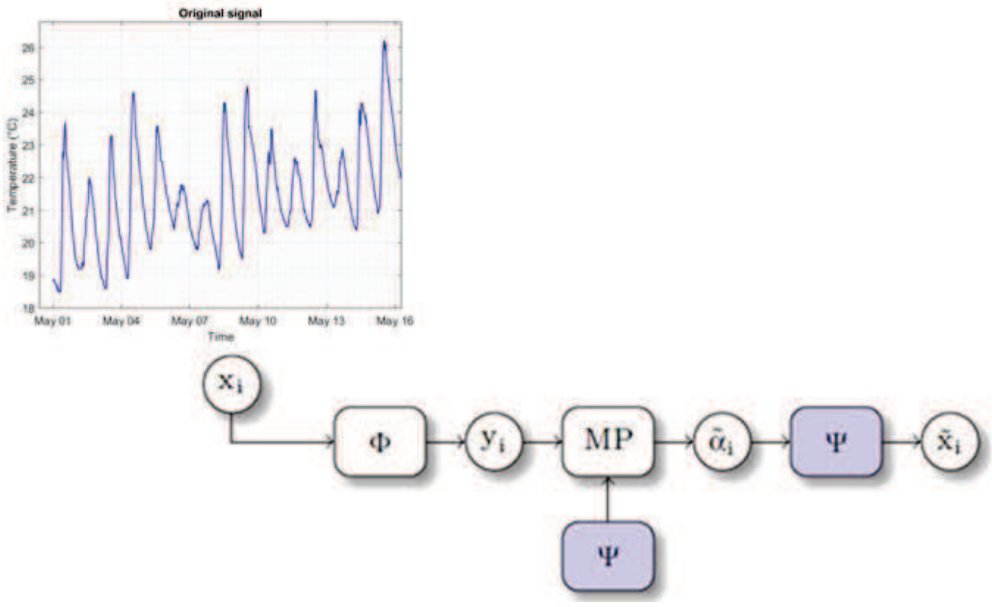


Figure IV-6 Processus du CS

Pour déterminer $\tilde{x}$ nous avons besoin de déterminer Φ et Ψ. Pour cela on recourt au test du CS sur différents signaux issus des mesures réalisées au sein de la plateforme. La simulation du CS va permettre de trouver les paramètres pertinents pour appliquer le CS dans le réseau de capteurs.

Avec un signal de longueur N échantillonné périodiquement, on peut vérifier la validité du CS en récupérant M valeurs aléatoires. La répartition de ces M valeurs par rapport aux N valeurs du signal d'origine permet de générer la matrice de mesure Φ. Ainsi le mode de détermination des M valeurs permet de générer un code qui sera appliqué dans les nœuds de capteurs.

IV.3.1. Détermination de la matrice de représentation Ψ

La matrice Ψ est la matrice de transformation du signal temporel x dans un domaine où le signal transformé est parcimonieux. Pour déterminer le domaine le plus favorable, nous allons représenter un signal de température dans deux domaines différents : Fourier et cosinus discrète. Le choix de domaine s'est limité à ces deux domaines du fait de leurs simplicités de calculs et du fait que le signal de température est un signal continu ayant un comportement quasi-cyclique (cycles journaliers, saisonniers). La figure IV-7, présente le signal d'un 1 capteur sur la période du 16 au 31 Août 2017.

BY-NC-ND

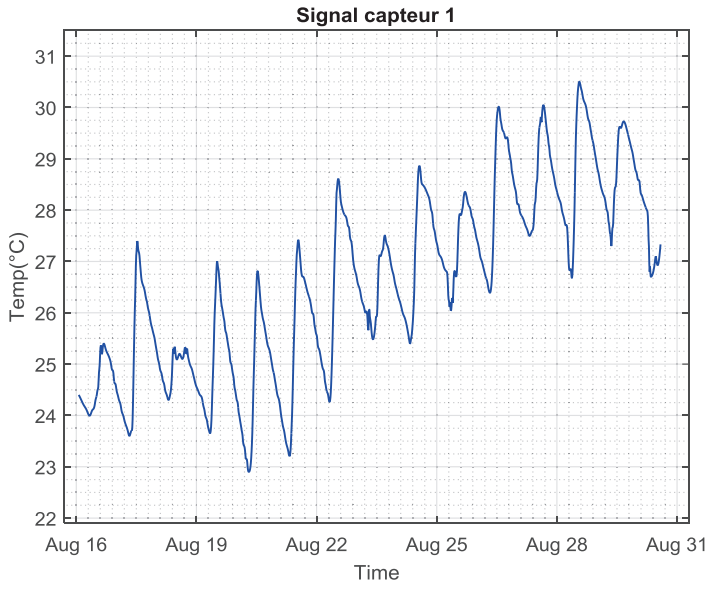


Figure IV-7 Signal température d'un capteur

Le signal représenté au niveau de la figure IV-7 est transformé dans deux domaines (DCT et DFT), voir figure IV-8.

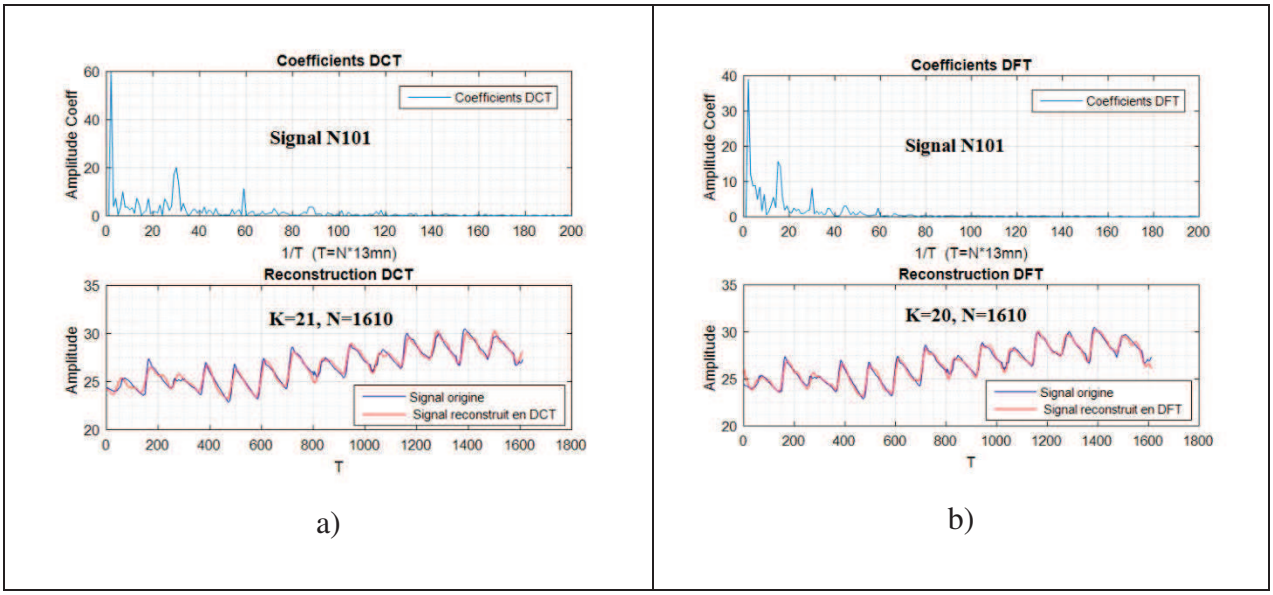


Figure IV-8 Reconstruction du signal capteur1 a) en DCT / b) en DFT

La figure IV-8 montre la reconstruction du signal température du capteur dans les domaines de Fourier et de cosinus discrète. Dans cette figure, on voit une représentation du signal dans chaque domaine choisi, on observe que le signal est concentré sur les basses fréquences.

Pour évaluer nos domaines, nous avons choisi arbitrairement un seuil de bruit de 6% du niveau max des amplitudes des coefficients (DCT ou DFT). Sous ce seuil tous les points sont considérés comme non représentatifs. C'est à dire que les coefficients non nuls (K) qui permettent de calculer la parcimonie du signal et de le reconstruire sont les points supérieurs au seuil. Avec les éléments non nuls déterminés, nous avons observé que le nombre de coefficient parcimonieux K de la DFT (K=20) est environ égal aux nombres coefficients DCT (21). Sur la

BY-NC-ND

précision de reconstruction, on observe que le domaine DFT est plus performant que le domaine DCT avec un PRD respective de 1,10 et 1,37. Et enfin en comparant les facteurs de compression nous avons un taux de compression en DCT de 76,6 et un taux DFT de 80 ,5.

Nous avons effectué la même reconstruction sur différents niveaux de seuils, pour déterminer le meilleur domaine de représentation entre la DCT et la DFT. Cette évaluation s'appuie sur le facteur de compression (CF) et le PRD. La figure ci-dessous illustre l'évolution du PRD en fonction du CF de la DCT et DFT :

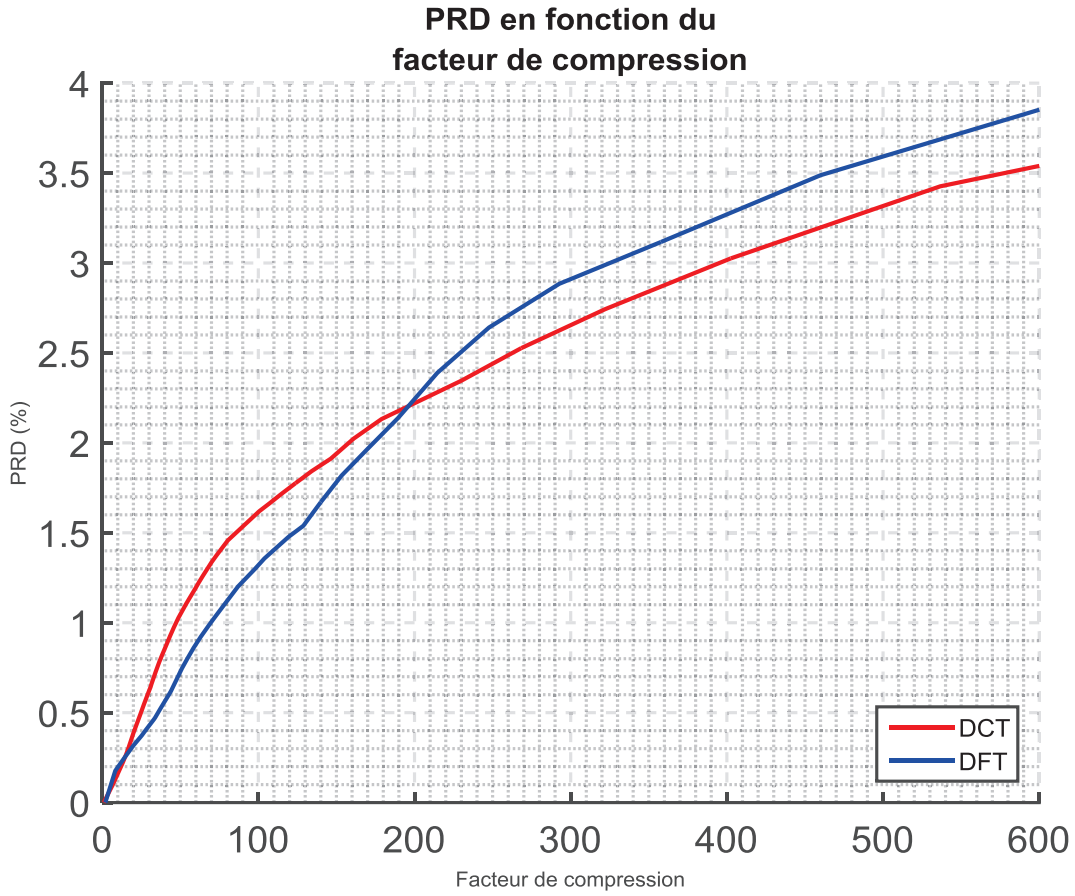


Figure IV-9 Représentation du PRD en fonction du CF

Cette évaluation montre, plus on tend vers un facteur de compression très grand mieux est l'utilisation de la matrice DCT. Pour confirmer cette évaluation, une seconde analyse du coefficient de corrélation a été effectuée.

BY-NC-ND

La figure IV-10 donne le coefficient de corrélation entre signal d'origine et le signal reconstruit.

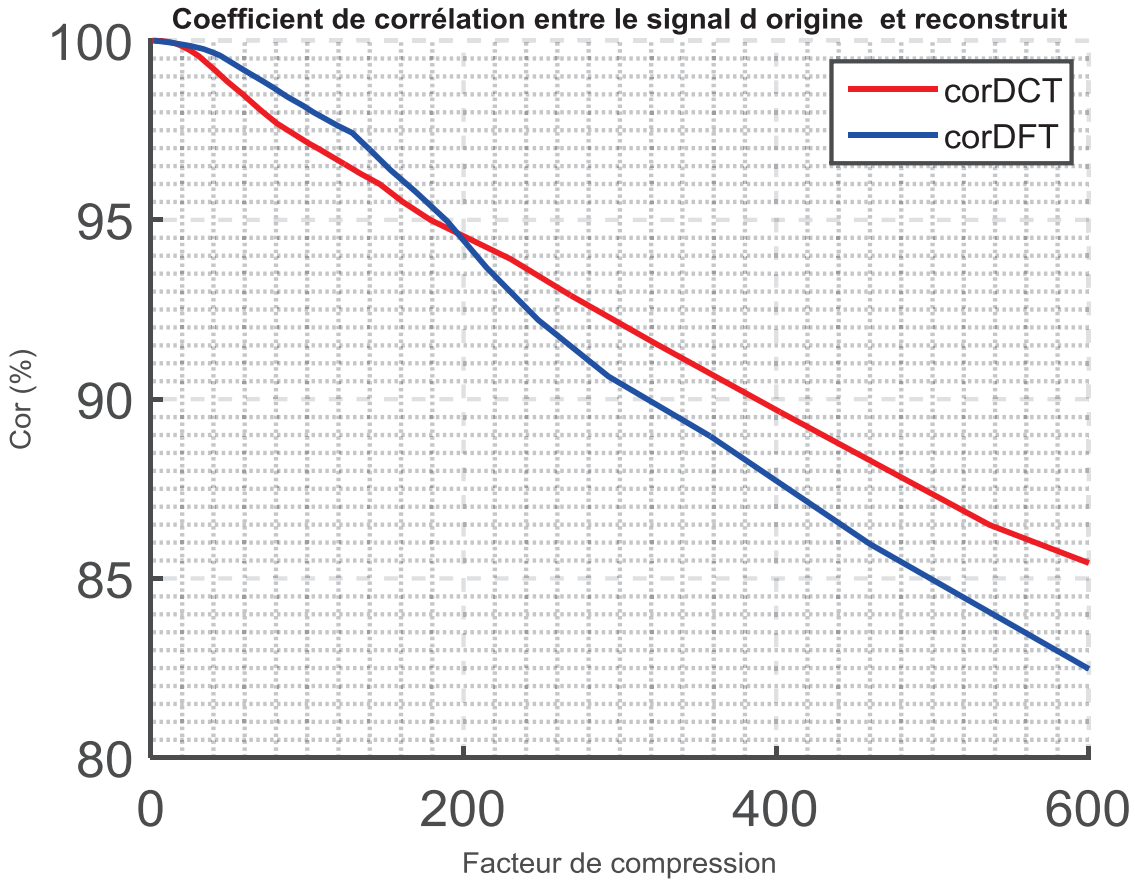


Figure IV-10 Coefficient de la corrélation

Le calcul de la PRD entre les bases DFT et DCT, a montré que la base DCT a des meilleurs niveaux de PRD quand le CF est supérieur à 200. La capacité de la matrice DCT à garantir une bonne reconstruction sur des taux de compression très élevé est déterminé dans la figure IV-10.

Nous utiliserons donc la base DCT suite à l'impact de l'autodécharge des batteries et la nécessite des mesures pour un monitoring dites temps réel.

IV.3.2. Détermination de la matrice de mesure Φ

Nous avons dit dans l'une des sections IV.2.1.3 qu'une matrice de mesure aléatoire et équiprobable respecte l'incohérence avec la matrice de représentation Ψ.

Soit la matrice de mesure aléatoire Φ_{MxN} telle que :

$$\Phi_{M\times N} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

BY-NC-ND

N : Nombre d'échantillons du signal d'origine.

M : Nombre d'échantillons du signal compressé.

L'échantillonnage du signal y doit être aléatoire et l'extraction de la matrice de mesure doit respecter l'incohérence avec la matrice de domaine. Nous effectuons un test de sélection aléatoire (la fonction random) sur un signal x (de 1348 échantillons) afin de voir si l'échantillonnage respecte les conditions citées.

Cette matrice est constituée par des permutations aléatoires des colonnes d'une matrice génératrice qui se met sous la forme.

$$\Phi_G = [1_{M\times M} \quad 0_{M\times N-M}]$$

Où $1_{M\times M}$ est la matrice identité de dimension MxM et $0_{M\times N-M}$ est la matrice identiquement nulle de dimensions MxN-M.

Pratiquement la matrice peut être construite à partir de plusieurs méthodes. Les différents tests ont été effectués sur un ensemble de 1348 échantillons.

- Test 1 :

On réalise un échantillonnage aléatoire du signal x en le permutant aléatoirement puis en récupérant le premier quart des échantillons cela correspond à un facteur de compression de 4. La permutation du signal x est basé sur la fonction rand qui est un le générateur aléatoire de loi uniforme. Cette méthode revient à réaliser une permutation aléatoire des colonnes de la matrice Φ_G. Afin d'examiner la répartition temporelle des échantillons choisis on a représenté l'histogramme des intervalles de temps entre les dates d'échantillonnage. Cet histogramme représenté à la figure IV-11-b montre que les intervalles de temps entre deux prises d'échantillons de l'ordre de la période minimale d'échantillonnage sont très largement majoritaires. Ce test permet de déterminer que les échantillons sélectionnés aléatoirement n'ont pas une loi uniforme. Ainsi cette méthode ne permet pas de générer un algorithme qui peut être implémenté dans les nœuds de capteurs.

BY-NC-ND

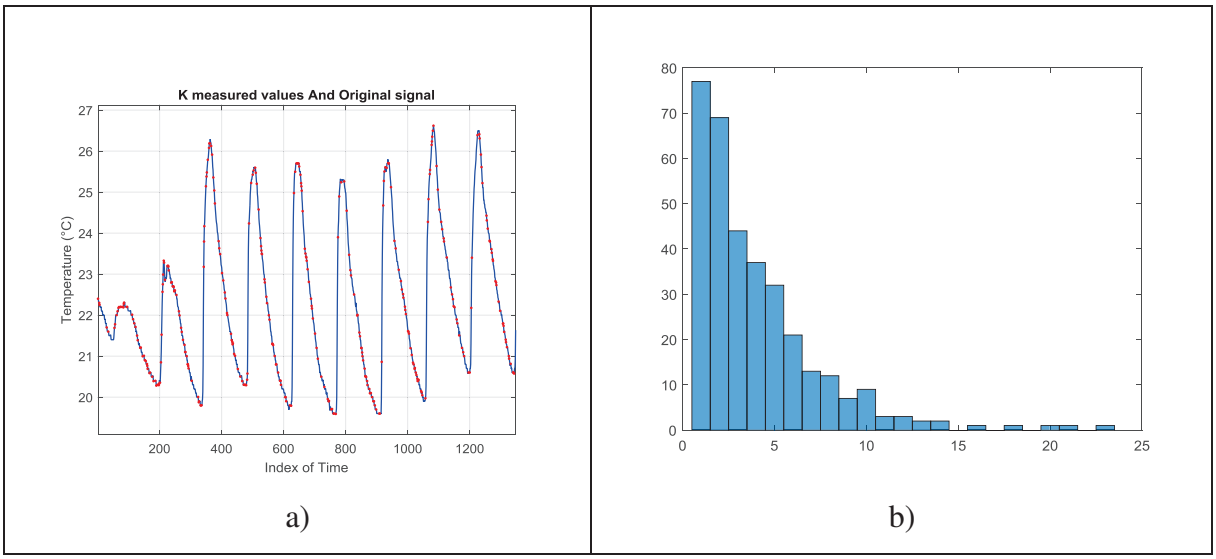


Figure IV-11 a) Signal d'origine (Bleu) et signal échantillonné (Rouge), b) Répartition fréquentielle des échantillons

Le deuxième test schématisé sur la figure IV-13 b) montre la répartition fréquentielle des échantillons respectant une loi de distribution exponentielle. Dans cet exemple le coefficient d'incohérence μ(A) est égal à 1,41. Un tel système de mesure aléatoire n'est pas adapter aux nœuds du réseau de capteurs.

- Test 2 :

On effectue à nouveau un échantillonnage aléatoire du signal x grâce à un algorithme qui réalise une sélection aléatoire de ¼ des échantillons du signal x.

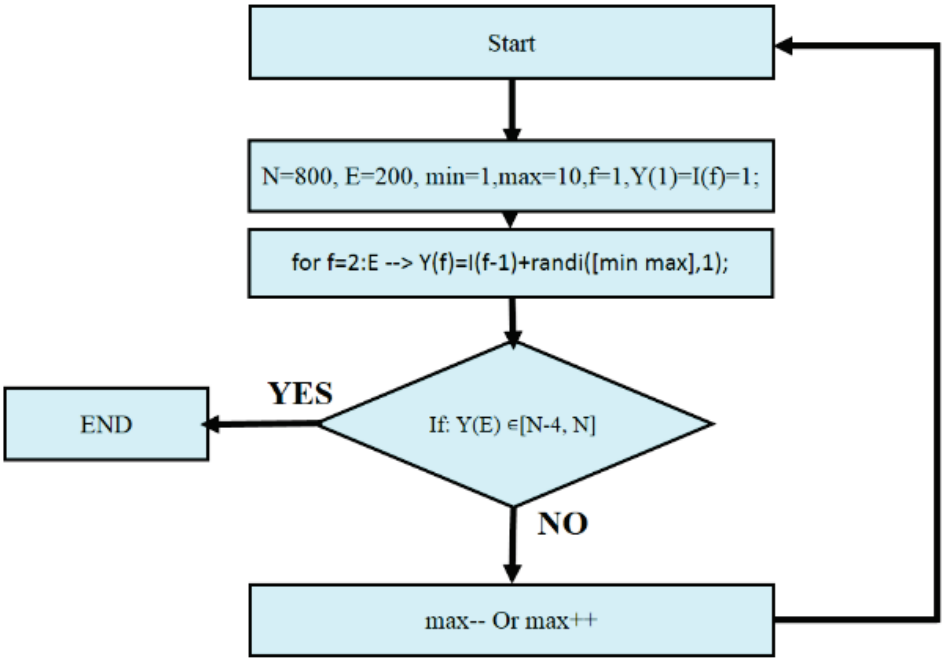


Figure IV-12 Echantillonnage aléatoire

BY-NC-ND

Cet algorithme va échantillonner aléatoirement un signal *x* de longueur N pour aboutir un signal y de E échantillons. Le taux d'échantillonnage est de 4 qui va correspondre au ¼ des indices Y(f) du signal *x*. La dernier indice Y(E) de y doit être compris entre [N-4, N]. Le signal y créé, nous pouvons déterminer la matrice de mesure et vérifier la cohérence entre cette matrice et la matrice de domaine tout en déterminant la loi de sélection aléatoire. Faire la simulation du CS en passant par cet algorithme permet de générer un code random que l'on peut appliquer sur les nœuds de capteurs sans fils.

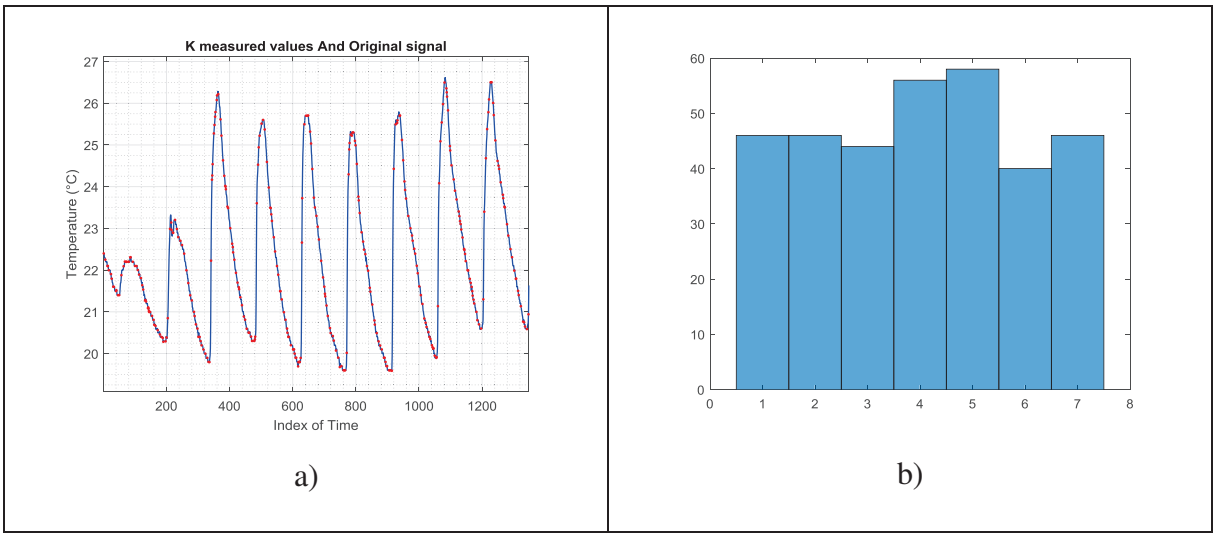


Figure IV-13 a) Signal d'origine (Bleu) et signal échantillonné (Rouge), b) Répartition fréquentielle des échantillons

Dans ce deuxième test, la figure IV-13 montre une répartition fréquentielle des échantillons respectant plus ou moins l'équiprobabilité (Loi de distribution uniforme). Dans cet exemple le coefficient d'incohérence μ(A) est aussi égal à 1,41. Appliquer cet algorithme dans les nœuds génère des économies d'énergie.

IV.3.3. Reconstruction d'un signal par CS

La matrice de représentation $A = \Phi \times \Psi$ ainsi connue, nous avons maintenant tous les paramètres pour effectuer la reconstruction du signal par CS comme décrit dans la figure IV-14.

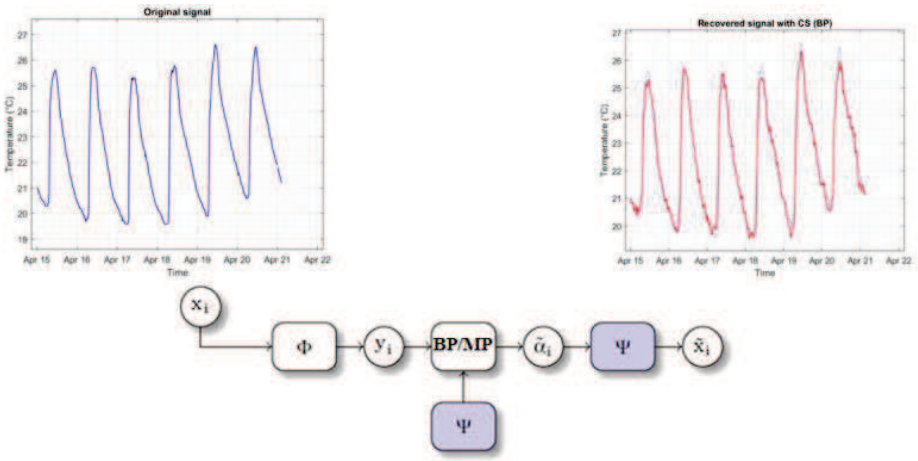


Figure IV-14 Etapes de reconstruction de x_i

BY-NC-ND

Nous allons considérer comme signal d'origine le signal x de longueur N=1348.

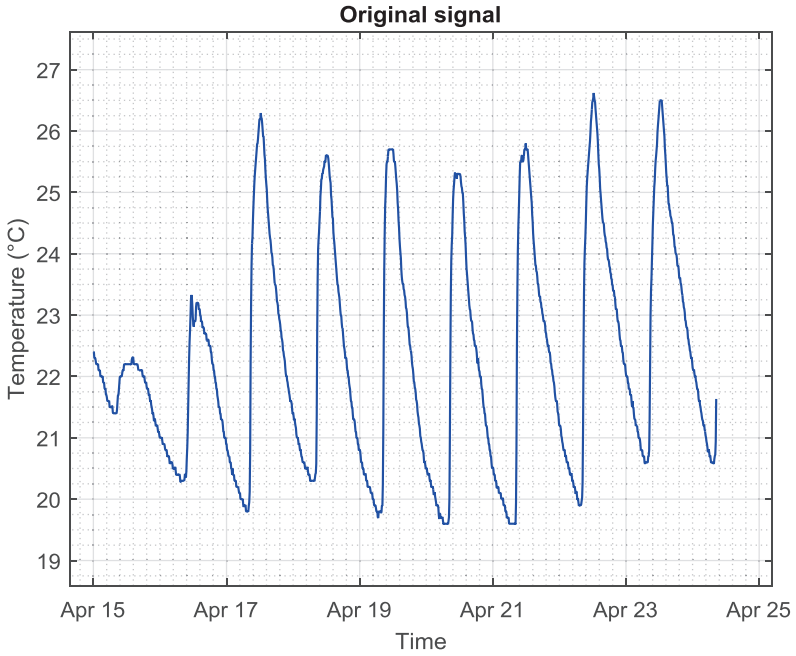
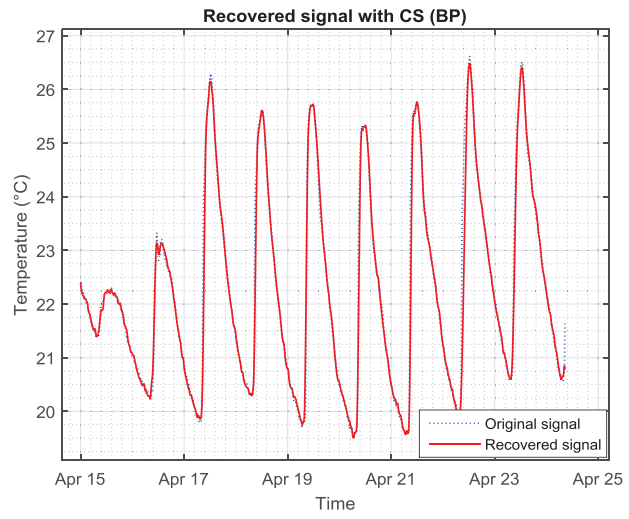


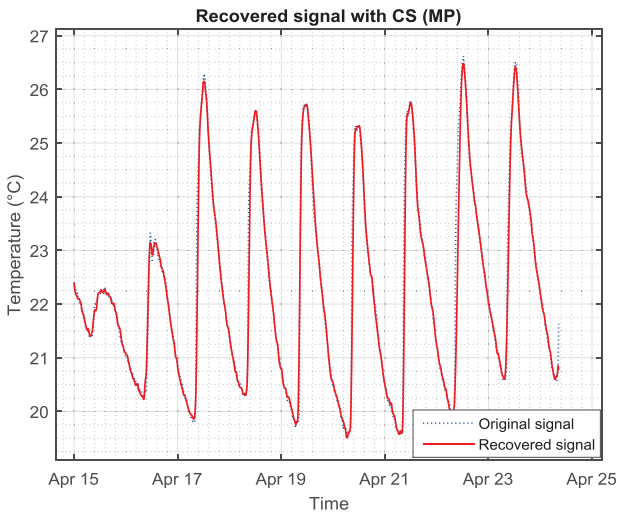
Figure IV-15 Signal de température

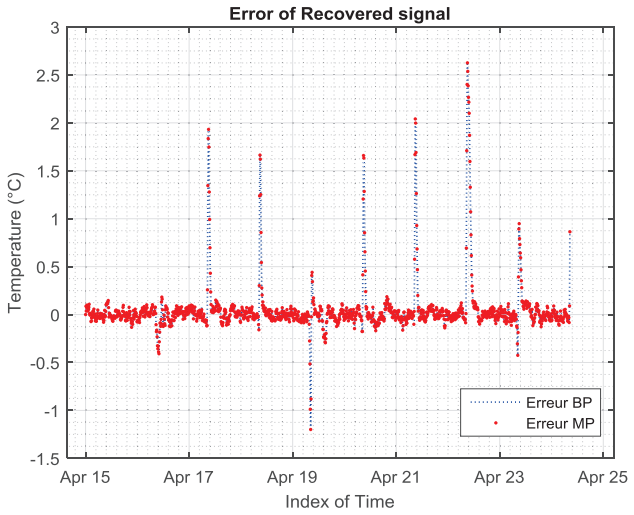
A partir de ce signal x, nous allons faire quatre échantillonnages dont les facteurs de compressions (CF) seront égaux à 2, 3, 4 et 5.

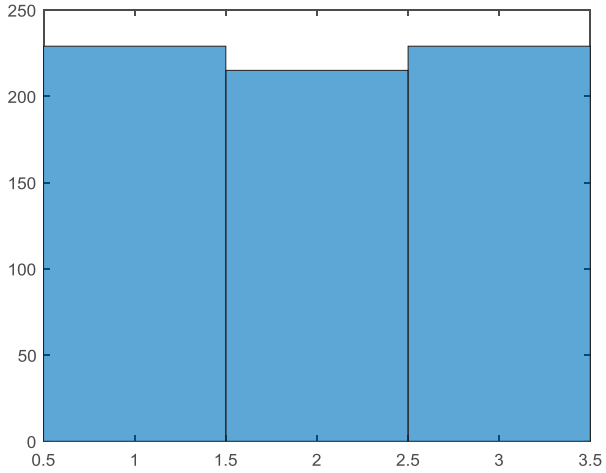
BY-NC-ND

➢ Reconstruction d'un signal échantillonné avec un CF=2 :







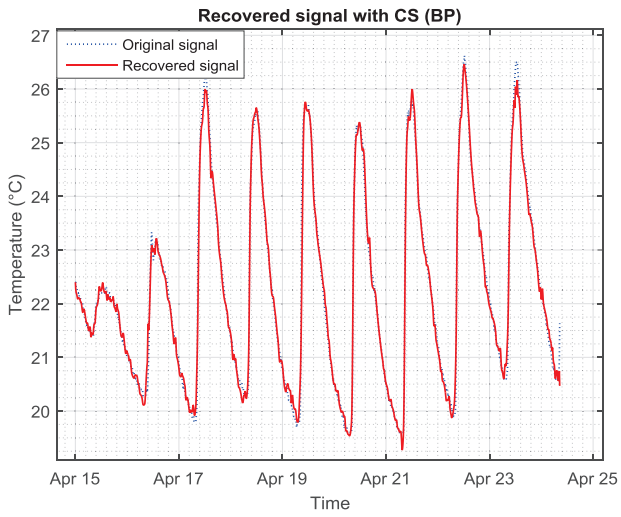


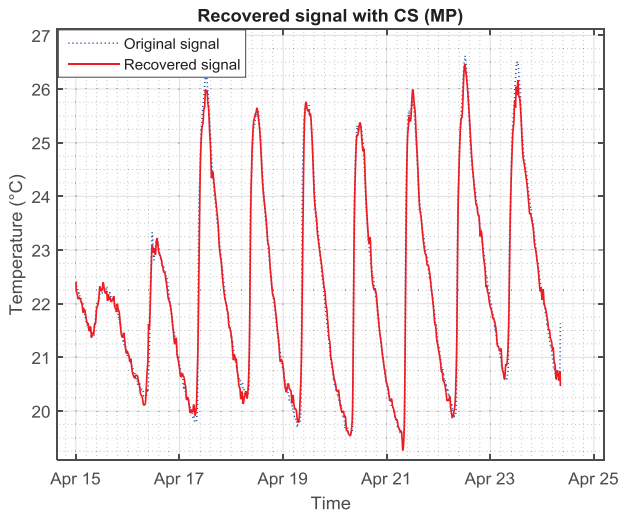
CF=2 ; CR=50% ; BP_PRD[%]= 1,329; MP_PRD[%]= 1,335; BP_Cor[%]= 98,95; MP_Cor[%]= 98,94; N=1348 ; Y=674.

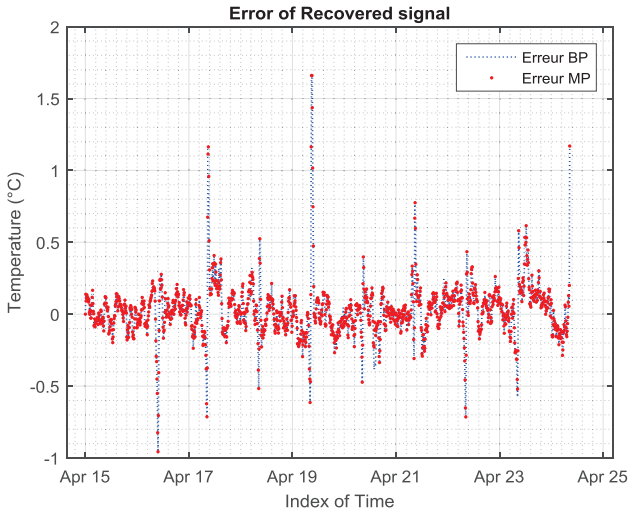
Figure IV-16 Reconstruction du signal avec un CF=2

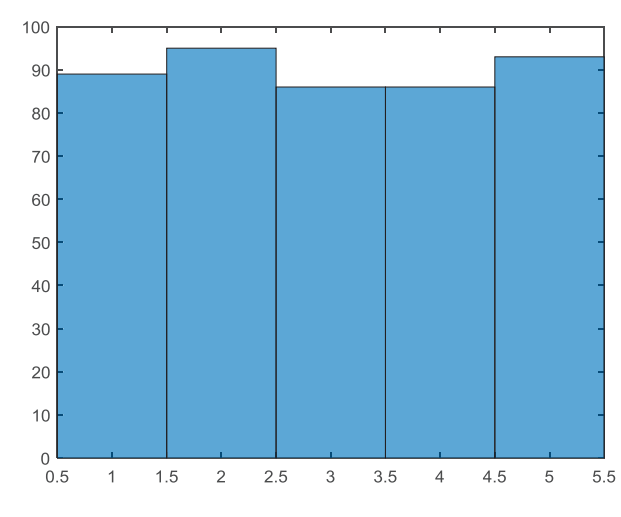
BY-NC-ND

➢ Reconstruction d'un signal échantillonné avec un CF=3 :







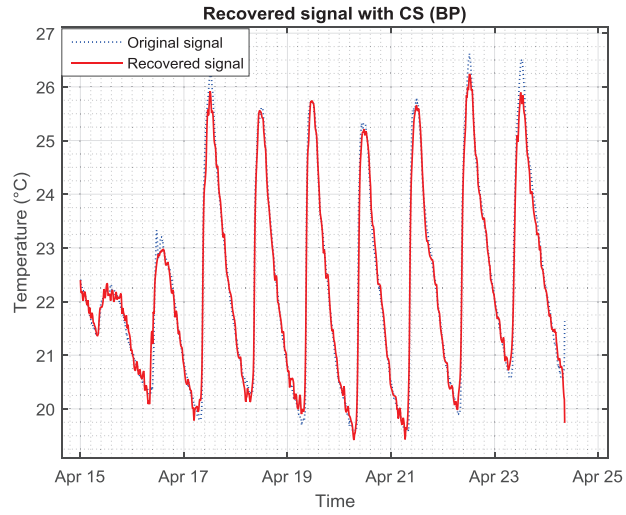


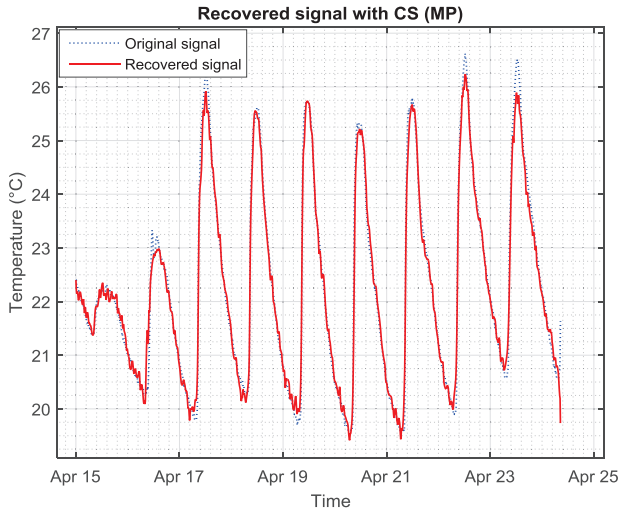
CF=3 ; CR=66.61% ; BP_PRD[%]=0,85; MP_PRD[%]=0,84; BP_Cor[%]= 99,50; MP_Cor[%]= 99,51; N=1348 ; Y=450.

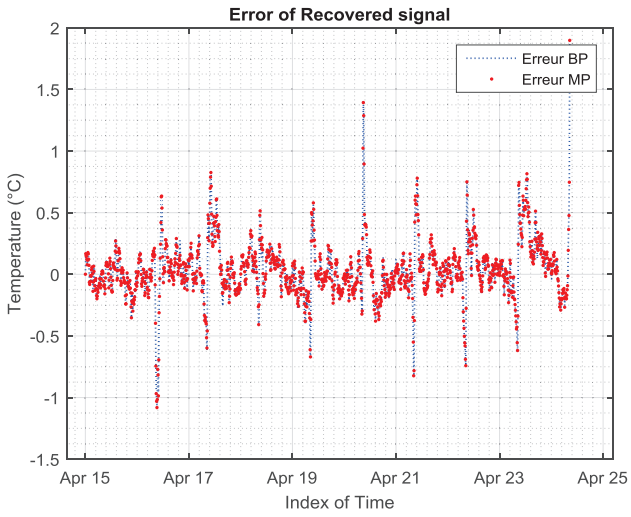
Figure IV-17 Reconstruction du signal avec un CF=3

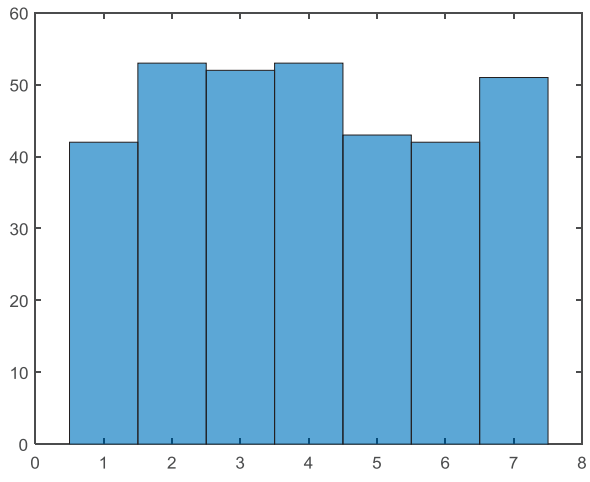
BY-NC-ND

➢ Reconstruction d'un signal échantillonné avec un CF=4 :







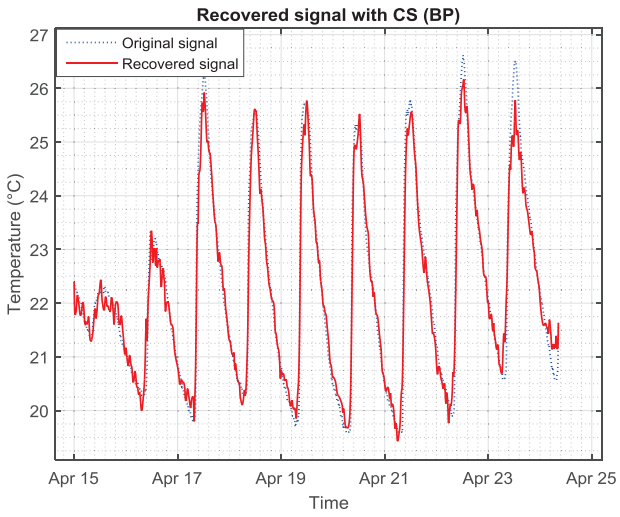


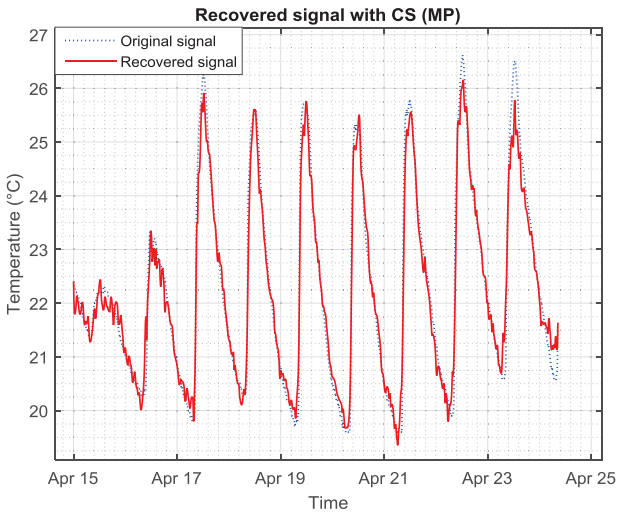
CF=4 ; CR=75% ; BP_PRD[%]=1,059; MP_PRD[%]=1,057; BP_Cor[%]= 99,314; MP_Cor[%]= 99,318 ; N=1348 ; Y=337.

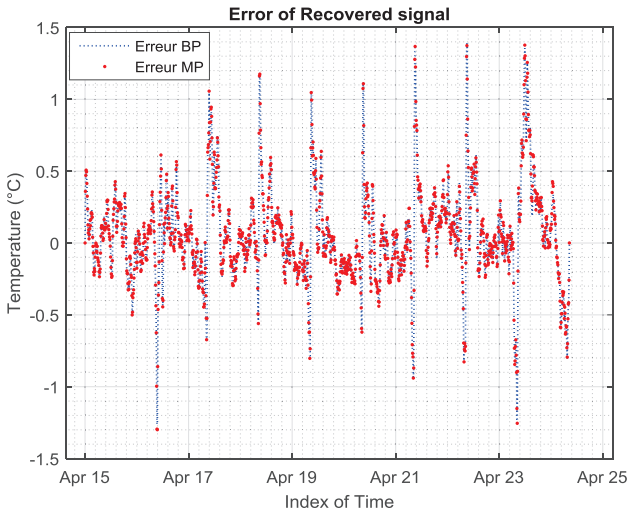
Figure IV-18 Reconstruction du signal avec un CF=4

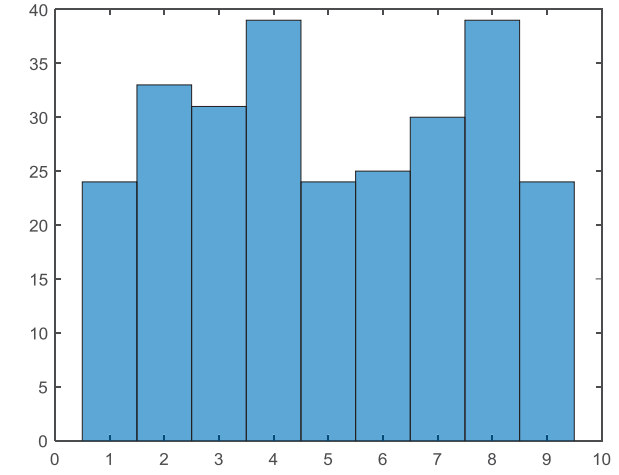
BY-NC-ND

➢ Reconstruction d'un signal échantillonné avec un CF=5 :









CF=5 ; CR=80% ; BP_PRD[%]=1,49; MP_PRD[%]= 1,50; BP_Cor[%]= 98,74; MP_Cor[%]=98,73 ; N=1348 ; Y=270.

Figure IV-19 Reconstruction du signal avec un CF=5

BY-NC-ND

Les résultats de simulation sont résumés dans le tableau IV-3.

	Longueur du signal x	Longueur du signal y	CF/CR [%]	Ran[Min Max]	BP_PRD/ MP_PRD	Cor[%] BP / MP
Ech. 1	N=1348	M=674	2 / 50	[1 3]	**0,88 / 0,85**	**99,45 / 99,5**
Ech. 2	N=1348	M=450	3 / 66.61	[1 5]	**0,85 / 0,93**	**99,50 / 99,42**
Ech. 3	N=1348	M=337	4 / 75	[1 7]	**1,06 / 1,06**	**99,27 / 99,32**
Ech. 4	N=1348	M=270	5 / 80	[1 9]	**1,61 / 1,64**	**98,38/ 98,38**
Ech. 5	N=1348	M=225	6 / 83	[1 11]	**1,88 / 1,89**	**97,78/ 97,76**

Tableau IV-2 Les résultats de reconstructions

Le coefficient de corrélation (Cor) linéaire de deux signaux X et Y est égal à la covariance de X et Y (Cov(X,Y)) divisée par le produit des écarts-types de X et Y ($\sigma_X \sigma_Y$).

$$Cor(X,\mathrm{Y}) == \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \tag{IV.22}$$

La simulation du CS nous a permis de déterminer les paramètres de compressions à appliquer à un nœud de capteur. La fiabilité de la reconstruction a été observée sur plusieurs ratios de compression (CR). En analysant la qualité de reconstruction par rapport au paramètre PRD, la qualité de reconstruction est très bonne sur l'ensemble de taux de compression. Enfin le facteur de compression (CF) est le coefficient d'amélioration de la durée de vie des nœuds.

IV.4. Application du CS sur les nœuds de capteurs du réseau

Pour appliquer le CS dans le réseau de capteurs déployé, nous nous sommes basés sur des résultats obtenus en simulation. Les tests effectués en simulation avec un CF de 2 à 5 ont donnés de bons résultats. Le choix du taux de compression ne se fera pas uniquement sur le CF qui impacte la durée de vie du réseau. Le choix est conditionné par la sensibilité et le bruit sur les mesures des capteurs qui ont été introduits sur l'ensemble des tests, le paramètre déterminant pour le choix de la compression est alors l'erreur moyenne de reconstruction. Nous allons donc programmer nos nœuds avec un CF=3 qui est le bon compromis entre le rythme de mesure aléatoire, l'amélioration de la durée de vie des nœuds et l'erreur de reconstruction. Les nœuds effectueront une compression de mesure de 1/3, par rapport au programme initial qui échantillonnait toutes les 10 minutes.

BY-NC-ND

La compression des mesures est basée sur l'algorithme de la figure IV-20 qui met en évidence la façon dont les nœuds vont sélectionner leurs échantillonnages.

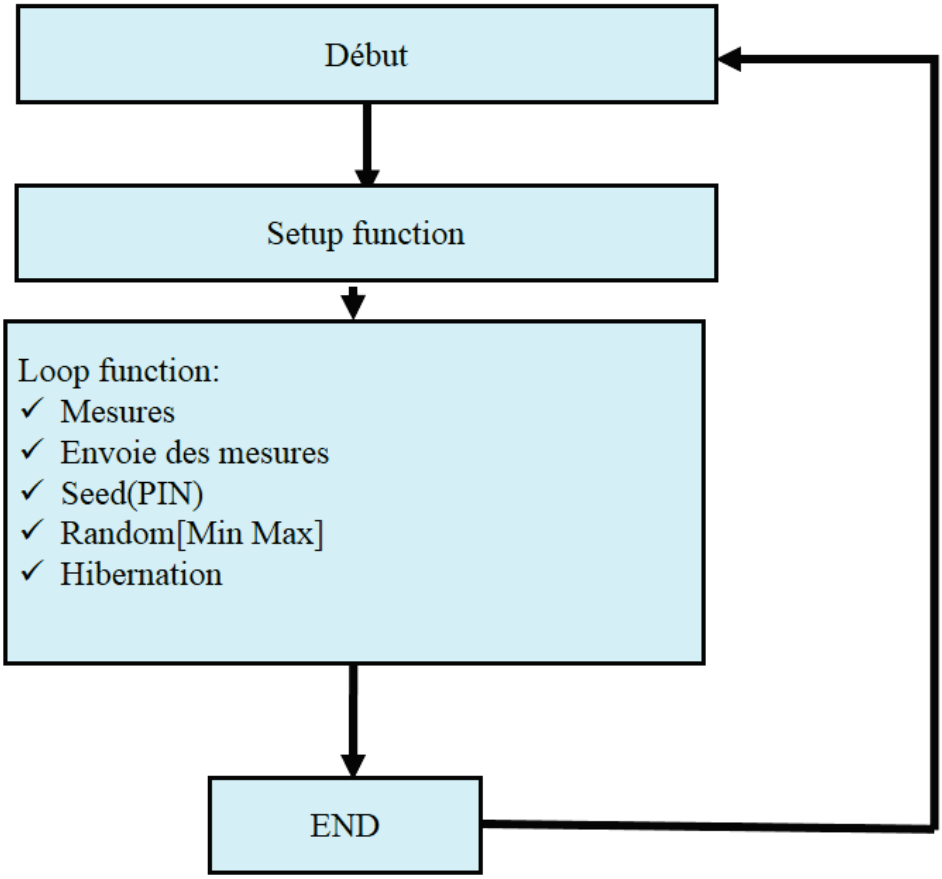


Figure IV-20 Exécution du code CS dans les Nœuds

Le programme des nœuds de capteurs débute par l'exécution de la fonction d'initialisation (Setup function) qui est déjà optimisée. Ensuite il passe à la fonction de lecture en boucle (Loop function), où il effectue les mesures des capteurs puis l'envoi des données. La durée d'hibernation est choisie aléatoirement à l'aide d'un tirage aléatoire d'un nombre de périodes compris entre h_{min} et h_{max} par la fonction *random*. Afin de renforcer le caractère aléatoire de ce tirage la graine (« seed ») de la fonction est déterminée par le résultat de la mesure de la tension analogique d'une broche du circuit non connectée. L'étape de reconstruction est ensuite menée au niveau du centre de fusion pour obtenir une estimation du signal initial.

Nous avons effectué un test, pour montrer que le code de reconstruction du CS appliqué aux nœuds de capteurs permet de restaurer fidèlement le signal initial. Le test consiste à installer deux nœuds de capteurs dans la même pièce à proximité l'un de l'autre. Le premier nœud fait un échantillonnage périodique du signal toutes les 10 minutes. Le deuxième nœud quant à lui, est programmé avec un code CS de CF=3.

Nous remarquons qu'entre les signaux initial et compressé (figure IV-21), il existe déjà une erreur absolue qui est de +/- 0.5 dégrées.

BY-NC-ND

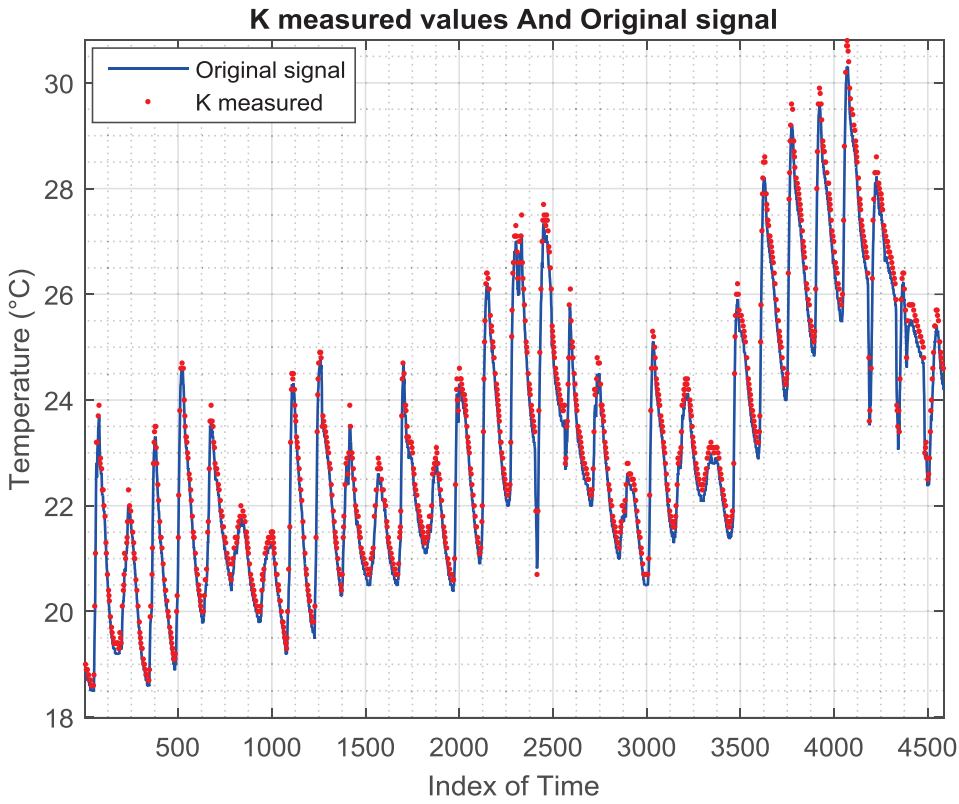
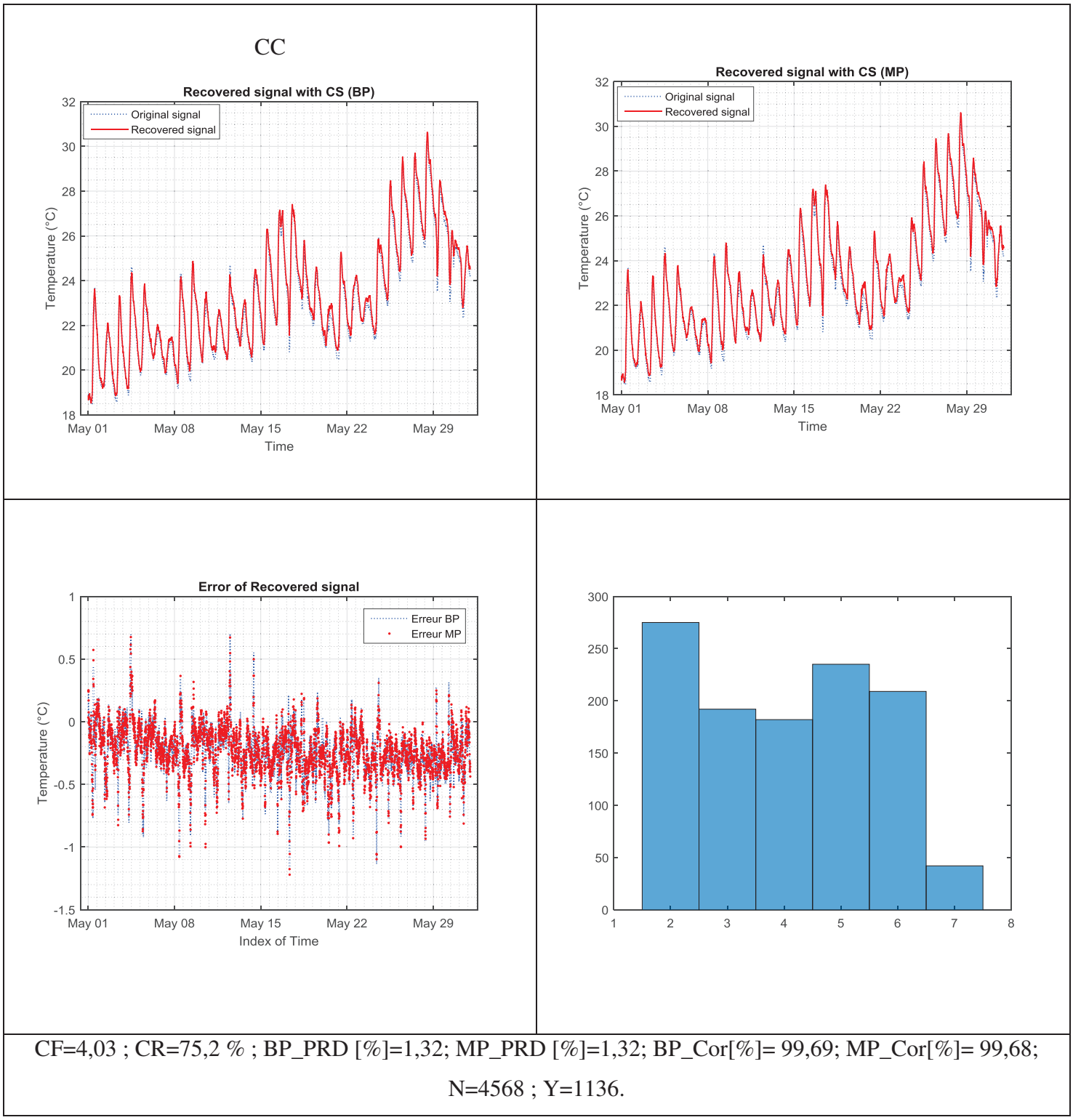


Figure IV-21 Signal d'origine (Bleu) et signal échantillonné (Rouge)

BY-NC-ND

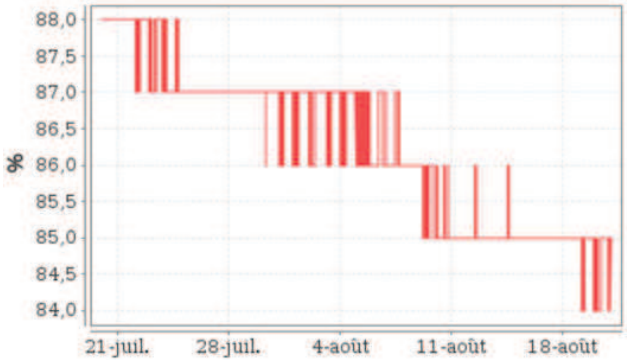


CF=4,03 ; CR=75,2 % ; BP_PRD [%]=1,32; MP_PRD [%]=1,32; BP_Cor[%]= 99,69; MP_Cor[%]= 99,68; N=4568 ; Y=1136.

Figure IV-22 Reconstruction du signal avec un CF=4,03

Le résultat de la figure IV-22, montre une très bonne reconstruction par rapport à l'évaluation de Yaniv Zigel et al. [129]. Pour vérifier l'efficacité du CS, nous avons vérifié le niveau de la batterie entre le nœud synchrone et un nœud intégrant le code CS sur un mois (figure IV-23). Les résultats montrent une consommation de 2 % (par rapport à la capacité du la batterie) sur le nœud avec le code CS, et une consommation de 4 % sur le nœud de transmission synchrone. Sur la période on constate une réduction de moitié de la consommation dans le nœud exécutant le code du CS.

BY-NC-ND



a) Nœud synchrone

b) Nœud code CS

Figure IV-23 Niveau de batterie

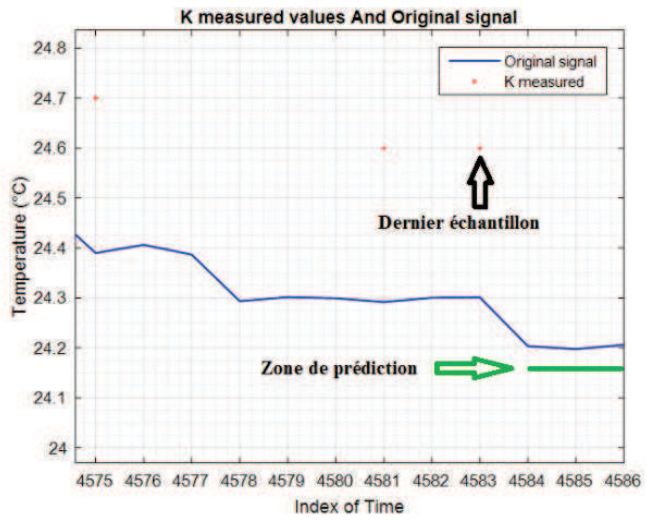
Dans ce document nous utilisons le CS à des fins de compression de données et d'optimisation de consommation énergétique. Il peut aussi être utilisé à des fins prédictives.

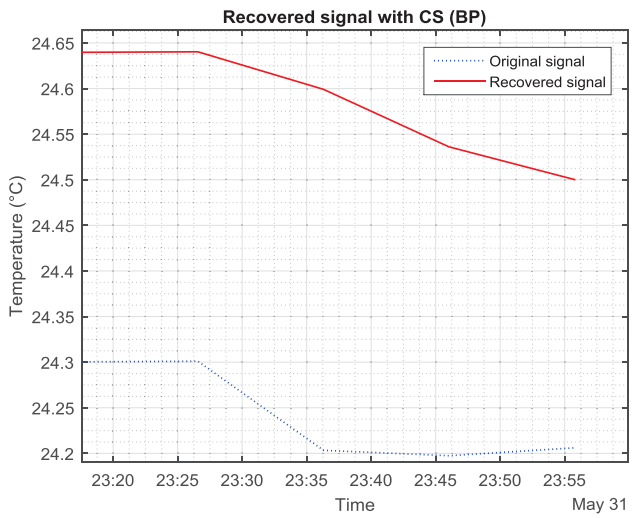
Si on considère une matrice de mesure Φ telle que :

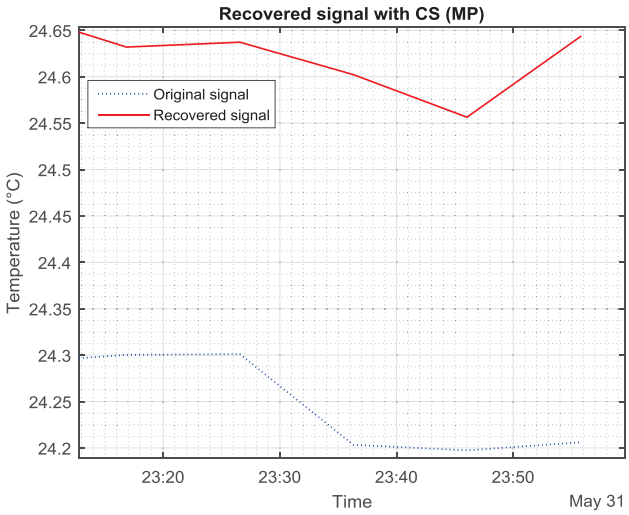
$$\Phi_{M\times N} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

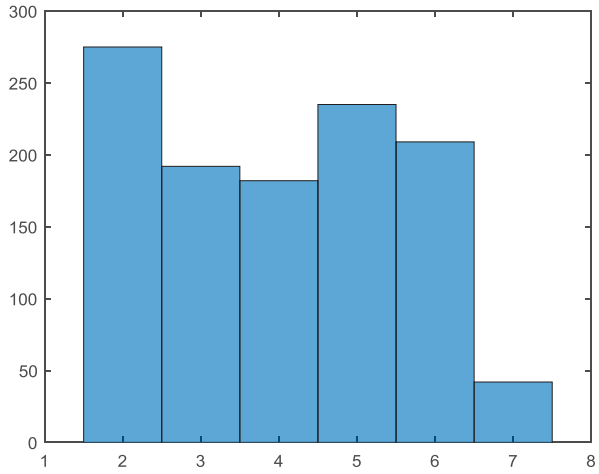
Dans cette matrice le nombre de lignes correspond à la longueur du signal compressé, et dans chaque colonne la valeur 1 représente l'instant où la trame a été envoyée. Pour pouvoir faire une prédiction les mesures à venir (30 prochaines minutes dans notre cas), on rajoute un nombre colonne à 0 correspondant aux prochaines périodes d'échantillonnages (3 périodes dans notre cas).

BY-NC-ND









CF=4,03 ; CR=71.97% ; BP_PRD[%]=1,32; MP_PRD[%]=1,32; BP_Cor[%]= 99,69; MP_Cor[%]= 99,68; N=4586 ; Y=1136.

Figure IV-24 Reconstruction prédictive

En se basant sur le signal de la figure IV-21, nous effectuons une reconstruction avec un CF=4,03 et une prédiction sur les 3 dernières périodes. Pour cela, le signal de mesure va s'arrêter à l'indice 4050 du signal x. Ainsi en effectuant la reconstruction de x sur une longueur de 4586 points, on va effectuer une prédiction sur les 3 derniers échantillons.

La prédiction des trois instants nous a donné des valeurs avec une erreur en [+0.3 ; +0.4] °C pour les deux résolutions (BP et MP). Cette erreur est inférieure à l'erreur relative du capteur DHT22 qui est de +/- 0.5 °C. On peut donc appliquer le CS à des faits prédictifs pour pouvoir anticiper les actions.

BY-NC-ND

IV.5. CS spatio-temporel

La mesure de certains paramètres du bâtiment, la température notamment, indique une forte corrélation spatiale entre les différents capteurs. Cette corrélation spatiale doit pouvoir être exploitée pour réduire encore le nombre de mesures nécessaires pour reconstituer l'état du bâtiment. Cette approche a été utilisée par de nombreux auteurs pour procéder à un échantillonnage aléatoire dans l'espace, qui permet de réduire l'énergie consommée par le réseau [131] [132]. Cependant la plupart de résultats présentés s'appuient sur une grille spatiale déterminée pour obtenir la base de décomposition parcimonieuse. Dans notre cas nous souhaitons nous appuyer sur une liste de capteurs dont la position dans l'espace est elle aussi aléatoire, c'est-à-dire que les capteurs ne sont pas répartis sur une grille spatiale déterminée. Les techniques de décomposition suivant la DCT ou la transformée en ondelettes ne sont donc pas applicables directement. Dans le cadre d'un projet de la fédération de recherche MIRES nous avons ouvert l'accès aux données aux collègues de Poitiers et avons travaillé sur deux approches du CS spatio-temporel. Ces deux approches reposent sur une décomposition de la répartition spatiale des mesures identique et différent dans les algorithmiques implantées au niveau des capteurs. L'approche dite « CS spatial » exposée ci-après a été mise en œuvre par nos collègues de Poitiers à partir des mesures réalisées sur la plateforme. Nous avons pour notre part cherché un algorithme (dit « CS spatio-temporel par produit de Kronecker ») compatible avec les programmes implantés au niveau des nœuds de capteurs.

IV.5.1. Recherche d'une base de projection spatiale parcimonieuse

La recherche d'une base de projection repose sur l'analyse en composantes principales (PCA) de la matrice de covariance telle qu'elle est décrite dans [133]. Si l'on définit la matrice des mesures effectuées par N capteurs à K instants par $\boldsymbol{X} = \{x_{kn}\} 1 \leq k \leq K, 1 \leq n \leq N$, on a à chaque instant k un vecteur de mesures $\boldsymbol{x_k} = \{x_{k1}, x_{k2}, \cdots, x_{kN}\}$ et le vecteur moyenne temporelle $\overline{\boldsymbol{x}} = \{\overline{x_1}, \overline{x_2}, \cdots, \overline{x_N}\}$. La matrice de covariance entre les différentes mesures est donnée par

$$\sum = \frac{1}{K} \sum_{K=1}^{K} \left(x_k - \overline{x}\right) \bullet \left(x_k - \overline{x}\right)^T \tag{IV.23}$$

Et les auteurs prennent comme base de décomposition les composantes principales de la matrice de covariance soit

$$S_k \overset{def}{=} U_N^T \bullet \left(x_k - \overline{x}\right) \tag{IV.24}$$

BY-NC-ND

$$\left(x_k - \overline{x}\right) \overset{def}{=} U_N \bullet S_k \quad avec \quad U_N \cdot U_N^T = I \tag{IV.25}$$

Où $\boldsymbol{U_N}$ est la matrice constituée par les composantes principales de la matrice de covariance obtenue par une décomposition en valeurs singulières (SVD).

Connaissant le vecteur moyen $\overline{\boldsymbol{x}}$ et la matrice de covariance $\boldsymbol{\Sigma}$ on peut reconstituer l'ensemble des valeurs des capteurs à partir d'une acquisition partielle des mesures en utilisant les algorithmes d'optimisation en norme l_1 déjà décrits précédemment.

IV.5.2. CS spatial

L'approche précédente a été mise en œuvre par nos collègues de Poitiers sur un ensemble de mesures de 13 capteurs (ceux disposés au 3ème étage du bâtiment). La méthode nécessitant la connaissance de la moyenne et de la variance des mesures elle nécessite une phase d'apprentissage où tous les capteurs du réseau vont émettre leurs données. La durée de cette phase est le résultat de K transmissions synchrones l'ensemble des capteurs du réseau. La moyenne des mesures et la matrice de covariance spatiale sont calculées à partir de ces données.

La phase d'échantillonnage aléatoire consiste alors à sélectionner L nœuds parmi N pour envoyer des données à l'instant *k.* Ceci est réalisé par un tirage aléatoire qui autorise une transmission avec une probabilité égale à L/N. Avec les signaux des L capteurs récupérés, on applique le CS pour reconstruire l'ensemble des mesures des N-L nœuds qui n'ont pas transmis leurs données (figure IV-25).

BY-NC-ND

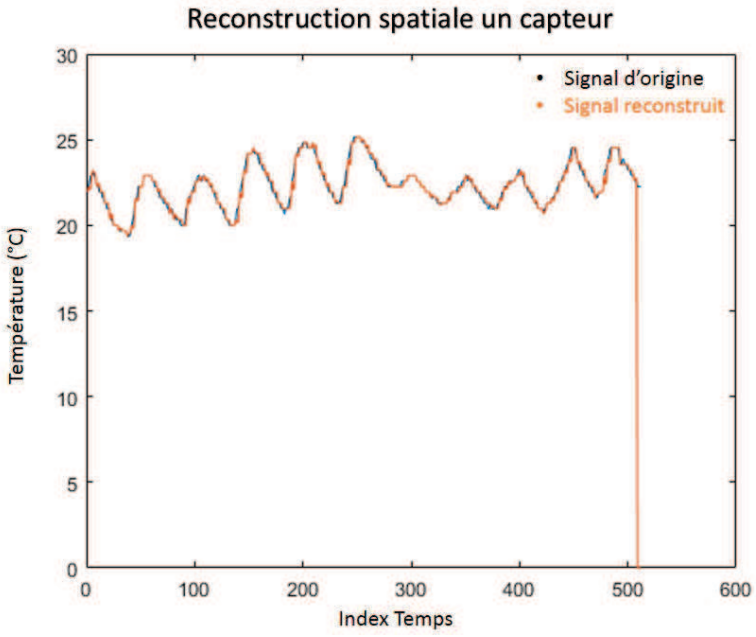


Figure IV-25 Reconstruction temporelle des mesures au niveau d'un nœud avec L= 4 et N= 13

La méthode du « CS spatial » donne de bons résultats pour des facteurs de compression spatiale de l'ordre de 4. Cependant la phase d'apprentissage nécessaire pour mesurer la moyenne et la covariance des mesures vient réduire de façon significative le facteur de compression global. La méthode sera particulièrement efficace pour des signaux stationnaires. Par ailleurs cette approche nécessite de changer l'algorithme d'acquisition implanté au niveau des capteurs entre les phases d'apprentissage et de mesure aléatoire. Nous avons donc envisagé une approche alternative qui ne nécessite pas de phase d'apprentissage.

IV.5.3. CS spatio-temporel par produit de Kronecker

La recherche d'une base de représentation parcimonieuse pour des signaux multidimensionnels a conduit certains auteurs à introduire le concept de « Kronecker Compressive Sensing » [134].

Concrètement on considère un signal multidimensionnel représenté par la matrice de mesures qui admet une représentation parcimonieuse suivant ses différentes dimensions. Par exemple si un signal bidimensionnel de mesures $\boldsymbol{X} = \{x_{kn}\} 1 \leq k \leq K, 1 \leq n \leq N$ peut être représenté dans une base de Fourier les lignes et colonnes de la transformée $\boldsymbol{S}$ de $\boldsymbol{X}$ sont les transformées de Fourier d'ordre N et K respectivement.

$$S_k = W_N \cdot x_K \quad où \quad W_N = \left\{ e^{-\frac{2\pi i \cdot j}{N}} \right\} \quad 0 \leq i, j \leq N-1 \tag{IV.26}$$

$$S_n = W_K \cdot x_n \quad où \quad W_K = \left\{ e^{-\frac{2\pi i \cdot j}{K}} \right\} \quad 0 \leq i, j \leq K-1 \tag{IV.27}$$

Alors on peut définir les vecteurs $\boldsymbol{V_X}$**=vec(***X***)** *et* $\boldsymbol{V_S}$**=vec(***S***)** constitués de l'empilement des colonnes de $\boldsymbol{X}$ et $\boldsymbol{S}$ respectivement. Ces vecteurs sont liés par la transformation de matrice $\boldsymbol{W}$ obtenue en effectuant le produit de Kronecker des matrices transformées des lignes et des colonnes.

BY-NC-ND

$$V_s = W \cdot V_X \quad où \quad W = W_N \otimes W_K \tag{IV.28}$$

La propriété du produit de Kronecker des matrices de transformation est généralisable à un nombre de dimension supérieur à 2 ou à d'autres transformations que la transformation de Fourier.

Dans notre cas nous combinons la transformation en cosinus discrète utilisée dans le domaine temporel avec la transformation spatiale basée sur la décomposition en composantes principales exposée précédemment. La transformation résultante est donc

$$W = U_N^T \otimes DCT_K \tag{IV.29}$$

Si on considère les mesures réalisées sur les 13 capteurs du 3ème étage représentées à la Figure IV-26 : Ensemble des mesures des capteurs placés au 3ème étage entre le 20/09/2016 à 0h00 et le 21/09/2016 à 23h59 on peut calculer la transformée du champ de température spatio-temporel $\boldsymbol{V_x}$. Cette transformée est représentée à la Figure IV-27 : Spectre du vecteur champ spatio-temporel obtenu par la transformation $\boldsymbol{W}$. On retrouve N ilots de fréquences spatio-temporelles qui correspondent aux N valeurs singulières de la transformation SVD. Le nombre de composantes dont la valeur est supérieure à 1% de la valeur maximum est de 323 dans ce cas.

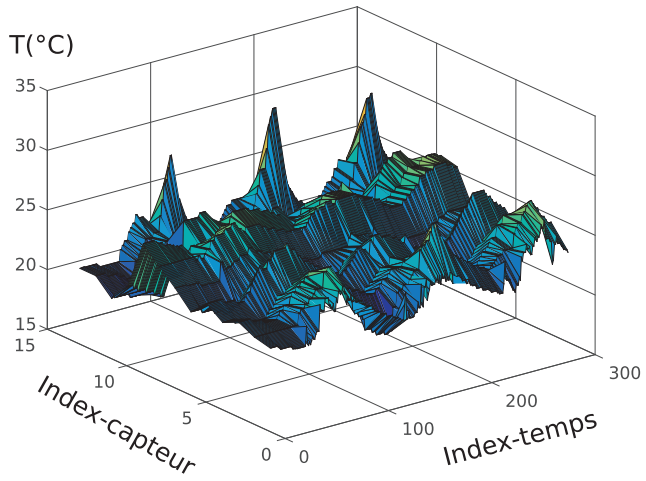


Figure IV-26 : Ensemble des mesures des capteurs placés au 3ème étage entre le 20/09/2016 à 0h00 et le 21/09/2016 à 23h59

BY-NC-ND

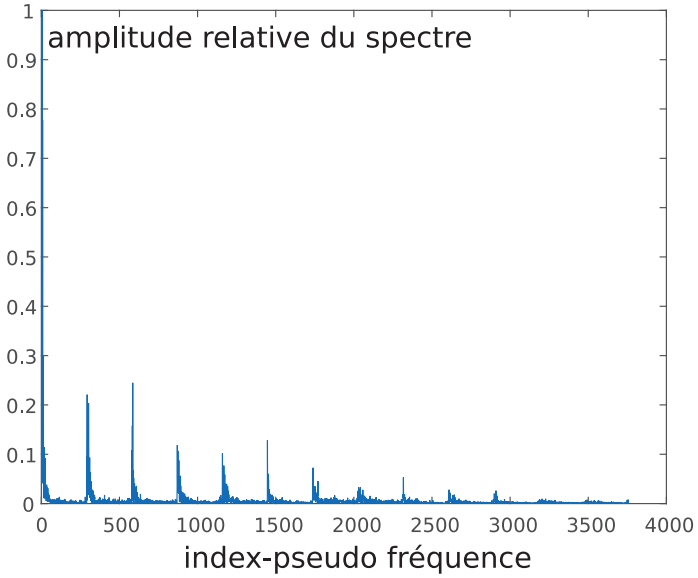


Figure IV-27 : Spectre du vecteur champ spatio-temporel obtenu par la transformation $\boldsymbol{W}$. On retrouve N ilots de fréquences spatio-temporelles qui correspondent aux N valeurs singulières de la transformation SVD. Le nombre de composantes dont la valeur est supérieure à 1% de la valeur maximum est de 323 dans ce cas.

On peut donc raisonnablement envisager d'appliquer la méthode du CS en prenant pour matrice de transformation ψ la matrice $\boldsymbol{W^T}$**.** La matrice de mesure $\boldsymbol{A}$ est alors donnée par $\boldsymbol{A = \Phi \cdot W^T}$ et le recouvrement du champ de température est obtenu par la minimisation l_1 du spectre du signal spatiotemporel. L'application du CS spatio-temporel sur la première période sélectionnée du 20/09/2016 à 0h00 au 21/09/2016 à 23h59 a soulevé certains problèmes de corrélations. Ces problèmes viennent de la transmission synchrone des données qui génère du bruit pendant la reconstruction.

La deuxième application du CS spatio-temporel a été effectuée sur une nouvelle période d'échantillonnage du 16/02/2018 au 22/02/2018 dans laquelle les nœuds sont programmés avec le code CS. Une comparaison entre les mesures initiales et le signal reconstruit est donnée aux Figure IV-28 : Comparaison des signaux initiaux et reconstruits avec un facteur de compression de 5. Figure IV-29 Comparaison des signaux initiaux et reconstruits avec un facteur de compression de 10 pour des facteurs de compression de 5 et 10 respectivement. Les signaux sont correctement restitués après l'application du CS spatio-temporel.

BY-NC-ND

Figure IV-28 Comparaison des signaux initiaux et reconstruits avec un facteur de compression de 5.

BY-NC-ND

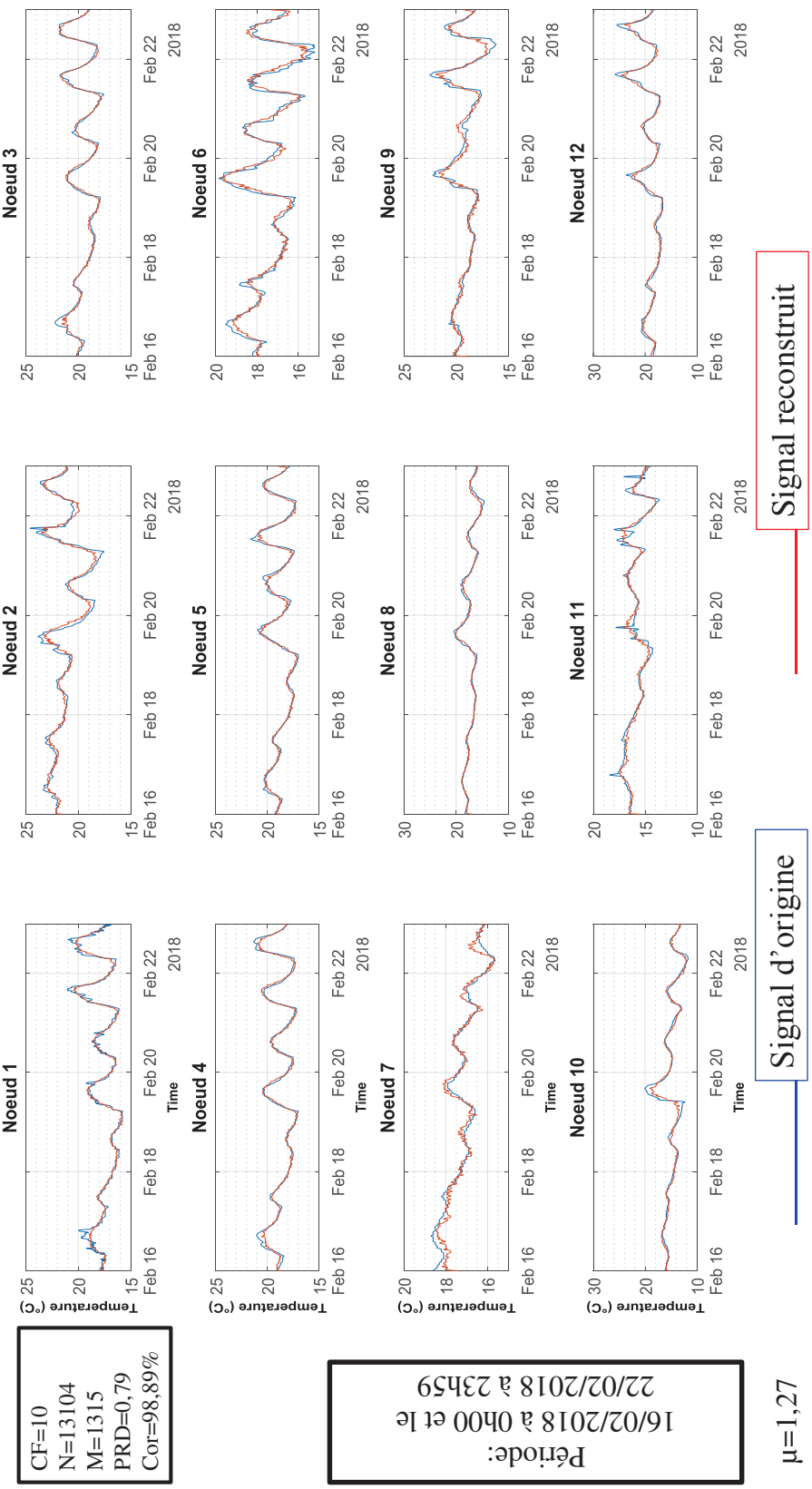


Figure IV-29 Comparaison des signaux initiaux et reconstruits avec un facteur de compression de 10.

BY-NC-ND

IV.6. Conclusion

Enfin le chapitre quatre nous a permis de mettre en œuvre une optimisation de la couche application. Cette optimisation est basée sur la technique du Compressive Sensing (CS), qui permet d'obtenir des réductions très significatives du nombre de mesures à réaliser. Ce nombre de mesures impacte directement la consommation des capteurs et représente un facteur clé de l'optimisation de la durée de vie des capteurs. Les performances de la méthode ont été évaluées pour l'acquisition temporelle des signaux au niveau d'un capteur ainsi que pour l'acquisition spatiale mettant en œuvre plusieurs capteurs – cette dernière évaluation ayant été réalisée à partir des données issues de la plateforme par nos collègues de Poitiers- . Finalement une approche spatio-temporelle a été menée sur ces ensembles de capteurs avec de très bons résultats. Certains problèmes rencontrés, comme les remontées de bruit par exemple ont été résolus. D'autres approches théoriques pour déterminer les bases de décomposition optimisées ainsi que le choix des algorithmes d'optimisation seront nécessaires pour améliorer l'application du CS spatio-temporel.

Néanmoins l'optimisation menée révèle un grand potentiel pour l'optimisation énergétique des réseaux de capteurs d'une part mais aussi pour la mise au point d'un modèle de bâtiment intelligent à partir d'un apprentissage basé sur les mesures.

BY-NC-ND

Conclusion

En conclusion dans l'ensemble des chapitres, nous avons proposé le déploiement et l'optimisation d'un réseau de capteurs sans fil pour une application de bâtiment intelligent.

En premier lieu, nous avons commencé par présenter les généralités sur les réseaux sans fil, plus précisément sur les réseaux de capteurs. Cette étude nous a permis de prendre connaissance de quelques types de protocoles existants et des topologies qu'ils génèrent.

Dans le deuxième chapitre, nous avons décrit les différents types d'optimisations qui peuvent s'effectuer dans un réseau de capteurs sans fil. Ces méthodes d'optimisations peuvent être matérielles ou logicielles. La première optimisation est matérielle, elle passe par l'ajout d'un organe de récupération d'énergie qui va apporter une efficacité énergétique significative voir une autonomie totale selon le type de source d'énergie. Nous avons ainsi fait une étude sur l'ajout d'un organe de récupération d'énergie de type panneau solaire. Les résultats ont montré qu'il est possible de rendre autonome un nœud installé dans une pièce éclairée par la lumière naturelle et artificielle à certains niveaux d'éclairage. La deuxième méthode d'optimisation est logicielle, elle s'appuie sur les couches protocolaires de la norme utilisée dans le réseau de capteurs sans fil. Dans cette thèse nous avons utilisé la norme ZigBee, plus précisément le standard 802.15.4, et nous avons montré les améliorations que l'on peut apporter sur chaque couche. En commençant par la couche physique qui permet de déterminer les caractéristiques physiques des nœuds, le type de topologie (protocole utilisé) selon la zone d'installation du réseau, l'étude radio des canaux de transmissions a permis de déterminer le meilleur canal,… ensuite la couche MAC quant à elle permet d'étudier l'accès au canal, les retransmissions, les corrections d'erreurs,… Et en dernier la couche application qui est l'interface entre l'utilisateur et le réseau de capteurs. Au niveau de cette couche on gère le type de mesures effectuées, la méthode de mesure et sa fréquence. Nous avons effectué l'optimisation de la couche application par l'application du CS.

Le troisième chapitre a permis de présenter la mise en œuvre de la plateforme d'acquisition de données du réseau de capteurs et celui des automates. Nous avons fait une description détaillée de l'installation du réseau de capteurs sans fil qui mesure les paramètres ambiants et l'état du bâtiment. Aussi nous avons présenté le réseau de mesure des énergies qui est un réseau d'automates en modbus TCP/IP.

Enfin le chapitre quatre nous a permis de faire une optimisation de la couche application du standard 802.15.4. Cette optimisation est appliquée grâce au compressive Sensing (CS), qui permet de faire une réduction de mesures d'un facteur 3 dans notre réseau. La performance de cette méthode a été évaluée par la corrélation temporelle qui existe sur les mesures un nœud. Un second test d'évaluation a été effectué par l'équipe Xlim de Poitiers en exploitant la corrélation spatiale entre les nœuds de capteurs dans le réseau.

Les perspectives des travaux pour cette thèse seraient de :

- ✓ Développer un nœud autonome avec un module de récupération d'énergie
- ✓ Elargir la zone de couverture en intégrant un routage dynamique optimisé

BY-NC-ND

- ✓ Exploiter les corrélations temporelle et spatiale pour une reconstruction plus efficace.

BY-NC-ND

Références bibliographiques

[1] R. Lopes Pereira, J. Trindade, F. Gonçalves, L. Suresh, D. Barbosa, et T. Vazão, « A wireless sensor network for monitoring volcano-seismic signals », *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 14, nº 12, p. 3123‑3142, déc. 2014.

[2] K. Casey, A. Lim, et G. Dozier, « A Sensor Network Architecture for Tsunami Detection and Response », *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, vol. 4, nº 1, p. 27‑42, janv. 2008.

[3] C. Alippi, R. Camplani, C. Galperti, et M. Roveri, « A Robust, Adaptive, Solar-Powered WSN Framework for Aquatic Environmental Monitoring », *IEEE Sens. J.*, vol. 11, nº 1, p. 45‑55, janv. 2011.

[4] V. Jelicic, M. Magno, D. Brunelli, G. Paci, et L. Benini, « Context-Adaptive Multimodal Wireless Sensor Network for Energy-Efficient Gas Monitoring », *IEEE Sens. J.*, vol. 13, nº 1, p. 328‑338, janv. 2013.

[5] K. Shahzad et B. Oelmann, « A comparative study of in-sensor processing vs. raw data transmission using ZigBee, BLE and Wi-Fi for data intensive monitoring applications », in *2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS)*, 2014, p. 519‑524.

[6] N. Mendes, G. H. Oliveira, et H. X. De Araújo, « Building thermal performance analysis by using matlab/simulink », in *Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil*, 2001, p. 473–480.

[7] F. Pramudianto, J. Simon, M. Eisenhauer, H. Khaleel, C. Pastrone, et M. Spirito, « Prototyping the Internet of Things for the future factory using a SOA-based middleware and reliable WSNs », in *2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies Factory Automation (ETFA)*, 2013, p. 1‑4.

[8] M. Berning, T. Riedel, D. Karl, F. Schandinat, M. Beigl, et N. Fantana, « Augmented service in the factory of the future », in *2012 Ninth International Conference on Networked Sensing (INSS)*, 2012, p. 1‑2.

[9] P. van Zeijl *et al.*, « A Bluetooth radio in 0.18- mu;m CMOS », *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 37, nº 12, p. 1679‑1687, décembre 2002.

[10] K. Mikhaylov, N. Plevritakis, et J. Tervonen, « Performance Analysis and Comparison of Bluetooth Low Energy with IEEE 802.15.4 and SimpliciTI », *J. Sens. Actuator Netw.*, vol. 2, nº 3, p. 589‑613, août 2013.

[11] A. Shrestha et L. Xing, « A Performance Comparison of Different Topologies for Wireless Sensor Networks », in *2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security*, 2007, p. 280‑285.

[12] A. Darif, R. Saadane, et D. Aboutajdine, « Energy consumption of IR-UWB based WSN in a start topology », in *2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, 2014, p. 663‑667.

[13] M. G. Zanchi, « Comparison of Classic Bluetooth and BLE Technical Specifications ». [En ligne]. Disponible sur: http://litepoint.com/whitepaper/Bluetooth%20Low%20Energy_WhitePaper.pdf. [Consulté le: 21-juill-2017].

[14] M. Choi, W. K. Park, et I. Lee, « Smart Office Energy-Saving Service Using Bluetooth Low Energy Beacons and Smart Plugs », in *2015 IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems*, 2015, p. 247‑251.

BY-NC-ND

[15] « IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirement Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) », *IEEE Std 802154a-2007 Amend. IEEE Std 802154-2006*, p. 1‑203, 2007.

[16] « IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks », *IEEE Std 802154-2015 Revis. IEEE Std 802154-2011*, p. 1‑709, avr. 2016.

[17] « IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) », *IEEE Std 802154-2003*, p. 0_1‑670, 2003.

[18] S. R. Saunders et A. Aragón-Zavala, *Antennas and propagation for wireless communication systems*, 2nd ed. Chichester, England ; Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons, 2007.

[19] B. Chowkwale, D. Yadav, et R. Abhyankar, « Energy harvesting techniques for low power RF sensors », in *2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2015, p. 49‑53.

[20] F. Touvat, J. Poujaud, et N. Noury, « Indoor localization with wearable RF devices in 868MHz and 2.4GHz bands », in *2014 IEEE 16th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom)*, 2014, p. 136‑139.

[21] A. Kara et H. L. Bertoni, « Effect of people moving near short-range indoor propagation links at 2.45 GHz », *J. Commun. Netw.*, vol. 8, nº 3, p. 286‑289, sept. 2006.

[22] M. Liu, M. Zhang, D. Han, L. Lang, et P. Luo, « Performance analysis of a DSSS-based UV communication with inter-symbol interference », in *2015 20th European Conference on Networks and Optical Communications - (NOC)*, 2015, p. 1‑5.

[23] M. S. Mezghanni, N. Kandil, et N. Hakem, « IEEE 802.15.4 performance evaluation for the underground mine radio-channel », in *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 2016, p. 2057‑2058.

[24] « XBee 802.15.4 Protocol Comparison ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.digi.com/pdf/xbee-802-15-4-protocol-comparison.pdf. [Consulté le: 21-juill-2017].

[25] « Demystifying 802.15.4 and ZigBee ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.pikkerton.de/_mediafiles/44-whitepaper-zigbee.pdf. [Consulté le: 21-juill-2017].

[26] « Product manual XBEE 802.15.4 OEM RF Modules ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf. [Consulté le: 21-juill-2017].

[27] « XBee-PRO 868 Range Validation ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.comfort.net.tw/wp_xbeepro868range.pdf. [Consulté le: 21-juill-2017].

[28] I. E. Korbi et L. A. Saidane, « Enhanced energy computation of unslotted IEEE 802.15.4 under unsaturated traffic conditions », in *2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2016, p. 976‑981.

[29] Z. Dahham, A. Sali, B. M. Ali, et M. S. Jahan, « An efficient CSMA-CA algorithm for IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks », in *2012 International Symposium on Telecommunication Technologies*, 2012, p. 118‑123.

BY-NC-ND

[30] C. Buratti et R. Verdone, « Performance Analysis of IEEE 802.15.4 Non Beacon-Enabled Mode », *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, nº 7, p. 3480‑3493, sept. 2009.

[31] « PRISM - Case Studies - IEEE 802.15.4 CSMA-CA Protocol (ZigBee) ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.prismmodelchecker.org/casestudies/zigbee.php. [Consulté le: 21-juill-2017].

[32] A. Koubaa, M. Alves, et E. Tovar, « A comprehensive simulation study of slotted CSMA/CA for IEEE 802.15.4 wireless sensor networks », in *2006 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, 2006, p. 183‑192.

[33] F. Wang, D. Li, et Y. Zhao, « Analysis and Compare of Slotted and Unslotted CSMA in IEEE 802.15.4 », in *2009 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2009, p. 1‑5.

[34] K. Kaushal, T. Kaur, et J. Kaur, « ZigBee based wireless sensor networks », *Kanchan Kaushal AIIJCSIT Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.*, vol. 5, nº 6, p. 7752–7755, 2014.

[35] M. Zhou et Z. Nie, « Analysis and design of ZigBee MAC layers protocol », in *2010 International Conference on Future Information Technology and Management Engineering*, 2010, vol. 2, p. 211‑215.

[36] « Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt. [Consulté le: 21-juill-2017].

[37] P. Jacquet, P. Muhlethaler, T. Clausen, A. Laouiti, A. Qayyum, et L. Viennot, « Optimized link state routing protocol for ad hoc networks », in *Proceedings. IEEE International Multi Topic Conference, 2001. IEEE INMIC 2001. Technology for the 21st Century.*, 2001, p. 62‑68.

[38] « Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt. [Consulté le: 21-juill-2017].

[39] I. Minakov, R. Passerone, A. Rizzardi, et S. Sicari, « Routing behavior across WSN simulators: The AODV case study », in *2016 IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*, 2016, p. 1‑8.

[40] J. Thangaraj et S. Kumari, « Evaluating feasibility of using Wireless Sensor Network in agricultural land through simulation of DSR, AOMDV, AODV, DSDV protocol », in *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2016, p. 301‑305.

[41] N. Garepalli, K. Gopalan, et P. Yang, « Control Message Reduction Techniques in Backward Learning Ad Hoc Routing Protocols », in *2008 Proceedings of 17th International Conference on Computer Communications and Networks*, 2008, p. 1‑6.

[42] « Wireless Sensor Networks - Wireless Sensor Networks (Akyildiz).pdf ». [En ligne]. Disponible sur: http://doktora.kirbas.com/Kitaplar/Wireless%20Sensor%20Networks%20(Akyildiz).pdf. [Consulté le: 30-janv-2018].

[43] Y. Gadallah et M. Jaafari, « A Reliable Energy-Efficient 802.15.4-Based MAC Protocol for Wireless Sensor Networks », in *2010 IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, 2010, p. 1‑6.

[44] S. Saha, T. Tyagi, et D. V. Gadre, « ARM(R) Microcontroller Based Automatic Power Factor Monitoring and Control System », in *2013 Texas Instruments India Educators' Conference*, 2013, p. 165‑170.

BY-NC-ND

[45] Q. Wang et W. Yang, « Energy Consumption Model for Power Management in Wireless Sensor Networks », in *2007 4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, 2007, p. 142‑151.

[46] H. Unterassinger *et al.*, « A power management unit for ultra-low power wireless sensor networks », in *AFRICON, 2011*, 2011, p. 1‑6.

[47] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, et M. B. Srivastava, « Energy-aware wireless microsensor networks », *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 19, nº 2, p. 40‑50, mars 2002.

[48] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, et E. Cayirci, « A survey on sensor networks », *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, nº 8, p. 102‑114, août 2002.

[49] W. K. G. Seah, Z. A. Eu, et H. P. Tan, « Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (WSN-HEAP) - Survey and challenges », in *2009 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace Electronic Systems Technology*, 2009, p. 1‑5.

[50] M. Chen et G. A. Rincon-Mora, « Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance », *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, nº 2, p. 504‑511, juin 2006.

[51] L. Gao, S. Liu, et R. A. Dougal, « Dynamic lithium-ion battery model for system simulation », *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, vol. 25, nº 3, p. 495‑505, sept. 2002.

[52] D. N. Rakhmatov et S. B. K. Vrudhula, « An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems », in *IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design. ICCAD 2001. IEEE/ACM Digest of Technical Papers (Cat. No.01CH37281)*, 2001, p. 488‑493.

[53] S. Castillo, N. K. Samala, K. Manwaring, B. A. Izadi, et D. Radhakrishnan, « Experimental Analysis of Batteries Under Continuous and Intermittent Operations. », in *ESA/VLSI*, 2004, p. 18–24.

[54] M. Swierczynski, D. I. Stroe, A. I. Stan, R. Teodorescu, et S. K. Kær, « Investigation on the Self-discharge of the LiFePO4/C nanophosphate battery chemistry at different conditions », in *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2014, p. 1‑6.

[55] A. El-Hoiydi, « Spatial TDMA and CSMA with preamble sampling for low power ad hoc wireless sensor networks », in *Proceedings ISCC 2002 Seventh International Symposium on Computers and Communications*, 2002, p. 685‑692.

[56] A. Giridhar et P. R. Kumar, « Maximizing the functional lifetime of sensor networks », in *IPSN 2005. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005.*, 2005, p. 5‑12.

[57] V. P. Mhatre, C. Rosenberg, D. Kofman, R. Mazumdar, et N. Shroff, « A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint », *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 4, nº 1, p. 4‑15, janv. 2005.

[58] J. Deng, Y. S. Han, W. B. Heinzelman, et P. K. Varshney, « Balanced-energy sleep scheduling scheme for high density cluster-based sensor networks », in *2004 4th Workshop on Applications and Services in Wireless Networks, 2004. ASWN 2004.*, 2004, p. 99‑108.

[59] A. Cerpa et D. Estrin, « ASCENT: adaptive self-configuring sensor networks topologies », *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 3, nº 3, p. 272‑285, juill. 2004.

BY-NC-ND

[60] D. Tian et N. D. Georganas, « A Coverage-preserving Node Scheduling Scheme for Large Wireless Sensor Networks », in *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, New York, NY, USA, 2002, p. 32–41.

[61] W. Mo, D. Qiao, et Z. Wang, « Mostly-sleeping wireless sensor networks: Connectivity, k-coverage, and α-lifetime », in *Proceedings of the 43rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, 2005, p. 1–10.

[62] M. Bhardwaj et A. P. Chandrakasan, « Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments », in *Proceedings.Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 2002, vol. 3, p. 1587‑1596 vol.3.

[63] M. Bhardwaj, T. Garnett, et A. P. Chandrakasan, « Upper bounds on the lifetime of sensor networks », in *ICC 2001. IEEE International Conference on Communications. Conference Record (Cat. No.01CH37240)*, 2001, vol. 3, p. 785‑790 vol.3.

[64] S. Kumar, A. Arora, et T. H. Lai, « On the lifetime analysis of always-on wireless sensor network applications », in *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005.*, 2005, p. 3 pp.‑188.

[65] R. J. M. Vullers, R. v Schaijk, H. J. Visser, J. Penders, et C. V. Hoof, « Energy Harvesting for Autonomous Wireless Sensor Networks », *IEEE Solid-State Circuits Mag.*, vol. 2, nº 2, p. 29‑38, Spring 2010.

[66] K. Rühle, L. M. Reindl, et M. Kasemann, « Energy Capture with Optimized Photovoltaic Cells under Low Lighting Conditions », in *2012 IEEE International Conference on Green Computing and Communications*, 2012, p. 628‑630.

[67] A. Chirap, V. Popa, E. Coca, et D. A. Potorac, « A study on light energy harvesting from indoor environment: The autonomous sensor nodes », in *2014 International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, 2014, p. 127‑131.

[68] A. Liberale, E. Dallago, et A. L. Barnabei, « Energy harvesting system for wireless body sensor nodes », in *2014 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS) Proceedings*, 2014, p. 416‑419.

[69] F. Caracciolo, E. Dallago, D. G. Finarelli, A. Liberale, et P. Merhej, « Single-Variable Optimization Method for Evaluating Solar Cell and Solar Module Parameters », *IEEE J. Photovolt.*, vol. 2, nº 2, p. 173‑180, avr. 2012.

[70] U. Bergqvist *et al.*, « Mobile telecommunication base stations–exposure to electromagnetic fields », *Rep. Short Term Mission COST-244bis COST-244bis Short Term Mission Base Stn. Expo.*, 2000.

[71] D. K. Ho, I. Kharrat, V. D. Ngo, T. P. Vuong, Q. C. Nguyen, et M. T. Le, « Dual-band rectenna for ambient RF energy harvesting at GSM 900 MHz and 1800 MHz », in *2016 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, 2016, p. 306‑310.

[72] C. Song, Y. Huang, J. Zhou, J. Zhang, S. Yuan, et P. Carter, « A High-Efficiency Broadband Rectenna for Ambient Wireless Energy Harvesting », *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, nº 8, p. 3486‑3495, août 2015.

[73] M. Pinuela, P. D. Mitcheson, et S. Lucyszyn, « Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments », *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 61, nº 7, p. 2715‑2726, juill. 2013.

[74] A. Sample et J. R. Smith, « Experimental results with two wireless power transfer systems », in *2009 IEEE Radio and Wireless Symposium*, 2009, p. 16‑18.

BY-NC-ND

[75] V. Dang et O. Kilic, « A Simple Method for Calculating the Output Voltage at Receive Antenna Terminals Using the Complex Antenna Factor », *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, p. 756‑759, 2017.

[76] I. Al-Anbagi, M. Erol-Kantarci, et H. T. Mouftah, « A delay mitigation scheme for WSN-based smart grid substation monitoring », in *2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2013, p. 1470‑1475.

[77] W. Sun, X. Yuan, J. Wang, D. Han, et C. Zhang, « Quality of Service Networking for Smart Grid Distribution Monitoring », in *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 2010, p. 373‑378.

[78] « Datasheet_SHTxx_E.doc - SHT11humiditySensor.pdf ». .

[79] W. M. N. A. M. Nour, « Design A sensor to Control the Temperature of X-ray Machine », PhD Thesis, Sudan University of Science and Technology, 2017.

[80] « CC2650 SimpleLink™ Multistandard Wireless MCU datasheet (Rev. B) - cc2650.pdf ». .

[81] « waspmote_technical_guide.pdf ». .

[82] P. Koopman et T. Chakravarty, « Cyclic redundancy code (CRC) polynomial selection for embedded networks », in *International Conference on Dependable Systems and Networks, 2004*, 2004, p. 145‑154.

[83] D. Mankar et B. S. Chaudhari, « Dynamic performance analysis of IEEE 802.15.4 devices under various RF interferences », in *2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, 2016, vol. 1, p. 1‑4.

[84] A. Berger, M. Pichler, D. Ciccarello, P. Priller, et A. Springer, « Characterization and adaptive selection of radio channels for reliable and energy-efficient WSN », in *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2016, p. 1‑6.

[85] P. D. Marco, P. Park, C. Fischione, et K. H. Johansson, « Analytical Modeling of Multi-hop IEEE 802.15.4 Networks », *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, nº 7, p. 3191‑3208, sept. 2012.

[86] J. Y. Ha, T. H. Kim, H. S. Park, S. Choi, et W. H. Kwon, « An Enhanced CSMA-CA Algorithm for IEEE 802.15.4 LR-WPANs », *IEEE Commun. Lett.*, vol. 11, nº 5, p. 461‑463, mai 2007.

[87] L. Wang, J. Mao, L. Fu, H. Zhu, et N. Guo, « An improvement of IEEE 802.15.4 MAC protocol in high-density wireless sensor networks », in *2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, 2015, p. 1704‑1707.

[88] Q. Liu et P. Li, « Backoff algorithm optimization and analysis for IEEE 802.15.4 wireless sensor networks », in *2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks Digital Sign (CSNDSP)*, 2014, p. 411‑416.

[89] T.-M. Hoang, V.-T. Nguyen, N.-G. Nguyen, et T.-N. Lang, « Analysing the performance of unslotted sensor networks based on the IEEE 802.15.4 employed EIED algorithm », in *2017 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, 2017, p. 682‑685.

[90] M. Gribaudo, D. Manini, A. Nordio, et C. F. Chiasserini, « Transient Analysis of IEEE 802.15.4 Sensor Networks », *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 10, nº 4, p. 1165‑1175, avr. 2011.

[91] C. K. Singh et A. Kumar, *Performance Evaluation of an IEEE 802.15.4 Sensor Network with a Star Topology*. .

BY-NC-ND

[92] G. Anastasi, M. Conti, et M. D. Francesco, « A Comprehensive Analysis of the MAC Unreliability Problem in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks », *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 7, nº 1, p. 52‑65, févr. 2011.

[93] M. M. Rahaman, K. Ashrafuzzaman, M. S. Chowdhury, et M. O. Rahman, « Performance measurement of different backoff algorithms in IEEE 802.15.4 », in *2016 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISET)*, 2016, p. 1‑4.

[94] M. Petrova, J. Riihijarvi, P. Mahonen, et S. Labella, « Performance study of IEEE 802.15.4 using measurements and simulations », in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006.*, 2006, vol. 1, p. 487‑492.

[95] B. M. Khan, F. H. Ali, et E. Stipidis, « Improved backoff algorithm for IEEE 802.15.4 wireless sensor networks », in *2010 IFIP Wireless Days*, 2010, p. 1‑5.

[96] M. Khanafer, M. Guennoun, et H. T. Mouftah, « Priority-Based CCA Periods for Efficient and Reliable Communications in Wireless Sensor Networks », *Wirel. Sens. Netw.*, vol. 04, nº 02, p. 45‑51, 2012.

[97] S. Y. Lee, Y. S. Shin, J. S. Ahn, et K. W. Lee, « Performance Analysis of a Non-Overlapping Binary Exponential Backoff Algorithm over IEEE 802.15.4 », in *Proceedings of the 4th International Conference on Ubiquitous Information Technologies Applications*, 2009, p. 1‑5.

[98] E. J. Candes et M. B. Wakin, « An Introduction To Compressive Sampling », *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 25, nº 2, p. 21‑30, mars 2008.

[99] « FS5.pdf ». .

[100] S. Yi et B. Scholz-Reiter, « Collaborative Transfer Operations between Drayage Companies and a Container Terminal », *Int. Grad. Sch. Dyn. Logist.*, p. 63, 2013.

[101] C. Lloyd, S. Issa, W. Lang, et R. Jedermann, « Empirical airflow pattern determination of refrigerated banana containers using thermal flow sensors », in *Fifth Int. Workshop Cold Chain Management, Bonn, Germany*, 2013, p. 10–11.

[102] E. Ciancamerla, B. Fresilli, M. Minichino, T. Patriarca, et S. Iassinovski, « An electrical grid and its SCADA under cyber attacks: Modelling versus a Hybrid Test Bed », in *2014 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST)*, 2014, p. 1‑6.

[103] A. M. Grilo, J. Chen, M. Díaz, D. Garrido, et A. Casaca, « An Integrated WSAN and SCADA System for Monitoring a Critical Infrastructure », *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 10, nº 3, p. 1755‑1764, août 2014.

[104] M. S. Almas, L. Vanfretti, S. Løvlund, et J. O. Gjerde, « Open source SCADA implementation and PMU integration for power system monitoring and control applications », in *2014 IEEE PES General Meeting | Conference Exposition*, 2014, p. 1‑5.

[105] « meshlium_technical_guide.pdf ». .

[106] D. L. Donoho, « Compressed sensing », *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, nº 4, p. 1289‑1306, avr. 2006.

[107] E. J. Candes, J. Romberg, et T. Tao, « Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information », *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, nº 2, p. 489‑509, févr. 2006.

[108] M. S. Manikandan, B. Ramkumar, P. S. Deshpande, et T. Choudhary, « Robust detection of premature ventricular contractions using sparse signal decomposition and temporal features », *Healthc. Technol. Lett.*, vol. 2, nº 6, p. 141‑148, 2015.

BY-NC-ND

[109]M. Brajović, I. Orović, M. Daković, et S. Stanković, « Compressive Sensing of Sparse Signals in the Hermite Transform Basis », *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. PP, nº 99, p. 1-1, 2017.

[110]A. M. R. Dixon, E. G. Allstot, D. Gangopadhyay, et D. J. Allstot, « Compressed Sensing System Considerations for ECG and EMG Wireless Biosensors », *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 6, nº 2, p. 156-166, avr. 2012.

[111]J. Zhang *et al.*, « An Efficient and Compact Compressed Sensing Microsystem for Implantable Neural Recordings », *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 8, nº 4, p. 485-496, août 2014.

[112]P. A. Milder, F. Franchetti, J. C. Hoe, et M. Puschel, « FFT Compiler: from math to efficient hardware HLDVT invited short paper », in *2007 IEEE International High Level Design Validation and Test Workshop*, 2007, p. 137-139.

[113]B. Shen, I. K. Sethi, et V. Bhaskaran, « DCT convolution and its application in compressed domain », *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 8, nº 8, p. 947-952, déc. 1998.

[114]S. Rein et M. Reisslein, « Low-Memory Wavelet Transforms for Wireless Sensor Networks: A Tutorial », *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 13, nº 2, p. 291-307, Second 2011.

[115]E. J. Candes et T. Tao, « Near-Optimal Signal Recovery From Random Projections: Universal Encoding Strategies? », *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, nº 12, p. 5406-5425, déc. 2006.

[116]E. Candès et J. Romberg, « Sparsity and incoherence in compressive sampling », *Inverse Probl.*, vol. 23, nº 3, p. 969-985, juin 2007.

[117]K. Hayashi, M. Nagahara, et T. Tanaka, « A User's Guide to Compressed Sensing for Communications Systems », *IEICE Trans. Commun.*, vol. E96.B, nº 3, p. 685-712, 2013.

[118]E. G. Allstot, A. Y. Chen, A. M. R. Dixon, D. Gangopadhyay, et D. J. Allstot, « Compressive sampling of ECG bio-signals: Quantization noise and sparsity considerations », in *2010 Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*, 2010, p. 41-44.

[119]J. A. Tropp et S. J. Wright, « Computational Methods for Sparse Solution of Linear Inverse Problems », *Proc. IEEE*, vol. 98, nº 6, p. 948-958, juin 2010.

[120]E. J. Candès et B. Recht, « Exact Matrix Completion via Convex Optimization », *Found. Comput. Math.*, vol. 9, nº 6, p. 717-772, déc. 2009.

[121]D. Li, Q. Wang, et Y. Shen, « GASA Based Signal Reconstruction for Compressive Sensing », in *2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, 2015, p. 422-426.

[122]H. Chen, J. Tao, Y. Sun, Z. Ye, et B. Qiu, « Magnetic resonance image reconstruction via Lo-norm minimization », in *2015 IET International Conference on Biomedical Image and Signal Processing (ICBISP 2015)*, 2015, p. 1-6.

[123]S. Narayanan, S. K. Sahoo, et A. Makur, « Greedy pursuits assisted basis pursuit for compressive sensing », in *2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2015, p. 694-698.

[124]S. G. Mallat et Z. Zhang, « Matching pursuits with time-frequency dictionaries », *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 41, nº 12, p. 3397-3415, déc. 1993.

BY-NC-ND

[125] V. Abolghasemi, S. Ferdowsi, B. Makkiabadi, et S. Sanei, « On optimization of the measurement matrix for compressive sensing », in *2010 18th European Signal Processing Conference*, 2010, p. 427‑431.

[126] D. L. Donoho, Y. Tsaig, I. Drori, et J. L. Starck, « Sparse Solution of Underdetermined Systems of Linear Equations by Stagewise Orthogonal Matching Pursuit », *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, nº 2, p. 1094‑1121, févr. 2012.

[127] D. Needell et R. Vershynin, « Signal Recovery From Incomplete and Inaccurate Measurements Via Regularized Orthogonal Matching Pursuit », *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 4, nº 2, p. 310‑316, avr. 2010.

[128] M. A. Herman et D. Needell, « Mixed operators in compressed sensing », in *2010 44th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, 2010, p. 1‑6.

[129] Y. Zigel, A. Cohen, et A. Katz, « The weighted diagnostic distortion (WDD) measure for ECG signal compression », *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 47, nº 11, p. 1422‑1430, nov. 2000.

[130] D. Gangopadhyay, E. G. Allstot, A. M. R. Dixon, K. Natarajan, S. Gupta, et D. J. Allstot, « Compressed Sensing Analog Front-End for Bio-Sensor Applications », *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 49, nº 2, p. 426‑438, févr. 2014.

[131] F. Fazel, M. Fazel, et M. Stojanovic, « Random Access Compressed Sensing for Energy-Efficient Underwater Sensor Networks », *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 29, nº 8, p. 1660‑1670, sept. 2011.

[132] L. Quan, S. Xiao, X. Xue, et C. Lu, « Neighbor-Aided Spatial-Temporal Compressive Data Gathering in Wireless Sensor Networks », *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, nº 3, p. 578‑581, mars 2016.

[133] R. Masiero, G. Quer, D. Munaretto, M. Rossi, J. Widmer, et M. Zorzi, « Data Acquisition through Joint Compressive Sensing and Principal Component Analysis », 2009, p. 1‑6.

[134] M. F. Duarte et R. G. Baraniuk, « Kronecker Compressive Sensing », *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 21, nº 2, p. 494‑504, févr. 2012.

BY-NC-ND

Publications et communications relatives à ce travail

[ITO 1] ITOUA ENGOTI F., QUERE R., LALANDE M., Optimisation d'un réseau Zigbee de diagnostic énergétique pour la gestion intelligente d'un bâtiment, 19ème Journées Nationales du Réseau Doctoral en Micro-nanoélectronique, Toulouse, 11-13 mai 2016.

[ITO 2] ITOUA ENGOTI F. & Al, A Low Cost Wireless Sensor System for Monitoring the Air Handling Unit of the University Building, 11th International Conference on Intelligent systems and control (ISCO), Tamilnadu, India, january 2017

[ITO 3] ITOUA ENGOTI F., QUERE R., LALANDE M., Co-conception hardware/software pour la minimisation de la consommation d'un nœud de capteur dans un réseau zigbee, Journées Scientifiques URSI Energie et Radiosciences, Rennes, 15-16 mars 2016.

[ITO 4] ITOUA ENGOTI F., Angellier Nicolas, Ulmet Laurent, Quéré Raymond, Lalande Michèle, Dubois Frédéric Modélisation thermique dynamique d'un amphithéâtre à l'aide d'un réseau de capteurs sans fil : vers un démonstrateur d'outil de diagnostic énergétique dans un bâtiment public, Les 35èmes Rencontres universitaires de Génie Civil de l'AUGC, Nantes, 22-24 mai 2017.

BY-NC-ND

Réalisation d’une plate-forme pour l’optimisation de réseaux de capteurs sans fil appliqués au bâtiment intelligent

La thèse porte sur le déploiement d'un réseau de capteurs pour le diagnostic énergétique d'un bâtiment universitaire. Elle s'inscrit dans la thématique Bâtiment intelligent et durable de l'Université de Limoges. Il s'agit au cours de cette thèse, dans un premier temps, d'optimiser l'architecture d'un réseau de capteurs Zigbee ainsi que les méthodes d'interrogation de ces capteurs, pour minimiser la consommation énergétique des nœuds du réseau. On s'appuiera notamment sur des concepts de compressive sensing" pour augmenter la durée de vie des nœuds autonomes qui pourra être éventuellement renforcée par des organes de récupération d'énergie. "

Mots-clés : capteurs, réseaux, énergie, compressive sensing, optimisation, Zigbee

Realization of a platform for the optimization of wireless networks sensors applied to the intelligent building

This thesis deals with the roll out of Wireless Sensor Network for the energetic monitoring of an existing building of the University. This work wil be incorporated in the framework of the smart building program of the University of Limoges. The work aims to optimize the architecture of a Zigbee network as well as data collection methods to minimize the energy consumption of the network's nodes. Methods based on the compressive sensing concepts will be investigated to reduce the number of nodes and to extend the lifetime of the nodes. Those methods will eventually be complemented with energy harvesting techniques

Keywords : Sensors, networks, energy, compressive sensing, optimization, Zigbee