



**HAL**  
open science

# Systèmes et protocoles de télé-réveil appliqués à l'optimisation énergétique des réseaux de capteurs sans fil

Jean-Mickaël Lebreton

► **To cite this version:**

Jean-Mickaël Lebreton. Systèmes et protocoles de télé-réveil appliqués à l'optimisation énergétique des réseaux de capteurs sans fil. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de la Réunion, 2017. Français. NNT : 2017LARE0014 . tel-01761239

**HAL Id: tel-01761239**

**<https://theses.hal.science/tel-01761239>**

Submitted on 8 Apr 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



En vue de l'obtention du

**DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION**

Délivré par : *l'Université de la Réunion*

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

---

---

Présentée et soutenue le *05/04/2017* par :

**Jean Mickael Lebreton**

**Systemes et protocoles de télé-réveil appliqués à l'optimisation énergétique  
des réseaux de capteurs sans fil**

---

---

## JURY

|                      |                            |                    |
|----------------------|----------------------------|--------------------|
| VÉRONIQUE VÈQUE      | Professeur des Universités | Présidente du Jury |
| JEAN-MARC THIRIET    | Professeur des Universités | Membre du Jury     |
| THIERRY VAL          | Professeur des Universités | Membre du Jury     |
| JEAN-PIERRE CHABRIAT | Professeur des Universités | Membre du Jury     |
| RICHARD LORION       | Maître de Conférences      | Membre du Jury     |
| NOUR MOHAMMAD MURAD  | Maître de Conférences      | Membre du Jury     |
| DENIS GENON-CATALOT  | Maître de Conférences      | Membre du Jury     |

---

### École doctorale et spécialité :

*EDSTS : Sciences, Technologies et Santé*

### Unité de Recherche :

*Laboratoire d'Énergie, d'Électronique et de Procédés (LE<sup>2</sup>P)*

### Encadrants de Thèse :

*Dr. Nour Mohammad MURAD et Dr. Richard LORION*

### Directeur de Thèse :

*Pr. Jean-Pierre CHABRIAT*

### Rapporteurs :

*Pr. Jean-Marc Thiriet et Pr. Thierry Val*



# *Résumé*

## **Systèmes et protocoles de télé-réveil appliqués à l'optimisation énergétique des réseaux de capteurs sans fil**

De nos jours, une forte croissance des objets connectés est constatée, dépassant même la population mondiale. Devant l'ampleur de ce phénomène, l'efficacité énergétique des objets communicants est une sérieuse problématique. La maximisation de leur durée de vie est requise pour assurer une qualité de service. Dans cette optique, les travaux de cette thèse visent à optimiser la consommation énergétique des communications sans fil dans un réseau de capteurs.

Le télé-réveil, un concept imaginé depuis une dizaine d'années, consiste au déclenchement du réveil du nœud communicant par un signal radio à distance. Par défaut, le nœud reste en mode veille de façon permanente à très basse consommation. Au besoin, il peut être réveillé à la demande par un signal radio spécifique. Ainsi, la consommation énergétique du module radio est grandement réduite par l'écoute passive du canal en mode veille. Ce principe de télé-réveil nécessite toutefois le développement de nouvelles architectures matérielles associées à des protocoles de communication adaptés et innovants. Malgré les propositions récentes, le niveau de maturité technologique n'a pas encore été atteint sur ce sujet.

Par conséquent, un système de télé-réveil est proposé dans cette thèse, en incluant une caractérisation théorique de ses performances. Le récepteur de télé-réveil consomme 363 nW en mode veille contre 49,8  $\mu$ W en mode de réception. De plus, deux nouveaux protocoles de télé-réveil DoRa et DC-DoRa sont proposés avec une évaluation de leurs performances par simulation. Les résultats obtenus montrent que ces protocoles de télé-réveil diminuent fortement l'énergie consommée par le module radio, en comparaison des protocoles MAC actuellement utilisés dans les réseaux de capteur. Enfin, la mise en œuvre expérimentale du système et des protocoles de télé-réveil a permis de mesurer les performances réelles de notre approche dans un environnement de surécoute et d'interférence.

# *Abstract*

## **Wake-up radio systems and protocols for optimizing energy consumption in wireless sensor networks**

Nowadays, a significant growth of connected things is observed, exceeding even the world population. Given the magnitude of this phenomenon, the energy efficiency of communicating objects is a crucial issue. Maximizing their lifetime is necessary to ensure a quality of service. In this regard, the aim of this thesis is to optimize the energy consumption of wireless communications in a wireless sensor network.

The concept of wake-up radio was created a decade ago, which consists of waking up the communicating node by a remote radio signal. By default, the node remains in sleeping mode at a very low power consumption. If needed, the node can be woken up on demand through a specific radio signal. Thus, the energy consumption of the radio module is greatly reduced by idle listening to the channel in sleeping mode. However, this wake-up radio principle requires the development of new hardware architectures associated with adapted and innovative communication protocols. Despite recent proposals, the level of technology maturity has not yet been reached on this subject.

Therefore, a wake-up radio system is proposed in this thesis, including a theoretical characterization of its performances. The wake-up receiver consumes 363 nW in sleeping mode and 49.8  $\mu$ W in receiving mode. Moreover, two new protocols called DoRa and DC-DoRa are proposed with an evaluation of their performances by simulation. The results show that these wake-up radio protocols greatly reduce the energy consumed by the radio module, compared to the MAC protocols currently used in wireless sensor networks. Finally, the experimental implementation of the wake-up radio system and protocols enabled the real performance measurement of our approach in an environment with overhearing and interference.

# *Remerciements*

En premier lieu, j'adresse mes remerciements à mon directeur de thèse, le professeur Jean-Pierre CHABRIAT, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce travail de thèse. Je lui suis reconnaissant pour ses conseils et sa franchise afin que cette thèse ait pris la bonne direction.

Je tiens à remercier M. Nour MURAD pour son encadrement, sa grande disponibilité et son implication tout au long de cette thèse. Je tiens également à lui dire à quel point je lui suis reconnaissant pour ses conseils, son aide dans la réalisation de mes expériences et ses nombreuses relectures et corrections de mon mémoire.

Je remercie M. Richard LORION pour son encadrement et le suivi de thèse. Je lui suis également reconnaissant pour ses conseils, son recul et son regard critique afin d'améliorer mes travaux et de parcourir de nouvelles pistes.

Je souhaite également remercier la professeur Véronique VEQUE d'avoir accepté de présider ce jury de thèse. Je remercie également les professeurs Thierry VAL et Jean-Marc THIRIET d'avoir acceptés de rapporter ma thèse. Les remarques pertinentes et les échanges effectués m'ont permis de perfectionner ce mémoire.

Je tiens aussi à remercier M. Denis GENON-CATALOT pour sa participation dans ce jury de thèse, mais surtout pour son aide technique dans la réalisation des prototypes et ses conseils avisés dans les moments où nous avons pu collaborer.

Je remercie également les membres du LE2P pour la bonne ambiance qui y règne, en particulier mon ami et collègue de bureau Somasekhar KANDUKURI pour m'avoir supporté pendant ces trois années, et aussi Jean-Michel CLAIN, Qi LI, Peng LI, Jérôme RIVIERE, Ludovic ODDOZ pour les moments agréables au laboratoire. J'exprime également ma reconnaissance à M. Alexandre DOUYERE pour nos échanges scientifiques et son aide au niveau des rectennas, et aussi M. Patrick JEANTY et Kelly GRONDIN-D'ANNA pour toutes les démarches administratives.

J'exprime mes sincères remerciements aux membres du département R&T où j'ai été pendant une grande partie de cette thèse, en particulier Laurent CHANE KUANG SANG, Kévin ARNASSALOM, Kenji FUNK LUCK MIN et Johanne MOREL pour leur aide et leur bonne humeur.

Enfin, un grand merci à ma famille et à mes amis pour votre soutien et les moments de détente passés en dehors de cette thèse.

# Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| Résumé   | iii       |
| Abstract   | iv        |
| Remerciements  | v         |
| Nomenclature   | xiv       |
| Symboles   | xvii      |
| Introduction générale  | 1         |
| <b>1 État de l'art sur le télé-réveil pour l'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil</b>          | <b>9</b>  |
| 1.1 Introduction   | 10        |
| 1.2 Méthodes d'économie d'énergie dans les RCSF  | 10        |
| 1.2.1 Optimisation radio   | 11        |
| 1.2.2 Fonctionnement par cycle d'activité  | 13        |
| 1.2.3 Réduction des données  | 15        |
| 1.2.4 Routage efficace de l'information  | 16        |
| 1.2.5 Réapprovisionnement de la batterie   | 17        |
| 1.2.6 Synthèse et choix de la méthode  | 18        |
| 1.3 État de l'art sur les protocoles de réveil   | 19        |
| 1.3.1 Protocoles par rendez-vous planifié  | 20        |
| 1.3.2 Protocoles asynchrones   | 20        |
| 1.3.3 Protocoles de réveil à la demande  | 21        |
| 1.3.4 Protocoles inter-couches   | 23        |
| 1.3.5 Protocoles MAC de télé-réveil  | 24        |
| 1.3.6 Synthèse et choix du type de protocole   | 26        |
| 1.4 Etat de l'art sur les récepteurs de télé-réveil  | 27        |
| 1.4.1 Récepteurs de télé-réveil à faible complexité  | 28        |
| 1.4.2 Récepteurs de télé-réveil hétérodynes  | 29        |
| 1.4.3 Récepteurs de télé-réveil à base de corrélateur  | 31        |
| 1.4.4 Récepteurs de télé-réveil à base de RFID   | 32        |
| 1.4.5 Récepteurs de télé-réveil à base de microcontrôleur  | 33        |
| 1.4.6 Synthèse et choix du type de récepteur de télé-réveil  | 34        |
| 1.5 Conclusion   | 37        |
| <b>2 Conception et caractérisation théorique d'un système de télé-réveil à très basse consommation énergétique</b> | <b>39</b> |
| 2.1 Introduction   | 39        |
| 2.2 Intégration du récepteur de télé-réveil dans le nœud de capteur  | 40        |
| 2.3 Composants et fonctionnement du récepteur de télé-réveil   | 41        |
| 2.3.1 Convertisseur RF-DC  | 42        |
| 2.3.2 Comparateur  | 42        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.3.3    | Microcontrôleur . . . . .   | 43        |
| 2.4      | Caractérisation théorique du système de télé-réveil . . . . .   | 44        |
| 2.4.1    | Niveaux de consommation énergétique du nœud . . . . .   | 45        |
| 2.4.2    | Sensibilité du récepteur de télé-réveil . . . . .   | 48        |
| 2.4.3    | Portée de télé-réveil . . . . .   | 51        |
| 2.4.4    | Durée d'une requête d'interrogation du nœud . . . . .   | 53        |
| 2.5      | Conclusion . . . . .  | 55        |
| <b>3</b> | <b>Conception et évaluation des performances du protocole DoRa associé au système de télé-réveil</b> . . . . .    | <b>59</b> |
| 3.1      | Introduction . . . . .  | 60        |
| 3.2      | Présentation du protocole DoRa . . . . .  | 60        |
| 3.2.1    | Définition de la topologie du réseau . . . . .  | 61        |
| 3.2.2    | Structure des messages du protocole . . . . .   | 62        |
| 3.2.3    | Communication entre la BS et un nœud quelconque . . . . .   | 63        |
| 3.2.4    | Protocole DoRa pour l'accès au support dans le RCSF . . . . .   | 64        |
| 3.3      | Implémentation du protocole DoRa sous OMNeT++ . . . . .   | 65        |
| 3.3.1    | Module de la BS . . . . .   | 66        |
| 3.3.2    | Module du nœud . . . . .  | 67        |
| 3.3.3    | Machine à états finis du protocole inter-couches . . . . .  | 69        |
| 3.3.4    | Algorithme du protocole de réveil d'un nœud quelconque . . . . .  | 71        |
| 3.4      | Définition des critères de performance . . . . .  | 72        |
| 3.4.1    | Critères typiques pour l'évaluation des performances des protocoles MAC . . . . .                                 | 72        |
| 3.4.2    | Probabilités associées à une théorie de détection du signal . . . . .   | 73        |
| 3.5      | Évaluation des performances du protocole DoRa en fonction des paramètres du réseau . . . . .                      | 76        |
| 3.5.1    | Scénario de simulation . . . . .  | 77        |
| 3.5.2    | Effet du canal de propagation . . . . .   | 77        |
| 3.5.3    | Effet du nombre de nœuds . . . . .  | 80        |
| 3.5.4    | Effet de la taille des données . . . . .  | 82        |
| 3.6      | Étude comparative des performances du protocole DoRa . . . . .  | 84        |
| 3.6.1    | Scénario de simulation . . . . .  | 84        |
| 3.6.2    | Comparaison avec des protocoles MAC en variant la période de requête . . . . .                                    | 86        |
| 3.6.3    | Comparaison avec des protocoles MAC en variant la taille des données . . . . .                                    | 89        |
| 3.6.4    | Comparaison entre les bibliothèques MiXiM et INET . . . . .   | 92        |
| 3.7      | Conclusion . . . . .  | 93        |
| <b>4</b> | <b>Conception et évaluation des performances du protocole DC-DoRa associé au système de télé-réveil</b> . . . . . | <b>95</b> |
| 4.1      | Introduction . . . . .  | 96        |
| 4.2      | Problématiques . . . . .  | 96        |
| 4.2.1    | La problématique de surécoute . . . . .   | 97        |
| 4.2.2    | La problématique des interférences co-canal . . . . .   | 99        |
| 4.2.3    | Nécessité d'une optimisation protocolaire . . . . .   | 100       |
| 4.3      | Présentation du protocole DC-DoRa . . . . .   | 100       |
| 4.3.1    | Évolution du protocole DoRa vers DC-DoRa . . . . .  | 100       |
| 4.3.2    | Structure des messages du protocole DC-DoRa . . . . .   | 101       |
| 4.3.3    | Protocole DC-DoRa pour l'accès au support dans le RCSF . . . . .  | 102       |
| 4.4      | Implémentation du protocole DC-DoRa sous OMNeT++ . . . . .  | 103       |
| 4.4.1    | Modules et fonctionnalités supplémentaires du protocole DC-DoRa . . . . .   | 103       |



|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.4.2    | Machine à états finis du protocole DC-DoRa . . . . .  | 104        |
| 4.5      | Évaluation des performances des protocoles DoRa et DC-DoRa face à la surécoute . . . . .    | 105        |
| 4.5.1    | Scénario de simulation . . . . .  | 105        |
| 4.5.2    | Analyse des résultats avec le protocole DoRa . . . . .                                      | 106        |
| 4.5.3    | Analyse des résultats avec le protocole DC-DoRa . . . . .                                   | 108        |
| 4.5.4    | Comparaison des résultats . . . . .   | 110        |
| 4.6      | Évaluation des performances des protocoles DoRa et DC-DoRa face aux interférences . . . . . | 111        |
| 4.6.1    | Scénario de simulation . . . . .  | 112        |
| 4.6.2    | Analyse des résultats avec le protocole DoRa . . . . .                                      | 113        |
| 4.6.3    | Analyse des résultats avec le protocole DC-DoRa . . . . .                                   | 116        |
| 4.6.4    | Comparaison des résultats . . . . .   | 118        |
| 4.7      | Conclusion . . . . .  | 119        |
| <b>5</b> | <b>Mise en œuvre expérimentale du système et des protocoles de télé-réveil</b>              | <b>121</b> |
| 5.1      | Introduction . . . . .  | 122        |
| 5.2      | Présentation des matériels utilisés et développés . . . . .                                 | 123        |
| 5.2.1    | Développement de l'émetteur de télé-réveil . . . . .  | 123        |
| 5.2.2    | Développement du récepteur de télé-réveil . . . . .   | 126        |
| 5.2.3    | Programmation du microcontrôleur . . . . .  | 132        |
| 5.2.4    | Présentation des antennes (émission) et de la rectenna (réception) . . . . .                | 135        |
| 5.2.5    | Présentation des modules radio . . . . .  | 136        |
| 5.2.6    | Récapitulatif des matériels . . . . .   | 138        |
| 5.3      | Validation expérimentale du dispositif de télé-réveil . . . . .                             | 138        |
| 5.3.1    | Réponse temporelle de la rectenna . . . . .   | 139        |
| 5.3.2    | Mesure analogique de la tension délivrée par la rectenna . . . . .                          | 142        |
| 5.3.3    | Lecture numérique du signal par le microcontrôleur . . . . .                                | 143        |
| 5.3.4    | Décodage du message par UART . . . . .  | 144        |
| 5.3.5    | Conclusion . . . . .  | 146        |
| 5.4      | Validation expérimentale des protocoles de télé-réveil . . . . .                            | 147        |
| 5.4.1    | Scénario de validation expérimentale . . . . .  | 147        |
| 5.4.2    | Validation expérimentale du protocole DoRa . . . . .  | 148        |
| 5.4.3    | Validation expérimentale du protocole DC-DoRa . . . . .                                     | 150        |
| 5.4.4    | Comparaison entre l'expérimentation et la simulation . . . . .                              | 151        |
| 5.4.5    | Conclusion . . . . .  | 152        |
| 5.5      | Mesure des caractéristiques et optimisation énergétique du système de télé-réveil           | 153        |
| 5.5.1    | Mesure de la sensibilité du récepteur de télé-réveil . . . . .                              | 153        |
| 5.5.2    | Mesure de la portée de télé-réveil . . . . .  | 155        |
| 5.5.3    | Méthode de mesure de la consommation énergétique du récepteur de télé-réveil . . . . .      | 157        |
| 5.5.4    | Mesure statique de consommation de courant du récepteur de télé-réveil                      | 160        |
| 5.5.5    | Mesure et optimisation de la consommation énergétique du micro-contrôleur . . . . .         | 164        |
| 5.6      | Comparaison des résultats avec la littérature . . . . .                                     | 167        |
| 5.7      | Conclusion . . . . .  | 171        |
|          | <b>Conclusion générale et perspectives</b>  | <b>173</b> |
|          | <b>Bibliographie</b>  | <b>177</b> |

# Liste des figures

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1    | Architecture d'un RCSF [5–8]. . . . .   | 3  |
| 1.1  | Classification des méthodes d'économie d'énergie dans les RCSF. . . . .   | 11 |
| 1.2  | Représentation des différentes périodes d'un fonctionnement par cycle [37]. . . . .                                       | 13 |
| 1.3  | Topologie basique d'un réseau avec une architecture de groupe [58]. . . . .   | 16 |
| 1.4  | Positionnement de notre étude dans la classification des méthodes d'économie d'énergie dans les RCSF. . . . .             | 19 |
| 1.5  | Modèle de réveil décalé [25]. . . . .   | 20 |
| 1.6  | Découverte d'un nœud source par écoute périodique [25]. . . . .   | 21 |
| 1.7  | Architecture d'un nœud intégrant le mécanisme de télé-réveil. . . . .   | 22 |
| 1.8  | Principe de fonctionnement de réveil par radio [69]. . . . .  | 23 |
| 1.9  | Modèle de communication dans les RCSF: modèle OSI et modèle inter-couches. . . . .  | 23 |
| 1.10 | Schéma de communication pour les différents protocoles présentés [77]. . . . .  | 25 |
| 1.11 | Schéma-bloc du récepteur de télé-réveil à faible complexité dans [79]. . . . .  | 28 |
| 1.12 | Schéma-bloc d'un récepteur de télé-réveil hétérodyne. . . . .   | 30 |
| 1.13 | Schéma-bloc du récepteur de télé-réveil SCM-WuRx [70]. . . . .  | 31 |
| 1.14 | Noeud intégrant un récepteur de télé-réveil passif : WISP-Mote. . . . .   | 32 |
| 1.15 | Schéma-bloc général d'un récepteur de télé-réveil à base de microcontrôleur. . . . .                                      | 33 |
| 2.1  | Architecture 1 d'un nœud intégrant le système de télé-réveil . . . . .  | 41 |
| 2.2  | Architecture 2 d'un nœud intégrant le système de télé-réveil. . . . .   | 41 |
| 2.3  | Schéma-bloc du récepteur de télé-réveil proposé. . . . .  | 42 |
| 2.4  | Signal modulé en OOK et signal digital correspondant. . . . .   | 43 |
| 2.5  | Le microcontrôleur PIC24F et la puce radio CC2500. . . . .  | 45 |
| 2.6  | Diagramme d'état du microcontrôleur PIC24F. . . . .   | 46 |
| 2.7  | Diagramme d'état de la puce radio CC2500. . . . .   | 48 |
| 2.8  | Schéma de transmission de puissance. . . . .  | 49 |
| 2.9  | Distance maximale de télé-réveil en fonction de la puissance de transmission et du rendement de conversion RF/DC. . . . . | 52 |
| 2.10 | Répartition du temps requis pour la période de requête $T_{req}$ . . . . .  | 55 |
| 2.11 | Chronogramme d'état du micro-contrôleur et de la puce radio après réception d'un message AdR. . . . .                     | 56 |
| 3.1  | Topologie du réseau considéré. . . . .  | 61 |
| 3.2  | Structure de la trame des messages échangés entre la BS et les nœuds. . . . .   | 62 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 3.3  | Protocole de communication entre la BS et un nœud. . . . .  | 63  |
| 3.4  | Protocole d'accès au support dans le réseau. . . . .  | 65  |
| 3.5  | Architecture de la BS sous OMNeT++. . . . .   | 66  |
| 3.6  | Architecture d'un nœud sous OMNeT++. . . . .  | 68  |
| 3.7  | Machine à états finis des protocoles MAC liés au tété-réveil. . . . .   | 70  |
| 3.8  | Simulation d'un réseau de 5 nœuds sous OMNeT++, avec les 5 étapes lors du télé-réveil d'un nœud particulier. . . . .                    | 71  |
| 3.9  | Arbre des évènements possibles. . . . .   | 75  |
| 3.10 | Probabilité des évènements de télé-réveil en fonction du coefficient d'atténuation $n$ . . . . .  | 79  |
| 3.11 | Probabilité des évènements de télé-réveil en fonction de l'écart-type $\sigma$ . . . . .  | 79  |
| 3.12 | Évolution de la puissance moyenne consommée par le nœud et le réseau en fonction du nombre de nœuds. . . . .                            | 80  |
| 3.13 | Probabilités des évènements de télé-réveil en fonction de la durée de transmission des données. . . . .                                 | 82  |
| 3.14 | Évolution du taux moyen de livraison des trames en fonction de la période de requête à la BS. . . . .                                   | 86  |
| 3.15 | Évolution du débit de données reçues à la BS en fonction de la période de requête. . . . .  | 87  |
| 3.16 | Évolution de la latence moyenne de réception des données à la BS. . . . .   | 88  |
| 3.17 | Évolution de l'énergie moyenne consommée par bit des nœuds en fonction de la période de requête à la BS. . . . .                        | 89  |
| 3.18 | Évolution du taux moyen de livraison des trames en fonction de la taille des données du nœud. . . . .                                   | 90  |
| 3.19 | Évolution du débit de données reçues à la BS en fonction de la taille des données du nœud. . . . .                                      | 90  |
| 3.20 | Évolution de la latence moyenne de réception des données à la BS en fonction de la taille des données du nœud. . . . .                  | 91  |
| 3.21 | Évolution de l'énergie moyenne consommée par bit des nœuds en fonction de la taille des données. . . . .                                | 92  |
| 3.22 | Comparaison des résultats entre les simulateurs avec la puissance moyenne consommée par les nœuds. . . . .                              | 93  |
| 3.23 | Comparaison des résultats entre les simulateurs avec le débit de données reçue à la BS. . . . .   | 93  |
| 4.1  | Structure de la trame des messages échangés entre la BS et les nœuds avec le protocole DC-DoRa. . . . .                                 | 102 |
| 4.2  | Principe de communication du protocole DC-DoRa. . . . .   | 103 |
| 4.3  | Machine à états finis des protocoles MAC liés au tété-réveil, incluant le protocole DC-DoRa. . . . .                                    | 105 |
| 4.4  | Répartition de l'énergie consommée par les modules de communication avec le protocole DoRa. . . . .                                     | 107 |
| 4.5  | Répartition de l'énergie consommée par le récepteur de télé-réveil en fonction de la période de requête avec le protocole DoRa. . . . . | 108 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 4.6  | Répartition de l'énergie consommée par les modules de communication avec le protocole DC-DoRa. . . . .   | 109 |
| 4.7  | Répartition de l'énergie consommée par le récepteur de télé-réveil en fonction de la période de requête avec le protocole DC-DoRa. . . . .   | 110 |
| 4.8  | Puissance moyenne consommée par le récepteur de télé-réveil en fonction de la période de requête avec les protocoles DoRa et DC-DoRa. . . . .  | 111 |
| 4.9  | Topologie du réseau considéré avec des interférences provenant de sources externes. . . . .  | 112 |
| 4.10 | Évolution de l'énergie moyenne consommée par bit des nœuds en fonction de la période de requête de la BS et du nombre d'interféreurs. . . . .  | 114 |
| 4.11 | Évolution du taux moyen de livraison des trames de données en fonction de la période de requête de la BS et du nombre d'interféreurs. . . . .  | 115 |
| 4.12 | Évolution de la probabilité de fausse alarme en fonction de la période de requête à la BS et du nombre d'interféreurs. . . . .   | 115 |
| 4.13 | Évolution de l'énergie moyenne consommée par bit des nœuds en fonction de la période de requête à la BS avec les protocoles DoRa et DC-DoRa. . . . .                                     | 117 |
| 4.14 | Répartition de l'énergie consommée par le récepteur de télé-réveil avec le protocole DoRa, en présence d'interféreurs ( $N_{int} = 6$ ). . . . .   | 117 |
| 4.15 | Répartition de l'énergie consommée par le récepteur de télé-réveil avec le protocole DC-DoRa, en présence d'interféreurs ( $N_{int} = 6$ ). . . . .                                      | 118 |
| 4.16 | Évolution de l'énergie moyenne consommée par bit des nœuds en fonction du nombre de nœuds interféreurs avec les protocoles DoRa et DC-DoRa. . . . .                                      | 119 |
| 5.1  | Le matériel NI USRP-2922 [112]. . . . .  | 124 |
| 5.2  | Schéma fonctionnel du VI (face arrière). . . . .   | 125 |
| 5.3  | Face avant du VI pour l'entrée des paramètres. . . . .   | 126 |
| 5.4  | Photographie de la platine d'essai pour le microcontrôleur ATmega328P. . . . .   | 128 |
| 5.5  | Circuit du récepteur de télé-réveil avec le PIC24F. $C_1 = 10 \mu\text{F}$ , $C_2 = 100 \text{ nF}$ , $C_3 = 100 \text{ nF}$ , $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ , $R_2 = 470 \Omega$ . . . . . | 129 |
| 5.6  | Photographie de la platine d'essai pour le microcontrôleur PIC24F. . . . .   | 129 |
| 5.7  | Schéma du circuit électronique. . . . .  | 131 |
| 5.8  | Routage de la carte électronique. . . . .  | 132 |
| 5.9  | Photographie de la carte électronique avec le microcontrôleur PIC24F. . . . .  | 132 |
| 5.10 | Diagramme d'états du microcontrôleur selon le protocole défini. . . . .  | 134 |
| 5.11 | Réseau de rectenna en série [117], dimensions : $9 \times 5 \text{ cm}$ . . . . .  | 135 |
| 5.12 | Types d'antennes utilisés pour l'émetteur de télé-réveil. . . . .  | 136 |
| 5.13 | Photographie du module radio LoRa utilisé, dimensions : $4,3 \times 3,9 \text{ cm}$ . . . . .  | 137 |
| 5.14 | Photographie du montage expérimental lors de la réception du signal sans fil. . . . .  | 140 |
| 5.15 | Capture d'écran de l'oscilloscope lors de la réception du signal sans fil. . . . .   | 140 |
| 5.16 | Illustration du temps de montée $T_b$ et de la durée d'un bit $T_b$ . . . . .  | 141 |
| 5.17 | Évolution de la tension en sortie de la rectenna en fonction du gain en émission. . . . .  | 143 |
| 5.18 | Lecture numérique du signal reçu par l'Arduino en sortie de la rectenna. . . . .   | 144 |
| 5.19 | Validation de la version 1 du prototype. [Lien vidéo]. . . . .   | 146 |

---

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.20 | Photo du montage expérimental pour la validation du protocole de communication DoRa. . . . .                                  | 148 |
| 5.21 | Capture d'écran des résultats de communication avec le module LoRa réveillé avec le protocole DoRa. . . . .                   | 149 |
| 5.22 | Photo du montage expérimental pour la validation du protocole DC-DoRa. . . . .  | 150 |
| 5.23 | Mesure de l'activité des récepteurs selon le protocole utilisé. . . . .   | 151 |
| 5.24 | Évolution du taux de livraison des données en provenance des capteurs en fonction du taux d'occupation du canal WiFi. . . . . | 152 |
| 5.25 | Photographie du montage expérimental pour la mesure de la sensibilité du récepteur de télé-réveil. . . . .                    | 154 |
| 5.26 | Photographie du montage expérimental pour la mesure de portée de télé-réveil. . . . .   | 155 |
| 5.27 | Schéma synoptique de mesure de consommation de courant du récepteur de télé-réveil. . . . .                                   | 157 |
| 5.28 | Circuit du montage pour la mesure de consommation d'énergie du PIC24F lors de la réception de l'AdR. . . . .                  | 158 |
| 5.29 | Capture d'écran de l'oscilloscope lors de la réception d'un message AdR. . . . .  | 159 |
| 5.30 | Fonctionnement avec l'oscillateur de type FRC à 8 MHz. . . . .  | 162 |
| 5.31 | Fonctionnement avec l'oscillateur de type FRC à 31 kHz. . . . .   | 162 |
| 5.32 | Fonctionnement avec l'oscillateur de type LPRC à 32 kHz. . . . .  | 163 |
| 5.33 | Fonctionnement en mode sleep. . . . .   | 163 |
| 5.34 | Fonctionnement en mode deep sleep. . . . .  | 163 |
| 5.35 | Capture d'écran de l'oscilloscope lors de la réception d'un <i>Appel de réveil</i> . . . . .                                  | 165 |
| 5.36 | Évolution de la consommation moyenne de courant du système d'adressage en fonction de la période de requête. . . . .          | 171 |

# Liste des tableaux

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 1.1  | Comparaison sur les caractéristiques des récepteurs de télé-réveil de la littérature.   | 36  |
| 2.1  | Caractéristiques des états sélectionnés pour le PIC24F à 25 °C et 3,3 V.  | 45  |
| 2.2  | Caractéristiques des états sélectionnés pour la puce CC2500.  | 47  |
| 2.3  | Paramètres fixés pour le système de réveil radio.   | 51  |
| 2.4  | Liste des différents délais pris en compte pour le processus de réveil radio d'un nœud.   | 54  |
| 2.5  | Récapitulatif des performances théoriques du système de télé-réveil.  | 57  |
| 3.1  | Paramètres d'entrée par défaut utilisés pour les simulations de cette section.  | 77  |
| 3.2  | Paramètres de simulation pour l'étude comparative.  | 85  |
| 4.1  | Paramètres de simulation pour l'évaluation comparative des performances.  | 106 |
| 4.2  | Paramètres de simulation pour l'évaluation des interférences.   | 113 |
| 5.1  | Paramètres de la face arrière du VI sous LabVIEW.   | 124 |
| 5.2  | Paramètres de configuration du module LoRa.   | 137 |
| 5.3  | Liste des matériels utilisés pour le démonstrateur.   | 138 |
| 5.4  | Liste des matériels de mesure.  | 138 |
| 5.5  | Tension mesurée sur le port analogique de l'Arduino en fonction du gain en émission de l'émetteur radio (USRP) pour $d = 20$ cm.                                | 142 |
| 5.6  | Durée d'un bit $T_b$ pour le signal numérique reçu et transmis.   | 144 |
| 5.7  | Paramètres pour obtenir un débit binaire de 4800 bps.   | 145 |
| 5.8  | Résultats de la validation expérimentale du protocole DoRa.   | 150 |
| 5.9  | Probabilité de validation du réveil $\mathbb{P}(VR)$ mesurée en fonction de la distance émetteur-récepteur de télé-réveil pour $P_t = 100$ mW et $G_t = 2$ dBi. | 156 |
| 5.10 | Portée de télé-réveil en fonction des antennes utilisées à l'émission.  | 156 |
| 5.11 | Mesure de courant pour les deux modes de fonctionnement.  | 161 |
| 5.12 | Mesure de courant pour différents modes de fonctionnement.  | 164 |
| 5.13 | Délais de réveil et énergie consommée lors d'un réveil avec l'utilisation de différents types d'oscillateurs.   | 166 |
| 5.14 | Comparaison des caractéristiques de notre récepteur de tél-réveil avec la littérature.  | 168 |
| 5.15 | Paramètres considérés pour le calcul de consommation moyenne de courant pour divers composants d'adressage.   | 170 |



# Nomenclature

|                |  |
|----------------|--|
| <b>ACK</b>     | <b>A</b> CKnowledgment   |
| <b>AdR</b>     | <b>A</b> ppel de <b>R</b> éveil  |
| <b>ASCII</b>   | <b>A</b> merican <b>S</b> tandard <b>C</b> ode for <b>I</b> nformation <b>I</b> nterchange |
| <b>ASK</b>     | <b>A</b> mplitude <b>S</b> hift <b>K</b> eying   |
| <b>BS</b>      | <b>B</b> ase <b>S</b> tation   |
| <b>CCA</b>     | <b>C</b> lear <b>C</b> hannel <b>A</b> ssessment   |
| <b>CTS</b>     | <b>C</b> lear <b>T</b> o <b>S</b> end  |
| <b>DC-DoRa</b> | <b>D</b> uty-Cycled <b>D</b> ouble <b>R</b> adio   |
| <b>DoRa</b>    | <b>D</b> ouble <b>R</b> adio   |
| <b>DSWDT</b>   | <b>D</b> eep <b>S</b> leep <b>W</b> atch <b>D</b> og <b>T</b> imer                         |
| <b>FRC</b>     | <b>F</b> ast <b>R</b> C  |
| <b>IEEE</b>    | <b>I</b> nstitute of <b>E</b> lectrical and <b>E</b> lectronics <b>E</b> ngineers          |
| <b>IRQ</b>     | <b>I</b> nterrupt <b>R</b> e <b>Q</b> uest   |
| <b>LED</b>     | <b>L</b> ight <b>E</b> mitting <b>D</b> iode   |
| <b>LoRa</b>    | <b>L</b> ong <b>R</b> ange   |
| <b>LPFRC</b>   | <b>L</b> ower <b>P</b> ower <b>F</b> ast <b>R</b> C  |
| <b>LPRC</b>    | <b>L</b> ow <b>P</b> ower <b>R</b> C   |
| <b>MAC</b>     | <b>M</b> edia <b>A</b> ccess <b>C</b> ontrol   |
| <b>OOK</b>     | <b>O</b> n- <b>O</b> ff <b>K</b> eying   |
| <b>OSI</b>     | <b>O</b> pen <b>S</b> ystems <b>I</b> nterconnection                                       |
| <b>PWM</b>     | <b>P</b> ulse- <b>W</b> idth <b>M</b> odulation  |
| <b>RTCC</b>    | <b>R</b> eal- <b>T</b> ime <b>C</b> lock and <b>C</b> alendar                              |
| <b>RCSF</b>    | <b>R</b> éseau de <b>C</b> apteurs <b>S</b> ans <b>F</b> il                                |
| <b>RFID</b>    | <b>R</b> adio <b>F</b> requency <b>I</b> Dentification                                     |
| <b>RTS</b>     | <b>R</b> equest <b>T</b> o <b>S</b> end  |



|             |   |
|-------------|---|
| <b>RF</b>   | <b>R</b> adio <b>F</b> réquence   |
| <b>SDR</b>  | <b>S</b> oftware <b>D</b> efined <b>R</b> adio                              |
| <b>SPI</b>  | <b>S</b> erial <b>P</b> eripheral <b>I</b> nterface                         |
| <b>TDMA</b> | <b>T</b> ime <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess               |
| <b>UART</b> | <b>U</b> niversal <b>A</b> synchronous <b>R</b> eceiver <b>T</b> ransmitter |
| <b>VI</b>   | <b>V</b> irtual <b>I</b> nstrument  |

# Symboles

|                  |  |          |
|------------------|--|----------|
| $D_{max}$        | Distance maximale de télé-réveil                       | m        |
| $D_b$            | Débit binaire  | bps      |
| $E_e$            | Énergie consommée par l'état $e$                       | J        |
| $F_{cy}$         | Fréquence d'instruction                                | Hz       |
| $F_p$            | Fréquence porteuse du signal radio                     | Hz       |
| $G_r$            | Gain de réception de l'antenne                         |          |
| $G_t$            | Gain de transmission de l'antenne                      |          |
| $I_c$            | Courant consommé                                       | A        |
| $n$              | Coefficient d'atténuation du signal radio              |          |
| $N$              | Nombre de nœuds  |          |
| $N_{int}$        | Nombre de nœuds interférents                           |          |
| $N_{add}$        | Taille du champs d'adressage                           | bit      |
| $N_{AdR}$        | Taille du message AdR                                  | bit      |
| $N_{don}$        | Taille du message de données                           | bit      |
| $N_{pay}$        | Taille des données utiles                              | bit      |
| $N_{pre}$        | Taille du préambule                                    | bit      |
| $\mathbb{P}(ED)$ | Probabilité d'échec de détection du signal de réveil   |          |
| $\mathbb{P}(FA)$ | Probabilité de fausse alarme                           |          |
| $\mathbb{P}(RC)$ | Probabilité de rejet correct                           |          |
| $\mathbb{P}(SD)$ | Probabilité de succès de détection du signal de réveil |          |
| $P_e$            | Puissance consommée par l'état $e$                     | W        |
| $P_t$            | Puissance de transmission                              | W        |
| $R_c$            | Rayon de couverture                                    | m        |
| $R_m$            | Résistance de mesure                                   | $\Omega$ |
| $S$              | Sensibilité du récepteur                               | dBm      |

---

|             |  |          |
|-------------|--|----------|
| $T_{act}$   | Durée du mode actif                            | s        |
| $T_{att}$   | Fenêtre d'attente à la BS                      | s        |
| $T_b$       | Durée d'un bit                                 | s        |
| $T_m$       | Temps de montée                                | s        |
| $T_e$       | Durée occupée par l'état $e$                   | s        |
| $T_{off}$   | Période d'inactivité liée au protocole DC-DoRa | s        |
| $T_{trame}$ | Durée de transmission de la trame des données  | s        |
| $T_{req}$   | Période de requête de la BS                    | s        |
| $U_m$       | Tension aux borne de la résistance de mesure   | V        |
| $U_{Gen}$   | Tension du générateur                          | V        |
| $V_{DC}$    | Tension en sortie de la rectenna               | V        |
| $V_{cc}$    | Tension d'alimentation                         | V        |
| $Z_c$       | Impédance d'entrée du comparateur              | $\Omega$ |
| $\lambda$   | Longueur d'onde                                | $m^{-1}$ |
| $\eta$      | Rendement de conversion RF-DC                  |          |
| $\sigma$    | Écart-type de l'effet de masque                | dBm      |

# Introduction générale

Nous connaissons aujourd'hui une forte croissance de l'Internet des objets<sup>1</sup>. L'infrastructure apportée par l'Internet des objets permet de relier le monde physique avec le monde digital. L'Internet des objets repose sur l'interconnexion entre des objets dotés d'une adresse unique et d'une intelligence propre. Ces objets sont alors nommés objets intelligents ou objets connectés. Ils peuvent collecter des informations relatives à l'environnement dans lequel ils se trouvent, et voir même interagir avec cet environnement. En 2015, le nombre d'appareils connectés était de 15,4 milliards selon une étude effectuée par IHS[1]. Des prévisions suggèrent un effectif compris entre 30 et 50 milliards d'appareils connectés en 2020 selon IHS ou Cisco [2].

La communication est essentielle pour connecter ces objets entre eux ou avec l'Internet. À ce titre, plusieurs réseaux et technologies de communication existent. Les réseaux de communications peuvent être classés selon leur portée de communication ou leur zone de couverture en cinq types :

- Un réseau corporel (BAN<sup>2</sup>) couvre les régions autour ou dans le corps humain.
- Un réseau personnel (PAN<sup>3</sup>) couvre une surface d'une dizaine de mètres avec des technologies telles que le Bluetooth Low Energy, le Zigbee ou la RFID.
- Un réseau local (LAN<sup>4</sup>) couvre une centaine de mètres comme par exemple une habitation ou un bâtiment. Le WiFi est la technologie la plus répandue pour ce type de réseau.
- Un réseau métropolitain (MAN<sup>5</sup>) peut couvrir une ville entière avec le WiMAX comme standard de communication généralement utilisé.
- Un réseau étendu (WAN<sup>6</sup>) couvre une zone allant de l'échelle d'un pays à la planète entière. Les technologies utilisées sont par exemple le GSM, la 4G, la LTE-Advanced, LoRaWAN ou Sigfox.

---

<sup>1</sup>De l'anglais *Internet of Things* ou IoT

<sup>2</sup>Abréviation anglaise : *Body Area Network*.

<sup>3</sup>Abréviation anglaise : *Personal Area Network*.

<sup>4</sup>Abréviation anglaise : *Local Area Network*.

<sup>5</sup>Abréviation anglaise : *Metropolitan Area Network*.

<sup>6</sup>Abréviation anglaise : *Wide Area Network*.

Les exemples de technologies qui ont été cités précédemment sont uniquement des technologies de communication sans fil, bien qu'il en existe en filaire. Les objets connectés de demain ne peuvent se déployer en filaire vu le nombre d'objets à venir et afin de faciliter le déploiement.

Le Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) fait partie intégrante de l'Internet des objets puisque les objets doivent être connectés en liaison sans fil pour transmettre diverses informations [3, 4]. De nombreux travaux de recherche ont été conduits au cours des vingt dernières années dans ce domaine [5–8].

Les RCSF sont aujourd'hui utilisés dans les secteurs militaires, industriels, environnementaux, médicaux, e-santé... On ne pourrait citer toutes les applications existantes et potentielles au vu de l'ampleur des possibilités. Par exemple, les RCSF permettent de détecter ou de traquer les mouvements ennemis dans le domaine militaire [9]. Dans le domaine industriel, ils sont utilisés pour contrôler le procédé de production [10]. Au niveau environnemental, on peut citer la collecte d'informations météorologique ou encore la détection d'activités sismiques [11, 12].

Un RCSF est un réseau composé de plusieurs nœuds de capteurs pouvant communiquer entre eux par liaison sans fil, comme illustré sur la figure 1. La distribution de ces nœuds dans un champ d'observation permet d'obtenir des informations concernant un phénomène mesuré à différentes positions et en temps réel. Ces informations sont ensuite transmises à une Station de Base (BS) par liaison directe en mono-saut, ou par l'intermédiaire des autres nœuds de capteur en multi-saut. La BS peut stocker localement les données pour afficher les mesures des capteurs. Elle peut également rendre ces mesures disponibles en ligne à d'autres utilisateurs.

Un nœud de capteurs est typiquement constitué d'un microcontrôleur (MCU), d'une interface radio, d'un convertisseur analogique numérique (CAN), d'un ou plusieurs capteurs, d'une mémoire de stockage et d'une source d'énergie. Le nœud peut également disposer d'actionneurs s'il doit aussi contrôler l'environnement.

## Projet de recherche

L'alimentation du nœud de capteurs est un problème récurrent puisqu'elle est effectuée à travers des batteries. Dans la plupart des cas, la recharge ou le remplacement des batteries du capteur n'est pas concevable d'un point de vue logistique ou fonctionnel. En effet, les capteurs peuvent être déployés dans des endroits difficiles d'accès, ce qui contraint leur recharge après déploiement. Cette situation est la raison d'un vaste champ de recherche durant ces dernières décennies pour optimiser la consommation énergétique du nœud de

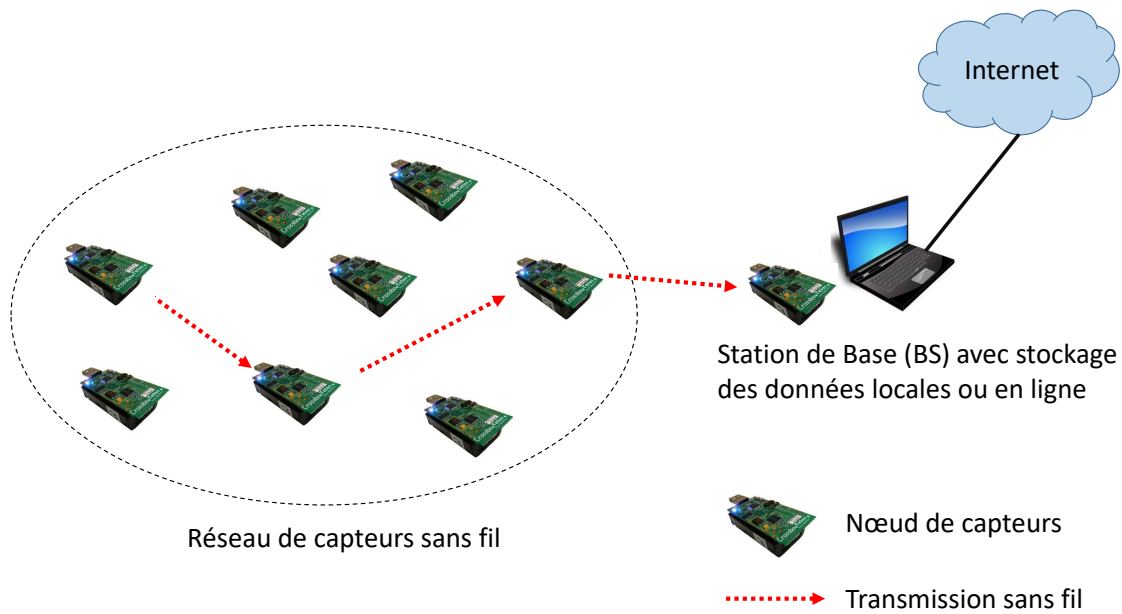


FIGURE 1: Architecture d'un RCSF [5–8]. .

capteur. Un aperçu des approches effectuées dans ce domaine est présenté au début du chapitre 1.

En parallèle à cette optimisation énergétique des capteurs, on envisage de plus en plus d'intégrer une récupération d'énergie ambiante pour accroître la durée de vie du capteur [13–19]. Il est même possible de réaliser des capteurs autonomes en énergie grâce à la récupération d'énergie ambiante, ce qui permet de supprimer la batterie du capteur. Les sources ambiantes actuellement considérées sont l'énergie photovoltaïque, l'énergie vibratoire, l'énergie thermique et l'énergie Radio-Fréquence (RF). Cette dernière source d'énergie fait partie d'un axe de recherche au sein de notre laboratoire [20, 21]. Les travaux sur le transfert d'énergie sans fil dans la bande des 2,4 GHz ont permis de réaliser des rectennas<sup>7</sup>, qui sont utilisées dans le cadre de notre projet.

Néanmoins, notre projet de recherche ne s'oriente pas vers la récupération d'énergie sans fil pour télé-alimenter les nœuds de capteurs. Cette approche reste transversale à notre projet de recherche principal. Au moment où l'on rédige, le rendement de conversion n'est pas assez élevé pour déployer efficacement cette technologie. En effet, il est possible de télé-alimenter un nœud de capteur à courte distance mais avec un fonctionnement intermittent du nœud. Au lieu d'utiliser l'énergie récupérée pour alimenter le nœud, on peut également utiliser cette énergie récupérée pour télé-alimenter partiellement le nœud et le réveiller à distance.

<sup>7</sup>Contraction anglaise de *rectifying antenna*, antenne redresseuse.

Notre projet consiste à proposer un système et un protocole de télé-réveil basé sur la récupération d'énergie sans fil. Le système de télé-réveil est en fait composé d'un émetteur et d'un récepteur radio qui sera développé et optimisé. L'objectif de l'émetteur est d'envoyer les signaux de réveil, qu'on appellera Appel de Réveil (AdR) dans ce mémoire. Au niveau du récepteur de télé-réveil, l'énergie récupérée à partir du signal AdR est d'abord utilisée pour réveiller le circuit de réception. Puis, cette énergie récupérée est utilisée pour véhiculer une information qui est en général l'adresse du nœud. Cette adresse envoyée permet de réveiller uniquement un nœud du réseau, afin que le nœud réveillé puisse transmettre ses données sans contention dans le canal de communication. Le protocole de réveil définit le procédé de réveil des nœuds ainsi que l'accès au support de communication dans le réseau.

L'objectif principal de cette thèse est de développer un système et un protocole de télé-réveil qui optimise la consommation énergétique des communications sans fil du RCSF. Le premier objectif était de développer un protocole simple de télé-réveil, puisque la complexité entraînerait forcément une consommation énergétique plus élevée. Ce protocole se situe au niveau MAC<sup>8</sup> avec une approche inter-couches, il a été nommé DoRa pour Double Radio. Le protocole DoRa est défini pour un réseau statique avec une topologie en étoile où la BS connaît l'ensemble des nœuds du réseau. L'évaluation des performances vise à montrer que cette approche est plus efficace d'un point de vue énergétique que les protocoles d'accès traditionnels.

La confrontation du système et du protocole DoRa dans un milieu réel pourrait néanmoins poser certaines limites, notamment dans un environnement composé de dispositifs de communications sans fil existants. Nous nous sommes donc intéressés à ce problème dans le but d'évaluer la robustesse du protocole DoRa face aux interférences d'un environnement réel. En cas d'interférences notables dans le milieu, nous proposons une optimisation du protocole avec le DC-DoRa (Duty-Cycled DoRa). Le rôle supplémentaire du protocole DC-DoRa est d'éviter les interférences en provenance d'appareil qui communiquent dans la même bande de fréquence (2,45 GHz). L'apport du protocole DC-DoRa est ensuite évalué pour justifier son efficacité dans un milieu présentant des appareils qui interfèrent.

L'un des avantages du protocole de télé-réveil est la suppression de la surécoute, qui correspond à l'écoute de communications par un nœud alors que ces communications sont destinées à d'autres nœuds du réseau. Cette surécoute est effectivement supprimée au niveau du module radio principale qui gère le transfert de données. En effet, l'écoute du canal est assurée par le récepteur de télé-réveil ici. Toutefois, le problème de sur-écoute persiste au niveau du récepteur de télé-réveil même s'il consomme moins d'énergie que les récepteurs traditionnelles pour écouter le canal. Une évaluation de la proportion d'énergie consommée à cause de la surécoute a été effectuée dans le cadre du protocole de télé-réveil pour souligner ce

---

<sup>8</sup>Abréviation anglaise : Media Access Control

problème, qui était sans solution notable auparavant. Le protocole DC-DoRa est également proposé en tant que solution avec une évaluation de ses performances sur cet aspect.

Enfin, nous voulons valider expérimentalement le système et les protocoles de télé-réveil. Cette approche permet surtout de caractériser réellement les performances du système. Une comparaison entre les mesures réelles et théoriques permettra alors de consolider notre approche. Le modèle de simulation pourra également être validé sur des cas concrets en considérant le même scénario sur la plateforme expérimentale développée. De plus, le système de télé-réveil pourra être déployé dans un environnement non contraint où les interférences ne sont pas contrôlées. Dans ce cas, des mesures de performances pourront être effectuées pour montrer que le système et les protocoles sont assez robustes dans un milieu réel.

## Plan du mémoire

Ce document est organisé en cinq chapitres. En premier lieu, un état de l'art sur les méthodes d'économie d'énergie est abordé dans le chapitre 1. Plus particulièrement, nous développerons l'étude sur les différents systèmes de télé-réveil. Une distinction est faite entre l'aspect protocolaire et matériel du télé-réveil, bien que les protocoles en question soient souvent rattachés à un récepteur de télé-réveil spécifique.

Dans le chapitre 2, on présente la conception de notre système de télé-réveil. Le système fait référence à l'intégration du récepteur de télé-réveil dans un nœud de capteur. De plus, une étude théorique y est menée pour donner une première indication des performances du système de télé-réveil.

Le chapitre 3 est consacré à la conception et l'évaluation des performances du protocole DoRa. Le protocole DoRa est défini pour gérer l'accès au support de communication à travers le système de télé-réveil. Nous y présentons dans un premier temps l'implémentation du protocole DoRa sous OMNeT++. Divers scénarios de simulation sont considérés tout en prenant en compte plusieurs critères de performance. Les résultats sont analysés et comparés avec d'autres protocoles de la littérature.

Puis, le protocole DoRa est optimisé dans le chapitre 4 pour résoudre les problèmes de surécoute et d'interférence qui interviennent au niveau du récepteur de télé-réveil. Le protocole DC-DoRa est proposé en tant que solution à ces problèmes. Nous effectuons ensuite une comparaison des performances entre les protocoles DoRa et DC-DoRa à partir de résultats obtenus par simulation.

Enfin, le chapitre 5 présente une validation et une optimisation expérimentale du système de télé-réveil. Nous y décrivons l'ensemble des matériels utilisés ou développés pour mettre



en place le banc d'essai. Le fonctionnement du système est ensuite validé en expérimentant chaque bloc du récepteur de télé-réveil. Nous y présentons également les méthodes de mesure pour les critères de performance du système. Au final, les caractéristiques de notre récepteur de télé-réveil sont comparées à d'autres approches de la littérature.

## Liste des contributions de la thèse

Les travaux effectués au cours de cette thèse ont donné lieu à diverses formes de communications scientifiques. On y distingue 3 articles de revues internationaux avec comité de lecture, 5 communications à des conférences internationales et 2 communications nationales ou locales. Par ailleurs, une participation à d'autres travaux de recherche a fait l'objet de communications internationales même s'ils n'appartiennent pas à la problématique de cette thèse [22–24].

### Articles de revues internationaux avec comité de lecture :

Jean Lebreton and Nour Murad, Lifetime Optimization of Wireless Sensor Network by a Better Nodes Positioning and Energy Distribution, *IOP Conf. Series: Material Science and Engineering*, October 2014, vol. 67. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/67/1/012011>

Jean Lebreton, Nour Murad and Richard Lorion, Radio Frequency Mapping using an Autonomous Robot: Application to the 2.4 GHz Band, *IOP Conf. Series: Material Science and Engineering*, March 2016, vol. 120. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/120/1/012001>

Jean Mickael Lebreton, Somasekhar Kandukuri, Nour Murad, and Richard Lorion, An Energy-efficient Duty-cycled Wake-up Radio Protocol for Avoiding Overhearing in Wireless Sensor Networks, *Wireless Sensor Network*, August 2016, vol. 8, pp. 176-190. <http://dx.doi.org/10.4236/wsn.2016.88015>

### Communication à des conférences internationales :

Jean Lebreton and Nour Murad, Lifetime Optimization of Wireless Sensor Network by a Better Nodes Positioning and Energy Distribution, *2nd Radio and Antenna Days of the Indian Ocean*, Mauritius, 7-10 April 2014, p. 19.

Jean Lebreton and Nour Murad, Implementation of a Wake-up Radio Cross-Layer Protocol in OMNeT++/MiXiM, *2nd International OMNeT++ Community Summit 2015*, Zurich, Switzerland, 3-4 September 2015. <http://arxiv.org/abs/1509.03553v1>

Jean Mickael Lebreton, Nour Murad and Richard Lorion, Real-Time Radio Signal Mapping using an Autonomous Robot, *IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean*, Mauritius, 21-24 September 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/RADIO.2015.7323377>

Jean Lebreton, Nour Murad, Somasekhar Kandukuri and Richard Lorion, An Energy-Efficient Addressing Mechanism for Wake-up Radio Systems, *IEEE Wireless Telecommunications Symposium 2016*, London, 18-20 April 2016, p. 1-6. <http://dx.doi.org/10.1109/WTS.2016.7482057>

Jean Mickael Lebreton, Somasekhar Kandukuri, Nour Murad, Denis Genon-Catalot, and Richard Lorion, Interference Evaluation of WiFi Devices over Wake-up Radio in Wireless Sensor Networks, *IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean*, Reunion Island, France, 10-13 October 2016. <https://doi.org/10.1109/RADIO.2016.7772034>

### **Communications nationales ou locales :**

Jean Mickaël Lebreton, Denis Genon-Catalot, Nour Murad et Richard Lorion, Système et protocole de télé-réveil appliqués aux réseaux de capteurs sans fil, *GdR MACS - GT ARC (Automatique et Réseaux de Communication)*, Paris, 16 Juin 2016.

Jean Mickael Lebreton, Réseaux de communication pour objets connectés, *Les objets connectés au service de l'environnement, Atelier Techsud*, Saint-Pierre, 13 Octobre 2016.



# Chapitre 1

## État de l'art sur le télé-réveil pour l'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

### Table des matières

---

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.1   | Introduction . . . . .                                    | 10 |
| 1.2   | Méthodes d'économie d'énergie dans les RCSF . . . . .     | 10 |
| 1.2.1 | Optimisation radio . . . . .                              | 11 |
| 1.2.2 | Fonctionnement par cycle d'activité . . . . .             | 13 |
| 1.2.3 | Réduction des données . . . . .                           | 15 |
| 1.2.4 | Routage efficace de l'information . . . . .               | 16 |
| 1.2.5 | Réapprovisionnement de la batterie . . . . .              | 17 |
| 1.2.6 | Synthèse et choix de la méthode . . . . .                 | 18 |
| 1.3   | État de l'art sur les protocoles de réveil . . . . .      | 19 |
| 1.3.1 | Protocoles par rendez-vous planifié . . . . .             | 20 |
| 1.3.2 | Protocoles asynchrones . . . . .                          | 20 |
| 1.3.3 | Protocoles de réveil à la demande . . . . .               | 21 |
| 1.3.4 | Protocoles inter-couches . . . . .                        | 23 |
| 1.3.5 | Protocoles MAC de télé-réveil . . . . .                   | 24 |
| 1.3.6 | Synthèse et choix du type de protocole . . . . .          | 26 |
| 1.4   | Etat de l'art sur les récepteurs de télé-réveil . . . . . | 27 |
| 1.4.1 | Récepteurs de télé-réveil à faible complexité . . . . .   | 28 |
| 1.4.2 | Récepteurs de télé-réveil hétérodynes . . . . .           | 29 |

|   |    |
|---|----|
| 1.4.3 Récepteurs de télé-réveil à base de corrélateur . . . . .       | 31 |
| 1.4.4 Récepteurs de télé-réveil à base de RFID . . . . .              | 32 |
| 1.4.5 Récepteurs de télé-réveil à base de microcontrôleur . . . . .   | 33 |
| 1.4.6 Synthèse et choix du type de récepteur de télé-réveil . . . . . | 34 |
| 1.5 Conclusion . . . . .  | 37 |

---

## 1.1 Introduction

Ce chapitre vise à positionner cette thèse dans un contexte de recherche particulier avec un état de l'art séparé en trois parties.

La première partie répertorie les méthodes d'économie d'énergie dans les RCSF. Cet état de l'art donne une vision globale des approches effectuées pour augmenter la durée de vie des nœuds de capteur. On positionnera également nos travaux dans cet axe global de recherche.

Les deux parties suivantes présentent un état de l'art sur les protocoles de réveil et sur les récepteurs de télé-réveil. Cette étude permet de positionner plus finement notre approche dans la littérature. Nous avons dissocié l'état de l'art sur les protocoles et les récepteurs de télé-réveil même s'ils sont étroitement liés. En effet, les protocoles de télé-réveil sont en général définis pour un récepteur de télé-réveil particulier. Au moment de la rédaction de ce mémoire, aucune standardisation n'a été effectuée dans ce domaine, ce qui explique pourquoi les travaux de recherche vont dans plusieurs directions.

## 1.2 Méthodes d'économie d'énergie dans les RCSF

La problématique énergétique suscite un intérêt majeur dans le domaine des RCSF, puisque les nœuds du réseau sont en général alimentés par des batteries. Plusieurs approches ont été considérées dans la littérature afin de réduire la consommation d'énergie des nœuds du réseau [25–27]. On peut classer ces méthodes d'économies d'énergie en cinq catégories représentées sur la figure 1.1 :

- l'optimisation de la communication radio,
- le fonctionnement par cycle d'activité,
- la réduction des données,
- le routage efficace de l'information,
- le réapprovisionnement de la batterie.

Cette classification nous montre une vue globale de la multitude de mécanismes possibles afin de réduire la consommation d'énergie dans les RCSF, à l'exception des méthodes de

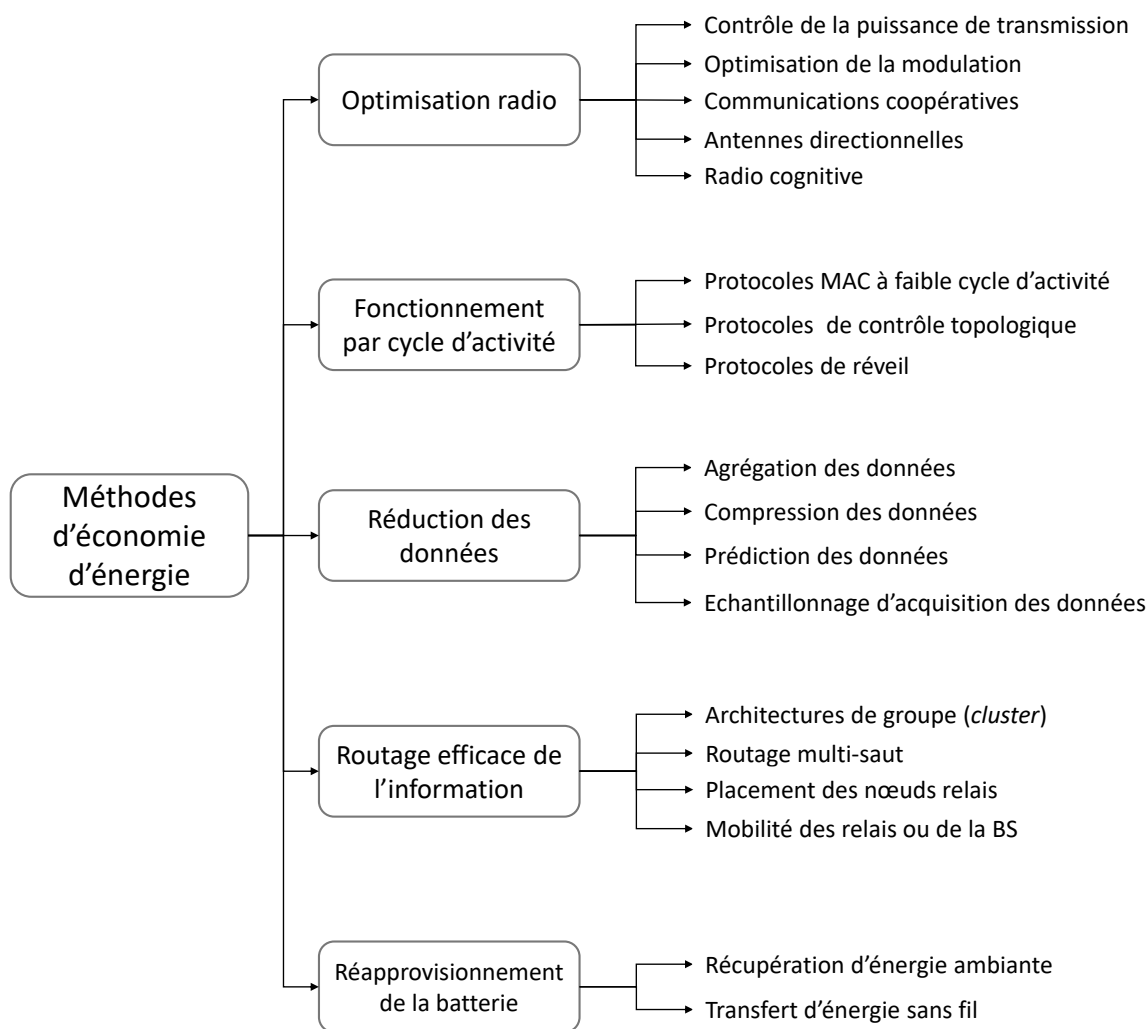


FIGURE 1.1: Classification des méthodes d'économie d'énergie dans les RCSF.

réapprovisionnement de la batterie. Cette dernière méthode permet toutefois d'augmenter la durée de vie du réseau, au même titre que les méthodes d'économies d'énergie. Nous détaillerons chaque catégorie dans les sous-sections suivantes.

### 1.2.1 Optimisation radio

Dans la plupart des cas, on constate que le module radio est le composant qui consomme le plus d'énergie au niveau du nœud de capteur. Afin de réduire la consommation d'énergie causée par la communication radio, plusieurs approches sont proposées pour optimiser les paramètres de communication avec le module radio. Nous présentons les principales techniques suivantes sans ordre particulier :

- le contrôle de la puissance de transmission,
- l'optimisation de la modulation,

- la communication coopérative,
- les antennes directionnelles,
- la radio cognitive.

Tout d'abord, le contrôle de la puissance de transmission a pour objectif d'optimiser l'efficacité énergétique de la transmission radio tout en gardant une bonne connectivité des nœuds [28, 29]. Les protocoles proposés implémentent généralement une technique d'adaptation de la puissance de transmission en se basant sur divers critères. Les critères proposés sont par exemple le calcul d'une puissance idéale de transmission en fonction de la puissance reçue, de la puissance transmise et de la moyenne du bruit.

L'optimisation de la modulation consiste à estimer les paramètres optimaux de modulation pour minimiser la consommation énergétique du module radio. Les recherches dans ce domaine ont pour objectif de trouver un bon compromis entre la taille de la constellation, le nombre de bits par symbole, la durée de transmission, la distance entre les nœuds et le bruit [30, 31].

Le concept des communications coopératives provient du fait que les données transmises à un nœud particulier sont généralement écoutées par les nœuds voisins, ce qui est le principe de la surécoute<sup>1</sup>. Ainsi, la qualité du signal reçu peut être améliorée en faisant coopérer des nœuds disposant d'une seule antenne pour former un émetteur ou récepteur virtuel à multiples antennes [32]. Les transmissions coopératives augmentent également la portée de transmission, ce qui permet de supprimer la nécessité de certains nœuds relais [33].

En ce qui concerne les antennes directionnelles, elles ont la particularité d'envoyer et de recevoir le signal radio dans une seule ou  $n$  directions à la fois. Elles améliorent ainsi la portée de transmission et le débit [34]. L'énergie supplémentaire causée par la surécoute est également réduite par l'utilisation d'antennes directionnelles car uniquement les nœuds dans la direction en question recevront les signaux émis. De plus, il faut moins d'énergie pour transmettre un signal à une distance identique avec une antenne directionnelle comparée à une antenne omnidirectionnelle. De nouveaux protocoles MAC ont d'ailleurs été proposés pour prendre en compte la communication avec des antennes directionnelles dans un RSCF [35].

Enfin, la radio cognitive est une radio intelligente qui est capable d'adapter dynamiquement ses paramètres telles que la fréquence porteuse, la puissance de transmission, la modulation ou la bande passante. Cependant, la radio cognitive consomme plus d'énergie que les radios traditionnelles à l'heure actuelle en raison de sa plus grande complexité. Des travaux récents s'orientent dans l'optimisation énergétique des radios cognitives pour utiliser efficacement l'énergie des batteries [36].

---

<sup>1</sup>De l'anglais *overhearing*

## 1.2.2 Fonctionnement par cycle d'activité

Un fonctionnement par cycle d'activité<sup>2</sup> signifie que le nœud fonctionne selon différents états avec des périodes prédéfinies. Cette considération vient du fait que la consommation énergétique d'un nœud en mode inactif<sup>3</sup> reste trop importante à long terme. De plus, cette consommation d'énergie n'apporte rien au réseau vu que le nœud ne fait rien à part écouter le canal radio. Le principe du fonctionnement par cycle d'activité est alors de passer le nœud en mode sommeil lorsque celui-ci est inactif et de le réveiller pour transmettre ou recevoir des informations. Cette fonctionnalité est rendue possible grâce aux récentes avancées technologiques qui permettent plusieurs niveaux de consommation énergétique pour les microcontrôleurs et les puces radios.

Le cas idéal serait que le nœud reste en mode sommeil la majeure partie du temps et se réveille uniquement au moment de la transmission de données. Dans ce cas, on tend vers des faibles cycles d'activité<sup>4</sup>. Un cycle est la somme d'une période de sommeil et d'une période active, comme illustré sur la figure 1.2. Le cycle d'activité est le rapport de la durée de la période active sur la durée du cycle.

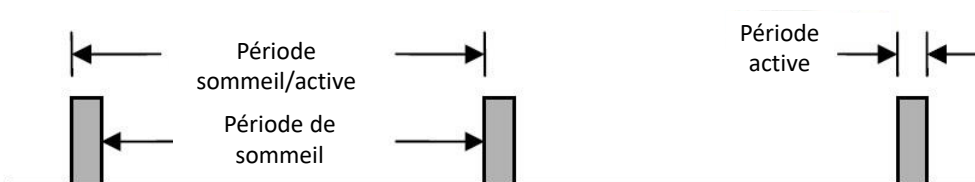


FIGURE 1.2: Représentation des différentes périodes d'un fonctionnement par cycle [37].

Le fonctionnement par cycle d'activité peut être géré à plusieurs niveaux dans la couche protocolaire, mais il se trouve en général au niveau MAC. On distingue trois types de techniques pour le fonctionnement par cycle :

- les protocoles MAC à faible cycle d'activité,
- les protocoles de contrôles topologiques,
- les protocoles de réveil.

Tout d'abord, la première technique concerne les protocoles MAC à faible cycle d'activité. Plusieurs protocoles MAC ont été proposés pour les RCSF afin d'optimiser l'accès au support en fonction du cycle d'activité implémenté [37, 38]. Ces protocoles sont généralement classés en trois types : TDMA<sup>5</sup>, basé sur la contention ou hybride.

<sup>2</sup>De l'anglais *duty cycling*

<sup>3</sup>De l'anglais *idle*

<sup>4</sup>*Low Duty Cycle*

<sup>5</sup>Abréviation anglaise : *Time Division Multiple Access*



Les protocoles MAC basés sur un mécanisme TDMA allouent un ou plusieurs créneaux horaires à chaque nœud. Le nœud peut donc éteindre son module radio en dehors des créneaux horaires qui lui sont alloués, ce qui permet de réduire la consommation d'énergie. Les protocoles les plus efficaces pour réduire la consommation d'énergie sont les protocoles FLAMA [39], LMAC [40], ATMA [41] et LEFT [42].

Les protocoles MAC basés sur la contention sont les plus répandus dans les RSCF. L'implémentation du cycle d'activité est couplée à la méthode d'accès du protocole MAC. Le protocole B-MAC [43] est le protocole le plus populaire de cette catégorie. Le protocole B-MAC utilise un schéma asynchrone de réveil basé sur une écoute périodique de canal à faible consommation, aussi nommé LPL<sup>6</sup>. D'une part, les nœuds se réveillent périodiquement pour vérifier si une communication est en cours. D'autre part, les nœuds qui souhaitent transmettre des données émettent un préambule assez long pour être entendus par un nœud qui se réveille. Parmi les autres protocoles efficaces, on peut citer les protocoles S-MAC [44], T-MAC [45] et D-MAC [46].

Les protocoles MAC hybrides utilisent les deux méthodes d'accès précédentes selon le niveau de contention dans le réseau. Quand le niveau de contention est faible, les protocoles hybrides adoptent une méthode d'accès basée sur la contention de type CSMA<sup>7</sup>. Lorsque le niveau de contention est élevé, un protocole de type TDMA sera utilisé à la place. Les protocoles PTDMA [47] et Z-MAC [48] sont des exemples de protocoles hybrides qui adoptent cette démarche.

Puis, la deuxième technique fait référence aux protocoles à contrôle topologique. Le concept de contrôle topologique est lié aux redondances du réseau. En fait, un trop grand nombre de nœuds placés trop proches les uns des autres n'apporterait rien aux mesures du phénomène physique. Dans ce cas, les protocoles de contrôles topologiques permettent d'activer ou de désactiver des nœuds selon leur localisation ou selon la connectivité dans le réseau [49]. La désactivation temporaire des nœuds les moins utiles permet d'éviter un gaspillage d'énergie.

Enfin, la troisième technique concerne les protocoles de réveil. Ces protocoles sont définis de manière indépendante du protocole MAC et de la topologie. Ils définissent un protocole de mise en veille et de réveil pour un composant spécifique, qui est en général la radio de communication. De plus, les protocoles de réveil peuvent être implémentés sur la couche réseau ou application. Cela permet une plus grande flexibilité, notamment pour les besoins applicatifs du réseau. Nous présenterons ces protocoles de réveil plus en détail dans la section 1.3.

---

<sup>6</sup>Abréviation anglaise : *Low Power Listening*

<sup>7</sup>Abréviation anglaise : *Carrier Sense Multiple Access*

### 1.2.3 Réduction des données

La réduction des données a pour objectif de limiter la quantité de données envoyées vers la BS. Ainsi, l'énergie consommée pour la transmission et la réception des données sera réduite. On peut classer les techniques de réduction de données en quatre catégories :

- l'agrégation de données,
- la compression de données,
- la prédiction de données,
- l'échantillonnage d'acquisition des données.

L'agrégation de données est typiquement effectuée lors du routage des données vers la BS. Considérons le cas où un nœud est utilisé en tant que relai et qu'il possède également des données à transmettre. Il peut agréger les données à relayer avec ses propres données afin de réduire la quantité de données à transmettre à la BS. Toutefois, ce type d'approche est spécifique aux applications du RCSF et la précision des données reçues peut être réduite [50, 51].

Ensuite, la compression des données consiste à encoder les données de manière à réduire la taille de celles-ci. Cette approche est efficace car le traitement des données consomme bien moins d'énergie que la transmission sans fil de données. Des techniques spécifiques de compression de données ont été proposées pour les RCSF ces dernières années, car ils doivent prendre en compte la capacité limitée des nœuds de capteur [52].

La prédiction des données se base sur la construction d'un modèle représentant l'évolution des données du phénomène physique capturé. Ce modèle doit être implémenté au niveau des nœuds et de la BS. Par exemple, dans le paradigme PREMON<sup>8</sup> [53], les nœuds doivent vérifier que le modèle est toujours valable en faisant des mesures régulières. Si les mesures correspondent au modèle, les nœuds ne transmettent pas les mesures à la BS, ce qui permet d'économiser de l'énergie. Dans le cas contraire, ils informent la BS en envoyant les mesures ou ils redémarrent une procédure de paramétrage du modèle.

Enfin, la dernière technique de réduction des données est l'échantillonnage d'acquisition des données. La fréquence d'échantillonnage influe directement sur la quantité de données à transmettre. Des algorithmes de contrôle de l'échantillonnage ont été proposés dans la littérature pour adapter la fréquence d'échantillonnage au phénomène physique mesuré [54, 55]. Ces techniques permettent d'éviter une surconsommation à la fois des capteurs, du microcontrôleur et du module radio.

<sup>8</sup>Abréviation anglaise : PREdictive MONitoring

### 1.2.4 Routage efficace de l'information

Le routage de l'information peut s'avérer être couteux en énergie, surtout dans un réseau à routage multi-sauts (bien que le mono-saut soit privilégié pour les réseaux IoT modernes). Les stratégies de routage efficace de l'information sont essentielles pour router les données tout en préservant l'énergie du réseau au maximum. Nous divisons ces stratégies en quatre types :

- l'architecture de groupe (cluster),
- le routage multi-sauts,
- le placement des nœuds relais,
- la mobilité des relais ou de la BS.

Tout d'abord, l'architecture de groupe repose sur la division du réseau en groupe de nœuds comme il est illustré sur la figure 1.3. Chaque groupe est géré par un nœud qui a été élu chef de groupe<sup>9</sup>. D'une part, le chef de groupe gère la communication à l'intérieur de son groupe. D'autre part, il gère la communication avec les autres chefs de groupe ou la BS. D'un point de vue énergétique, l'architecture de groupe est efficace car elle permet de réduire le nombre de transmission et la puissance de transmission du nœud. La consommation d'énergie est également équilibrée entre les nœuds en faisant tourner l'élection du chef de groupe [56, 57].

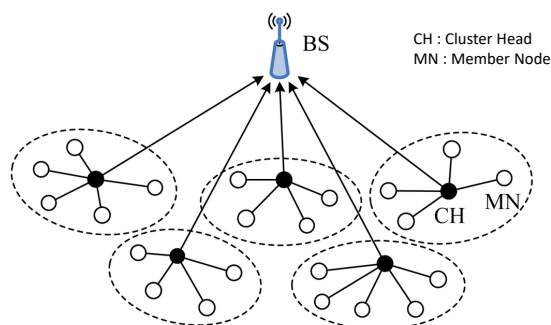


FIGURE 1.3: Topologie basique d'un réseau avec une architecture de groupe [58].

À l'inverse de la technique précédente, le routage multi-sauts consiste à router l'information de nœud à nœud sans avoir d'architecture particulière. Les protocoles de routage multi-sauts doivent également prendre en compte l'énergie résiduelle des nœuds pour choisir un trajet de l'information qui conserve au mieux l'énergie du réseau [59, 60]. Ce type de protocole rencontre souvent un problème de trou d'énergie<sup>10</sup> qu'il est difficile d'éviter [61]. En effet, les nœuds proches de la BS sont plus sollicités que les autres nœuds du réseau. La durée de vie de ces nœuds est donc plus faible à cause du routage de l'information.

<sup>9</sup>De l'anglais *cluster head*

<sup>10</sup>De l'anglais *energy hole*

Le placement de nœuds relais peut aider à réduire ce problème de trous d'énergie. Ces nœuds relais doivent être placés de manière optimale de façon à équilibrer la consommation d'énergie dans le réseau. Des travaux ont également été effectués pour trouver le nombre minimum de nœuds relais pour prolonger la durée de vie du réseau [62].

Enfin, la dernière technique repose sur la mobilité des nœuds relais ou des BS. La mobilité n'était pas prise en compte dans les premières considérations de RCSF puisque les nœuds étaient considérés statiques. La mobilité peut être assurée de deux façons différentes selon qu'elle fasse partie de l'infrastructure du réseau ou de l'environnement. Quand la mobilité est gérée par l'environnement, les nœuds peuvent être placés sur des éléments mobiles tels que des animaux ou des véhicules automobiles (MANET<sup>11</sup> ou VANET<sup>12</sup>). Dans le cas où la mobilité est gérée par l'infrastructure du réseau, une capacité motrice peut être ajoutée au nœud de capteur. Cette deuxième option peut être effectuée par un robot mobile par exemple, ce qui permet au nœud de gérer ses déplacements de manière autonome. Cette mobilité possède un coût énergétique plus élevé que le nœud de capteur en lui-même, c'est pourquoi on considère la mobilité uniquement pour la BS ou des nœuds relais. Pour ce qui est de la communication, la mobilité permet de réduire considérablement l'énergie consommée pour relayer les données dans le réseau [63, 64].

### 1.2.5 Réapprovisionnement de la batterie

À l'inverse des méthodes précédentes, le réapprovisionnement de la batterie ne permet pas d'économiser l'énergie des nœuds. Nous présentons cette méthode car elle augmente naturellement la durée de vie du réseau. L'objectif principal des techniques de réapprovisionnement consiste à pouvoir recharger la batterie du nœud sans une intervention humaine. Nous distinguerons deux approches pour réapprovisionner la batterie en énergie :

- la récupération d'énergie ambiante,
- le transfert d'énergie sans fil.

D'une part, la récupération d'énergie ambiante repose sur des technologies pouvant convertir l'énergie ambiante en énergie électrique [65]. Cette énergie ambiante peut être de type solaire, éolien ou cinétique par exemple. L'énergie électrique peut soit être stockée dans une batterie, soit être utilisée directement. Comme la source d'énergie ne sera pas forcément constante au cours du temps, le nœud de capteur doit adapter son fonctionnement à l'énergie disponible. Dans le cas de l'énergie solaire, le nœud pourra fonctionner correctement durant le jour mais il devra fonctionner de manière intermittente durant la nuit. La récupération

<sup>11</sup>Abréviation anglaise : *Mobile Ad-hoc NETWORK*

<sup>12</sup>Abréviation anglaise : *Vehicular Ad-hoc NETWORK*

d'énergie ambiante permettrait en théorie une durée de vie illimitée du capteur, en tout cas d'un point de vue énergétique.

D'autre part, le transfert d'énergie sans fil pourrait également augmenter la durabilité des RCSF, voire de les rendre autonomes en énergie. Deux systèmes existent pour le transfert d'énergie sans fil dans un RCSF : le rayonnement électromagnétique et le couplage inductif par résonance. À l'heure actuelle, ces technologies permettent de considérer un transfert d'énergie pour une distance de l'ordre de plusieurs mètres, principalement à cause de la perte d'efficacité pour des plus grandes distances. Quelques applications ont été développées avec par exemple l'alimentation de capteurs médicaux et d'appareils implantés dans le corps humain [66]. Afin de palier au problème de distances, l'utilisation de chargeurs mobiles a été proposée pour alimenter les nœuds du réseau de manière contrôlée [67].

### 1.2.6 Synthèse et choix de la méthode

Nous avons vu dans les sous-sections précédentes un ensemble de méthodes d'économie d'énergie dans les RCSF. Ces méthodes se trouvent à différents niveaux dans la pile protocolaire mais on peut en faire sortir une raison commune. Cette raison est en fait la réduction de la consommation énergétique du module radio, qui est l'élément qui consomme le plus d'énergie dans un RCSF.

Nous pensons que le module radio doit être activé uniquement lorsque son utilisation est nécessaire. Parmi les méthodes présentées, on s'oriente alors vers un fonctionnement par cycle d'activité. Les protocoles de réveil ont l'avantage de pouvoir être définis séparément des protocoles MAC ou de la topologie du réseau. Ils permettent de concevoir un réveil du module radio lorsqu'on doit communiquer avec ce dernier. Cette méthode semble donc la plus adéquate pour l'économie d'énergie du nœud de capteur. On présentera un état de l'art sur les protocoles de réveil dans la section suivante afin de placer notre étude dans un contexte plus précis.

Bien que nous focalisions notre étude sur les protocoles de réveil, nous prendrons en considération certains aspects qui ont été traités dans la littérature pour optimiser les performances du protocole de réveil. En effet, on utilisera certaines techniques présentées dans l'optimisation radio telles que les antennes directionnelles ou encore l'optimisation de la modulation. Des techniques propres aux protocoles MAC à faible cycle d'activités seront réaménagées pour notre protocole de réveil. Enfin, le système de télé-réveil est basé sur le transfert d'énergie sans fil. L'énergie récupérée n'est toutefois pas utilisée pour le réapprovisionnement de la batterie, mais elle alimente partiellement le circuit du récepteur de télé-réveil. Nous représentons sur la figure 1.4 la thématique principale de cette thèse en grisé, tout en soulignant les méthodes utilisées transversalement.

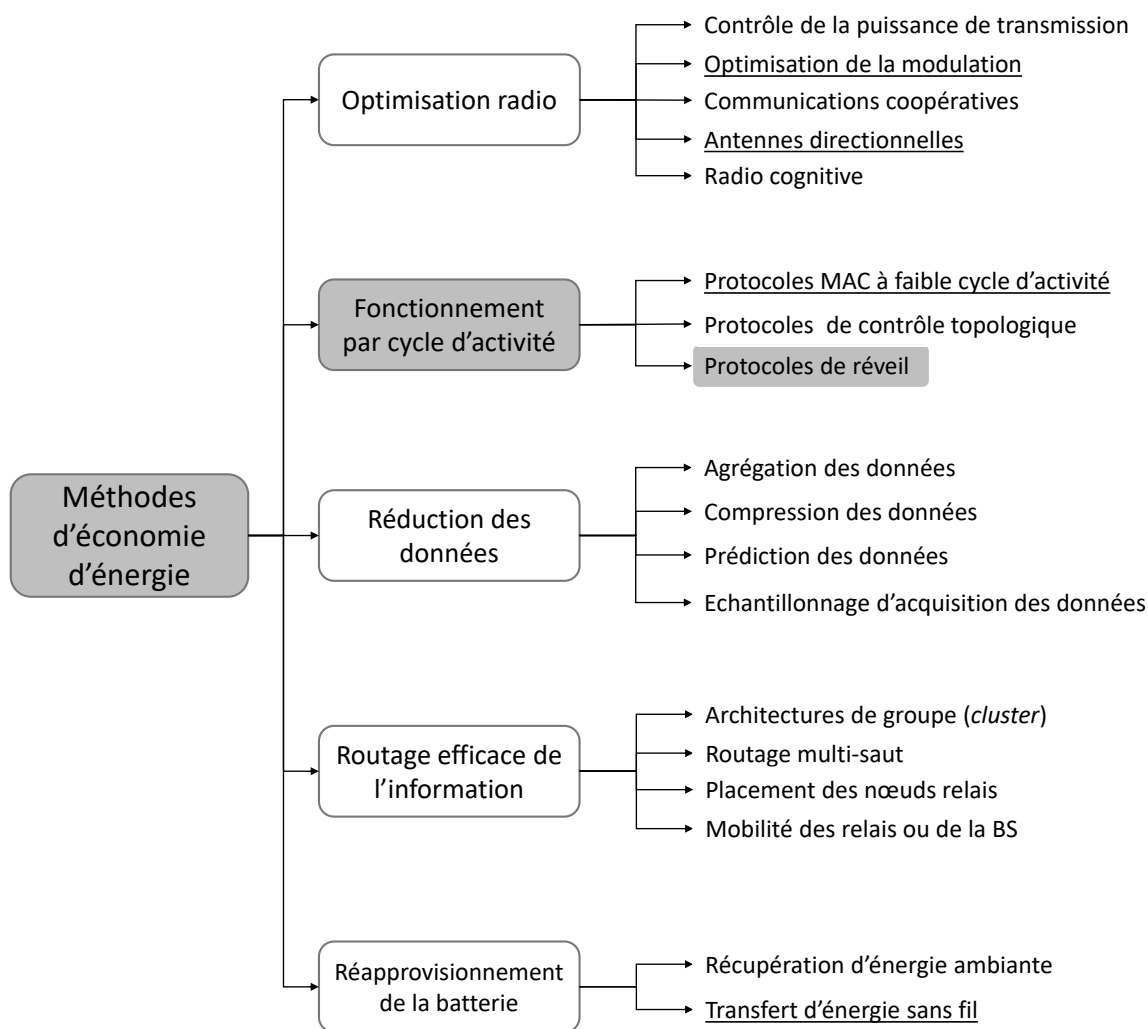


FIGURE 1.4: Positionnement de notre étude dans la classification des méthodes d'économie d'énergie dans les RCSF.

### 1.3 État de l'art sur les protocoles de réveil

Comme énoncé dans la section précédente, les protocoles de réveil ont pour objectif de réveiller le module radio selon un schéma ou une méthode qui maximise la durée du mode veille. On peut classer les protocoles de réveil en trois catégories :

- les protocoles par rendez-vous planifiés.
- les protocoles asynchrones,
- les protocoles à la demande.

Nous détaillerons chacun de ces types de protocoles dans les sections suivantes. Nous présenterons ensuite trois protocoles MAC de la littérature associés au télé-réveil.

### 1.3.1 Protocoles par rendez-vous planifié

Comme son nom l'indique, les protocoles par rendez-vous planifiés consistent à faire réveiller deux ou plusieurs nœuds au même moment pour qu'ils puissent communiquer.

Au préalable de ces protocoles, une synchronisation des nœuds du réseau doit être effectuée pour qu'ils se réveillent aux mêmes instants. Les nœuds peuvent alors se réveiller périodiquement afin de vérifier si une transmission de données est requise. Les premiers protocoles faisaient réveiller tous les nœuds au même moment avec des périodes identiques pour le mode de sommeil et le mode écoute. Les nœuds du réseau étaient alors totalement synchrones au niveau du fonctionnement. L'inconvénient de cette méthode est que les nœuds transmettent au même moment, ce qui peut créer des collisions dans un réseau assez large.

Plusieurs améliorations ont été proposées pour ce type de protocole, comme les modèles de réveil décalé<sup>13</sup> [68]. Ce type de modèle est particulièrement adapté pour les réseaux dont la transmission fonctionne en multi-sauts. Ce principe est illustré sur la figure 1.5 où les nœuds voisins sont réveillés au même moment avec des intervalles de réveil qui se croisent. Cette méthode est très efficace au niveau énergétique et en termes de latence pour une transmission du nœud  $l$  vers le nœud  $i$ . Un réarrangement des temps d'activité des nœuds permettrait une efficacité de la transmission dans l'autre sens (nœud  $i$  vers  $l$ ). En général, la transmission de données s'effectue dans le sens des nœuds vers la station de base, ce qui permet d'utiliser un seul schéma de réveil décalé.

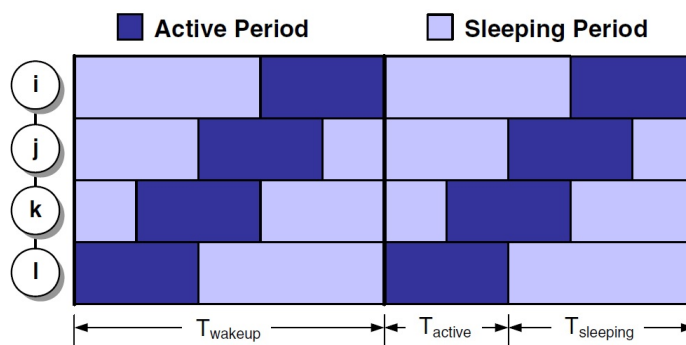


FIGURE 1.5: Modèle de réveil décalé [25].

### 1.3.2 Protocoles asynchrones

À l'inverse des protocoles précédents, les protocoles asynchrones permettent de s'affranchir de la synchronisation du réseau. Le problème est que cette synchronisation peut être coûteuse en termes de consommation énergétique. Un schéma de réveil asynchrone implique

<sup>13</sup>De l'anglais *Staggered Wakeup Pattern*

un réveil de chaque nœud indépendamment des autres nœuds, à condition que les périodes d'activités se chevauchent après un certain temps.

Divers scénarios de réveil ont été traités afin de permettre le réveil de manière asynchrone. On illustre un exemple sur la figure 1.6 où un nœud source S émet périodiquement un signal de découverte. Un nœud récepteur R écoute périodiquement le canal radio avec un temps suffisamment long afin de recevoir le signal de découverte. Dans cette configuration le temps d'activité du nœud source est plus petit que le récepteur, ce qui implique une plus grosse consommation d'énergie au niveau du récepteur. Il est également possible d'inverser cette situation en imposant une longue durée de transmission du nœud S et une faible durée de réception du nœud R.

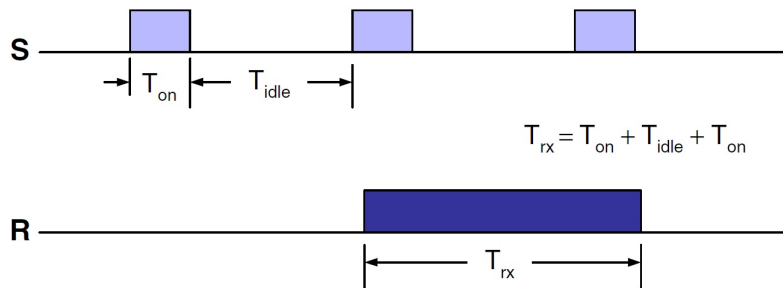


FIGURE 1.6: Découverte d'un nœud source par écoute périodique [25].

Ce type protocole est particulièrement intéressant pour les réseaux de capteurs mobiles puisque la connaissance des nœuds voisins n'est pas toujours assurée. Toutefois, ces protocoles ont l'inconvénient de proposer des cycles d'activité assez longs par rapport aux protocoles par rendez-vous planifiés. De plus, une latence supplémentaire est ajoutée avec ce mécanisme car le nœud qui initialise la démarche de communication doit attendre que l'autre nœud se réveille.

### 1.3.3 Protocoles de réveil à la demande

Les protocoles de réveil à la demande diffèrent grandement des deux types de protocoles précédents. Le seul point commun est le fait que le réveil du nœud est effectué de manière asynchrone. Toutefois, les protocoles à la demande ne souffrent pas de temps de latence supplémentaire dû au schéma de réveil. En effet, le réveil est effectué à la demande de l'émetteur lorsqu'une communication est nécessaire. La latence est donc le temps de réponse à cette demande de réveil, ce qui est lié aux contraintes physiques pour effectuer une telle demande de réveil.

Le principe des protocoles de réveil à la demande est que le nœud doit se réveiller uniquement lorsqu'un autre nœud souhaite communiquer. Cette méthode nécessite cependant une



modification au niveau matériel afin d'ajouter la fonctionnalité de réveil. Dans la plupart des précédents travaux, un second module radio est incorporé au nœud dans l'optique d'être utilisé uniquement pour le réveil du nœud.

Nous appellerons ce module radio supplémentaire un récepteur de télé-réveil<sup>14</sup>. Cette appellation permet d'éviter toute confusion avec la radio principale qui s'occupe de la transmission de données. La radio principale peut également être utilisée en tant qu'émetteur de télé-réveil si un réveil multi-sauts est considéré. Sinon, un émetteur de télé-réveil spécifique est généralement conçu au niveau de la BS. L'architecture d'un nœud intégrant le mécanisme de télé-réveil est alors représentée sur la figure 1.7.

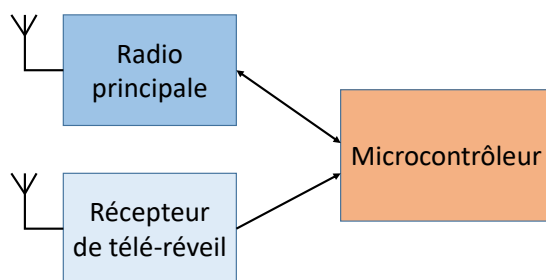


FIGURE 1.7: Architecture d'un nœud intégrant le mécanisme de télé-réveil.

La consommation énergétique du récepteur de télé-réveil doit cependant être beaucoup plus faible que la radio principale, surtout en mode inactif lorsque celle-ci écoute sur le canal radio. Dans cette optique, divers prototypes ont été créés ces dernières années avec des consommations de l'ordre du  $\mu\text{W}$  pour la majorité. Ces différentes technologies ont été recensées et comparées sur les aspects de consommation, de débit, de sensibilité et de distance maximale de réveil [69, 70]. Nous reprendrons cet état de l'art avec une mise à jour concernant certains prototypes dans la section 1.4.

Concernant le schéma de réveil, le principe de fonctionnement est illustré sur la figure 1.8. On considère un nœud source qui souhaite transmettre des données à un nœud de destination. La radio principale du nœud de destination est initialement en mode éteint et la radio de réveil est en mode écoute. Lorsque le nœud source émet un signal de réveil, la radio de réveil du nœud de destination reçoit le signal et réveille le nœud. La radio principale est alors utilisée pour transmettre un accusé de réception noté ACK<sup>15</sup> et on procède ensuite à la transmission des données. Enfin, la radio principale repasse en mode éteint et la radio de réveil en mode écoute jusqu'à une nouvelle demande de communication.

<sup>14</sup>De l'anglais *wake-up radio*

<sup>15</sup>Abréviation anglaise : *Acknowledgement*

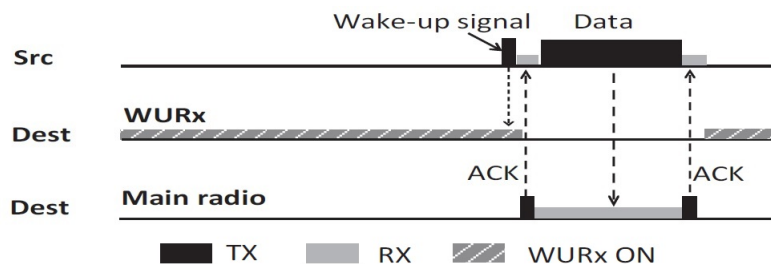


FIGURE 1.8: Principe de fonctionnement de réveil par radio [69].

### 1.3.4 Protocoles inter-couches

Le fonctionnement par cycle d'activité et les mécanismes de télé-réveil peuvent faire appel à des échanges d'information entre les couches du modèle OSI<sup>16</sup>, par exemple entre la couche application et la couche MAC. Ce type d'échange fait appel à une approche inter-couches<sup>17</sup> du modèle de communication. Pour rappel, le modèle de communication utilisée dans les réseaux de capteurs est présenté dans la figure 1.9. Un modèle inter-couches est également représenté où toutes les couches sont directement interconnectées.

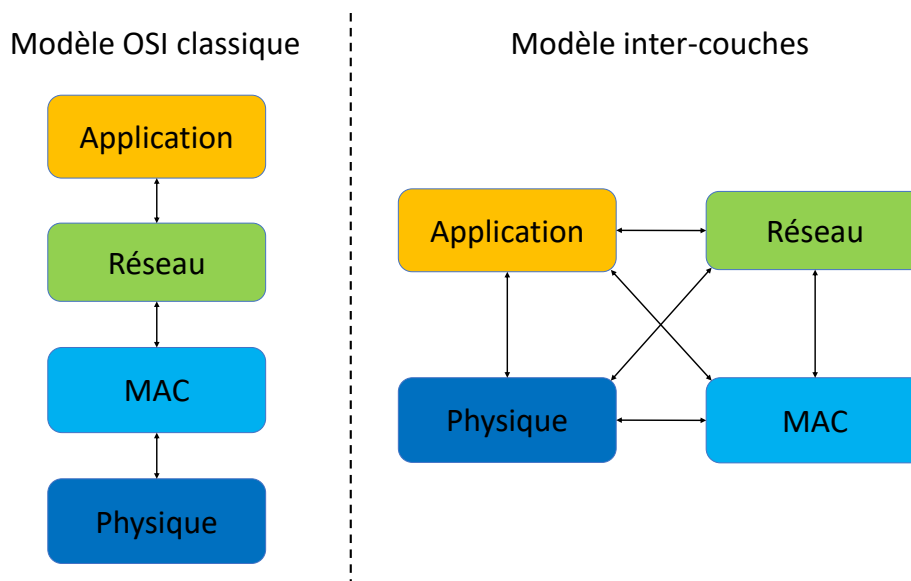


FIGURE 1.9: Modèle de communication dans les RCSF: modèle OSI et modèle inter-couches.

Les objectifs principaux d'une optimisation inter-couches sont de réduire la consommation d'énergie, de définir un routage efficace ou de fournir une qualité de service optimale [71]. Les interactions inter-couches peuvent être un accès ou une modification des paramètres appartenant à d'autres couches. La plupart des protocoles inter-couches considèrent une interaction entre les couches adjacentes du modèle OSI [72]. Toutefois, des approches faisant

<sup>16</sup> Abréviation anglaise : *Open Systems Interconnection*

<sup>17</sup> De l'anglais *cross-layer*

intervenir plus de deux couches ont également été considérées. Par exemple, l'optimisation conjointe des couches physique, MAC et réseau permettent de maximiser la durée de vie des RCSF [73].

### 1.3.5 Protocoles MAC de télé-réveil

Quelques protocoles MAC ont été proposés durant ces dernières années pour intégrer la fonctionnalité de télé-réveil. Ces protocoles prennent en compte la présence de deux modules radio : une radio principale ordinaire et une deuxième radio dont la consommation est minimale. Cette deuxième radio peut être soit entièrement passive en étant alimentée par les ondes radio, ou bien être composée d'éléments actifs à la condition d'avoir une consommation très faible.

Les deux radios peuvent communiquer sur les mêmes canaux ou bien sur des canaux différents. Le contrôle d'accès au support est différent pour les nœuds disposant de deux modules radio, c'est pourquoi les nouveaux protocoles MAC tels que le protocole RTM<sup>18</sup> [74], le protocole à la demande [75] et le protocole SCM<sup>19</sup> [76] ont été proposés pour gérer l'accès au support en utilisant ces deux modules radios. Les performances de ces protocoles ont été comparées par leur auteur avec les protocoles MAC fonctionnant par cycle d'activité tels que S-MAC, B-MAC et X-MAC. Le protocole 802.15.4 MAC en mode sans balise est souvent pris comme référence de consommation énergétique pour une méthode d'accès sans économie de l'énergie.

Pour les protocoles MAC de télé-réveil présentés ici, la communication est initiée par le récepteur des données, souvent un collecteur ou une BS. Celui-ci émet donc le signal de réveil afin que le nœud interrogé lui transmette ses données. Il existe également des protocoles où le réveil est demandé par l'émetteur des données, mais nous focalisons notre étude sur les protocoles de même type que le nôtre.

Le protocole RTM prend en considération l'ajout d'un circuit passif pour le réveil radio. Le même canal radio est utilisé par les deux modules radio pour ce protocole. La radio principale et le microcontrôleur sont allumés suite à la réception d'un appel de réveil. Tous les nœuds voisins du nœud transmetteur sont réveillés puisque la problématique d'adressage de réveil n'est pas traitée par ce protocole. Comme illustrée sur la figure 1.10(a), la communication est effectuée selon un mécanisme de RTS/CTS<sup>20</sup>. Les trames de type RTS et CTS contiennent l'identification du nœud de destination, ce qui permet au nœud réveillé de repasser en mode veille si le transfert de données ne leur est pas destiné. Après réception

<sup>18</sup>Abréviation anglaise : *Radio Triggered sensor MAC*.

<sup>19</sup>Abréviation anglaise : *SubCarrier Modulation*.

<sup>20</sup>Abréviation anglaise : *Request to Send/Clear to Send*.

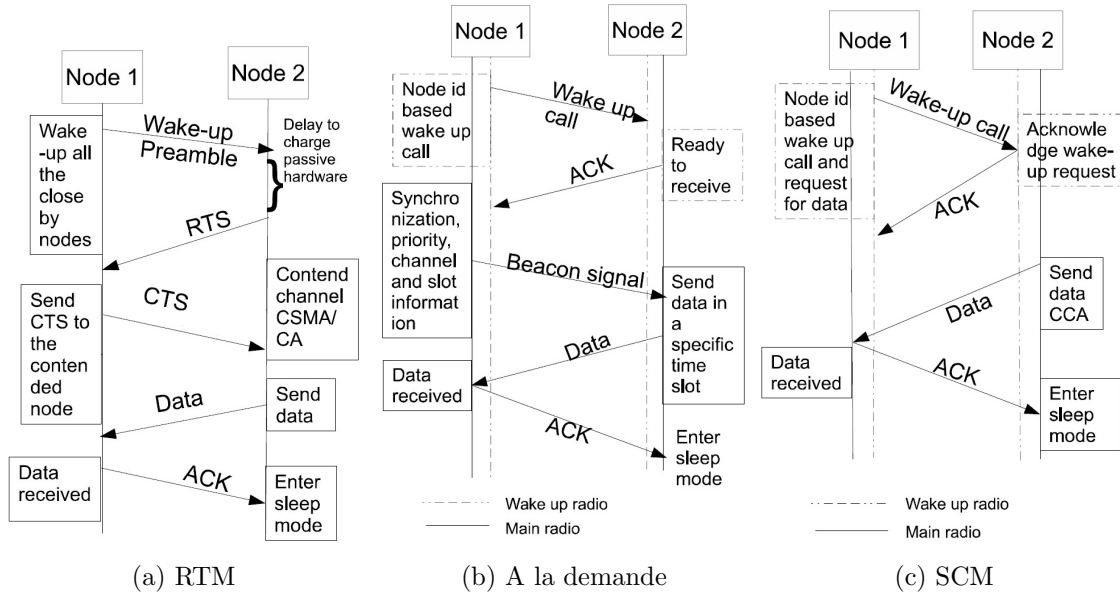


FIGURE 1.10: Schéma de communication pour les différents protocoles présentés [77].

des données, un accusé de réception est envoyé à travers une trame de type ACK, entraînant ainsi la mise en veille du nœud.

Le protocole à la demande est représenté sur la figure 1.10(b). Il est défini pour des réseaux en étoile où une BS collecte les données des nœuds en mono-saut. La BS dispose d'une table de réveil avec les identifiants des différents nœuds. Une deuxième radio de type active est utilisée pour le réveil, ce qui permet notamment d'intégrer l'identification des nœuds dans le message de réveil. La transmission de données est gérée par un mécanisme basé sur le TDMA<sup>21</sup>, les nœuds transmettent alors des données suivant les fenêtres temporelles qui leur sont attribuées afin d'éviter toute collision. L'attribution est réalisée par une trame balise envoyée par la BS après le réveil du nœud. Après la transmission de données et réception de l'ACK, le nœud repasse en mode veille.

Le schéma de communication du protocole SCM est représenté sur la figure 1.10(c). L'identification des nœuds est réalisée grâce à une modulation de type OOK<sup>22</sup> dans le message de réveil. La demande de données est également insérée dans ce message de réveil. L'accusé de réception est alors envoyé par la radio de réveil, puisque celle-ci est en fait un émetteur à basse consommation. Les données sont alors transmises suite à l'utilisation d'un CCA<sup>23</sup> pour vérifier que le support de communication est disponible.

<sup>21</sup> Abréviation anglaise : *Time Division Multiple Access*.

<sup>22</sup> Abréviation anglaise : *On-Off Keying*

<sup>23</sup> Abréviation anglaise : *Clear Channel Assessment*

### 1.3.6 Synthèse et choix du type de protocole

Comme on peut le voir avec ces protocoles MAC de télé-réveil, beaucoup de messages sont échangés entre les nœuds pour effectuer un réveil suivi d'une transmission de données. Nous pensons que ces protocoles n'exploitent pas totalement la fonctionnalité de télé-réveil.

Nous proposerons par la suite le protocole de télé-réveil DoRa qui est un protocole simplifié qui ne nécessite pas de messages de contrôle. Nous considérerons une topologie en étoile où une BS, non contrainte en énergie, contrôle l'accès au support par l'émission des messages AdR. L'objectif est de minimiser les échanges entre les nœuds en s'affranchissant des messages de type RTS/CTS ou encore d'ACK. Cette approche est possible puisque la communication entre la BS et un nœud s'effectue lorsque les autres nœuds sont en mode veille, ce qui permet d'éviter les éventuels conflits. Cette dernière affirmation est valide si le système de télé-réveil est sélectif et robuste aux bruits. Nous détaillons par la suite les différences entre les protocoles DoRa ou DC-DoRa et les trois protocoles MAC de télé-réveil présentés précédemment.

Le protocole DoRa se différencie du protocole RTM car le message AdR contient l'adresse du nœud à réveiller, en faisant l'hypothèse d'une connaissance préalable des nœuds du réseau par la BS. Pour cette raison, les messages RTS/CTS ne sont donc pas nécessaires car uniquement le nœud adressé se réveille. Le contrôle du réveil du nœud peut être validé par la réception des données en provenance de ce dernier. De plus, ce protocole est défini pour les récepteurs de télé-réveil qui sont passifs, ce qui explique pourquoi l'adressage n'est pas pris en compte. Nous verrons dans la section suivante que notre récepteur contient des éléments actifs pour l'adressage du réveil.

Le protocole à la demande gère l'accès avec un mécanisme TDMA après le réveil des nœuds. De ce fait, le système de télé-réveil n'est utilisé que pour synchroniser le réseau. Notre protocole DoRa exploite entièrement le système de télé-réveil puisque les données sont envoyées directement après le réveil du nœud. Toutefois, nous avons bien une allocation de fenêtres temporelles pour chaque nœud. Cependant, cette allocation de fenêtre est implémentée pour le canal réservé aux messages AdR, à l'inverse du protocole à la demande qui l'implémente pour les messages de données.

Le protocole SCM est assez similaire au protocole DoRa. Tout d'abord, nous nous distinguons par la suppression des messages ACK car ils sont optionnels dans le cadre d'un télé-réveil. Dans le cas où le message de données ne serait pas reçu par la BS, elle peut réinterroger le nœud en question avec un autre message AdR pour obtenir les données. De ce fait, le nœud peut repasser en mode veille directement après l'envoi des données, sans attendre d'ACK avec le module radio principal. Contrairement au protocole SCM, le protocole DoRa n'utilise pas de CCA avant l'envoi de données car nous faisons l'hypothèse que

le canal est libre une fois le télé-réveil validé par un nœud. Cette hypothèse est valide si la fréquence porteuse n'est pas utilisée par d'autres réseaux avoisinants puisqu'en interne, un seul nœud est réveillé pour communiquer.

Par ailleurs, on s'aperçoit qu'il est difficilement concevable d'évaluer un protocole sans avoir de connaissance sur le récepteur de télé-réveil. En effet, la consommation énergétique associée à un protocole de télé-réveil se base sur la consommation du module physique, qui est le récepteur de télé-réveil. Pour cette raison, nous présentons un état de l'art sur les récepteurs de télé-réveil dans la section suivante.

## 1.4 Etat de l'art sur les récepteurs de télé-réveil

La principale fonctionnalité d'un récepteur de réveil est de pouvoir recevoir et traiter un signal sans fil spécialement conçu pour le réveil du nœud, qu'on nommera Appel de Réveil (AdR). Après validation de cet AdR, le récepteur de télé-réveil doit envoyer un signal pour réveiller le microcontrôleur, la radio principale et les capteurs, afin de procéder au traitement des mesures et à l'envoi ou la réception des données (selon le type de protocole). Pour que l'incorporation de ce récepteur de télé-réveil soit bénéfique d'un point de vue énergétique, il doit avoir une consommation de l'ordre du  $\mu\text{A}$  ou bien être totalement passif.

Une multitude de récepteurs de télé-réveil a été proposée au cours de ces dernières années pour rendre possible le télé-réveil d'un nœud dans les RCSF. Les récepteurs de télé-réveil peuvent être de différents types et ils disposent de caractéristiques très distinctes puisqu'ils sont basés sur des technologies différentes.

Pour les récepteurs de télé-réveil, nous ferons la distinction entre le mode veille et le mode actif. Le mode veille est le mode où le récepteur est inactif avec une très faible consommation d'énergie. Le mode actif concerne l'état dans lequel le récepteur effectue le décodage du message AdR.

On distingue cinq types de récepteurs de télé-réveil dans la littérature. Nous présentons en détail chacun d'eux dans les sous-sections qui suivent. Les exemples de récepteurs de télé-réveil présentés ne représentent pas la totalité de ceux qui ont été proposés dans la littérature. Nous focalisons notre étude sur les approches qui ont caractérisé leur récepteur de manière assez complète pour une analyse comparative des performances.

### 1.4.1 Récepteurs de télé-réveil à faible complexité

On présente dans un premier temps les récepteurs de télé-réveil à faible complexité. Comme leur nom l'indique, le principe de ces récepteurs est d'avoir un circuit simple afin d'avoir une faible consommation d'énergie.

Historiquement, ce type de récepteur a été le premier à être considéré avec le concept de télé-réveil [78]. Un récepteur de télé-réveil basique est construit avec une diode redresseuse et un circuit LC. Toutefois, ce récepteur n'offre qu'une portée de quelques mètres. Les propositions suivantes ont alors ajouté des composants supplémentaires afin d'améliorer la portée de télé-réveil et d'incorporer un système d'adressage.

Un récepteur à 868 MHz est proposé dans [79], il ajoute un multiplicateur de tension et un comparateur au circuit de base. Le multiplicateur de tension est en fait une pompe de charge composée de diodes et de condensateurs. Ce montage permet d'augmenter la tension en sortie de l'antenne redresseuse, au détriment d'un temps de charge supplémentaire. Ainsi, la portée de télé-réveil calculée s'élève à 15 mètres pour une puissance d'émission à +27 dBm (antenne monopole). Un comparateur est ajouté pour digitaliser le signal en vue d'une méthode d'adressage par microcontrôleur. Toutefois, le microcontrôleur n'est pas pris en compte dans leur architecture de récepteur, comme on peut le voir sur la figure 1.11. La consommation du système d'adressage n'est donc pas donnée avec cette approche. De plus, la sensibilité du récepteur n'est pas fournie, ce qui limite l'évaluation comparative du récepteur.

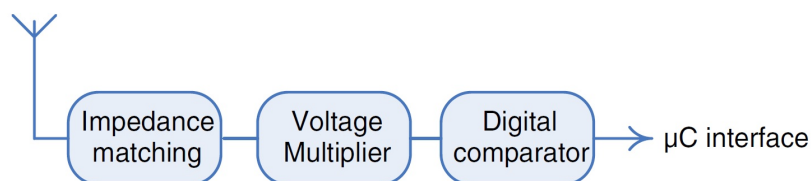


FIGURE 1.11: Schéma-bloc du récepteur de télé-réveil à faible complexité dans [79].

Le récepteur proposé dans [80] présente la plus faible consommation d'énergie pour ce type de récepteur, avec une consommation de 180 nA à 1,5 V. Le récepteur implémente un décodeur SPI<sup>24</sup> après l'étage du comparateur afin que le microcontrôleur puisse effectuer le décodage d'adresse. Toutefois, la consommation du microcontrôleur n'est pas prise en compte pour effectuer cette tâche. La consommation d'énergie du récepteur de télé-réveil n'est donc pas complète.

Un récepteur de télé-réveil à faible complexité fonctionnant à 915 MHz ou 2,4 GHz a été proposé dans [81]. Ces travaux fournissent la sensibilité du récepteur pour les deux

<sup>24</sup>Abréviation anglaise : *Serial Peripheral Interface*.

fréquences porteuses. Naturellement, la sensibilité est plus faible à 2,4 GHz avec -69 dBm contre -80 dBm à 915 MHz. Ces sensibilités assez élevées ont été obtenues en amplifiant le signal avant le circuit de redressement, à l'inverse des autres approches. La consommation est toutefois relativement élevée puisque le récepteur consomme en permanence 51  $\mu\text{A}$  à 1 V. Ils montrent également que la consommation est plus élevée si on augmente le débit, c'est pourquoi un débit de 10 kbps a été choisi.

Dans cette même optique, le récepteur proposé dans [82] implémente deux débits distincts avec un fonctionnement par cycle d'activité. Un premier débit de 1 kbps est utilisé par défaut pour surveiller le canal radio. Après détection du préambule du message de réveil, le récepteur adopte un débit de 200 kbps pour décoder le reste du message. La consommation résultante est alors de 4,7  $\mu\text{A}$  en mode 1 kbps contre 599  $\mu\text{A}$  en mode 200 kbps avec une alimentation de 1,8 V. La consommation du deuxième mode semble relativement élevée mais le fait de décoder le message à 200 kbps permet d'effectuer la tâche plus rapidement. En intégrant cette consommation sur la durée lors de la réception d'un message de réveil, il se pourrait que cette approche soit assez efficace. On ne dispose toutefois pas de la durée de ce mode, ce qui ne permet pas d'analyser l'énergie consommée de manière optimale.

Ce dernier récepteur montre un point important qui différencie notre approche de ceux présentés dans cette section. Le fait de considérer un débit plus faible pour surveiller le canal permet d'avoir une consommation d'énergie de l'ordre du  $\mu\text{A}$ . On peut toutefois s'interroger sur l'intérêt des composants d'adressage lorsqu'on ne fait que surveiller le canal radio. Au lieu de définir un débit plus faible, notre approche consistera à éteindre ces modules liés à l'adressage ou au décodage du message lors de la surveillance du canal. Ainsi, la consommation d'énergie devrait être sévèrement réduite. À l'inverse des méthodes présentées ici, nous intégrerons également la consommation du microcontrôleur dans notre bilan de consommation énergétique.

### 1.4.2 Récepteurs de télé-réveil hétérodynes

Cette sous-section présente les récepteurs de télé-réveil de type hétérodyne. Un récepteur est dit hétérodyne s'il est capable de transposer le signal modulé à la fréquence porteuse en un signal modulé à une fréquence intermédiaire. Cette fréquence intermédiaire est généralement plus basse afin de simplifier le circuit de réception. La figure 1.12 présente l'architecture typique d'un récepteur de télé-réveil hétérodyne.

Le récepteur proposé dans [83] implémente un cycle de fonctionnement au niveau du mélangeur, de l'oscillateur et de l'amplificateur de fréquence intermédiaire. Ainsi, le récepteur consomme 346  $\mu\text{A}$  à 1,2 V lors du mode actif. Cette consommation est élevée pour un



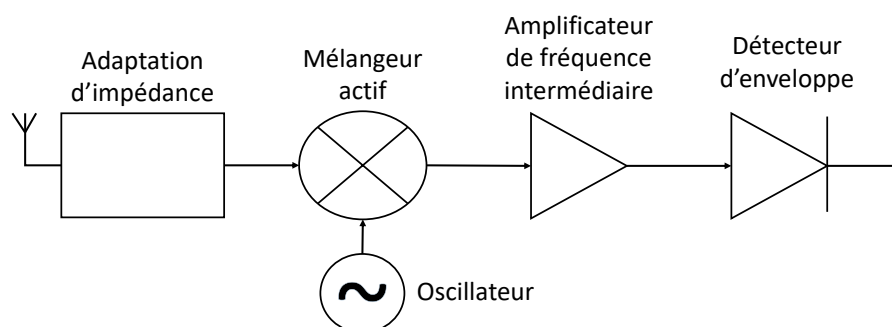


FIGURE 1.12: Schéma-bloc d'un récepteur de télé-réveil hétérodyne.

récepteur de télé-réveil car le décodage s'effectue à un débit de 500 kbps. Aucune information n'est donnée pour la consommation du récepteur en mode veille, on ne peut donc pas interpréter correctement les avantages du fonctionnement par cycle d'activité. Ce récepteur présente une sensibilité de -82 dBm, ce qui est assez élevé pour une fréquence porteuse de 2,4 GHz. La portée de télé-réveil n'a toutefois pas été mesurée pour cette approche.

Un récepteur hétérodyne fonctionnant à la fréquence porteuse de 35 MHz a été proposé pour les réseaux corporels [84]. La portée de télé-réveil n'a pas été fournie mais une sensibilité de -55 dBm semble être suffisante pour ce type de réseau. Le récepteur proposé présente une consommation active de 55,7  $\mu\text{A}$  à 0,7 V. Cette consommation est raisonnable à cause du débit de 200 kbps mais aucun mode veille n'est implémenté, ce qui limite la durée de vie du récepteur.

Le récepteur proposé dans [85] a pour objectif de présenter un compromis entre la sensibilité de réception et la consommation d'énergie. Cet objectif est respecté puisque le récepteur consomme 34,1  $\mu\text{A}$  à 1,2 V pour une sensibilité de -78 dBm. Cette faible consommation s'explique par le fait que le débit du récepteur est compris entre 0,5 et 4 kbps.

Pour chacun des récepteurs hétérodynes présentés ici, l'adressage n'est pas pris en charge directement par le récepteur de télé-réveil. En fait, le décodage de l'adresse est effectué par le microcontrôleur du nœud mais sa consommation n'est pas prise en compte dans celle du récepteur. De ce fait, nous ne considérons pas que ces récepteurs disposent de la fonctionnalité d'adressage.

Le défaut des récepteurs hétérodynes est leur consommation active relativement élevée. Le fait d'incorporer des composants actifs tels que le mélangeur ou l'oscillateur accroît la consommation du récepteur de façon trop significative. C'est pour cette raison qu'il est préférable de minimiser le nombre de composants actifs dans l'architecture du récepteur de télé-réveil.

### 1.4.3 Récepteurs de télé-réveil à base de corrélateur

Nous présentons dans cette sous-section un ensemble de récepteurs de télé-réveil à base de corrélateur. À l'inverse des deux types de récepteurs précédents, l'adressage est réalisé entièrement par le récepteur par le biais du corrélateur. Un corrélateur est en fait un circuit électronique capable de comparer une adresse binaire entrante avec une adresse binaire prédéfinie dans le registre du corrélateur.

Le module AS3932 est un récepteur de télé-réveil à base de corrélateur qui est commercialisé depuis 2009 [86]. La fréquence porteuse du signal doit être comprise entre 110 et 150 kHz pour être détecté par le récepteur. Ce récepteur consomme  $2,6 \mu\text{A}$  en mode veille contre  $8,3 \mu\text{A}$  pour décoder un message AdR, avec une alimentation à 3 V. La consommation du récepteur est donc relativement faible pour les deux modes. Toutefois, ce choix de fréquence porteuse offre une faible portée de télé-réveil de 5 m avec une puissance de +33 dBm à l'émission.

Le récepteur SCM-WuRx<sup>25</sup> proposé dans [70] réutilise le module AS3932 de façon à augmenter la portée de télé-réveil. L'architecture du récepteur est présentée dans la figure 1.13. Le récepteur exploite le concept de modulation du signal sur une sous-porteuse pour les données. La fréquence porteuse de 868 MHz sert à transporter le signal de réveil. Ce signal est également modulé à une fréquence de 125 kHz sous forme de modulation ASK. Le premier étage du récepteur comporte un détecteur d'enveloppe à 868 MHz, ce qui donne en sortie le signal modulé à 125 kHz. Ce signal modulé à 125 kHz peut donc ensuite être utilisé par le module AS3932. La portée de télé-réveil est de 100 m avec ce récepteur pour une puissance d'émission à 20 dBm. Ce récepteur propose donc la meilleure portée de télé-réveil parmi ceux présentés dans ce mémoire.

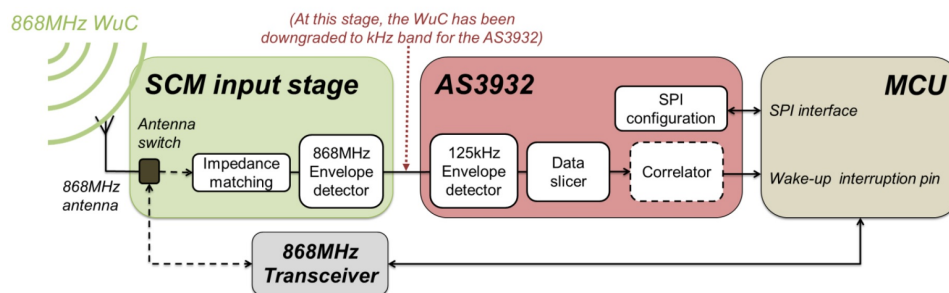


FIGURE 1.13: Schéma-bloc du récepteur de télé-réveil SCM-WuRx [70].

Dans la bande des 2,4 GHz, le récepteur proposé dans [87] intègre une modulation en PWM<sup>26</sup> à un débit de 50 kbps pour le signal de réveil. Les résultats obtenus par simulation

<sup>25</sup> Abréviation anglaise : *SubCarrier Modulation Wake-up Radio receiver*.

<sup>26</sup> Abréviation anglaise : *Pulse-Width Modulation*.

indiquent une consommation de  $19 \mu\text{A}$  à  $1 \text{ V}$ . La sensibilité résultante est de  $-50 \text{ dBm}$ , ce qui équivaut à une portée de  $4 \text{ m}$  pour une puissance d'émission à  $0 \text{ dBm}$ .

Un autre récepteur fonctionnant à  $2,4 \text{ GHz}$  a été proposé dans [88]. Il présente un débit de  $100 \text{ kbps}$  en utilisant une modulation de type OOK. La consommation du récepteur est de  $7,5 \mu\text{A}$  pour une alimentation à  $1,5 \text{ V}$ . La portée de télé-réveil n'est pas fournie mais une sensibilité de  $-55 \text{ dBm}$  a été mesurée. Toutefois, ces deux derniers récepteurs ont l'inconvénient de ne pas posséder de mode veille. La consommation sur le long terme est donc indéniablement plus élevée avec ce type de récepteur.

#### 1.4.4 Récepteurs de télé-réveil à base de RFID

Cette sous-section est consacrée aux récepteurs à base de RFID<sup>27</sup>. La technologie RFID est naturellement adaptée pour le télé-réveil car ils ont un concept similaire. Dans cette optique, le lecteur RFID peut être utilisé en tant qu'émetteur de télé-réveil pour réveiller le marqueur RFID du récepteur de télé-réveil.

Un nœud de capteurs intégrant un récepteur de télé-réveil passif a été proposé dans [89]. Le récepteur est en fait un marqueur RFID appelé WISP<sup>28</sup>. Le module WISP est connecté à un nœud T-mote sky disponible dans le marché. L'ensemble forme un nœud WISP-Mote représentée sur la figure 1.14. Le marqueur RFID du récepteur de télé-réveil est alimenté complètement par le lecteur RFID. Ce récepteur est donc le plus efficace d'un point de vue énergétique. En revanche, ce type de récepteur dispose d'une portée de télé-réveil de  $5 \text{ m}$  uniquement.

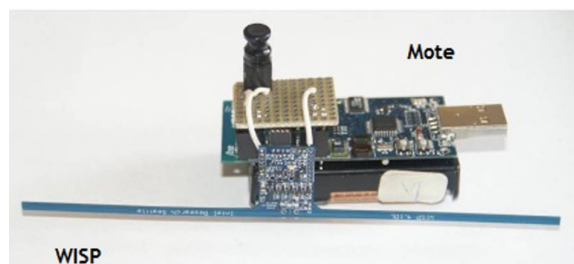


FIGURE 1.14: Nœud intégrant un récepteur de télé-réveil passif : WISP-Mote.

Afin d'accroître la portée de télé-réveil, des travaux plus récents ont proposé un récepteur passif similaire nommé REACH-Mote<sup>29</sup> [90]. À l'inverse du WISP-Mote, le récepteur de télé-réveil du REACH-Mote ne dispose pas de microcontrôleur ou de module de décodage. Le retrait de ces modules permet de réduire la consommation d'énergie du récepteur. La portée de télé-réveil du récepteur est alors de  $11,2 \text{ m}$ , ce qui représente le double du WISP-Mote.

<sup>27</sup>Abréviation anglaise : *Radio Frequency IDentification*.

<sup>28</sup>Abréviation anglaise : *Wireless IDentification Sensing Platform*.

<sup>29</sup>Abréviation anglaise : *Range EnhAnCing energy Harvester-Mote*.

Les récepteurs de télé-réveil passif à base de RFID ont l'avantage de ne pas nécessiter de batterie pour fonctionner. Toutefois, le fait de les alimenter par le lecteur RFID consomme énormément d'énergie au niveau de l'émetteur. Typiquement, une émission à +30 dBm est considérée. La durée de transmission croît également avec la distance entre l'émetteur et le récepteur. Par exemple, il faut 235 ms de transmission pour réveiller le REACH-Mote à 1,5 m de distance. L'émetteur consomme alors 0,88 J pour émettre un seul message AdR (1,25 A de courant consommé à 3 V).

Les récepteurs de télé-réveil actifs ne sont pas aussi contraignants au niveau de l'émetteur. Actuellement, on peut considérer qu'il y a au moins un facteur 100 entre l'énergie consommée au niveau de l'émetteur pour réveiller un récepteur actif comparé à un récepteur passif. De ce fait, on peut s'interroger sur l'efficacité énergétique globale du système. La tendance est de vouloir réduire uniquement la consommation énergétique du nœud, au détriment de l'émetteur de télé-réveil. Ce problème apparaît surtout pour les scénarios multi-sauts où la consommation de l'émetteur de télé-réveil doit être pris en compte car il est effectué par le nœud [91].

#### 1.4.5 Récepteurs de télé-réveil à base de microcontrôleur

Nous présentons ici le dernier type de récepteur de télé-réveil dont la conception est à base de microcontrôleur. Pour ces récepteurs, le microcontrôleur a pour fonction principale de traiter le message AdR. Après validation du message AdR, le microcontrôleur envoie une interruption matérielle notée IRQ<sup>30</sup> pour réveiller les autres composants du nœud. L'architecture générale d'un récepteur de télé-réveil à base de microcontrôleur est présentée sur la figure 1.15.

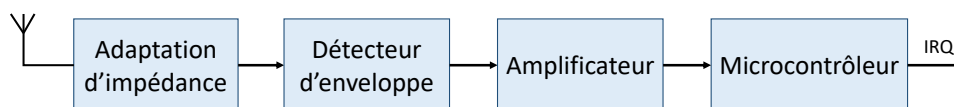


FIGURE 1.15: Schéma-bloc général d'un récepteur de télé-réveil à base de microcontrôleur.

Le premier prototype d'un récepteur de télé-réveil à base de microcontrôleur a été proposé dans [92] en 2009. Un PIC12F683 fonctionnant à 32 kHz y est utilisé pour décoder le message AdR. Le choix de ce mode basse consommation permet au récepteur de consommer 57  $\mu$ A avec une alimentation de 3 V. Toutefois, cette consommation reste relativement élevée comparé aux approches présentées précédemment, surtout pour un faible débit de 862 bps.

<sup>30</sup>Abréviation anglaise : *Interrupt ReQuest*.

De plus, le microcontrôleur reste actif en permanence alors qu'il pourrait être mis en veille après le traitement du message AdR.

Plus récemment en 2014, un autre récepteur à base de microcontrôleur a été proposé dans [93]. Le microcontrôleur utilisé est un PIC12LF1552 fonctionnant à la fréquence de 8 MHz. À l'inverse de l'approche précédente, un mode veille du microcontrôleur y est implémenté afin d'économiser de l'énergie. Le message AdR comprend un préambule pour faire sortir le microcontrôleur du mode veille avant de procéder au décodage de l'adresse. En revanche, aucune information n'est donnée concernant la consommation en mode actif pour décoder le message AdR. Cette information est nécessaire puisqu'un oscillateur à 8 MHz a été choisi, ce qui n'est pas forcément adéquat pour décoder un message à un débit de 10 kbps.

On peut tirer le meilleur de ces deux approches pour développer un récepteur à base de microcontrôleur qui soit optimisé en termes de consommation d'énergie. D'une part, le choix d'une faible fréquence d'horloge du microcontrôleur de la première approche pourrait permettre de réduire la consommation d'énergie. Une comparaison avec d'autres fréquences d'horloge est cependant nécessaire afin de prouver ce point. D'autre part, le mode veille qui a été implémenté dans la seconde approche est absolument nécessaire afin d'optimiser la consommation énergétique du récepteur.

#### 1.4.6 Synthèse et choix du type de récepteur de télé-réveil

Afin de synthétiser l'état de l'art sur les récepteurs de télé-réveil, on présente dans le tableau 1.1 les caractéristiques des récepteurs de la littérature. Les caractéristiques retenus sont :

- la fréquence porteuse  $F_p$  en MHz,
- la présence ou non d'un module d'adressage,
- la sensibilité de réception  $S$  en dBm,
- la portée de télé-réveil en m,
- le débit binaire  $D_b$  en kbps,
- le courant consommé en mode veille ou en mode actif en  $\mu A$ ,
- la tension d'alimentation en V.

Certaines caractéristiques n'ont pas été fournies par les précédents travaux, surtout la portée de télé-réveil et la consommation de courant. La portée de télé-réveil est toutefois liée à la sensibilité du récepteur de télé-réveil, ce qui n'est pas donc un facteur contraignant pour l'analyse. Toutefois, la consommation de courant est le point clef qui permet la comparaison entre les différentes approches. Certaines approches donnent uniquement la consommation

du récepteur en mode veille. Sans l'information sur le courant consommé en mode actif, la comparaison ne peut pas être considérée comme complète.

Cette étude met en évidence le manque de considération pour les récepteurs de télé-réveil basés sur un microcontrôleur. Le premier prototype proposé dans [92] présente une consommation relativement élevée de  $57 \mu\text{A}$ . Il est possible de diminuer cette consommation en optimisant la consommation de l'amplificateur et du microcontrôleur. Le second problème de cette approche réside dans le fait que le microcontrôleur reste en mode actif en permanence, ce qui est loin d'être la meilleure option au vu des possibilités des microcontrôleurs. Le deuxième prototype [93] est plus efficace étant donné qu'ils ont implémenté un mode veille du microcontrôleur. Néanmoins, la consommation pour décoder un message AdR n'a pas été mesurée ou calculée, ce qui limite considérablement son évaluation.

Enfin, ces deux prototypes fonctionnent à une fréquence porteuse de 868 MHz, alors que notre prototype travaillera dans la bande des 2,4 GHz. Actuellement, la bande 868 MHz est certes plus utilisée pour les RCSF et l'IoT (Lora, Sigfox...). Nous pensons toutefois que la bande des 2,4 GHz est plus adéquate pour les réseaux à base de télé-réveil. La raison principale est la distance limitée de télé-réveil (100 m au maximum), sachant que la bande des 2,4 GHz est plus performante pour des réseaux de petite taille [94]. Une deuxième raison est le potentiel ajout de récupération d'énergie au récepteur de télé-réveil. La bande des 2,4 GHz semble offrir le plus d'énergie avec les technologies répandues telles que le WiFi ou le Bluetooth. Une standardisation en 802.11 est actuellement étudiée pour cette bande [95], bien que l'application visée soit pour les appareils WiFi et non les RCSF.

Notre étude a pour objectif de montrer que les récepteurs de télé-réveil basé sur un microcontrôleur sont tout aussi efficaces au niveau de la consommation énergétique, voir plus efficace que la plupart des résultats référencés dans le tableau 1.1. On considère aussi une méthode d'adressage pour ce type de système avec un débit binaire assez convenable, de l'ordre du kbps. De plus, on s'attachera à mesurer toutes les caractéristiques afin de comparer notre approche avec celles proposées dans la littérature.

| Type              | Référence | $F_p$ (MHz) | Adressage | $S$ (dBm)          | Portée (m)                 | $D_b$ (kbps) | $I_c$ ( $\mu$ A)        | $V_{cc}$ (V) |
|-------------------|-----------|-------------|-----------|--------------------|----------------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| Faible complexité | [80]      | 433         | Non       | -51                | 10 (+10 dBm) <sup>31</sup> | 2 - 80       | 0,18                    | 1,5          |
|                   | [79]      | 868         | Non       | N.C. <sup>32</sup> | 15 (+27 dBm)               | 2            | 0,876                   | 3            |
|                   | [81]      | 915 / 2400  | Non       | -80 / -69          | N.C.                       | 10           | 51                      | 1            |
|                   | [82]      | 928         | Oui       | -73                | N.C.                       | 1 / 200      | 4,7 / 599 <sup>33</sup> | 1,8          |
| Hétérodyne        | [84]      | 35          | Non       | -55                | N.C.                       | 200          | 55,7                    | 0,7          |
|                   | [85]      | 868         | Non       | -78                | N.C.                       | 0,5 - 4      | 34,1                    | 1,2          |
|                   | [83]      | 2400        | Non       | -82                | N.C.                       | 500          | 346                     | 1,2          |
| Corrélateur       | [86]      | 0,15        | Oui       | -67                | 5 (+33 dBm)                | 0,5 - 8      | 2,6 / 8,3               | 3            |
|                   | [70]      | 868         | Oui       | -53                | 100 (+20 dBm)              | 0,5 - 8      | 2,7 / 8,4               | 3            |
|                   | [87]      | 2400        | Oui       | -50                | 4 (0 dBm)                  | 50           | 19                      | 1            |
|                   | [88]      | 2400        | Oui       | -55                | N.C.                       | 100          | 8,5                     | 1,5          |
| RFID              | [89]      | 900         | Oui       | N.C.               | 5                          | N.C.         | 0                       | 3            |
|                   | [90]      | 915         | Non       | N.C.               | 11,2                       | N.C.         | 0                       | 3            |
| Microcontrôleur   | [92]      | 868         | Non       | -51                | 3 (+4,7 dBm)               | 0,86         | 57                      | 3            |
|                   | [93]      | 868         | Oui       | -32                | 7 (0 dBm)                  | 10           | 0,11                    | 1,8          |

TABLEAU 1.1: Comparaison sur les caractéristiques des récepteurs de télé-réveil de la littérature.

<sup>31</sup>Puissance émise par l'émetteur.

<sup>32</sup>Non Communiqué.

<sup>33</sup>Consommation en mode veille / Consommation en mode actif.

## 1.5 Conclusion

Nous avons vu dans les sections précédentes un ensemble de méthodes pour économiser de l'énergie dans les RCSF. On constate que la majorité des méthodes présentées ont pour objectif de réduire la consommation d'énergie liée à la communication radio. D'un point de vue énergétique, la méthode la plus efficace est d'utiliser le module radio uniquement lorsqu'une communication est nécessaire. Nous nous sommes donc orientés vers les protocoles de réveil qui permettent de gérer les passages en mode veille ou en modes actif du module radio.

Parmi ces protocoles de réveil, les protocoles MAC de télé-réveil ont l'avantage de réveiller le module radio à la demande. En comparaison aux autres protocoles de réveil qui s'appuient sur une planification des modes veilles, de manière synchrone ou asynchrone, le protocole de télé-réveil ne dépense pas l'énergie du module radio pour vérifier si une communication est nécessaire. Bien au contraire, c'est l'énergie reçue par un signal radio qui va réveiller le module radio pour démarrer la communication.

En analysant les protocoles MAC de télé-réveil de la littérature, on constate qu'ils n'exploitent pas pleinement le potentiel des systèmes de télé-réveil. En effet, le système de télé-réveil permet de réveiller uniquement le nœud avec lequel on souhaite recevoir des données. En définissant un protocole centralisé géré par une BS, cette dernière peut communiquer avec les nœuds de manière sélective sans requérir à des messages de contrôle de type RTS/CTS ou d'ACK.

Cette approche est possible par le biais d'un système de télé-réveil qui permet de réveiller le nœud de capteur à la demande et par un signal radio particulier. Le système de télé-réveil est également la raison pour laquelle le protocole MAC peut être simplifié. L'état de l'art fait ressortir plusieurs types de récepteurs de télé-réveil. Ces récepteurs se différencient essentiellement par leur fréquence porteuse, leur sensibilité et l'énergie consommée.

Le récepteur de télé-réveil à base de microcontrôleur n'est pas l'approche la plus privilégiée à l'heure actuelle. La première approche basée sur un microcontrôleur consommait trop d'énergie pour être considéré comme efficace. La deuxième approche est plus efficace bien que la consommation en mode actif ne soit pas fournie et que la sensibilité est relativement faible.

Nous développerons donc un récepteur de télé-réveil à base de microcontrôleur pour poursuivre dans cette voie. Toutes les caractéristiques seront également calculées et mesurées afin d'analyser au mieux le récepteur de télé-réveil proposé. On s'attachera également à optimiser la consommation énergétique du récepteur de télé-réveil lors du décodage du message AdR, ce qui n'a pas été fait dans la littérature pour ce type de récepteur.



Le système de télé-réveil est réellement la base de nos travaux. Les protocoles de télé-réveil ne sont pas concevables sans un tel système. Pour cette raison, nous présentons dans le chapitre suivant la conception de notre système de télé-réveil ainsi que sa caractérisation théorique.

## Chapitre 2

# Conception et caractérisation théorique d'un système de télé-réveil à très basse consommation énergétique

### Table des matières

---

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.1   | Introduction . . . . .  | 39 |
| 2.2   | Intégration du récepteur de télé-réveil dans le nœud de capteur . . . . . | 40 |
| 2.3   | Composants et fonctionnement du récepteur de télé-réveil . . . . .        | 41 |
| 2.3.1 | Convertisseur RF-DC . . . . .   | 42 |
| 2.3.2 | Comparateur . . . . .   | 42 |
| 2.3.3 | Microcontrôleur . . . . .   | 43 |
| 2.4   | Caractérisation théorique du système de télé-réveil . . . . .             | 44 |
| 2.4.1 | Niveaux de consommation énergétique du nœud . . . . .                     | 45 |
| 2.4.2 | Sensibilité du récepteur de télé-réveil . . . . .                         | 48 |
| 2.4.3 | Portée de télé-réveil . . . . .   | 51 |
| 2.4.4 | Durée d'une requête d'interrogation du nœud . . . . .                     | 53 |
| 2.5   | Conclusion . . . . .  | 55 |

---

### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons la conception et la caractérisation théorique de notre système de télé-réveil. Le système permet un réveil à la demande des nœuds du réseau tout

en supprimant l'écoute passive. Cette suppression est due au fait que le récepteur de télé-réveil est activé par un signal radio particulier. Un mécanisme d'adressage est également incorporé au système afin de sélectionner le ou les nœuds nœuds à réveiller, ce qui réduit ainsi le phénomène de surécoute.

Par ailleurs, les protocoles DoRa et DC-DoRa seront définis pour ce système de télé-réveil afin de contrôler l'accès au support tout en étant le plus efficace d'un point de vue énergétique. Ce chapitre pose donc les bases pour les chapitres à venir.

L'objectif principal est de proposer un récepteur de télé-réveil dont la consommation énergétique est optimisée. Nous verrons que le récepteur proposé répond à cet objectif puisque sa consommation théorique est de 110 nA en mode veille pour 15,1  $\mu$ A en mode actif, avec une alimentation à 3,3 V.

Le chapitre 2 est organisé de la manière suivante : l'architecture d'un nœud intégrant le système de télé-réveil est décrite dans la section 2.2. Le récepteur de télé-réveil est ensuite présenté en détail dans la section 2.3 avec le fonctionnement de chaque module qui le compose. Enfin, une caractérisation théorique du système de télé-réveil est abordée dans la section 2.4. Cette caractérisation théorique est utile pour l'évaluation des performances des protocoles de télé-réveil car ils seront utilisés en tant que paramètres d'entrée dans le simulateur. Nous mesurerons également ces caractéristiques dans le chapitre 5.5 afin de valider notre approche.

## 2.2 Intégration du récepteur de télé-réveil dans le nœud de capteur

Le système de télé-réveil peut être ajouté au nœud de capteur selon deux architectures distinctes :

- Architecture 1 : le récepteur de télé-réveil est séparé du nœud typique.
- Architecture 2 : le récepteur de télé-réveil est intégré au nœud.

Dans la première architecture du nœud illustré sur la figure 2.1, le récepteur de télé-réveil est un composant séparé qu'on ajoute au nœud de capteur typique. Le nœud typique est composé d'un microcontrôleur principal, d'un module radio principal, d'un certain nombre de capteurs et d'une alimentation. Le récepteur de télé-réveil est quant à lui composé d'un récepteur semi-passif et d'un microcontrôleur secondaire. Un récepteur semi-passif est composé d'éléments actifs et passifs. Un composant passif ne nécessite pas d'être alimenté par une source d'énergie, à l'inverse du composant actif. Le microcontrôleur secondaire communique avec le microcontrôleur et la radio du nœud typique afin de les réveiller au

besoin. La composition du récepteur semi-passif est expliquée plus en détail dans la section 2.3. Cette configuration possède l'avantage de pouvoir être ajoutée sur des nœuds existants du marché puisque le récepteur de télé-réveil est développé séparément.

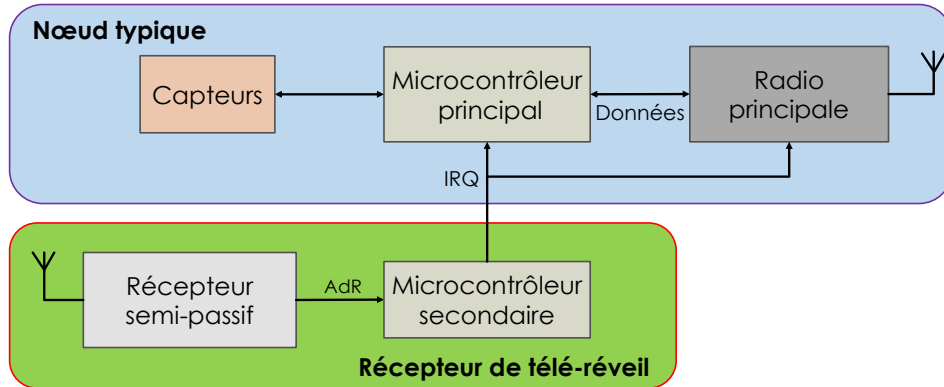


FIGURE 2.1: Architecture 1 d'un nœud intégrant le système de télé-réveil

En ce qui concerne la deuxième architecture présentée sur la figure 2.2, le récepteur de télé-réveil est intégré au nœud en connectant directement le récepteur semi-passif au microcontrôleur principal. Ce dernier effectue alors les tâches réservées au système de télé-réveil ainsi que les tâches liées au capteur. Cette deuxième configuration permet de s'affranchir d'un deuxième microcontrôleur comparé à la configuration précédente. La consommation d'énergie est donc plus faible avec ce système même si la consommation du microcontrôleur secondaire peut descendre à 35 nA (à 3,3 V) en mode veille.

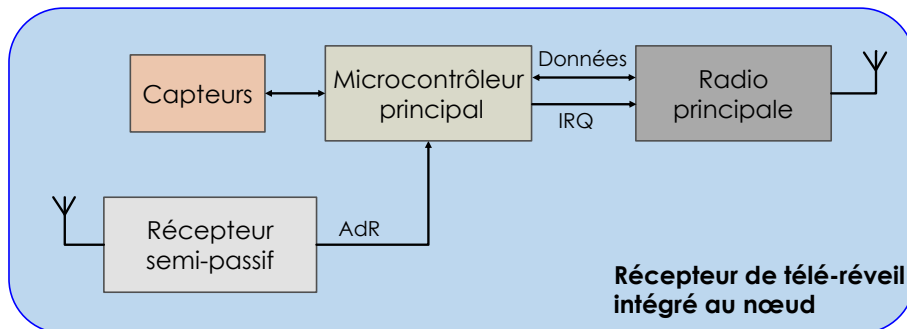


FIGURE 2.2: Architecture 2 d'un nœud intégrant le système de télé-réveil.

## 2.3 Composants et fonctionnement du récepteur de télé-réveil

Nous avons vu dans la section précédente comment intégrer le récepteur de télé-réveil dans l'architecture du nœud de capteur. Nous présentons ici le fonctionnement du récepteur de télé-réveil ainsi que les éléments le constituant. Bien qu'il existe deux architectures possibles, le fonctionnement du récepteur de télé-réveil reste identique pour les deux configurations.

Le schéma-bloc du récepteur de télé-réveil proposé est présenté sur la figure 2.3 avec la distinction entre éléments passifs et actifs. La quantification de la consommation énergétique du récepteur de télé-réveil s'effectue donc à travers l'étude de la consommation des composants actifs du système.

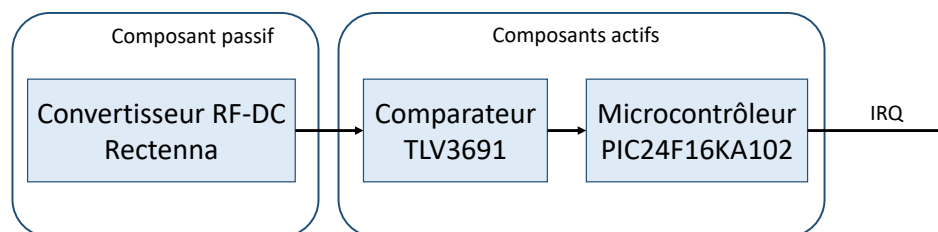


FIGURE 2.3: Schéma-bloc du récepteur de télé-réveil proposé.

Le récepteur est composé de trois éléments : un convertisseur RF-DC, un comparateur et un microcontrôleur. Nous présentons ci-dessous chaque élément ainsi que leur rôle dans le fonctionnement du récepteur.

### 2.3.1 Convertisseur RF-DC

Une rectenna est utilisée en tant que convertisseur RF-DC. La rectenna est un composant passif qui comprend l'antenne (ou un sous-réseau d'antenne) ainsi que le circuit de redressement [96]. Bien que son rôle fondamental soit de télé-alimenter des dispositifs, nous utilisons la rectenna pour fournir le signal de réveil au microcontrôleur. En effet, la rectenna peut récupérer l'énergie transportée par l'onde afin de fournir une tension continue. Cette tension fournie par la rectenna peut alors être utilisée pour déclencher le réveil du microcontrôleur.

### 2.3.2 Comparateur

Un comparateur est placé entre la rectenna et le microcontrôleur. Son rôle principal est d'amplifier le signal en sortie de la rectenna avant d'attaquer l'entrée du microcontrôleur. Ce composant actif n'est pas nécessaire au fonctionnement du récepteur mais il est essentiel pour augmenter la sensibilité du récepteur. Il permet notamment d'accroître la distance maximale de télé-réveil ou encore de diminuer la puissance de transmission. Cet argument est justifié dans la section 2.4.2 avec une évaluation de l'apport du comparateur au système. On y montrera notamment que l'ajout du comparateur permet d'accroître la sensibilité du récepteur de télé-réveil de -30 dBm.

Par ailleurs, le comparateur permet également d'avoir un signal carré sans phénomènes transitoires. En effet, les sinusoïdes au voisinage des transitions entre les niveaux haut et bas disparaissent après traitement du signal par le comparateur.

### 2.3.3 Microcontrôleur

De plus, une capacité d'adressage est ajoutée au système en mettant en place une transmission de données entre la BS et le récepteur de télé-réveil. Ici, nous présentons la communication entre la rectenna et le microcontrôleur. Les microcontrôleurs peuvent déjà communiquer avec d'autres appareils ou périphériques en utilisant les modules intégrés de types SPI, I2C<sup>1</sup> ou UART<sup>2</sup>. Il faudrait alors que la rectenna puisse délivrer un signal compatible avec un des modules de communication précédents. Notre choix se porte naturellement vers une communication UART pour son aspect asynchrone et sa simplicité de connexion.

Une liaison parallèle est difficilement envisageable car la rectenna dispose d'une seule sortie, qui est la tension  $V_{DC}$ . Cette contrainte explique le choix d'une liaison série le microcontrôleur et la rectenna.

Par ailleurs, la rectenna ne permet la communication que dans un seul sens, c'est-à-dire de la rectenna vers le microcontrôleur. On parle alors de communication unidirectionnelle ou simplex. Concernant la mise en œuvre de cette communication, une étude sera menée sur sa faisabilité (cf. chapitre 5). En théorie, elle consiste à effectuer une modulation de type OOK (On-Off Keying) au niveau du transmetteur radio sur le signal de réveil. La modulation OOK transcrit un message digital en jouant sur la présence ou non d'un signal. En général, comme présenté sur la figure 2.4, un 0 binaire correspond à l'absence d'une onde porteuse tandis qu'un 1 binaire correspond à la présence d'une onde porteuse.

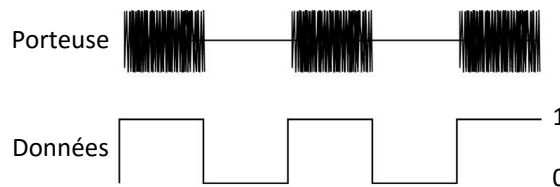


FIGURE 2.4: Signal modulé en OOK et signal digital correspondant.

En principe, si une rectenna reçoit un signal modulé en OOK, elle devrait fournir en sortie un signal digital associé. En effet, la rectenna fournit une tension continue positive lorsqu'elle reçoit un signal radio assez puissant dans sa bande de fréquence, alors que cette tension est nulle si aucun signal n'est reçu. On devrait alors pouvoir être en mesure

<sup>1</sup>Abréviation anglaise : *Inter-Integrated Circuit*.

<sup>2</sup>Abréviation anglaise : *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*.

d'effectuer un adressage avec ce système de télé-réveil proposé. L'inquiétude majeure concernant la faisabilité de ce procédé est le délai de charge en sortie de la rectenna. Ce délai de charge peut considérablement limiter le débit binaire recevable s'il est trop élevé, puisqu'il correspond ici au temps de transition entre les bits du message. La modulation OOK, ou plus généralement ASK, est la plus adaptée pour ce type de récepteur car la rectenna supprime les caractéristiques du signal telles que la fréquence porteuse ou la phase. Il reste alors l'amplitude du signal correspondant à l'énergie récupérée par la rectenna.

D'un point de vue énergétique, la rectenna est passive puisqu'elle est alimentée par le signal radio reçu. Il reste donc la consommation d'énergie du comparateur et du microcontrôleur à considérer pour notre système de réveil. Les avancées récentes dans l'électronique ont permis de concevoir des microcontrôleurs à très faible consommation d'énergie, allant jusqu'au nano-Watt en mode veille pour les plus performants. Cette consommation sera étudiée pour notre système au cours du traitement d'un signal de réveil ainsi qu'en mode veille.

## 2.4 Caractérisation théorique du système de télé-réveil

Nous présentons la caractérisation théorique du système de télé-réveil dans cette section. Nous focaliserons cette étude sur quatre grandeurs principales qui sont :

- le niveau de consommation énergétique du nœud ;
- la sensibilité du récepteur de télé-réveil ;
- la portée de télé-réveil, qui dépend de l'émetteur et du récepteur de télé-réveil avec notamment les antennes utilisées;
- la fenêtre d'attente au niveau de la BS, qui est un paramètre du protocole DoRa.

Tout d'abord, la caractérisation du niveau de consommation énergétique associé à chaque état du nœud s'effectuera à travers les états du microcontrôleur du récepteur de télé-réveil et les états du module radio. On s'intéresse uniquement à la consommation d'énergie utilisée pour la communication dans le réseau, et non pas l'énergie pour relever ou traiter les données du capteur. Les niveaux de consommations énergétiques ainsi que les délais de transitions entre les états seront utilisés dans le simulateur pour l'évaluation du protocole DoRa.

Puis, nous définissons la sensibilité du récepteur de télé-réveil. Cette sensibilité permet de connaître quel niveau minimal de puissance le récepteur est capable de traiter. Cette sensibilité est d'ailleurs liée au critère suivant.

Nous caractérisons ensuite la portée de télé-réveil pour notre système. Le calcul exact de cette portée est très sensible aux paramètres du système, c'est pourquoi nous préférons

donner un encadrement de la portée attendue. Il faudra toutefois vérifier la portée réelle en pratique car elle définira la zone de couverture du réseau de capteurs.

Enfin, nous caractérisons la fenêtre d'attente au niveau de la BS pour l'envoi de requêtes consécutives dans le protocole DoRa. Cette fenêtre est à respecter afin de ne pas créer d'interférences sur le canal radio. La fenêtre d'attente minimale dépend fortement du système de télé-réveil, c'est pourquoi on l'étudie ici.

### 2.4.1 Niveaux de consommation énergétique du nœud

Le niveau de consommation énergétique du nœud dépend principalement de l'état du microcontrôleur et de la radio principale. Le comparateur consomme également une part constante d'énergie qui est toutefois inférieure à la consommation en mode veille des deux autres composants. Dans notre étude, on se base sur le microcontrôleur PIC24F16KA102 [97] dont la consommation énergétique fait partie de l'une des plus basses du marché. Par la suite, on fera référence à ce microcontrôleur sous la dénomination simplifiée de PIC24F, qui est la famille des microcontrôleurs avec une architecture 16 bits. Il fait d'ailleurs partie de la famille des microcontrôleurs à extra-basse consommation ou encore XLP<sup>3</sup>. Concernant la radio principale, on se base sur une puce TI CC2500 [98] puisque ses fonctionnalités sont adaptées pour une intégration dans notre système de télé-réveil. La consommation en courant et en puissance, ainsi que la fréquence de l'oscillateur de ces deux composants sont référencées dans les tableaux 2.1 et 2.2.

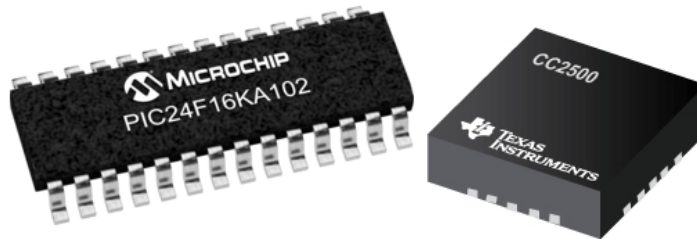


FIGURE 2.5: Le microcontrôleur PIC24F et la puce radio CC2500.

| Mode                       | Sommeil profond | Décodage AdR (LPRC <sup>4</sup> ) | Actif (FRC <sup>5</sup> ) |
|----------------------------|-----------------|-----------------------------------|---------------------------|
| Courant consommé           | 35 nA           | 15 $\mu$ A                        | 3,05 mA                   |
| Puissance consommée        | 115,5 nW        | 49,8 $\mu$ W                      | 10,06 mW                  |
| Fréquence de l'oscillateur | Aucun           | 31 kHz                            | 8 MHz                     |

TABLEAU 2.1: Caractéristiques des états sélectionnés pour le PIC24F à 25 °C et 3,3 V.

Si on considère la deuxième architecture comprenant un seul microcontrôleur présentée dans la section 2.2, trois états sont définis pour le microcontrôleur PIC24F. Le plus bas

<sup>3</sup>Abréviation anglaise : *Extremely Low Power*

<sup>4</sup>Abréviation anglaise : *Low Power RC*

<sup>5</sup>Abréviation anglaise : *Fast RC*



niveau de consommation correspond au mode sommeil profond, avec notamment l'arrêt de tous les oscillateurs internes. Ensuite, le mode décodage AdR correspond à l'état dans lequel le microcontrôleur décode l'adresse insérée dans la trame AdR reçue. Enfin, le mode actif comprend les actions principales réalisées par le nœud avec notamment la capture de mesures physiques, le réveil de la radio principale et la transmission de données. Le diagramme d'état du microcontrôleur est représenté sur la figure 2.6.

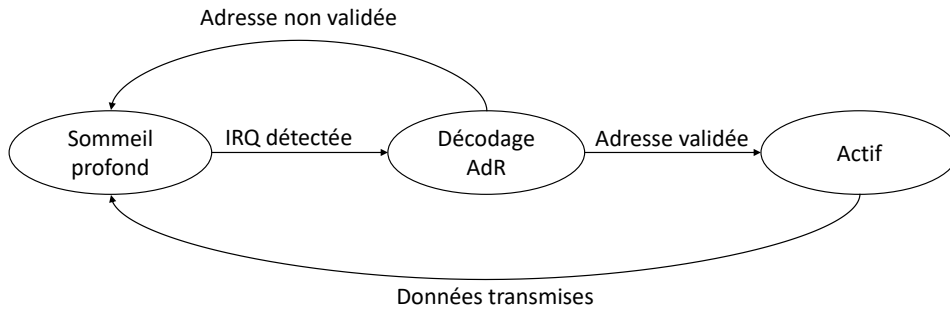


FIGURE 2.6: Diagramme d'état du microcontrôleur PIC24F.

Le microcontrôleur quitte le mode sommeil profond lorsqu'il reçoit une interruption matérielle (IRQ) sur les entrées d'interruption externe INT0, INT1 ou INT2. Il passe alors en mode décodage AdR pour décoder la trame reçue comprenant l'adresse de type MAC sur  $N_{add}$  bits. Dans le cas où l'adresse insérée dans le message AdR ne correspond pas à celui du nœud en question, le microcontrôleur repasse en mode sommeil profond. Sinon, il passe en mode actif avec le démarrage de l'oscillateur FRC à 8 MHz et selon un temps de transition de  $T_{da} = 1 \mu s$ . Le nœud peut alors pleinement effectuer ses fonctions avant de retourner en mode sommeil profond.

La latence du télé-réveil correspond au temps entre la réception d'un AdR et l'envoi des données par le nœud réveillé. Cette latence est beaucoup influencée par le temps de transition du mode sommeil profond vers le mode décodage AdR, qu'on notera  $T_{sd}$ , ainsi que la durée de réception de l'adresse, noté  $T_{add}$ .

Le décodage de la trame AdR est effectuée avec un débit binaire maximal égal au huitième de la fréquence de l'oscillateur, soit  $D_{max} = 3,87$  kbps pour l'oscillateur LPRC (Low Power RC) à 31 kHz. La durée de réception de l'adresse est alors égale à :

$$T_{add} = \frac{N_{add}}{D_{max}} \quad (2.1)$$

On fixe la longueur du champ d'identification par défaut à  $N_{add} = 10$  bits, ce qui nous donne la durée  $T_{add} = 2,6$  ms. Un champ d'adressage sur 10 bits comprend en fait 1 bit de démarrage, 8 bits de données pour l'adressage et 1 bit de fin. Il est donc possible d'avoir  $2^8 = 256$  nœuds dans le réseau. Ce nombre de nœuds est certes faible, mais il est approprié pour

la phase actuelle de développement des systèmes de télé-réveil dans les RCSF. Ce nombre est tout à fait suffisant pour les réseaux de petite et moyenne échelle. L'adressage n'est toutefois pas limitée à 8 bits, nous considérons cette grandeur uniquement dans le cadre pratique de cette thèse.

D'après le document technique du PIC24F [97], le temps de démarrage de l'oscillateur LPRC est de  $T_{LPRC} = 100 \mu s$ . Afin d'avoir la durée  $T_{sd}$ , il faut y ajouter la durée que met le microcontrôleur pour arriver au point où il est effectivement capable de recevoir la donnée relative à l'adresse. En théorie, on ne peut pas déterminer cette durée puisqu'il est dépendant du programme implanté dans le microcontrôleur. On peut néanmoins estimer cette durée en évaluant le nombre d'instruction dans le programme entre le redémarrage après réveil et la fin d'initialisation du module de réception.

Le programme de télé-réveil est présenté dans le chapitre 5, on compte  $N_{instr} = 40$  instructions dans celui-ci entre le redémarrage et la fin d'initialisation du module UART. Sachant qu'une instruction s'exécute en 4 cycles d'horloge  $T_{osc}$  de l'oscillateur choisi, on a alors la durée  $T_{sd}$  qui s'écrit :

$$T_{sd} = T_{LPRC} + N_{instr} \times 4 \times T_{osc} \quad (2.2)$$

L'oscillateur LPRC étant cadencé à 31 kHz, le calcul nous donne un temps de transition  $T_{sd} = 5,3 \text{ ms}$ .

Cette durée  $T_{sd}$  nous permet également de calculer la longueur minimale de préambule  $N_{pre,min}$ . En effet, le préambule doit être assez long pour permettre au microcontrôleur d'être prêt à recevoir l'adresse. Comme le message AdR peut être envoyé avec un débit maximal de 3,87 kbps, on calcule la longueur minimale de préambule par la relation suivante :

$$N_{pre,min} = T_{sd} \times D_{max} \quad (2.3)$$

Le calcul nous donne  $N_{pre,min} = 20,51 \text{ bits}$ . On a donc théoriquement une longueur minimale de préambule égale à 21 bits. Par mesure de sécurité, on prendra par défaut un préambule de longueur  $N_{pre} = 22 \text{ bits}$ . La séquence binaire choisie pour ce préambule est une suite de  $\{1\}$ .

| Mode                       | <i>Power-down</i> | <i>Idle</i> | <i>Idle</i> vers<br>Rx/Tx | Rx      | Tx      |
|----------------------------|-------------------|-------------|---------------------------|---------|---------|
| Courant consommé           | 400 nA            | 1,5 mA      | 7,4 mA                    | 16,6 mA | 21,2 mA |
| Puissance consommée        | 1,3 $\mu$ W       | 5 mW        | 24,4 mW                   | 54,8 mW | 70 mW   |
| Fréquence de l'oscillateur | 34,7 kHz          | 26 MHz      | 26 MHz                    | 26 MHz  | 26 MHz  |

TABLEAU 2.2: Caractéristiques des états sélectionnés pour la puce CC2500.

Au niveau de la puce radio CC2500, 5 états sont présents dans son mode de fonctionnement. Ils sont listés dans le tableau 2.2 avec les consommations énergétiques associées. Le diagramme d'état de la puce radio est représenté sur la figure 2.7. Initialement en mode *Power-down*, un oscillateur à faible fréquence est utilisé. Le passage en mode *Idle* est commandé par le microcontrôleur via le bus SPI. Il faut un temps  $T_{di} = 150 \mu\text{s}$  pour effectuer cette transition qui correspond au temps de redémarrage de l'oscillateur à quartz cadencé à 26 MHz. Lorsque le microcontrôleur envoie la requête de transmission de données à l'émetteur radio, celui-ci passe du mode *Idle* vers le mode de transmission Tx, avec un état de transition qui dure  $T_{it} = 88,4 \mu\text{s}$ . Après transmission des données dans le mode Tx, l'émetteur radio repasse en mode *Idle* avec un temps de transition  $T_{ti} = 0,1 \mu\text{s}$ . L'émetteur radio repasse ensuite en mode *Power-down* avec le redémarrage de l'oscillateur RC à 34,7 kHz. Cette dernière étape nécessite un temps de calibration de  $T_{ip} = 2 \text{ ms}$ .

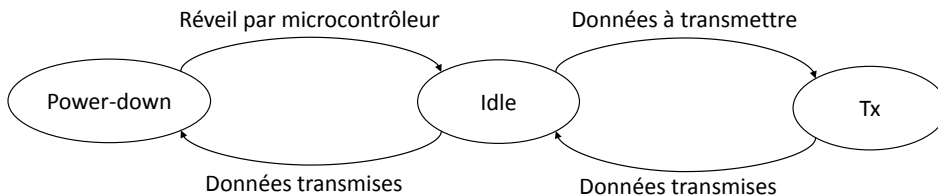


FIGURE 2.7: Diagramme d'état de la puce radio CC2500.

### 2.4.2 Sensibilité du récepteur de télé-réveil

Dans cette sous-section, nous présentons le calcul théorique de la sensibilité du récepteur de télé-réveil. On définit la sensibilité comme étant la puissance minimale reçue au niveau de l'antenne pour décoder correctement le message AdR. Cette puissance minimale correspond en fait à un rapport signal sur bruit suffisamment élevé pour décoder le message AdR. Nous présentons par la suite comment calculer cette puissance minimale.

Tout d'abord, considérons le schéma de transmission de puissance représenté sur la figure 2.8 entre la BS et le récepteur de télé-réveil du nœud.

On fait l'hypothèse que les deux antennes sont correctement alignées avec l'absence d'obstacles entre les antennes. Cela permet d'assurer le trajet direct de l'onde. Ici, on ne considère pas les réflexions et les trajets multiples. Ces hypothèses permettent de simplifier l'étude, car ces phénomènes existent bien en pratique. Dans ces conditions, l'équation de Friis [99] nous donne l'ordre de grandeur de la puissance reçue  $P_r$  par l'antenne de réception :

$$P_r = P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2 \quad (2.4)$$

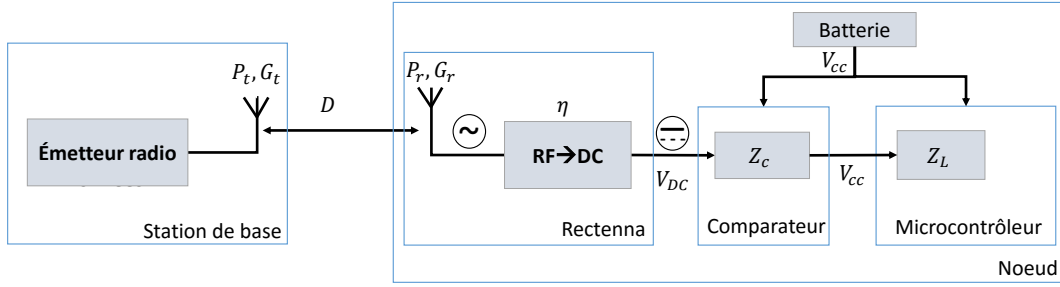


FIGURE 2.8: Schéma de transmission de puissance.

avec les paramètres suivants :

- $P_t$  est la puissance transmise par l'antenne émettrice en watts,
- $G_t$  et  $G_r$  sont respectivement les gains linéaires de l'antenne de transmission et de réception,
- $D$  est la distance séparant les antennes en mètres,
- $\lambda$  est la longueur d'onde en mètres.

Le rendement de conversion RF/DC est égal au rapport entre la puissance délivrée par le convertisseur RF/DC et la puissance reçue par l'antenne. Il est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{V_{DC}^2/Z_c}{P_r} \quad (2.5)$$

où :

- $Z_c$  est l'impédance d'entrée du comparateur en ohm,
- $V_{DC}$  est la tension fournie par le convertisseur RF/DC,
- $P_r$  est la puissance collectée par l'antenne en watts.

Lors de la réception d'un AdR, la tension  $V_{DC}$  doit être supérieure à un certain seuil de tension  $V_s$  afin que le comparateur traite le signal utile. La tension de seuil  $V_s$  correspond en fait au plafond de bruit. Cela signifie que tous les signaux reçus dont la tension  $V_{DC}$  est inférieur à  $V_s$  ne seront pas traités, qu'ils soient un signal de réveil ou un bruit de fond. En fait, la tension  $V_s$  est liée à la puissance minimale de réception au niveau de l'antenne. La sensibilité  $S$  est donc donnée par la relation :

$$S = \frac{V_s^2/Z_c}{\eta} \quad (2.6)$$

L'équation 2.6 montre la dépendance de la sensibilité par rapport à la tension  $V_s$ , mais également par rapport au rendement  $\eta$ . Nous ne sommes pas en mesure d'améliorer le rendement  $\eta$  car cela relève d'une autre thématique de recherche [100, 101]. En revanche, la tension  $V_s$  est définie au niveau du circuit associé au comparateur. Nous justifions ici

l'utilisation du comparateur en analysant la sensibilité de réception avec ou sans comparateur dans le récepteur.

Sans comparateur, si on considère un microcontrôleur PIC24F alimenté à la tension  $V_{cc}$ , la tension d'entrée d'un port digital doit être supérieure à  $V_{cc}/2$  pour être considérée comme un niveau haut. Sinon, elle sera considérée comme un niveau bas entre 0 V et  $V_{cc}/2$ . La tension d'entrée ne doit toutefois pas dépasser la tension  $V_{cc}$  sous peine d'endommager le microcontrôleur.

Le comparateur baisse le niveau de tension requis en sortie du convertisseur RF/DC. En effet, le comparateur délivre une tension égale à  $V_{cc}$  en sortie si la tension à son entrée est supérieure à une tension seuil  $V_s$  qu'on peut fixer à  $V_s = 50$  mV. Sinon, la tension de sortie est égale à 0 V si la tension d'entrée descend en dessous de  $V_s - V_{hys}$  (avec  $V_{hys}$  la tension d'hystérésis égale à 34 mV). En la présence du comparateur, la tension minimale  $V_{DC}$  est égale à la tension seuil  $V_s$ . En l'absence du comparateur, la tension minimale  $V_{DC}$  serait de  $V_{cc}/2$ , soit 1,65 V pour une alimentation à 3,3 V.

D'après l'équation 2.6 et en faisant le rapport des sensibilités avec et sans comparateur, l'ajout du comparateur diminue d'un facteur 1000 la sensibilité du récepteur. Cela correspond à une baisse de la puissance minimale de 30 dBm. Cette baisse de sensibilité permet au récepteur de traiter des signaux de plus faible puissance. Il est toutefois assez difficile de déterminer précisément la sensibilité du récepteur car nous ne connaissons pas exactement le rendement  $\eta$ . De plus, l'énergie supplémentaire consommée par l'ajout du comparateur est assez faible puisqu'il représente 14,7 % de la consommation totale en mode veille du nœud (le comparateur consomme 75 nA pour un nœud consommant au total 510 nA). Ces valeurs théoriques sont approuvées par des mesures réelles effectuées dans le chapitre 5.

En somme, le comparateur joue trois rôles :

1. Il discrimine les signaux utiles par rapport au bruit.
2. Il augmente la sensibilité du récepteur de télé-réveil en abaissant le seuil de tension  $V_s$ .
3. Il protège le microcontrôleur des possibles surtensions en cas de signal reçu trop puissant.

La sensibilité de réception définit en partie la portée de télé-réveil. En effet, l'émetteur de télé-réveil joue également un rôle dans la détermination de cette portée. Nous verrons dans la sous-section suivante la relation entre ces deux grandeurs.

### 2.4.3 Portée de télé-réveil

On souhaite calculer la portée de télé-réveil, qui est la distance maximale à laquelle le récepteur peut être réveillé. Cette valeur est essentielle pour le rayon de couverture du réseau ainsi que le déploiement des nœuds du réseau. Cette portée dépend de plusieurs facteurs qui sont présentés dans cette partie.

Étudions dans un premier temps la relation entre la tension  $V_{DC}$  obtenue et la distance  $D$  entre l'émetteur et le récepteur. En combinant les équations 2.4 et 2.5, on obtient :

$$V_{DC} = \sqrt{\eta Z_c P_t G_t G_r} \frac{\lambda}{4\pi D} \quad (2.7)$$

Selon l'équation 2.7, la tension  $V_{DC}$  est inversement proportionnelle à la distance  $D$ . La distance maximale de télé-réveil correspond alors à la tension  $V_{DC}$  minimale pour traiter le signal de réveil.

Pour la suite, on fixe les paramètres liés au système en utilisant les valeurs dans le tableau 2.3. Bien que ces valeurs soient propres à la technologie et au matériel utilisé, ils permettent d'avoir une estimation théorique de la distance maximale de réveil.

| Paramètre   | Valeur                |
|-------------|-----------------------|
| $Z_c$       | 1 M $\Omega$          |
| $G_t$       | 4                     |
| $G_r$       | 0,7 [102]             |
| $F$         | 2,45 GHz              |
| $\lambda$   | 12,2 cm <sup>-1</sup> |
| $P_{t,max}$ | 100 mW                |

TABLEAU 2.3: Paramètres fixés pour le système de réveil radio.

La puissance de transmission  $P_t$  est limitée à 100 mW car c'est la puissance maximale autorisée selon les normes européennes dans cette bande de fréquence [103]. On peut ajuster la puissance  $P_t$  selon les besoins en respectant cette limite. Nous réécrivons l'équation 2.7 pour exprimer la distance maximale  $D_{max}$  de télé-réveil en fonction de la puissance de transmission  $P_t$  et le rendement de conversion  $\eta$  :

$$D_{max} = \sqrt{\eta Z_c P_t G_t G_r} \frac{\lambda}{4\pi V_s} \quad (2.8)$$

On trace sur la figure 2.9 l'évolution de la distance maximale de réveil  $D_{max}$  en fonction de la puissance  $P_t$  et pour diverses valeurs de rendement  $\eta$ . Nous considérons un rendement variable dans cette étude car sa valeur nous est inconnue ici. Il est également intéressant d'étudier la variation de la distance de télé-réveil en fonction de ce paramètre dans la mesure où il montre les résultats potentiels en fonction du rendement  $\eta$ .

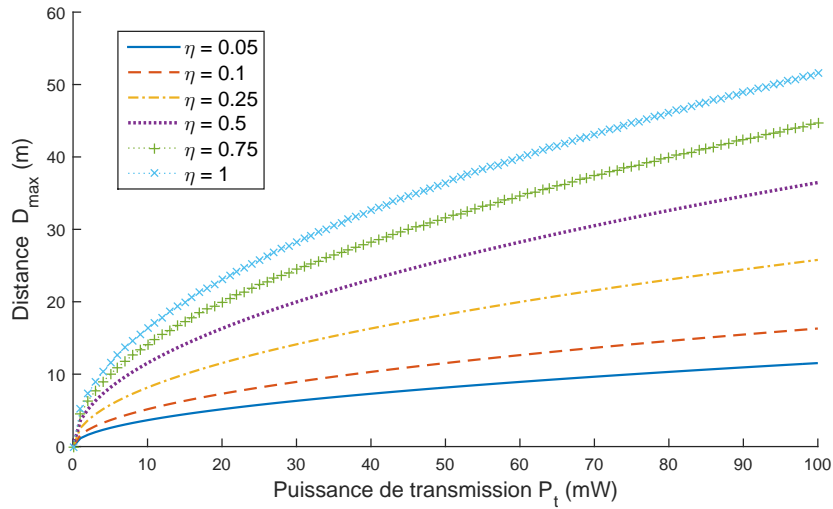


FIGURE 2.9: Distance maximale de télé-réveil en fonction de la puissance de transmission et du rendement de conversion RF/DC.

Le rendement  $\eta$  possède une influence similaire à la puissance de transmission  $P_t$  sur la distance maximale de réveil. Ceci explique la tendance à compenser le faible rendement en augmentant la puissance de transmission. À l'heure actuelle, la majorité des systèmes de télé-réveil ont une portée inférieure à 20 m, même en émettant à la puissance maximale (fixée à 2 W pour un fréquence porteuse de 868 Mhz contre 100 mW à 2,45 Ghz par les normes européennes). En confrontant cet état de fait à la figure 2.9, on pourrait en déduire que la majorité des systèmes de télé-réveil ont un rendement de conversion RF/DC inférieur à 25 %, du moins pour ceux disposant d'une architecture de système similaire à la nôtre.

Il est également possible de gérer la puissance de transmission en fonction de la distance  $D$  qui sépare le transmetteur et le nœud à réveiller. Pour ce faire, on peut appliquer la relation 2.9 en supposant que tous les paramètres soient connus. Entre autres, la distance  $D$  peut être connue par la BS si les nœuds sont déployés de manière statique et déterministe, ou bien si les nœuds informent la BS de leur position au préalable.

$$P_t = \frac{V_{DC}^2}{Z_c} \frac{1}{\eta G_t G_r} \left( \frac{4\pi D_{max}}{\lambda} \right)^2 \quad (2.9)$$

Comme on a pu le voir, la distance de télé-réveil dépend de plusieurs paramètres. Certains sont fixés par le système alors que d'autres peuvent être ajustés selon les besoins, tel que la puissance de transmission du signal au niveau de la BS. On peut aisément considérer un réveil possible des nœuds pour des distances inférieures à 20 mètres pour notre système, en faisant l'hypothèse que le rendement  $\eta$  est supérieur à 25 %.

#### 2.4.4 Durée d'une requête d'interrogation du nœud

On s'intéresse à la fenêtre d'attente au niveau de la BS. Elle est définie comme étant le temps d'attente après envoi d'une requête de réveil avant de transmettre une nouvelle requête à un autre nœud. Cette fenêtre d'attente est notée  $T_{att}$  et provient des délais temporels produits par les étapes de changement d'état (niveau électronique) et de transfert des informations (niveau protocolaire). Les délais de transfert sont explicités ci-dessous puisque les délais de transitions d'état ont été expliqués dans la section 2.4.1.

On considère que la transmission s'effectue dans un espace libre, le temps maximal de propagation est alors calculé à partir de la distance maximale de transmission suivant la relation suivante :

$$T_{pm} = \frac{R_{max}}{c} \quad (2.10)$$

avec  $R_{max} = 20$  m et  $c = 3 \times 10^8$  m/s, ce qui donne un temps de propagation maximale de  $T_{pm} = 66,7$  ns.

La durée d'envoi de l'AdR dépend de la taille du message ainsi que du débit de transmission. On considère l'envoi d'un message AdR de  $N_{AdR} = 32$  bits comprenant 22 bits de préambule et 10 bits de champ d'adresse. Le message sera envoyé au débit maximal calculé précédemment, c'est-à-dire  $D_{max} = 3,87$  kbps). La durée d'envoi  $T_{AdR}$  du message AdR est alors calculée de la façon suivante :

$$T_{AdR} = \frac{N_{AdR}}{D_{max}} \quad (2.11)$$

La durée d'envoi du message AdR est donc de  $T_{AdR} = 8,3$  ms.  $T_{AdR}$  est largement supérieure au temps de propagation calculé précédemment.

Après réception et traitement de cet AdR, le nœud se réveille si le message lui est destiné. Il envoie ensuite une commande par liaison SPI pour la transmission des données mesurées. On considère une taille des données égale à  $N_{pay} = 800$  bits. Cette valeur est bien suffisante pour la majorité des applications des RCSF. La commande d'inscription des données dans la mémoire tampon du module radio requiert un octet supplémentaire d'en-tête. La transmission des 808 bits s'effectue à une fréquence d'horloge maximale de  $F_{SPI} = 6,5$  MHz. La durée d'envoi de cette information vers la carte radio est alors calculée avec la relation suivante :

$$T_{SPI} = \frac{N_{pay} + 8}{F_{SPI}} \quad (2.12)$$

avec  $N_{pay}$  la taille des données en bits. La durée de transfert de la trame de données vers la radio est alors de  $T_{SPI} = 124,3$   $\mu$ s.



Une fois les données mesurées inscrites dans la mémoire tampon du module radio, ce dernier envoie les données à la BS dans une seule trame puisque les données sont inférieures à 256 octets. Cette limite est fixée par le module radio CC2500 pour l'envoi d'une seule trame, plusieurs trames sont envoyées dans le cas contraire. La durée d'envoi de la trame de données par le module radio vers la BS est définie par le débit binaire du module radio, ici on a  $D_b = 250$  kbps. Le temps de transfert des données est calculé selon la relation suivante :

$$T_{trame} = \frac{N_{trame}}{D_b} \quad (2.13)$$

avec  $N_{trame}$  la taille de la trame en bits. Il comprend le champ des données ainsi que divers champs additionnels ajoutés par le module radio d'une taille minimale de 48 bits, ce qui fait un total de 848 bits. Le calcul nous donne alors une durée  $T_{trame} = 3,4$  ms.

Le bilan temporel donne la durée maximale pour effectuer un procédé de requête et transfert de données entre la BS et le nœud, avec les différentes durées énumérées dans le tableau 2.4. La période de requête minimale  $T_{req}$  au niveau de la BS est alors donnée par la sommation suivante :

$$T_{req} = 2T_{pm} + T_{AdR} + T_{sa} + T_{di} + T_{SPI} + T_{it} + T_{trame} \quad (2.14)$$

$$T_{req} = 12,9 \text{ ms} \quad (2.15)$$

| Durée de                                      | Notation    | Valeur        |
|---|-------------|---------------|
| Propagation dans le milieu                    | $T_{pm}$    | 91,7 ns       |
| Envoi de l'AdR                                | $T_{AdR}$   | 8,3 ms        |
| Transition <i>Power-save</i> vers Actif       | $T_{sa}$    | 1 ms          |
| Transition <i>Power-down</i> vers <i>Idle</i> | $T_{di}$    | 150 $\mu$ s   |
| Transfert des données via SPI                 | $T_{SPI}$   | 124,3 $\mu$ s |
| Transition <i>Idle</i> vers Tx                | $T_{it}$    | 88,4 $\mu$ s  |
| Transmission de la trame                      | $T_{trame}$ | 3,4 ms        |

TABLEAU 2.4: Liste des différents délais pris en compte pour le processus de réveil radio d'un nœud.

La fenêtre d'attente  $T_{att}$  est obtenue en soustrayant la durée d'envoi de l'AdR à la période de requête :

$$T_{att} = T_{req} - T_{AdR} \quad (2.16)$$

La BS doit donc attendre au minimum  $T_{att} = 4,6$  ms avant de retransmettre un nouvel AdR.

Ces résultats sont également illustrés sur la figure 2.10 avec la représentation de la part de chaque durée sur la période de requête. La durée d'envoi de l'AdR prend une part prépondérante dans le processus avec 64% du temps total, suivi de la durée d'envoi de la trame avec 26 %.

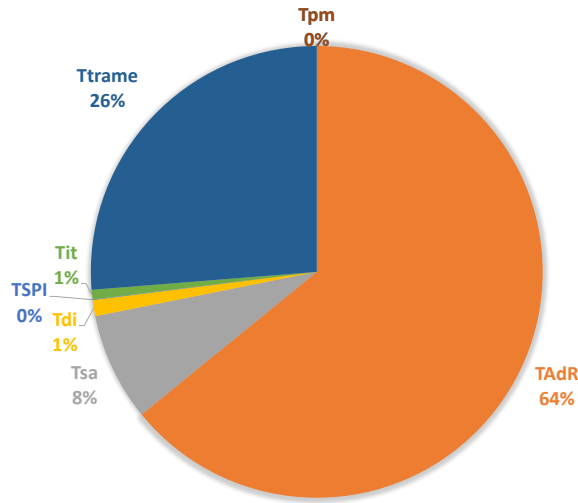


FIGURE 2.10: Répartition du temps requis pour la période de requête  $T_{req}$ .

Pour résumer, un chronogramme d'état du microcontrôleur et de la carte radio est représenté sur la figure 2.11. La puissance consommée par chaque état y est également représentée, la transition entre chaque état est représentée par des pentes car le changement de niveau de consommation ne s'effectue pas instantanément. Même si le long redémarrage du PIC24F oblige un long préambule dans le message AdR, le niveau de consommation est relativement faible comparé à ce que consomme la radio lors de la transmission des données. La consommation d'énergie reste tout de même dominée par la radio principale sur ce cycle de fonctionnement. En effet, une intégration de la consommation des modules au cours du cycle indique que le PIC24F consomme  $42 \mu\text{J}$  alors que la carte radio consomme  $239 \mu\text{J}$ . La consommation du PIC24F, qui est équivalente à la consommation du système de télé-réveil, est donc égale à 15 % de la consommation du nœud.

## 2.5 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif principal de présenter la conception du système de télé-réveil. Nous avons également effectué une caractérisation théorique du système pour avoir la consommation énergétique associée à chaque état du récepteur, la portée de télé-réveil ou la fenêtre d'attente. Cette première étude est nécessaire pour le simulateur que nous avons développé car les paramètres du système pourront y être définis de manière cohérente par rapport à un modèle théorique. Le simulateur permet d'évaluer les performances du protocole DoRa, ce qui fait l'objet du chapitre suivant.

De plus, nous pourrions confronter cette étude théorique avec l'expérimentation présentée dans le chapitre 5. La comparaison s'effectuera notamment sur la portée de télé-réveil, la latence de réveil et la consommation énergétique du récepteur de télé-réveil.

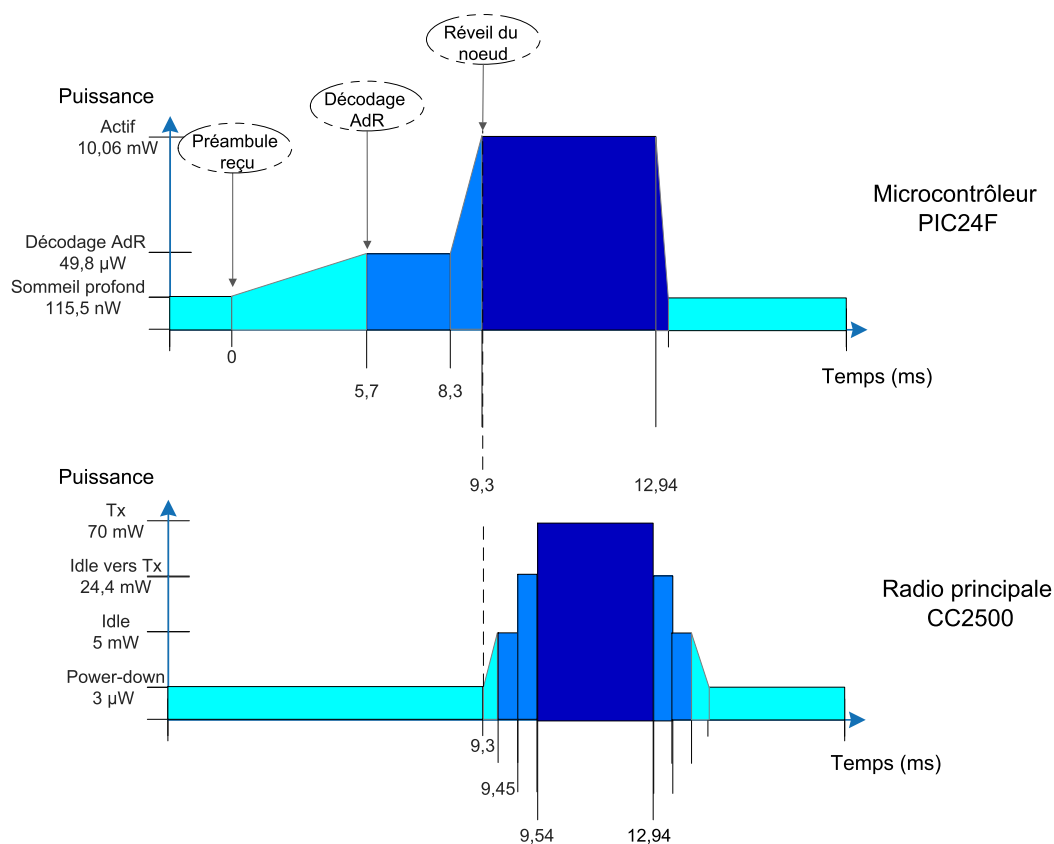


FIGURE 2.11: Chronogramme d'état du micro-contrôleur et de la puce radio après réception d'un message AdR.

Pour conclure ce chapitre, on présente dans le tableau 2.5 un récapitulatif des performances théoriques du système de télé-réveil. La portée de télé-réveil varie entre 0 et 46 mètres en fonction du rendement de conversion  $\eta$  et pour une puissance de transmission  $P_t = 100$  mW. Étant donné que la portée de télé-réveil peut difficilement être calculée de manière certaine, on se basera essentiellement sur l'approche expérimentale pour évaluer ce paramètre.

Avec la configuration du microcontrôleur présenté dans ce chapitre, la latence de réveil est de 8,3 ms. Cette latence est comprise dans la période de requête  $T_{req}$ , dont l'évaluation nous indique qu'il est possible d'interroger un nœud toutes les 12,9 ms. La BS peut alors récupérer 77 trames de données par seconde au maximum, en provenance de 77 nœuds distincts ou bien en provenance d'un nombre plus restreint de nœuds de capteurs.

Enfin, la consommation de courant du récepteur de télé-réveil est assez faible puisqu'elle est de 110 nA en mode sommeil profond. Le mode décodage AdR est en fait le mode Rx des récepteurs traditionnels. La consommation en mode décodage AdR est de seulement 15,1 µA, contre 16,6 mA pour le mode Rx du CC2500 par exemple. La consommation de courant en mode réception est donc 1000 fois inférieure avec le récepteur de télé-réveil proposé, soit

trois ordres de grandeur. Le débit et la portée de transmission sont certes plus élevés avec la puce radio CC2500, mais l'efficacité énergétique oblige à faire un compromis entre l'énergie consommée et la portée de télé-réveil par exemple.

| Paramètre                            | Valeur               |
|--------------------------------------|----------------------|
| Portée de télé-réveil                | 0 à 46 m             |
| Latence de réveil                    | 8,3 ms               |
| Consommation en mode sommeil profond | 110 nA (3,3 V)       |
| Consommation en mode décodage AdR    | 15,1 $\mu$ A (3,3 V) |
| Période de requête $T_{req}$         | 12,9 ms              |
| Fenêtre d'attente $T_{att}$          | 4,6 ms               |

TABLEAU 2.5: Récapitulatif des performances théoriques du système de télé-réveil.

Dans un premier temps, ces paramètres seront réutilisés en tant que paramètres d'entrée dans le simulateur. Ils sont donc importants pour l'évaluation des performances des protocoles DoRa et DC-DoRa dans les deux chapitres qui suivent. De plus, nous présenterons dans le chapitre 5 la mesure expérimentale de ces paramètres, ainsi que ceux qui n'ont pu être calculé précisément dans cette approche théorique (la sensibilité de réception et la portée de télé-réveil). Ces mesures ont donc été utilisées dans le simulateur que nous allons présenter dans le chapitre suivant, avec pour objectif de le rendre assez réaliste.



## Chapitre 3

# Conception et évaluation des performances du protocole DoRa associé au système de télé-réveil

### Table des matières

---

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.1   | Introduction . . . . .   | 60 |
| 3.2   | Présentation du protocole DoRa . . . . .   | 60 |
| 3.2.1 | Définition de la topologie du réseau . . . . .   | 61 |
| 3.2.2 | Structure des messages du protocole . . . . .  | 62 |
| 3.2.3 | Communication entre la BS et un nœud quelconque . . . . .                                    | 63 |
| 3.2.4 | Protocole DoRa pour l'accès au support dans le RCSF . . . . .                                | 64 |
| 3.3   | Implémentation du protocole DoRa sous OMNeT++ . . . . .                                      | 65 |
| 3.3.1 | Module de la BS . . . . .  | 66 |
| 3.3.2 | Module du nœud . . . . .   | 67 |
| 3.3.3 | Machine à états finis du protocole inter-couches . . . . .                                   | 69 |
| 3.3.4 | Algorithme du protocole de réveil d'un nœud quelconque . . . . .                             | 71 |
| 3.4   | Définition des critères de performance . . . . .   | 72 |
| 3.4.1 | Critères typiques pour l'évaluation des performances des protocoles MAC . . . . .            | 72 |
| 3.4.2 | Probabilités associées à une théorie de détection du signal . . . . .                        | 73 |
| 3.5   | Évaluation des performances du protocole DoRa en fonction des paramètres du réseau . . . . . | 76 |
| 3.5.1 | Scénario de simulation . . . . .   | 77 |
| 3.5.2 | Effet du canal de propagation . . . . .  | 77 |

---

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.5.3 | Effet du nombre de nœuds . . . . .                                   | 80 |
| 3.5.4 | Effet de la taille des données . . . . .                             | 82 |
| 3.6   | Étude comparative des performances du protocole DoRa . . . . .       | 84 |
| 3.6.1 | Scénario de simulation . . . . .                                     | 84 |
| 3.6.2 | Comparaison avec des protocoles MAC en variant la période de requête | 86 |
| 3.6.3 | Comparaison avec des protocoles MAC en variant la taille des données | 89 |
| 3.6.4 | Comparaison entre les bibliothèques MiXiM et INET . . . . .          | 92 |
| 3.7   | Conclusion . . . . .   | 93 |

---

## 3.1 Introduction

Ce chapitre présente la conception du protocole DoRa d’une part et l’évaluation de ses performances d’autre part. Ce protocole est défini pour le système de télé-réveil qui a été présenté dans le chapitre précédent.

Dans un premier temps, nous présenterons le protocole DoRa et son implémentation dans le simulateur OMNeT++. Afin de pouvoir quantifier les performances du protocole, nous définirons ensuite les critères de performance. Ces critères seront utilisés pour deux études distinctes.

La première étude porte sur l’évaluation des performances du protocole en fonction des paramètres du réseau. Ensuite, une étude comparative des performances sera menée afin de confronter notre protocole aux protocoles MAC actuellement utilisés. Une comparaison entre les deux simulateurs que nous avons développés est également présentée en fin de chapitre.

## 3.2 Présentation du protocole DoRa

Le protocole que nous avons créé se nomme DoRa, il fait référence à une communication avec Double Radio au niveau du nœud. Il est conçu pour des réseaux en étoile dont la topologie sera donnée dans la section 3.2.1. Ensuite, la structure des trames de messages utilisées par le protocole DoRa sera définie dans la section 3.2.2. La topologie du réseau et les messages étant définies, on présentera enfin le protocole DoRa pour la communication entre la BS et un nœud quelconque dans la section 3.2.3, et pour l’accès au support dans un RCSF dans la section 3.2.4.

### 3.2.1 Définition de la topologie du réseau

Nous présentons dans un premier temps la topologie de réseau pour lequel le protocole DoRa est défini. La topologie considérée est de type étoile où une station de base, qu'on appellera BS<sup>1</sup> par la suite, gère l'accès de la totalité du réseau au canal radio.

Une topologie en étoile a été choisie car nous pensons que l'émission d'un message AdR consomme trop d'énergie au niveau du nœud, ce qui exclut le réveil multi-saut. A titre d'exemple, un nœud consomme 152 mA pour émettre un message AdR pour l'approche présenté dans[104]. En revanche, il est envisageable de considérer plusieurs réseaux en étoile avec une communication entre les BS, ce qui formerait un réseau avec une topologie de type cluster. On présente cette topologie de type étoile par la suite.

Soit un réseau de capteurs sans fil composé de  $N$  nœuds et d'une station de base positionnée au centre. Les nœuds sont positionnés aléatoirement de telle sorte qu'ils se trouvent dans le Rayon de couverture  $R_c$  de la BS. La topologie de ce réseau est illustrée sur la figure 3.1. La distance  $R_c$  correspond en fait à la distance maximale de télé-réveil, dont l'estimation sera présentée dans la section 3.2.2.

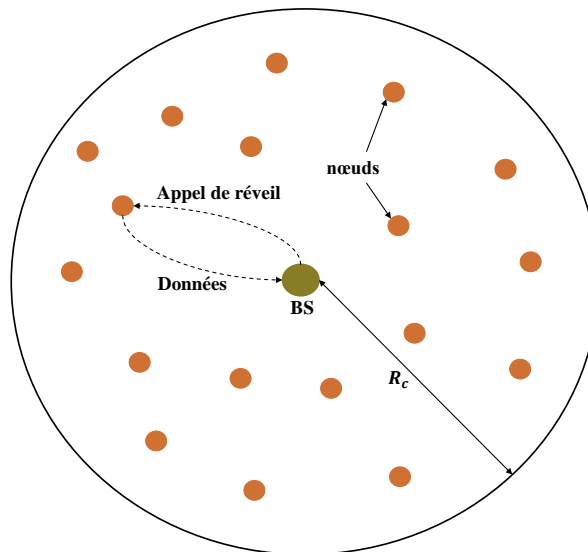


FIGURE 3.1: Topologie du réseau considéré.

Concernant la transmission de données, une transmission directe (ou mono-saut) est utilisée entre le nœud et la BS. Initialement, tous les nœuds sont en mode veille, la BS envoie périodiquement un message Appel de Réveil (AdR) à chaque nœud afin que celui-ci transmette des données. Ainsi, le trafic de données est généré par la BS avec un protocole à la demande. Ce protocole s'applique en particulier pour les réseaux de capteurs (sans actionneurs) où les données sont envoyés uniquement des nœuds vers un collecteur. Il

<sup>1</sup>Abréviation anglaise : *Base Station*



est toutefois possible d'ajouter des données complémentaires dans le message AdR, car le récepteur de télé-réveil est capable de recevoir des données si nécessaire. Les messages échangés entre la BS et les nœuds sont présentés dans la partie suivante.

### 3.2.2 Structure des messages du protocole

Dans le protocole DoRa, il y a uniquement deux types de message qui sont échangés entre la BS et les nœuds :

- le message Appel de Réveil (AdR) contenant au total  $N_{AdR}$  bits ;
- le message de données contenant au total  $N_{don}$  bits.

D'une part, le message AdR est envoyé par la BS vers le nœud. La trame du message AdR se décompose en un préambule contenant de  $N_{pre}$  bits et en une adresse du nœud destinataire sur  $N_{add}$  bits. La taille du préambule dépend des caractéristiques du circuit de réveil radio, il doit être assez long pour permettre au microcontrôleur de se réveiller afin de décoder l'adresse d'identification du nœud. Cette partie a été expliquée plus en détail dans le chapitre précédent en section 2.4 avec notamment le calcul de la taille minimale du préambule.

D'autre part, le deuxième message est la réponse du nœud vers la BS. Cette réponse est en fait le message de données qui survient après un message AdR étant destiné au nœud en question. Il se compose de l'adresse d'identification du nœud source et d'un payload (charge utile) contenant les données sur  $N_{pay}$  bits. La structure des trames est illustrée sur la figure 3.2.

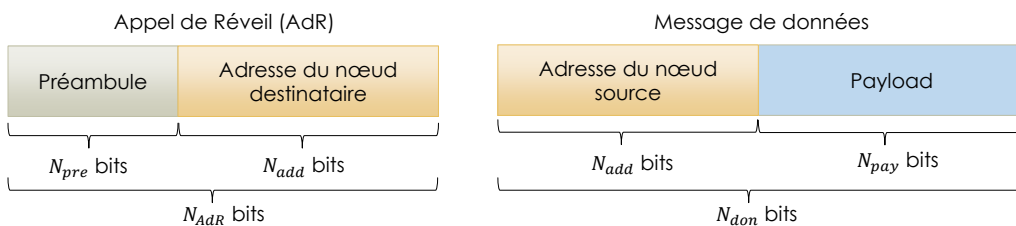


FIGURE 3.2: Structure de la trame des messages échangés entre la BS et les nœuds.

De plus, un seul canal physique est suffisant pour transmettre des messages. Dans notre cas, on utilisera essentiellement le canal radio à 2,4 GHz. En revanche, on définit deux canaux logiques distincts pour chaque message. D'une part, le canal de réveil  $C_{AdR}$  est utilisé pour l'envoi du message AdR avec une modulation de type OOK. Le canal  $C_{AdR}$  est utilisé entre la BS et le récepteur de télé-réveil. D'autre part, le canal de transmission des données  $C_{TD}$  est utilisé pour l'envoi des messages de données avec une modulation de type

OQPSK<sup>2</sup>, qui est plus robuste que la modulation OOK (surtout par rapport au bruit). Le canal  $C_{TD}$  est utilisé entre la radio principale des nœuds et la BS.

Le protocole DoRa a pour vocation de gérer l'accès au support de communication par le biais du système de télé-réveil. Étant donné que nous souhaitons le minimum d'énergie consommée par la couche protocolaire, le protocole devra échanger le minimum de message possible. Dans cette optique, on décide de s'affranchir des messages d'acquittement (ACK) ou des messages de contrôle (RTS/CTS par exemple). Ces messages ne sont pas nécessaires dans le cadre du protocole DoRa car la BS peut réveiller de manière sélective un nœud du réseau. Ainsi, la BS peut réveiller les nœuds en série afin d'éviter toutes collisions dans le milieu.

On présente ensuite le protocole DoRa sur un cas simple avec un seul nœud dans le réseau. Puis, on étendra ce schéma de communication à un réseau de  $N$  nœuds.

### 3.2.3 Communication entre la BS et un nœud quelconque

On considère ici le cas où le protocole DoRa est utilisé entre la BS et un nœud quelconque. Le schéma de communication est illustré sur la figure 3.3.

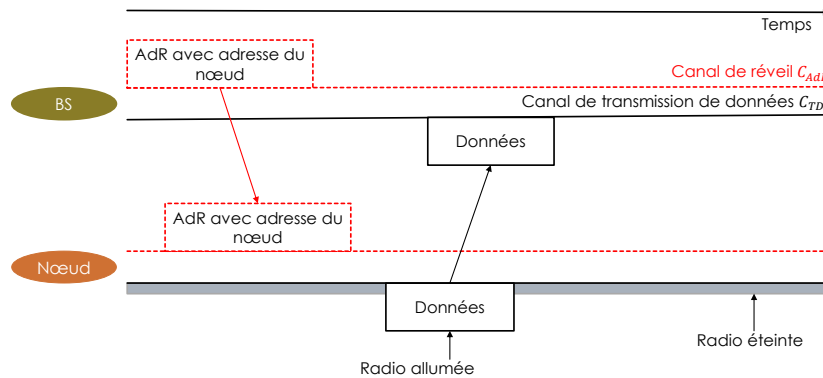


FIGURE 3.3: Protocole de communication entre la BS et un nœud.

Initialement, le nœud est en mode veille avec la radio principale éteinte et le récepteur de télé-réveil en mode sommeil profond. Un message de type AdR est ensuite envoyé par la BS sur le canal logique  $C_{AdR}$ .

A la réception du message AdR, le récepteur de télé-réveil transite vers le mode décodage AdR où il décode l'adresse insérée dans le message AdR. Le nœud se réveille si l'adresse décodée correspond à son adresse. Il sort alors du mode veille et allume sa radio principale pour transmettre les données sur le canal logique  $C_{TD}$ . Une fois le message envoyé, le nœud

<sup>2</sup>Abréviation anglaise : *Offset Quadrature Phase-Shift Keying*.

repassse en mode veille en éteignant sa radio principale et le récepteur de télé-réveil repasse en mode sommeil profond.

Ce protocole implique que la BS alterne entre les modes de transmission et de réception, le mode de réception étant activé une fois l'AdR envoyé et le mode de transmission activé lorsqu'un AdR doit être envoyé. La BS est supposée être alimentée en continu, c'est pourquoi il n'y a pas de mode veille à ce niveau. Au niveau du nœud, le récepteur de télé-réveil écoute passivement le canal de réveil en permanence tout en étant en mode veille, puisque son architecture lui permet d'être activé lors de la détection d'un AdR. La radio principale alterne entre les modes veille et de transmission, le mode de transmission étant activé lorsqu'un AdR a été validé par le récepteur de télé-réveil.

Ce schéma de communication a été présenté pour un seul nœud dans le réseau. La sous-section suivante présente le même principe pour un réseau de  $N$  nœuds.

### 3.2.4 Protocole DoRa pour l'accès au support dans le RCSF

On peut maintenant étendre le protocole de communication pour  $N$  nœuds dans un réseau, comme illustré sur la figure 3.4. On fait l'hypothèse que la BS connaît le nombre de nœuds dans le réseau ainsi que leur adresse, que ce soit par une entrée de ces paramètres par l'utilisateur ou bien par une phase de découverte du réseau au préalable.

La communication entre la BS et le nœud 1 se déroule comme il a été expliqué dans la sous-section précédente. Avant de retransmettre un nouvel AdR vers le nœud 2, la BS doit attendre un certain temps pour que les données en provenance du nœud réveillé soient bien reçues. Ce temps correspond à une fenêtre d'attente qu'on note  $T_{att}$  qu'il faudra définir de façon adéquate.

Cette fenêtre d'attente a été caractérisée dans la sous-section 2.4.4 du chapitre précédent. Pour rappel, nous avons calculé que la BS doit attendre au minimum  $T_{att} = 4,6$  ms avant de retransmettre un nouveau message AdR.

La BS réveille alors chaque nœud de façon sélective et en série, tout en respectant la fenêtre d'attente. C'est une interrogation par simple tour de rôle qui est présenté ici mais il est possible d'interroger certains nœuds plus que d'autres en créant plusieurs entrées pour ces nœuds en question dans la table d'interrogation de la BS. De cette façon, chaque nœud sera interrogé pour l'envoi de données vers la BS. De plus, aucune interférence interne n'est possible puisque les nœuds restent en mode veille si le message AdR ne leur est pas destiné.

En cas d'échec de réception des données et selon l'application concernée (données critiques ou non par exemples), la BS pourrait renvoyer un message AdR vers le même nœud pour

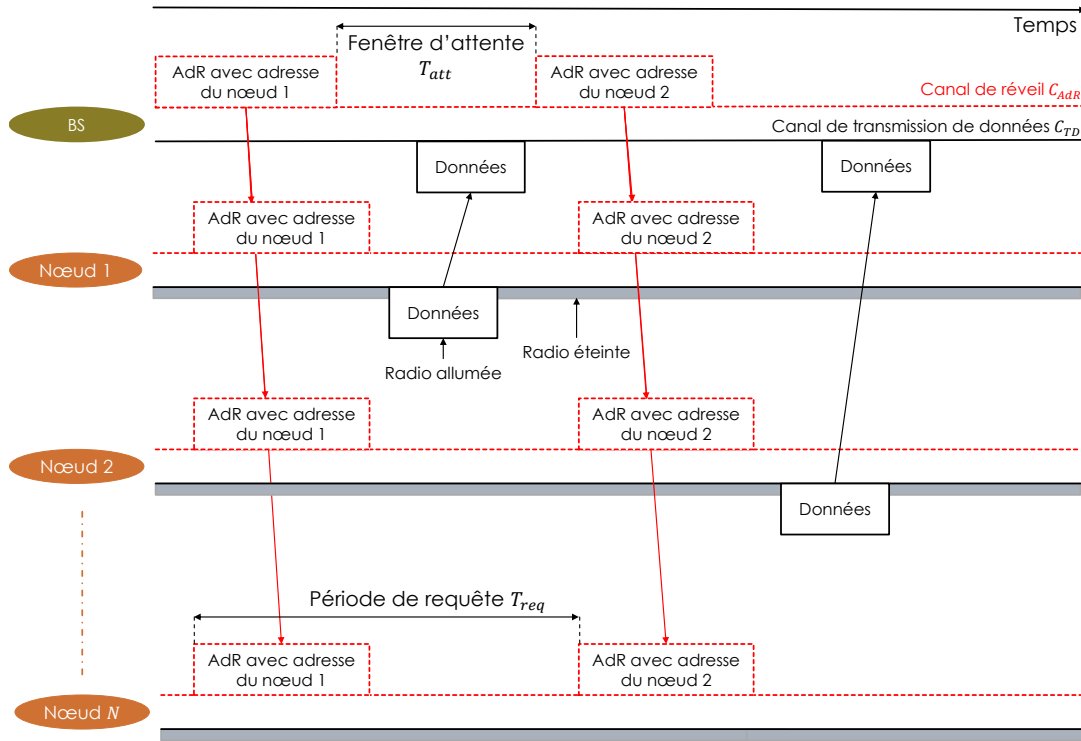


FIGURE 3.4: Protocole d'accès au support dans le réseau.

une autre tentative de réveil. Il faudrait alors fixer une limite à ce nombre de tentatives afin de pouvoir continuer à interroger les autres nœuds du réseau. Nous n'avons pas implémenté ce procédé en pratique mais c'est tout à fait possible de l'ajouter au niveau de la BS.

Nous présentons ensuite l'implémentation de ce protocole DoRa sous le simulateur OMNeT++. L'implémentation respecte les principes qui ont été présentés dans cette section.

### 3.3 Implémentation du protocole DoRa sous OMNeT++

Afin de valider et d'évaluer les performances du protocole DoRa, il est primordial de développer un simulateur de réseau intégrant notre protocole de télé-réveil. Ce simulateur permet aussi d'évaluer le protocole DoRa dans des conditions plus difficilement réalisables en pratique avec notre banc d'essai présenté dans le chapitre 5, notamment par rapport au nombre de nœuds.

Dans cette étude, on choisit de développer sous OMNeT++ [105] qui est un simulateur open source à évènement discret. Ce simulateur est préféré aux autres simulateurs (NS-2, NS-3, Cooja, Tossim, etc...) pour son aspect modulaire et extensible. Il permet entre autres d'implémenter aisément notre propre protocole dans la structure d'une librairie.

Les principales bibliothèques disponibles sous OMNET++ sont INET, MiXiM et Castalia. Nous choisissons la bibliothèque MiXiM [106] pour implémenter le protocole DoRa. La raison principale est que MiXiM propose des modèles existants et performants des couches physiques et MAC pour les réseaux sans fil. On présente dans cette partie les différents éléments qui ont été modifiés et ajoutés à la bibliothèque MiXiM, fournissant ainsi une extension à cette bibliothèque pour prendre en charge la fonctionnalité de télé-réveil.

Par ailleurs, la bibliothèque MiXiM a récemment été intégrée à la librairie INET. Cette fusion a eu lieu après notre implémentation du protocole DoRa sous MiXiM. INET est actuellement la bibliothèque la plus utilisée puisqu'elle comprend un plus grand nombre de modèles et de protocoles pour les réseaux de communication, aussi bien filaire que sans fil. Afin d'élargir le champ des possibilités pour l'évaluation du protocole DoRa, son implémentation a ensuite été développée sous INET. L'ensemble des résultats de ce chapitre a néanmoins été obtenu sous MiXiM, on présente une comparaison des résultats sous les deux bibliothèques en fin de chapitre afin de valider l'exportation du simulateur vers INET.

Nous présentons dans un premier temps le module qui est implémenté pour représenter le fonctionnement de la BS.

### 3.3.1 Module de la BS

L'architecture de la BS suit le modèle OSI typique pour un réseau de capteurs sans fil. Il est constitué d'une couche application, d'une couche réseau et d'un contrôleur d'interface réseau (NIC, *Network Interface Controller*) qui intègre la couche MAC et la couche physique. Le module de la BS est représenté sur la figure 3.5.

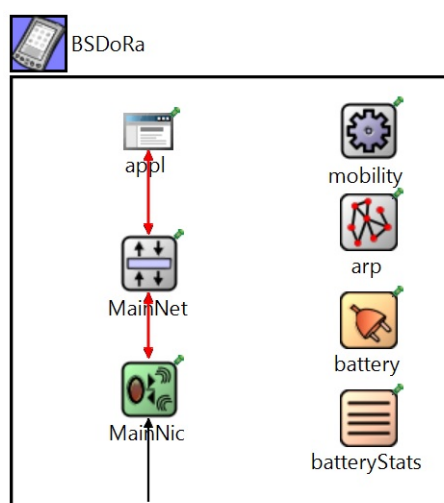


FIGURE 3.5: Architecture de la BS sous OMNeT++.

Bien que l'architecture de la BS ne soit pas nouvelle, son fonctionnement doit être en accord avec le système de télé-réveil. Une nouvelle couche MAC a été implémentée pour gérer les états de la couche physique suivant le protocole DoRa, ainsi que l'envoi des messages AdR. Cette couche est nommée *BSMAC* dans le simulateur et permet d'alterner entre mode de réception et de transmission, avec l'envoi périodique d'AdR à un nœud spécifique. A chaque nouvelle transmission, l'adresse du nœud de destination est modifiée afin de faire réveiller tous les nœuds du réseau de manière cyclique.

Il n'y a pas routage des données dans notre approche, la couche réseau est juste définie comme un module transparent qui relaye les trames entre la couche MAC et la couche application. Nous avons également une batterie au niveau de la BS, mais sa capacité est définie de façon assez élevée pour être considérée infinie. En pratique, la BS est alimentée sur secteur en continu. Cette batterie permet toutefois de quantifier la consommation énergétique de la BS, même si ce n'est pas nécessaire actuellement.

Le module du nœud possède une structure différente de la BS, on présente donc le module implémenté du nœud dans la sous-section suivante.

### 3.3.2 Module du nœud

De base, un nœud possède l'architecture du modèle OSI dans le simulateur. Une seule radio est donc utilisée pour la communication sans fil, ce qui ne correspond pas au modèle du système de télé-réveil.

Il est donc nécessaire de redéfinir un nœud dans la librairie MiXiM pour y intégrer deux modules radios, avec notamment les couches réseau, MAC et physique correspondantes. Dans le simulateur, on nomme ce nœud *HostDoRa* pour désigner un Hôte avec une Double Radio. Le module *HostDoRa* modélise alors le fonctionnement d'un nœud de capteur intégrant le protocole de télé-réveil DoRa. Une représentation des éléments le constituant est présentée dans la figure 3.6. On remarque également l'ajout d'une liaison entre les deux modules NIC pour relayer des messages de contrôle entre les deux modules radio. Plus précisément, cette liaison se situe notamment entre les deux entités MAC et elle définit notre approche en cross-layer du nœud afin de gagner du temps dans la mise en veille et dans le réveil du nœud.

L'implémentation consiste principalement à développer des nouvelles entités MAC qui gèrent l'accès au réseau en utilisant le système de télé-réveil. Au total, trois entités MAC ont été implémentées afin de modéliser notre protocole de télé-réveil. En effet, une entité MAC au niveau de la BS et deux autres entités MAC au niveau du nœud sont nécessaires pour le fonctionnement du système.

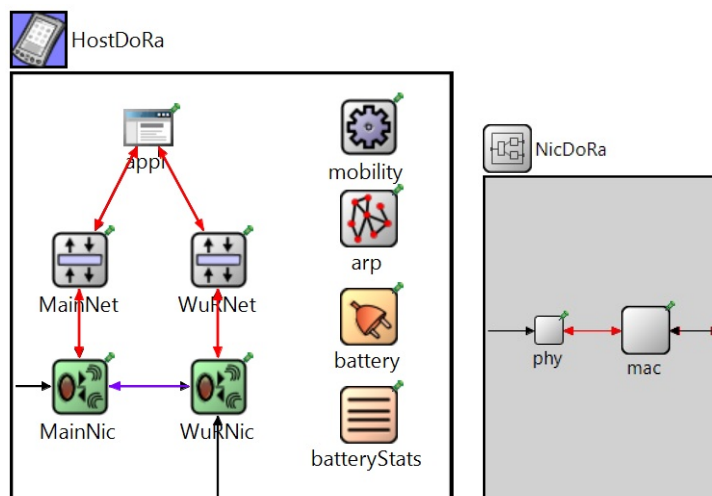


FIGURE 3.6: Architecture d'un noeud sous OMNeT++.

D'une part, le module MAC du récepteur de télé-réveil se nomme DoRaMacLayer et s'occupe de traiter le message AdR envoyé par la BS. Le module intègre les différents états du microcontrôleur ainsi que les niveaux de consommation énergétique associés. Il s'occupe également d'envoyer un message de contrôle à la radio principale afin de transiter le nœud vers un état actif lorsque le réveil a été validé.

D'autre part, le module MAC de la radio principale est appelé MAC\_main. Il gère l'envoi de la trame de données après le réveil du nœud, avec la transition des différents états associés de la couche physique. Les messages provenant du module DoRaMacLayer sont pris en compte pour la transition d'état. Le module MAC\_main envoie également un message de contrôle aux modules adjacents lorsque les données ont été envoyées à la BS, permettant ainsi au nœud de repasser en mode sommeil profond.

Certains types de messages ont par ailleurs été définis pour l'implémentation du protocole DoRa. Ces messages ont engendré des modifications dans les modules existants afin que les messages y soient relayés ou traités. Par exemple, le module dédié à la couche réseau doit relayer les messages liés au télé-réveil pour que la couche application puisse traiter ces messages. Par défaut, aucune de ces actions n'est prise en charge par les modules.

Au niveau du module physique du récepteur, deux conditions supplémentaires ont été ajoutées pour mieux modéliser le processus de télé-réveil. Ces conditions s'appliquent en la présence d'un signal pour activer ou non la réception du signal. Premièrement, la puissance reçue doit être supérieure à un seuil correspondant à la sensibilité de réception du signal de réveil. De plus, la durée d'émission du signal doit être suffisamment longue pour correspondre à la durée de préambule de la trame AdR. Ainsi, le récepteur de télé-réveil ne traite pas tous les messages qui transitent dans le réseau même si certains signaux sont capables de déclencher partiellement le récepteur. En effet, la transmission de données dure

beaucoup moins de temps que la transmission de l'AdR puisque le préambule a une durée assez longue. En rappel du chapitre 2, la durée du préambule est fixée à 5,7 ms et la durée de transmission de la trame à 3,4 ms.

Les délais de transition entre les états sont également pris en compte, notamment ceux générés par la couche physique. En effet, les entités MAC développés attendent un message de contrôle en provenance de la couche physique pour transiter d'un état à l'autre. En fait, à chaque changement d'état de la couche physique, celui-ci émet un message de contrôle à la couche MAC pour confirmer que le changement d'état est terminé. Ce message de contrôle est traité par nos modules de niveau MAC afin de gérer les délais de transition.

Nous avons vu dans les deux sous-section précédentes comment la BS et le nœud sont modélisés. La partie suivante explique le fonctionnement conjoint de ces modules dans le cadre du protocole DoRa.

### 3.3.3 Machine à états finis du protocole inter-couches

Comme énoncé précédemment, le protocole DoRa se situe au niveau MAC des modules du nœud et de la BS. Nous expliquerons ici comment les entités MAC de chaque module interagissent afin de modéliser le protocole de télé-réveil DoRa.

La machine à états finis de chaque module MAC est présentée sur la figure 3.7 avec les interactions requises entre ces modules. Au niveau du nœud, l'interaction entre les entités MAC est la raison de notre approche inter-couches.

Tous les modules MAC sont initialisés au même moment et ils passent à l'état suivant une fois l'initialisation terminée. Ils restent alors en attente d'un évènement déclencheur pour la prochaine action. Au niveau du module BSMAC, un décompte est démarré pour l'envoi périodique de message AdR (*wakeup\_call\_timer*). Une fois l'expiration du décompte, le module BSMAC passe à l'état suivant pour l'envoi du message AdR. Après réception du message de contrôle indiquant que la transmission est terminée (*tx\_over*), le module passe à une phase d'attente pour la réception de la trame de données en provenance du module MAC\_Main. Si aucune trame de données n'est reçue durant la fenêtre d'attente (données non envoyées ou non reçues, ou encore non réveil du nœud), le module repasse en mode *idle* avant de retransmettre un nouvel AdR.

Au moment de la réception du message AdR, le module DoRaMacLayer passe à l'état de décodage de l'adresse insérée dans l'AdR. Si le message ne lui est pas destiné, le module repasse en mode attente d'un AdR. Si l'adresse est validée, le module passe à l'état suivant où il envoie un message de contrôle (*wakeup*) pour réveiller le module MAC\_Main. Le dernier



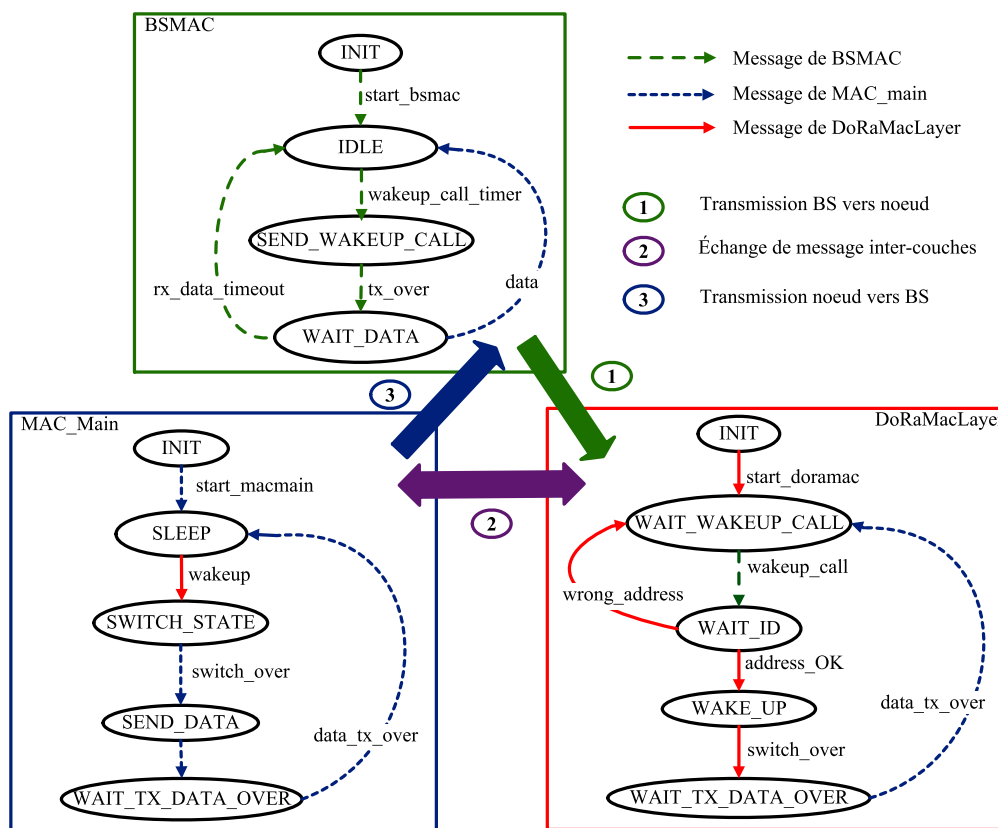


FIGURE 3.7: Machine à états finis des protocoles MAC liés au télé-réveil.

état du module DoRaMacLayer consiste alors à attendre l’envoi des données par le module MAC\_Main.

Le module MAC\_Main quitte le mode veille après réception du message (*wakeup*), il passe alors dans un état intermédiaire pour effectuer la transition du module radio vers le mode de transmission. Une fois la transition terminée, le module MAC\_Main transmet la trame de données vers la BS. Bien que non présentée sur cette machine à état, la transmission de la trame passe par les couches physiques du nœud et de la BS, ainsi que le canal radio avant d’être échangé entre les modules MAC. Une fois les données transmises, le module MAC\_Main repasse en mode veille et il en est de même pour les autres modules MAC qui retournent à leur premier état respectif.

Afin d’illustrer le fonctionnement du protocole de réveil et de valider visuellement le fonctionnement du protocole dans le simulateur, on présente dans la sous-section suivante l’algorithme du protocole DoRa pour le réveil d’un nœud quelconque.

### 3.3.4 Algorithme du protocole de réveil d'un nœud quelconque

On simule ici le fonctionnement d'un réseau composé d'une BS au centre et de 5 nœuds. Les 5 principales étapes lors du réveil d'un nœud sont illustrées sur la figure 3.8. On présente ci-dessous les différentes étapes :

1. Tous les nœuds sont en mode sommeil profond (de couleur noire), la BS (en rouge) envoie un AdR avec une adresse spécifique.
2. Tous les nœuds reçoivent l'appel de réveil et ils passent à un niveau de consommation supérieur (mode décodage AdR du microcontrôleur en vert) pour décoder l'adresse incluse dans le message.
3. Les nœuds non concernés repassent en mode veille et le nœud adressé par la BS se réveille pour transmettre des données (mode actif en bleu).
4. Le nœud transmet alors les données vers la BS (mode transmission en jaune), alors que tous les autres nœuds restent en mode veille.
5. Le nœud repasse en mode veille (noir), tous les nœuds sont alors éteints jusqu'à un nouveau message AdR envoyé par la BS.

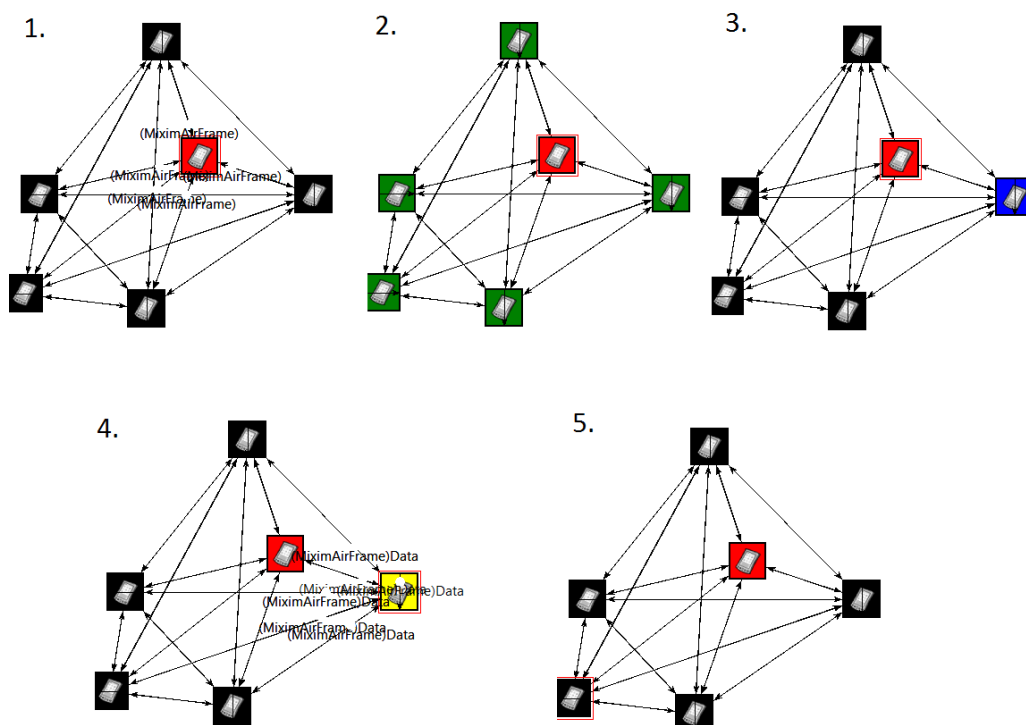


FIGURE 3.8: Simulation d'un réseau de 5 nœuds sous OMNeT++, avec les 5 étapes lors du télé-réveil d'un nœud particulier. [Lien vidéo<sup>3</sup>].

<sup>3</sup><https://youtu.be/tbklCdkJI14>

Cette sous-section conclut la partie implémentation du protocole DoRa. Cette première simulation permet de valider le simulateur mais il est nécessaire de définir des critères de performance pour évaluer convenablement le protocole DoRa. La section suivante présente justement ces critères.

### 3.4 Définition des critères de performance

Afin d'évaluer les performances du protocole DoRa en comparaison avec les protocoles existants, il faut s'appuyer sur des critères de performances bien établis. Cette section se décompose en deux parties. La première partie présente les critères typiques qui sont utilisés pour évaluer les protocoles MAC. La deuxième partie présente une approche plus particulière dans la mesure où l'on définit un ensemble de critères par rapport à la théorie de détection du signal.

#### 3.4.1 Critères typiques pour l'évaluation des performances des protocoles MAC

Plusieurs critères de performance existent pour évaluer les performances des protocoles MAC. Ils peuvent naturellement être utilisés de la même manière pour les protocoles de télé-réveil. On définit ci-dessous les métriques retenues dans le cadre de notre topologie de réseau et pour un système de télé-réveil :

**Définition 1.** Le taux de livraison des trames de données est égal au rapport du nombre de trames de données reçus correctement à la BS divisé par le nombre de trames de données transmises par les nœuds du réseau.

**Définition 2.** La latence moyenne des trames est la durée moyenne entre la transmission de l'AdR et la réception de la trame de données provenant du nœud.

**Définition 3.** L'énergie par bit est définie comme étant le rapport entre l'énergie totale consommée dans le réseau et le nombre total de bits reçus à la BS.

**Définition 4.** Le débit de données utiles correspond au nombre total de bits corrects reçus par unité de temps à la BS.

Toutefois, le simulateur ne fournit pas directement ces critères de performance en sortie. Nous avons alors écrit un script externe au simulateur sous MATLAB (R2015a) pour interpréter les données de simulations. Il permet de calculer les critères de performances et d'obtenir les résultats sous forme graphique.

D'autres critères peuvent également être considérés pour évaluer les performances du protocole. Par exemple, la puissance moyenne consommée par les nœuds ou la durée de vie

du réseau permettent d'analyser les performances énergétiques du protocole. Bien qu'il soit tout aussi intéressant d'étudier ces critères, ils ne contribuent pas pleinement à l'analyse de l'efficacité énergétique. On préfère ici le critère d'énergie par bit car il présente le compromis entre l'énergie consommée et la quantité de données transmises.

Ces critères seront essentiellement utilisées pour comparer le protocole DoRa avec les protocoles MAC existants. Afin de mieux cerner les performances et limites du protocole DoRa, nous définissons d'autres critères de performances qui sont liés au système de télé-réveil. Ces critères sont présentés dans la sous-section suivante.

### 3.4.2 Probabilités associées à une théorie de détection du signal

Les critères précédents ont toujours été utilisés pour l'évaluation de protocole MAC. Les critères de performance présentés dans cette sous-section sont plus particuliers au système de télé-réveil. C'est pour cette raison que nous les définissons de manière plus approfondie.

Dans le cadre d'un réseau de capteurs intégrant le protocole de télé-réveil, on souhaite analyser les performances du système à travers une approche probabiliste. On s'intéresse notamment à la probabilité de détection du signal de réveil ou encore la probabilité de décodage de l'adresse insérée dans le signal de réveil.

La caractérisation de la probabilité de réveil en fonction des paramètres variables du réseau serait un atout pour son bon fonctionnement. Un exemple de paramètres variables serait la distance entre la BS et les nœuds ou encore l'ampleur du bruit. Le calcul des probabilités sera effectué à partir de la théorie de détection de signal. Cette méthode n'a pas encore été appliquée sur un système de télé-réveil, nous définissons alors le modèle selon le cas d'étude.

#### Modélisation

La théorie de détection du signal offre des critères intéressants pour analyser les performances de notre système de réveil. Cette théorie peut être utilisée pour des domaines variés tels que la psychologie, les diagnostics médicaux ou encore des décisions statistiques [107].

Nous présentons dans un premier temps le modèle de détection appliqué à notre système de télé-réveil. L'étude porte sur les décisions possibles au niveau du récepteur de télé-réveil lors de la réception d'un signal. En cas de détection d'un signal, le récepteur décide si le signal reçu est un message AdR ou non. Si c'est bien le cas, il s'occupe ensuite de valider ou de rejeter le réveil selon l'adresse décodée. Nous définissons alors les événements suivants :

- $SD$  : Succès de Détection du signal AdR lorsque celui-ci est bien présent sur le canal,

- $ED$  : Échec de Détection du signal AdR lorsque celui-ci est bien présent sur le canal,
- $FA$  : Fausse Alarme, un signal AdR est détecté alors qu'il n'est pas présent sur le canal,
- $RC$  : Rejet Correct, un signal est rejeté puisque ce n'est pas un AdR alors que ce signal n'est effectivement pas sur le canal
- $VR$  : Validation du Réveil, l'adresse insérée dans le signal AdR correspond à l'adresse du nœud,
- $RR$  : Rejet du Réveil, l'adresse insérée dans le signal AdR ne correspond pas à l'adresse du nœud.

Nous définissons ensuite les probabilités d'occurrence de ces évènements :

- $\mathbb{P}(SD)$  : Probabilité de succès de détection du signal de réveil lorsque celui-ci existe,
- $\mathbb{P}(ED)$  : Probabilité d'échec de détection du signal de réveil lorsque celui-ci existe,
- $\mathbb{P}(FA)$  : Probabilité de fausse alarme, correspondant à la détection d'un signal de réveil alors que le signal en question n'en est pas un,
- $\mathbb{P}(RC)$  : Probabilité de rejet correct, correspondant au rejet d'un signal puisque celui-ci n'est pas un signal de réveil.

Les probabilités précédentes ne sont pas toutes indépendantes puisqu'il y a uniquement deux possibilités lors de la présence d'un signal. Lorsqu'un signal de réveil est envoyé, il peut être détecté avec succès (affecté à  $\mathbb{P}(SD)$ ) ou bien non détecté (affecté à  $\mathbb{P}(ED)$ ), on en déduit la relation de complémentarité suivante :

$$\mathbb{P}(SD) + \mathbb{P}(ED) = 1 \quad (3.1)$$

En appliquant le même raisonnement pour les probabilités de fausses alarmes et de rejet correct, on a :

$$\mathbb{P}(FA) + \mathbb{P}(RC) = 1 \quad (3.2)$$

Ces différentes probabilités interviennent à la détection d'un signal de réveil et conditionnent la réalisation ou non des prochains évènements. Lorsqu'un signal de réveil est détecté, la prochaine étape est de décoder l'adresse incluse dans le message de réveil pour statuer si le message AdR est destiné au nœud. Nous définissons alors les probabilités conditionnelles suivantes, conditionnées par l'évènement de succès de détection :

- $\mathbb{P}_{SD}(VR)$  : Probabilité de validation du réveil, correspondant à une adresse validée dans le message de réveil,
- $\mathbb{P}_{SD}(RR)$  : Probabilité de rejet du réveil, correspondant à une adresse non validée dans le message de réveil.

Ces deux probabilités conditionnelles sont également complémentaires. On a donc la relation suivante :

$$\mathbb{P}_{SD}(VR) + \mathbb{P}_{SD}(RR) = 1 \tag{3.3}$$

Les trois relations de complémentarité permettent de simplifier notre étude. En effet, on peut se contenter d'étudier uniquement trois probabilités parmi celles qui sont définies pour analyser le système de télé-réveil. Les probabilités manquantes pourront ensuite être obtenues en utilisant les relations de complémentarité. Nous choisissons par la suite de retenir les probabilités  $\mathbb{P}(SD)$ ,  $\mathbb{P}(FA)$  et  $\mathbb{P}_{SD}(VR)$ . Un système de réveil parfait se caractérise par une probabilité de succès de détection du signal de réveil  $\mathbb{P}(SD)$  égale à 1, une probabilité de fausse alarme  $\mathbb{P}(FA)$  nulle et une probabilité de validation du réveil  $\mathbb{P}_{SD}(VR)$  égal à  $1/N$ ,  $N$  étant le nombre de nœuds dans le réseau.

Enfin, la logique du récepteur de télé-réveil est présentée sous la forme d'un arbre d'évènements sur la figure 3.9. L'évènement initiateur est la détection d'un signal par le récepteur. Il s'ensuit alors les évènements précédemment définis selon les probabilités associées.

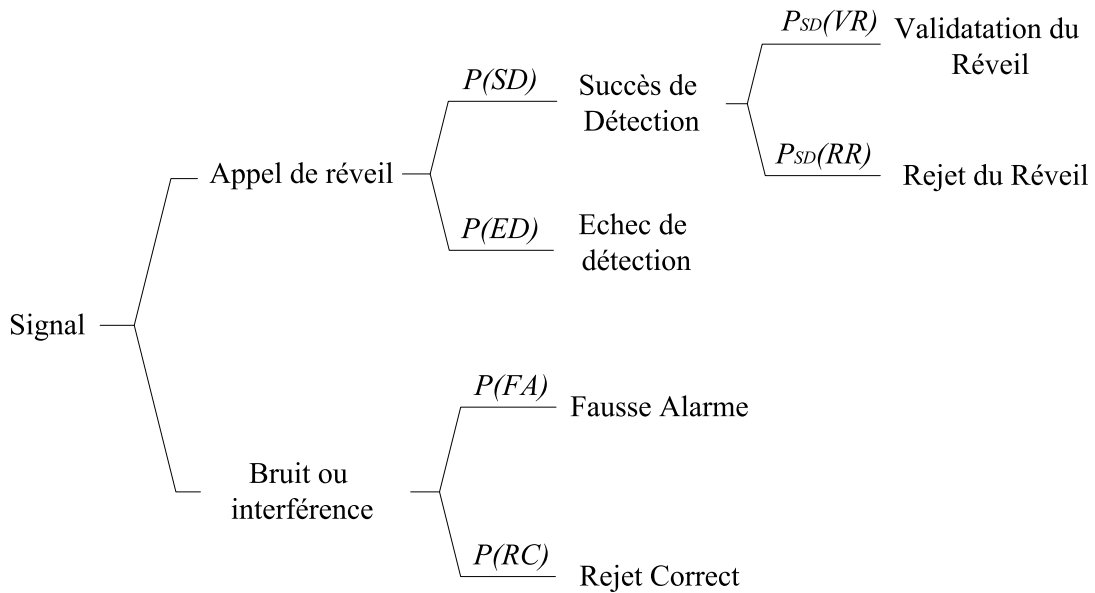


FIGURE 3.9: Arbre des évènements possibles.

Ces définitions, bien qu'elle soient explicites, n'indiquent pas comment effectivement calculer les probabilités en question. Nous présentons par la suite notre approche pour le calcul pratique de ces probabilités.

## Calcul pratique des probabilités

Les probabilités présentées dans la partie précédente seront calculées par des simulations de RCSF intégrant notre protocole de télé-réveil DoRa. Afin d'y parvenir, nous ajoutons un compteur pour chaque évènement découlant de la détection d'un signal. Ainsi, il est possible de calculer la proportion de chaque évènement par rapport au nombre total de signaux générés au cours de la simulation. On donne ci-dessous les calculs associés aux trois probabilités retenues en fonction des compteurs :

- La probabilité  $\mathbb{P}(SD)$  s'obtient en faisant le rapport du nombre de vrais messages AdR détectés par un nœud sur le nombre de messages AdR envoyés par la BS.
- La probabilité  $\mathbb{P}(FA)$  est égale au rapport entre le nombre de faux messages AdR détectés par un nœud et le nombre total de messages envoyés sur le canal au cours de la simulation.
- La probabilité  $\mathbb{P}_{SD}(VR)$  s'obtient en faisant le rapport du nombre d'adresses validées par un nœud sur le nombre de messages AdR détectés par ce même nœud.

Tous les critères présentés dans cette section permettent d'évaluer le protocole DoRa sous différents aspects. On s'intéresse dans un premier temps à l'évaluation du protocole DoRa en fonction des paramètres internes au réseau.

### 3.5 Évaluation des performances du protocole DoRa en fonction des paramètres du réseau

Cette section sera consacrée à l'évaluation des performances du protocole DoRa en faisant varier les paramètres liés au réseau de capteurs. Nous définirons dans un premier temps le scénario de simulation afin de contextualiser les résultats obtenus.

La première étude sert à analyser la robustesse du protocole par rapport aux canaux de propagation. Ensuite, le nombre de nœuds du réseau sera augmenté pour prouver la robustesse du protocole avec des réseaux de plus grande échelle. Ces deux premières études permettent également de valider le calcul des critères de performances dans des conditions adéquates.

Enfin, certaines limites du protocole DoRa seront montrées lorsque l'on fait varier la taille des données. Les applications du RCSF diffèrent essentiellement sur le flux de données nécessaire et la taille de ces données. En faisant varier ces deux paramètres, on teste la robustesse de notre protocole DoRa par simulation et on montre qu'il faut bien définir les paramètres en fonction de l'application souhaitée.

### 3.5.1 Scénario de simulation

Tout d'abord, on présente le scénario de simulation pour étudier les effets de paramètres variants. On fait varier un seul paramètre au cours des différentes simulations qui vont suivre, afin d'apprécier son influence sur les résultats de manière optimale. Les paramètres par défaut sont donnés dans le tableau 3.1.

| Paramètre                     | Valeur             |
|-------------------------------|--------------------|
| Durée de fonctionnement       | 15 min             |
| Superficie du réseau          | 400 m <sup>2</sup> |
| Nombre de nœuds               | 10                 |
| Fenêtre d'attente $T_{att}$   | 10 ms              |
| Taille du payload             | 100 octets         |
| Puissance d'émission de la BS | 100 mW             |

TABLEAU 3.1: Paramètres d'entrée par défaut utilisés pour les simulations de cette section.

On définit une durée de fonctionnement égal à 15 minutes. Cette durée présente en général un bon compromis entre rapidité d'exécution des simulations et fiabilité des résultats. La superficie du réseau est de 400 m<sup>2</sup>. Cette superficie correspond à une distance maximale de télé-réveil égale à 20 m.

Nous fixons un nombre de nœuds  $N = 10$  dans cette section, car on s'intéresse essentiellement aux performances du nœud dans le réseau et non le réseau en lui-même. Une étude sera d'ailleurs menée pour montrer que cette taille de réseau peut être augmentée sans problème, si ce n'est la longue durée de simulation qui en découle. Enfin, la fenêtre d'attente  $T_{att}$  est fixée à 10 ms pour permettre l'envoi d'une taille de données égales à 100 octets avec une bonne marge de sécurité.

Sauf mention contraire, les valeurs des paramètres présentées ici sont utilisés pour chaque simulation de cette section. Nous commençons l'analyse avec l'effet du canal de propagation.

### 3.5.2 Effet du canal de propagation

Dans cette sous-section, la variation des performances en fonction des paramètres du canal de propagation est étudiée. Les critères de performance sont les probabilités définies dans la section 3.4.

On présente dans un premier temps le modèle du canal de propagation. Le simulateur permet de modéliser le canal en y intégrant l'affaiblissement de parcours<sup>4</sup>, l'effet de masque<sup>5</sup>

<sup>4</sup>De l'anglais *path loss*.

<sup>5</sup>De l'anglais *shadowing*.



et l'effet d'évanouissement<sup>6</sup> de type Rayleigh. On considère les paramètres par défaut concernant l'évanouissement de Rayleigh puisque son influence sur les résultats est similaire à l'effet de masque. Le modèle d'atténuation en log-normal de la puissance du signal est donné par la relation suivante :

$$P_{dBm} = P_0 - 10n \log(\|X - X_s\|) + Z_\sigma \quad (3.4)$$

où

- $P_0$  est la puissance reçue à 1 mètre de la source ,
- $n$  est le coefficient d'atténuation du signal,
- $X$  et  $X_s$  sont respectivement les positions du récepteur et du transmetteur,
- $\|X - X_s\|$  est la distance euclidienne entre les positions  $X$  et  $X_s$ ,
- $Z_\sigma$  est une variable aléatoire qui suit une loi normale de valeur moyenne nulle et d'écart-type  $\sigma$  ( $Z_\sigma \sim \mathcal{N}(0, \sigma)$ ). Cette variable représente l'effet de masque ou le niveau de l'évanouissement de Rayleigh sur la puissance du signal.

Au vu de l'équation 3.4, deux paramètres nous intéressent pour la variation du canal de propagation. Les paramètres en question sont le coefficient d'atténuation  $n$  et l'écart-type  $\sigma$  lié à l'effet de masque. Pour chaque paramètre, on présentera les résultats obtenus au travers des probabilités des évènements suivant la détection du signal de réveil.

Tout d'abord, on fait varier le coefficient d'atténuation  $n$  entre 1,5 et 6 tout en fixant l'écart-type  $\sigma$  à 5 dBm. L'évolution des probabilités liées au télé-réveil est représentée sur la figure 3.10 en fonction du coefficient  $n$ . Parmi les trois probabilités calculées, la seule qui évolue est la probabilité  $\mathbb{P}(SD)$ . La probabilité  $\mathbb{P}_{SD}(VR)$  est constamment égale à 0,1. Cette valeur correspond parfaitement au rapport  $1/N$  pour un nombre de nœuds  $N = 10$ . La probabilité  $\mathbb{P}(FA)$  est également parfaite puisqu'elle est toujours nulle, quelle que soit la valeur du coefficient d'atténuation. La probabilité  $\mathbb{P}(SD)$  est égale à 1 lorsque le coefficient  $n$  est inférieur à 3. Elle décroît de façon quasiment linéaire une fois que l'on augmente le coefficient  $n$ , pour  $n$  supérieur à 3. On explique cette tendance par le fait que les nœuds le plus éloignés de la BS ne reçoivent pas assez d'énergie lorsque le coefficient  $n$  augmente. La détection du signal de réveil est donc compromise dans ce cas. On en déduit également que la distance maximale de télé-réveil obtenue permet de réveiller tous les nœuds lorsque  $n$  est inférieure à 3. Afin de résoudre ce problème, on pourrait compenser cette atténuation de puissance due au coefficient  $n$  en augmentant la puissance de transmission de la BS. Toutefois, on considère par la suite un scénario où le coefficient d'atténuation  $n$  est inférieure ou égale à 3.

---

<sup>6</sup>De l'anglais *fading*.

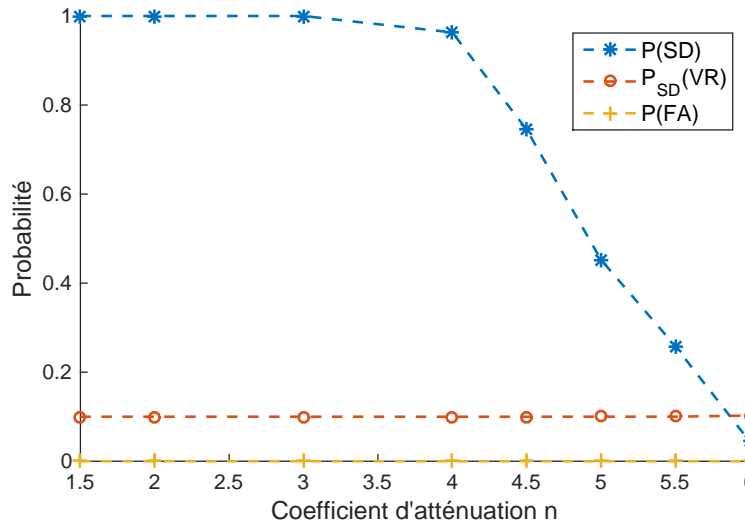


FIGURE 3.10: Probabilité des évènements de télé-réveil en fonction du coefficient d'atténuation  $n$ .

Ensuite, on considère une variation de l'écart-type  $\sigma$  entre 2 et 20 dBm, avec un coefficient  $n = 3$ . L'ensemble des probabilités liées au télé-réveil est représenté sur la figure 3.11. On observe un résultat similaire au cas précédent. En effet, les probabilités  $\mathbb{P}_{SD}(VR)$  et  $\mathbb{P}(FA)$  restent constant peu importe la valeur de  $\sigma$ . Ces résultats sont bien cohérents puisqu'on joue ici sur l'atténuation du signal. De ce fait, on ne peut pas créer de fausse alarme. Concernant la probabilité  $\mathbb{P}_{SD}(VR)$ , ces résultats nous montrent que le système fonctionne correctement une fois que le signal de réveil est détecté. On observe ici une baisse de la probabilité  $\mathbb{P}(SD)$  lorsque l'écart-type  $\sigma$  dépasse la valeur de 10 dBm. Cette valeur seuil est plutôt élevée pour le bruit causé par l'effet de masque.

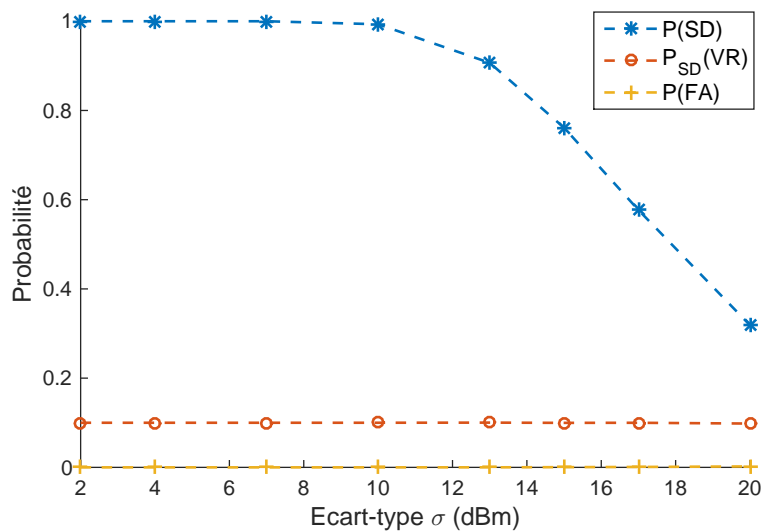


FIGURE 3.11: Probabilité des évènements de télé-réveil en fonction de l'écart-type  $\sigma$ .

En résumé, on a donc un protocole de télé-réveil qui ne sera pas perturbé par un mauvais canal de propagation, à moins de conditions extrêmes pour  $n > 3$  et  $\sigma > 10$  dBm.

Par ailleurs, nous avons développé une méthode d'automatisation de cartographie RF dans le cadre du projet CARERC<sup>7</sup>. Cette cartographie est effectuée par un robot et elle permet d'estimer les paramètres de propagation du milieu. Nous avons estimé  $n = 2,3$  et  $\sigma = 5,7$  dBm dans l'environnement qui sera utilisé pour nos expériences [108]. Nous sommes donc bien en dessous des conditions limites énoncés plus haut, ce qui nous exclut des problèmes de traitement du signal de réveil à cause du canal de propagation.

### 3.5.3 Effet du nombre de nœuds

On étudie ici l'impact de la taille du réseau sur les performances du protocole DoRa. Pour ce faire, on varie la taille du réseau entre 1 et 255 nœuds et pour la même superficie donnée (400 m<sup>2</sup>).

On s'intéresse essentiellement à la consommation énergétique résultante puisque l'efficacité énergétique est notre priorité. Les résultats de simulation sont présentés sur la figure 3.12. Le premier critère de performance est naturellement la puissance moyenne consommée par un nœud du réseau. On s'aperçoit que cette puissance décroît de manière asymptotique en augmentant le nombre de nœuds. Ce résultat est cohérent puisqu'on garde la même période de requête pour chaque simulation. Les nœuds se partagent alors ces requêtes envoyées par la BS de manière équitable.

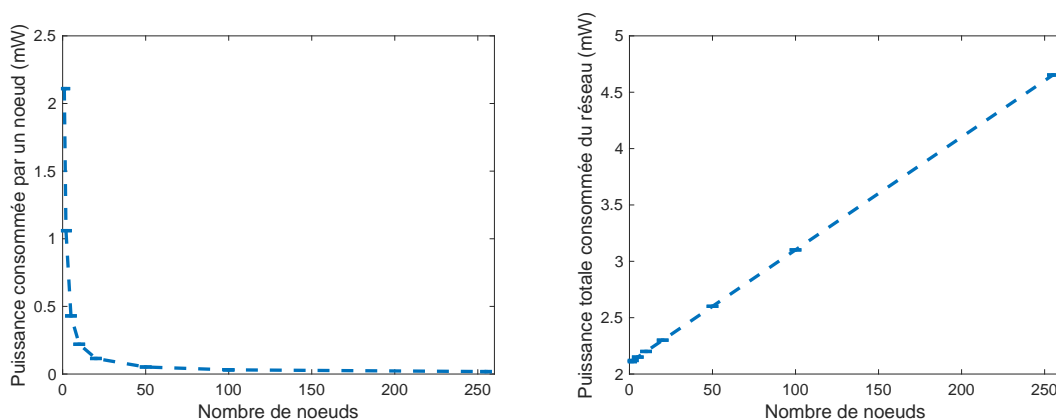


FIGURE 3.12: Évolution de la puissance moyenne consommée par le nœud et le réseau en fonction du nombre de nœuds.

On décide alors de représenter la puissance totale consommée par le réseau sur la même figure 3.12. On observe une évolution linéaire de la puissance totale consommée par le réseau en fonction du nombre de nœuds. Ce résultat signifie que le protocole DoRa gère tout aussi

<sup>7</sup>CARTographie Électromagnétique par Réseau de Communication.

bien les réseaux de petites tailles que ceux de grande taille, pour l'aspect énergétique du moins. En effet, l'évolution linéaire montre l'absence de problème supplémentaire lors de l'ajout de nœuds au réseau. On a donc un protocole extensible pour des réseaux de plus grande échelle.

Par ailleurs, nous pouvons utiliser une régression linéaire pour modéliser la relation entre la puissance totale consommée du réseau, noté  $P_{\text{reseau}}$ , et le nombre de nœuds  $N$ . Nous considérons une simple régression linéaire de la forme suivante :

$$P_{\text{reseau}} = \alpha + \beta N \quad (3.5)$$

avec  $\alpha$  l'ordonnée à l'origine et  $\beta$  la pente.

Nous appliquons une méthode des moindres carrés pour estimer les paramètres de la régression linéaire. On obtient ainsi l'estimation suivante :  $\alpha = 2,1$  mW et  $\beta = 0,01$  mW/nœud.

On calcule également le coefficient de détermination  $R^2$  pour mesurer la qualité de la régression linéaire. Le calcul donne  $R^2 = 1$ . Le modèle est donc en parfaite adéquation avec les résultats de simulation. De plus, on peut appliquer le modèle pour un nombre  $N$  entier strictement positif. Pour  $N = 0$ , la relation 3.5 n'est pas vraie car la puissance consommée par le réseau est nulle.

Toutefois, le délai d'émission des données de la part d'un nœud croît aussi de manière linéaire avec le nombre de nœuds. La période de requête  $T_{\text{req}}$  est ici égale à 18,3 ms, ce qui donne un délai d'émission des données de 4,67 s de la part d'un nœud pour un réseau de 255 nœuds. Cette valeur peut être considérée comme élevée si les données sont critiques où si le phénomène physique étudié varie rapidement dans le temps. En revanche, le nœud pourrait aussi bien effectuer plusieurs mesures durant ce délai d'émission, et envoyer l'ensemble des mesures lors de son interrogation par la BS. Cette remarque est par la suite appuyée par l'analyse en section 3.6.3. Nous montrerons qu'il est plus efficace d'envoyer une trame de données de grande taille lors d'un réveil, plutôt que plusieurs réveils consécutifs suivis de l'envoi d'une trame de petite taille.

En résumé, l'évolution linéaire de la puissance totale consommée du réseau en fonction du nombre de nœuds indique que le protocole DoRa fonctionne tout aussi bien pour les réseaux de petite ou grande échelle.

L'analyse suivante porte sur l'effet de la taille des données. Les résultats ne seront probablement pas identiques à ce qu'on vient d'obtenir, étant donné que le procédé d'interrogation est définie pour une taille limites de données.

### 3.5.4 Effet de la taille des données

Dans cette section, on étudie l'effet de la taille des données sur les performances du protocole DoRa. On considère une taille des données variant entre 160 bits et 4 kbits.

Ces valeurs ont été choisies pour correspondre à une durée de transmission des données particulière, puisque notre analyse se basera sur la durée de transmission des données. Par défaut, on préconise une durée de transmission des données inférieure à la durée de transmission du préambule de réveil. On s'intéresse aux performances du protocole DoRa dans le cas où la durée de transmission des données est supérieure au préambule de réveil. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 3.13 avec les probabilités des évènements intervenant à la suite de la réception d'un AdR.

Analysons dans un premier temps l'évolution de la probabilité  $\mathbb{P}(SD)$  de succès de détection du signal de réveil. On distingue deux niveaux de probabilités sur la courbe, les deux niveaux étant constants. Le premier niveau correspond à une probabilité  $\mathbb{P}(SD)$  égale à 1 lorsque la durée de transmission de données est inférieure à la fenêtre d'attente, qui est de  $T_{att} = 10$  ms (cf. tableau 3.2). Le deuxième niveau intervient ensuite pour des durées de transmission  $T_{trame} > T_{att}$ . On observe alors une probabilité  $\mathbb{P}(SD)$  environ égale à 0,5. On a donc 50% des messages AdR qui ne sont pas détectés par les nœuds. Dans ces conditions, la transmission des données dans le réseau n'est pas fiable. Le problème est sans doute que les trames de données sont considérées comme un AdR aux premiers abords par le récepteur de télé-réveil. Il cause ainsi potentiellement des problèmes pour la détection du prochain AdR.

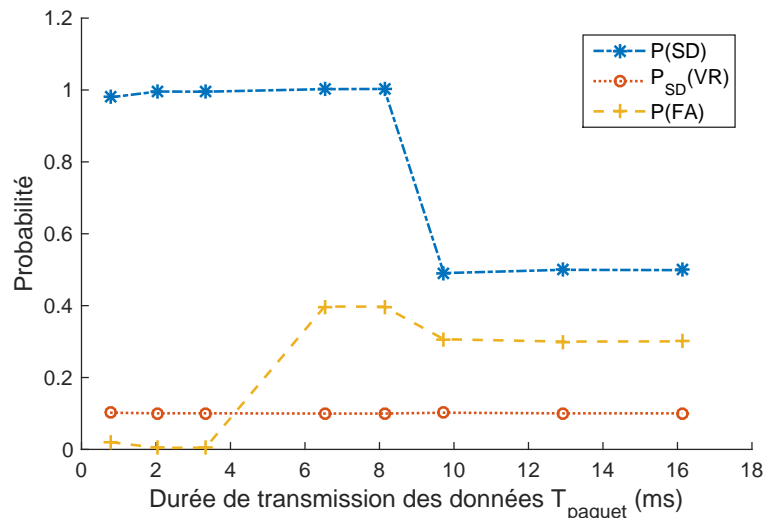


FIGURE 3.13: Probabilités des évènements de télé-réveil en fonction de la durée de transmission des données.

Intéressons-nous justement à la probabilité  $\mathbb{P}(FA)$  représenté sur la figure 3.13 pour évaluer l'évolution du nombre de fausses alarmes. On distingue 3 niveaux de probabilités sur la courbe, tous de valeur constante. On a une probabilité  $\mathbb{P}(FA)$  nulle lorsque les données sont assez petites, en cohérence avec la fenêtre d'attente. On observe une première rupture lorsque la durée de transmission des données dépasse la durée du préambule de réveil, qui est de 5,5 ms. La probabilité  $\mathbb{P}(FA)$  s'élève alors à 0,4. Autrement dit, 40 % des signaux détectés par le récepteur de télé-réveil sont des fausses alarmes à ce niveau. Les fausses alarmes ne perturbent en rien le succès de détection dans ce cas puisque la probabilité  $\mathbb{P}(SD)$  reste égale à 1. La deuxième coupure apparaît lorsque la durée  $T_{trame}$  est supérieure à la fenêtre d'attente  $T_{att}$ . Ici, la probabilité  $\mathbb{P}(FA)$  diminue à 0,3. Cette diminution s'explique par la baisse conjointe de la probabilité  $\mathbb{P}(SD)$  présentée précédemment. En effet, si la probabilité  $\mathbb{P}(SD)$  diminue de moitié, le nombre de réveil est potentiellement réduit de moitié. On a alors potentiellement moins de données transmises par les nœuds, donc moins de fausses alarmes engendrées par la transmission des données.

Enfin, analysons la probabilité  $\mathbb{P}_{SD}(VR)$  de validation du réveil, sachant que le signal de réveil a été détecté avec succès. Son évolution est également présentée sur la figure 3.13. On constate que la probabilité  $\mathbb{P}_{SD}(VR)$  reste constante quelle que soit la durée  $T_{trame}$ . On obtient également la probabilité maximum avec  $\mathbb{P}_{SD}(VR) = 0,1$ . La validation du réveil s'effectue donc sans interférence de la part des fausses alarmes.

En résumé, lorsque la durée  $T_{trame}$  est inférieure à la durée du préambule, les probabilités  $\mathbb{P}(SD)$  et  $\mathbb{P}_{SD}(VR)$  sont à leur valeur maximale respective. Les fausses alarmes se déclenchent une fois que la durée de transmission des données est supérieure à la durée du préambule. Il n'y a néanmoins pas de problème puisque les autres probabilités restent à leur valeur maximale. En revanche, la probabilité  $\mathbb{P}(SD)$  diminue de moitié une fois la durée  $T_{trame}$  supérieure à la fenêtre d'attente  $T_{att}$ . Cette réduction de moitié peut s'interpréter par le fait qu'un nœud qui se réveille va interférer avec le réveil du nœud suivant. Comme ce dernier ne se réveille pas, il n'interfère pas avec le réveil du prochain nœud dans la liste d'interrogation et celui-ci peut se réveiller. Ce phénomène en boucle se traduit par une détection du signal de réveil une fois sur deux par rapport au cas où les paramètres sont bien définis, d'où la réduction de moitié de la probabilité  $\mathbb{P}(SD)$ .

Parmi les solutions envisageables, il serait possible d'augmenter la fenêtre d'attente pour laisser au système de télé-réveil le temps de traiter ces fausses alarmes. On pourrait aussi rendre plus robuste le message AdR avec un préambule plus complexe par exemple, ou bien travailler sur deux canaux physiques séparés (cf. chapitre 3 avec les modules LoRa).

Cette partie conclut l'évaluation des performances du protocoles DoRa en fonction des paramètres du réseau. Dans la section suivante, on compare les performances du protocole

DoRa avec d'autres protocoles MAC existants pour montrer l'apport du protocole de télé-réveil à ce qui se fait actuellement.

## 3.6 Étude comparative des performances du protocole DoRa

Dans cette section, nous démontrerons l'avantage d'utiliser un système de télé-réveil par rapport aux protocoles MAC traditionnels. En effet, les performances du protocole DoRa seront comparées à deux protocoles MAC très connus : le protocole 802.15.4 MAC [109] et le protocole B-MAC [43].

D'une part, le protocole 802.15.4 MAC sert de comparaison car celui qu'on utilise (CS-MA/CA sans balise) ne dispose pas de mécanisme de gestion d'énergie. Son défaut est bien entendu l'écoute continue du canal, ce qui est très coûteux d'un point de vue énergétique. En revanche, ce protocole offre un débit maximal de données. La comparaison entre les protocoles DoRa et 802.15.4 MAC permettra alors d'étudier l'efficacité énergétique du système tout en confrontant les débits de données atteignables par les deux approches.

D'autre part, le protocole B-MAC a été choisi en tant que représentant des protocoles qui implémentent un fonctionnement par cycle d'activité sur la radio. Jusqu'à maintenant, c'était l'approche la plus efficace en termes d'énergie. La réduction d'énergie est proportionnelle au rapport cyclique entre le mode veille et le mode actif. Il est donc intéressant de comparer l'approche par cycle de fonctionnement et le télé-réveil afin d'en apprécier l'efficacité énergétique. De plus, certains capteurs sans fil du marché fonctionnent avec le protocole B-MAC, ou tout au moins une version dérivée (X-MAC [110], WiseMAC [111], etc.). Par ailleurs, ces deux protocoles sont déjà implémentés sous MiXiM. On peut donc effectuer des simulations de ces protocoles en utilisant la librairie à disposition.

Comme pour l'étude précédente, on présente dans un premier temps le scénario de simulation qui a été défini pour obtenir les résultats présentés dans cette section.

### 3.6.1 Scénario de simulation

Dans cette section, nous considérons un réseau composé de 40 nœuds et d'une BS. L'ensemble des nœuds est distribué de manière aléatoire sur une surface de 400 m<sup>2</sup>, à l'exception de la BS qui est positionnée au centre.

Ce même réseau est simulé pour chaque protocole MAC ainsi que le protocole de réveil, afin d'obtenir une comparaison fiable et équitable. Une liste des paramètres retenus pour la simulation est présentée dans le tableau 3.2. Par ailleurs, il faut rentrer beaucoup plus de

paramètres dans le simulateur. Nous présentons ici uniquement ceux qui sont nécessaires et utiles pour la compréhension du scénario de simulation.

TABLEAU 3.2: Paramètres de simulation pour l'étude comparative.

| Protocole     | Paramètre                   | Valeur       |
|---------------|-----------------------------|--------------|
| Commun        | Taille de la file d'attente | 10 trames    |
|               | Tension d'alimentation      | 3,3 V        |
|               | Capacité de la batterie     | 2900 mAh     |
|               | Radio principale :          |              |
|               | Débit binaire               | 250 kbps     |
|               | Consommation en veille      | 400 nA       |
|               | Consommation en mode Rx     | 16.6 mA      |
|               | Consommation en mode Tx     | 21.2 mA      |
| IEEE 802.15.4 | Nombre de Backoff           | 3-5          |
|               | Durée de détection du CCA   | 128 $\mu$ s  |
| B-MAC         | Durée d'un créneau          | 1 s          |
|               | Intervalle de vérification  | 10 ms        |
| DoRa          | Fenêtre d'attente           | 10 ms        |
|               | Taille du préambule         | 22 bits      |
|               | Taille de l'AdR             | 32 bits      |
|               | Récepteur de télé-réveil:   |              |
|               | Débit binaire               | 4 kbps       |
|               | Consommation en veille      | 110 nA       |
|               | Consommation en mode Rx     | 23,8 $\mu$ A |

Dans l'optique d'analyser les performances du protocole pour diverses applications, il faut considérer une charge de trafic variable. On choisit de faire varier deux paramètres au cours des simulations : la période de requête  $T_{req}$  et la taille des données.

D'une part, on considère une période de requête  $T_{req}$  variable et une taille de trame de données fixe. On joue ainsi sur la fréquence de transmission des données entre la BS et les nœuds pour influencer le trafic de données.

D'autre part, on considère une période de requête fixe et une taille de données variable. De cette manière, la fréquence de transmission est constante mais le trafic de données varie en fonction de la taille des trames. Les critères typiques de performances définies en section 3.4.1 sont calculés ici pour la comparaison entre les protocoles MAC et le protocole de télé-réveil DoRa. Pour chaque jeu de paramètres, la simulation est exécutée à plusieurs reprises pour avoir une meilleure représentativité des résultats. On tracera également l'intervalle de confiance à 99,7% sur les figures.



### 3.6.2 Comparaison avec des protocoles MAC en variant la période de requête

Premièrement, on compare les performances du protocole DoRa avec les protocoles MAC en faisant varier la période de requête. On considère une période de requête  $T_{req}$  qui varie entre 160 ms et 20 s. La taille des données en provenance des nœuds est fixée à 100 octets. Ainsi, le taux d'occupation du canal varie 0,06 % et 7,1 % en utilisant le protocole DoRa.

Après analyse des résultats de simulation, on étudie l'évolution des critères de performance en fonction de la période de requête. Tout d'abord, l'évolution du taux de livraison des trames à la BS est représentée sur la figure 3.14. Pour les protocoles DoRa et 802.15.4, le taux de livraison est quasiment égal à 100 % peu importe la valeur de  $T_{req}$ . Le protocole DoRa offre donc une fiabilité de transmission des données similaire au protocole 802.15.4. Les résultats sont également similaires pour le protocole B-MAC lorsque la période de requête est supérieure à 2 secondes. Ses performances chutent lorsqu'on diminue cette valeur jusqu'à atteindre 7,3 % lorsque  $T_{req} = 160$  ms. Cette chute de performance s'explique par le fait que le protocole B-MAC est conçu spécifiquement pour des applications qui maximisent la durée de sommeil entre les réveils. Il n'est donc pas adapté lorsque le temps de requête devient faible.

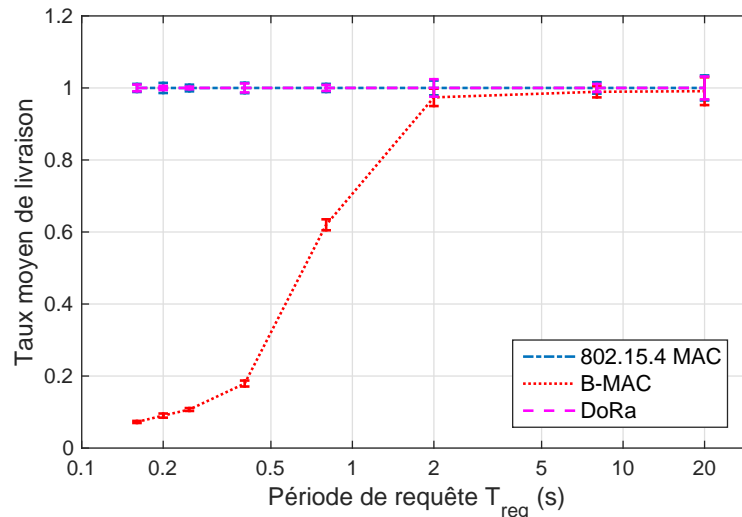


FIGURE 3.14: Évolution du taux moyen de livraison des trames en fonction de la période de requête à la BS.

On observe une tendance similaire pour le débit de données reçues à la BS puisqu'il est corrélé au taux de livraison des données. Les résultats sont présentés sur la figure 3.15. On distingue une très légère variation de débit entre les protocoles DoRa et 802.15.4. En effet, les résultats montrent une baisse de débit de données atteignant au maximum 3 % comparé au protocole 802.15.4. On note également que le débit de données ne dépasse pas 5 kbps.

On est donc très en dessous de la limite de 250 kbps fournie par la radio principale. En revanche, le protocole B-MAC souffre la aussi d'une chute de performance pour des faibles temps de requête. Le débit obtenu avec ce protocole ne dépasse pas les 700 bps dans ce cas de figure. Le protocole DoRa offre ainsi des performances adéquates pour la transmission des données, peu importe la fréquence de transmission des données.

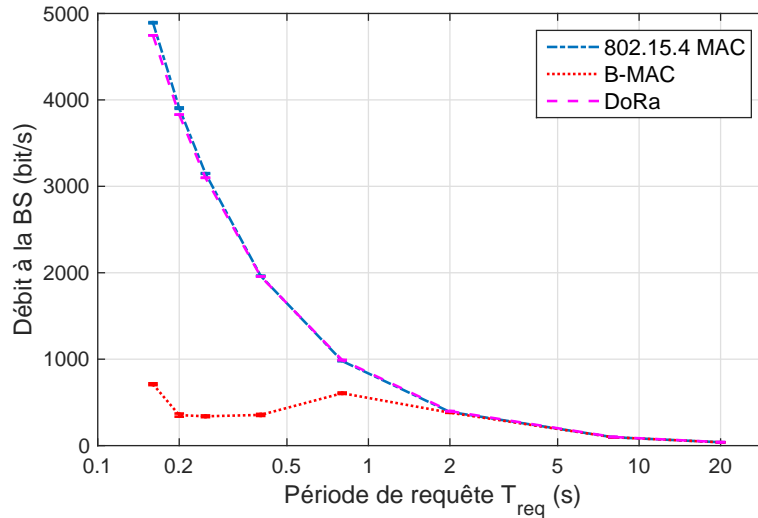


FIGURE 3.15: Évolution du débit de données reçues à la BS en fonction de la période de requête.

On s'intéresse ensuite au prochain critère de performance qui est la latence moyenne de réception des données à la BS. Les résultats de simulation sont présentés sur la figure 3.16. Dans un premier temps, on observe une latence moyenne constante pour les protocoles DoRa et 802.15.4. La période de requête n'influe donc pas sur la latence pour ces protocoles. En utilisant le protocole 802.15.4 CSMA/CA sans balise, le module radio des nœuds est toujours en mode Rx par défaut. Le nœud qui doit transmettre les données à la BS peut donc le faire directement si le canal radio est libre. Pour le protocole DoRa, une latence additionnelle est ajoutée puisque le nœud doit se réveiller après la requête de la BS. La différence de latence obtenue entre les résultats des protocoles DoRa et 802.15.4 est égale à 5 ms. Cette valeur correspond à la latence de télé-réveil. Concernant le protocole B-MAC, on obtient une latence supplémentaire de 1 seconde lorsque la période de requête est supérieure à 2 secondes. Cette latence supplémentaire correspond ici uniquement à la durée du créneau de réveil du nœud. Par contre, la latence augmente considérablement lorsqu'on diminue la période de requête. Le cycle d'activité du protocole B-MAC n'arrive donc pas à suivre la fréquence de requête de la BS. Une solution serait d'augmenter le cycle d'activité du protocole B-MAC afin de palier à ce problème, au détriment d'une consommation énergétique plus élevée.

Enfin, étudions l'efficacité énergétique des protocoles en fonction de la période de requête. L'énergie moyenne consommée par bit des nœuds est présentée sur la figure 3.17. Ce critère

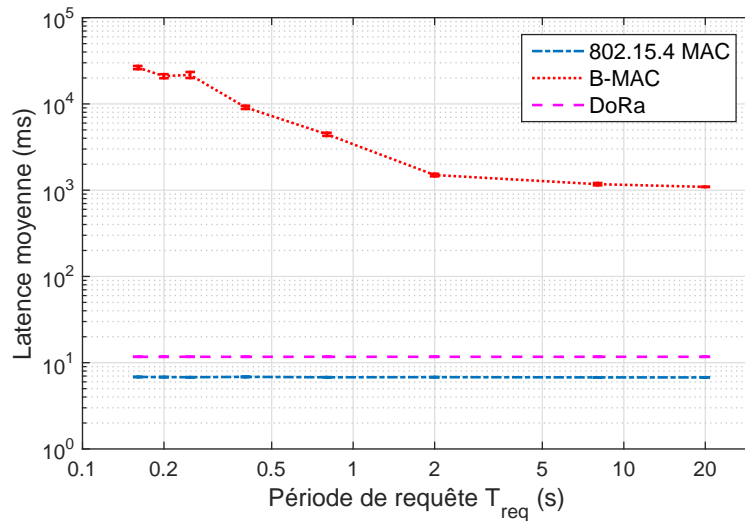


FIGURE 3.16: Évolution de la latence moyenne de réception des données à la BS.

de performance montre l'atout majeur du protocole DoRa comparé aux deux autres protocoles. En effet, l'ordre de grandeur de l'énergie moyenne par bit est compris entre  $10^{-3}$  et  $10^{-5}$  J.bit $^{-1}$  pour les protocoles 802.15.4 et B-MAC. Par contre, il est compris entre  $10^{-7}$  et  $10^{-8}$  J.bit $^{-1}$  pour le protocole DoRa. On obtient donc une amélioration d'au moins trois ordres de grandeur pour l'efficacité énergétique des nœuds. Par ailleurs, l'évolution de la tendance est aussi intéressante puisqu'il montre où se situe la meilleure efficacité énergétique. On observe globalement une baisse de l'énergie consommée par bit lorsqu'on diminue la période de requête. Donc, l'efficacité énergétique augmente avec la charge du trafic de données. Néanmoins, les protocoles de télé-réveil sont à l'heure actuelle considérés pour des réseaux à faible trafic où la période de requête varie de plusieurs secondes à quelques heures. La consommation d'énergie est certes réduite avec ce type de scénario, mais l'efficacité énergétique est elle aussi réduite puisque peu de données sont transmises.

Pour conclure cette sous-section, les résultats indiquent que le protocole DoRa offre un débit de données et un taux de livraison des données similaire au protocole 802.15.4 MAC, qui on le rappelle ne dispose d'aucun mécanisme d'économie d'énergie. Toutefois, le protocole DoRa dispose d'une latence supplémentaire par rapport au protocole 802.15.4, qui est en fait la latence de télé-réveil de 5 ms. Pour ce qui est de l'énergie par bit, le protocole DoRa est bien en dessous des protocoles MAC puisque l'énergie par bit est de 3 ordres de grandeur en dessous avec le protocole DoRa.

De plus, il faut souligner le fait que les performances du protocole DoRa ne baissent pas en diminuant la période de requête. Cela signifie qu'il est tout aussi intéressant de considérer un trafic de données rapide qu'un trafic de données lent pour le protocole DoRa. En revanche, les protocoles fonctionnant par cycle d'activité telles que B-MAC sont efficaces uniquement pour trafic de données lents.

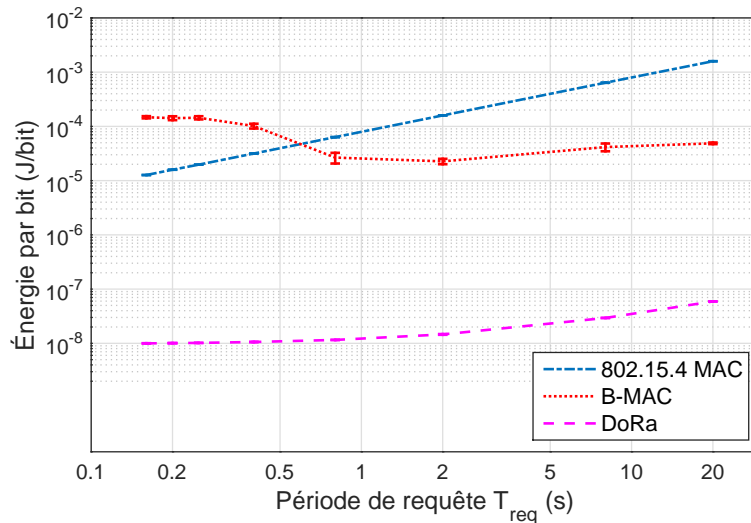


FIGURE 3.17: Évolution de l'énergie moyenne consommée par bit des nœuds en fonction de la période de requête à la BS.

### 3.6.3 Comparaison avec des protocoles MAC en variant la taille des données

On considère maintenant le scénario dans lequel la taille des données varie alors que la période de requête reste identique. On fixe alors la période  $T_{req} = 2$  s et on fait varier la taille des données entre 80 bits et 10 kbits. Le taux d'occupation du canal est alors de 0,4 % en utilisant le protocole DoRa (peu de variation car la période  $T_{req}$  est fixe).

Premièrement, on s'intéresse au taux moyen de livraison présenté sur la figure 3.18. On obtient là encore des résultats similaires entre les protocoles DoRa et 802.15.4 avec une livraison des trames quasiment toujours assurée. Le protocole B-MAC présente des performances décroissantes en fonction de la taille des données, avec un minimum de taux de livraison à 86 %. Cette diminution est probablement due à une plus grande occupation du canal lorsque des données plus volumineuses doivent être transmises. Certains nœuds pourraient donc rencontrer des difficultés pour accéder au canal après leur réveil en utilisant le protocole B-MAC.

Ensuite, on observe un résultat similaire pour le débit de données reçues à la BS. Les résultats présentés sur la figure 3.19 montrent une évolution linéaire du débit en fonction de la taille des données. Ce résultat est cohérent dans la mesure où le taux de livraison est égal à 100 % pour les protocoles 802.15.4 et DoRa. Cette linéarité n'est pas totalement respectée pour le protocole B-MAC en raison de la perte de trames lorsque les données sont trop volumineuses.

Passons ensuite aux résultats concernant la latence moyenne de réception des données à la BS. Les performances obtenues de chaque protocole sont présentées sur la figure 3.20.

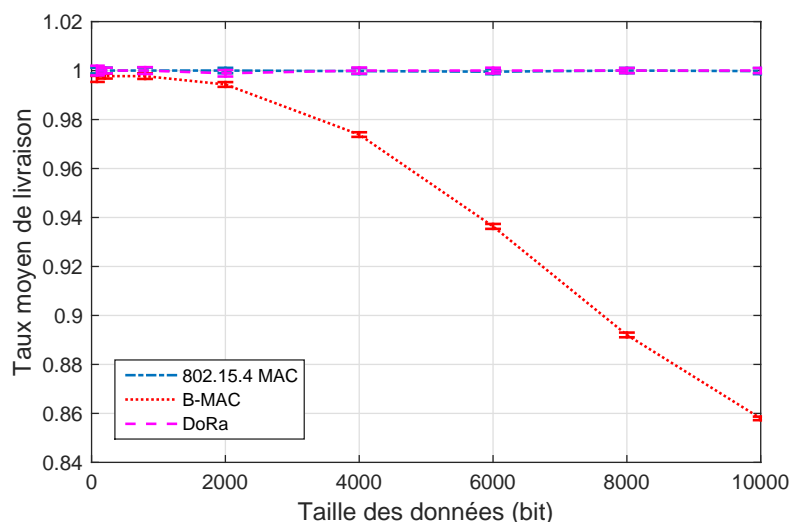


FIGURE 3.18: Évolution du taux moyen de livraison des trames en fonction de la taille des données du nœud.

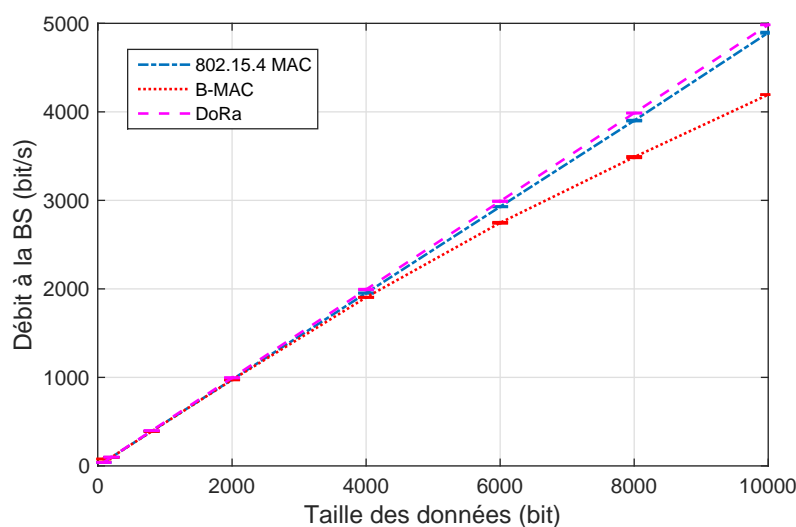


FIGURE 3.19: Évolution du débit de données reçues à la BS en fonction de la taille des données du nœud.

À l'inverse du scénario précédent, la latence moyenne évolue lorsqu'on fait varier la taille des données pour les protocoles 802.15.4 et DoRa. En effet, plus la taille des données est grande, plus long est le temps de transmission des trames de données. Cette durée de transmission est donc le facteur dans l'augmentation de la latence moyenne. Par ailleurs, on a toujours une différence entre les protocoles qui équivaut à la latence du système de télé-réveil. Concernant le protocole B-MAC, la latence moyenne reste relativement constante car la latence est essentiellement due au cycle d'activité du protocole.

Enfin, on analyse l'efficacité énergétique des protocoles en fonction de la taille des données. Les résultats relatifs à l'énergie moyenne consommée par bit des nœuds sont présentés sur

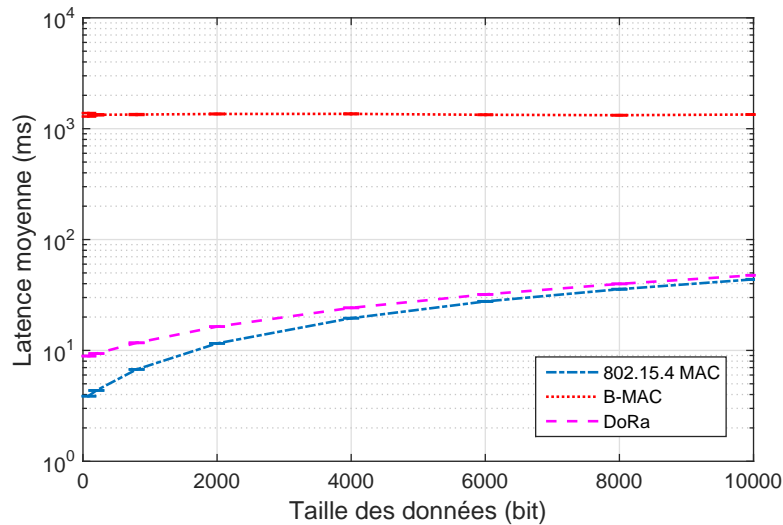


FIGURE 3.20: Évolution de la latence moyenne de réception des données à la BS en fonction de la taille des données du nœud.

la figure 3.21. Tout d'abord, on observe une variation similaire pour les trois protocoles. Comme précédemment, l'énergie par bit diminue lorsque la charge du trafic augmente. Cette diminution correspond ici à l'augmentation de la taille des données. Étant donné que plus de données sont transmises, l'énergie consommée pour transmettre les données utiles devient prépondérante face à l'énergie consommée en mode veille, réception ou encore dans la gestion de mécanisme de contrôle d'accès. On obtient toujours un ordre d'au moins 3 fois inférieur pour le protocole DoRa comparé aux protocoles 802.15.4 et B-MAC. Toutefois, la variation de l'énergie par bit est plus accentuée en faisant varier la taille des données que la période de requête. En considérant le même débit, l'énergie par bit descend en dessous des  $10^{-8}$  J.bit<sup>-1</sup> lorsqu'on varie la taille des données. Cependant, cette valeur est tout juste atteinte en faisant varier la période de requête. On peut donc en déduire que l'efficacité énergétique est plus affectée par la taille des données que par la période de requête. Il serait donc plus efficace de prioriser l'envoi des trames de plus grande taille plutôt que d'envoyer plusieurs trames de tailles inférieures.

En résumé de cette sous-section, on obtient des résultats assez similaires en faisant varier la taille des données ou la période de requête. La seule véritable différence se trouve au niveau de l'efficacité énergétique. On constate que l'énergie par bit consommée par les nœuds varie plus en jouant sur la taille des données comparée à la période de requête. Ces résultats montrent qu'il est plus efficace de considérer un réveil suivi de l'envoi d'une trame de grande taille plutôt que plusieurs réveils consécutifs suivis de l'envoi d'une trame de petite taille. Au final, la même taille de données est reçue, mais l'énergie consommée est plus faible avec la première stratégie.

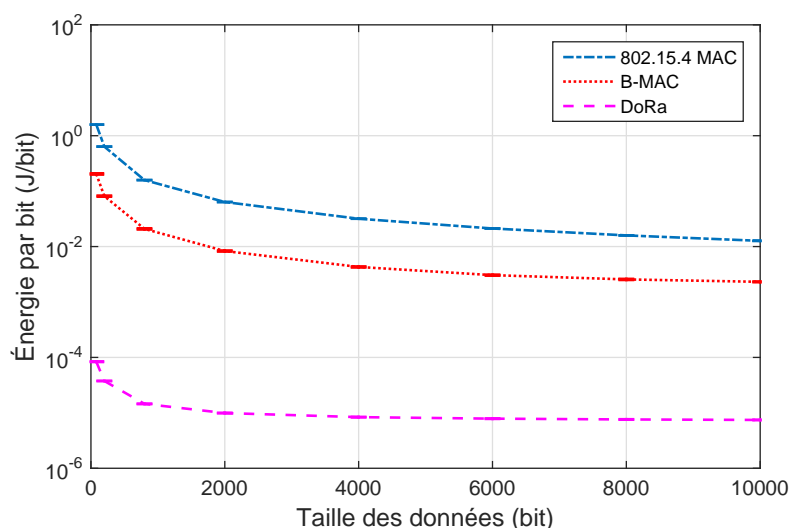


FIGURE 3.21: Évolution de l'énergie moyenne consommée par bit des nœuds en fonction de la taille des données.

### 3.6.4 Comparaison entre les bibliothèques MiXiM et INET

Cette section vise à valider l'exportation de notre simulateur initialement développé sous MiXiM vers INET. L'objectif est de montrer que nous obtenons les mêmes résultats avec les implémentations que nous avons effectués dans les deux bibliothèques.

La récente intégration de MiXiM dans la bibliothèque INET a permis d'améliorer les modèles des couches physiques et MAC de la bibliothèque INET. Notre choix s'était d'ailleurs porté sur la bibliothèque MiXiM car elle était mieux adaptée pour le développement de protocoles MAC ou physiques. Avec cette mise à jour, INET devient sans doute la meilleure bibliothèque sous OMNeT++ pour modéliser les réseaux de capteur sans fils au niveau physique et MAC. On peut également bénéficier des autres couches protocolaires qui font la renommée de cette bibliothèque. Les protocoles disponibles sont également la raison du passage à INET, notamment pour les simulations présentées dans le chapitre 4.

Afin de valider le nouveau modèle de simulation du protocole DoRa sous INET, on présente une comparaison des résultats avec le simulateur sous MiXiM. Les paramètres d'entrées du simulateur sont définis de manière identique pour chaque simulateur. Les résultats sont présentés sur la figure 3.22 avec la puissance moyenne consommée par les nœuds en fonction de la période de requête. Les résultats obtenus sont sensiblement similaires avec un écart absolu très faible. On a par ailleurs un écart relatif toujours inférieur à 1 %.

Enfin, on présente également la comparaison des résultats relatifs au débit de données reçus à la BS sur la figure 3.23. On obtient des résultats très proches puisque les courbes sont

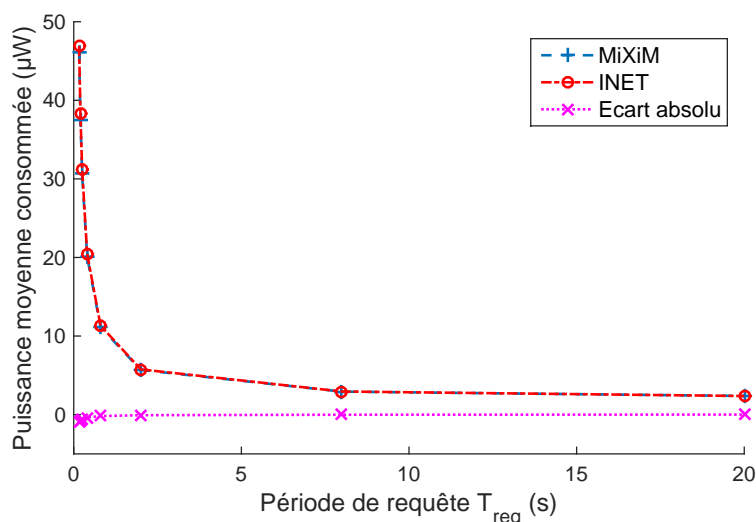


FIGURE 3.22: Comparaison des résultats entre les simulateurs avec la puissance moyenne consommée par les nœuds.

confondues. La comparaison de ces deux critères de performance permet donc de valider l'exportation du simulateur vers INET.

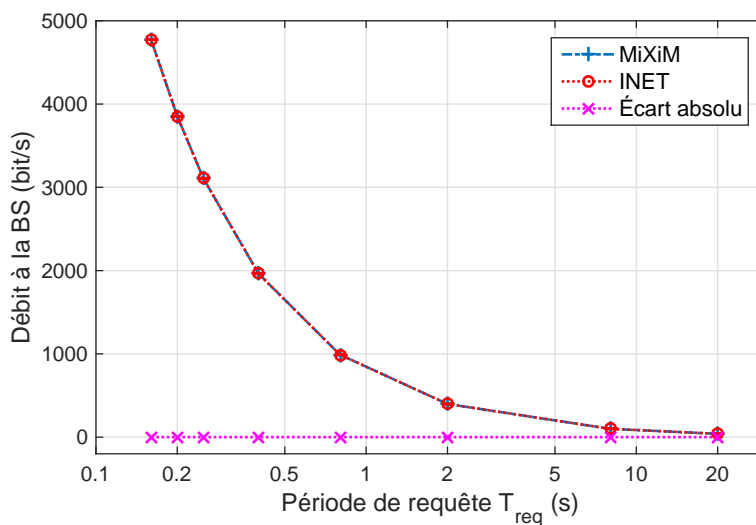


FIGURE 3.23: Comparaison des résultats entre les simulateurs avec le débit de données reçue à la BS.

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons premièrement décrit le principe de communication du protocole DoRa. Son implémentation dans le simulateur OMNeT++ a été ensuite présentée. L'implémentation consiste essentiellement en la programmation d'une machine à états finis



pour les entités MAC associées au protocole DoRa. Par la suite, nous avons défini les critères retenus pour évaluer les performances du protocole DoRa sous deux aspects.

D'une part, l'évaluation des performances en fonction des paramètres du réseau est basée principalement sur une théorie de détection du signal que nous avons défini par rapport au système de télé-réveil. La première étude a montré que le protocole DoRa était robuste par rapport au canal de propagation. En effet, le signal de réveil est toujours détecté lorsque  $n < 3$  et  $\sigma < 10$  dBm. Ensuite, nous avons analysé la consommation d'énergie des nœuds sur des réseaux de capteurs de grande échelle comportant jusqu'à 255 nœuds. Cette étude a montré que le protocole DoRa ne souffrait pas de problème d'adaptation d'échelle, étant donné que la consommation du réseau évolue de façon linéaire par rapport au nombre de nœuds. Puis, nous avons exposé les limites du protocole DoRa lorsque la taille des données transmises varie. Le protocole DoRa a été dimensionné pour une taille limite de données transmises par le capteur. Au-delà de cette limite, nous avons montré que les performances du protocole sont réduites puisque jusqu'à 50 % des messages AdR ne sont pas détectés. Cette étude montre l'importance de définition des paramètres du protocole DoRa selon les besoins de l'application du RCSF.

D'autre part, nous avons comparé les performances du protocole DoRa avec deux protocoles MAC actuellement utilisés dans les RCSF. La comparaison se base sur les critères typiques pour évaluer les protocoles MAC. Les résultats obtenus ont montré que le protocole DoRa est plus efficace en termes d'énergie que les protocoles B-MAC et 802.15.4 MAC. La différence pour l'énergie consommée par bit est de trois ordres de grandeur en dessous avec le protocole DoRa. Cette baisse d'énergie consommée est obtenue sans contrepartie puisque le taux de livraison des données, le débit de données à la BS ou la latence sont quasiment identiques entre les protocoles DoRa et 802.15.4 MAC. Enfin, cette étude a été menée en faisant varier séparément la taille des données du capteur ou la période de requête. Nous avons constaté que la taille des données joue un rôle plus important dans l'efficacité énergétique des nœuds. On peut en déduire qu'il est préférable d'envoyer des trames de données plus volumineuses après le réveil, plutôt que de réveiller le nœud en question à plusieurs reprises pour envoyer la même taille de données au final.

Enfin, la réduction énergétique apportée par le protocole DoRa s'explique surtout par le fait que la radio principale est utilisée uniquement au besoin. Nous supprimons donc complètement le problème d'écoute passive et de surécoute au niveau de la radio principale. Le récepteur de télé-réveil assure l'écoute passive du canal avec une méthode plus efficace que les récepteurs radios traditionnelles. Toutefois, on peut s'interroger si le problème de surécoute n'a pas été transféré vers le récepteur de télé-réveil avec le protocole DoRa. Cette interrogation sera traitée dans le chapitre suivant avec également une étude de l'effet des interférences sur le protocole DoRa.

## Chapitre 4

# Conception et évaluation des performances du protocole DC-DoRa associé au système de télé-réveil

### Table des matières

---

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.1   | Introduction . . . . .   | 96  |
| 4.2   | Problématiques . . . . .   | 96  |
| 4.2.1 | La problématique de surécoute . . . . .  | 97  |
| 4.2.2 | La problématique des interférences co-canal . . . . .                                    | 99  |
| 4.2.3 | Nécessité d'une optimisation protocolaire . . . . .                                      | 100 |
| 4.3   | Présentation du protocole DC-DoRa . . . . .  | 100 |
| 4.3.1 | Évolution du protocole DoRa vers DC-DoRa . . . . .                                       | 100 |
| 4.3.2 | Structure des messages du protocole DC-DoRa . . . . .                                    | 101 |
| 4.3.3 | Protocole DC-DoRa pour l'accès au support dans le RCSF . . . . .                         | 102 |
| 4.4   | Implémentation du protocole DC-DoRa sous OMNeT++ . . . . .                               | 103 |
| 4.4.1 | Modules et fonctionnalités supplémentaires du protocole DC-DoRa . . . . .                | 103 |
| 4.4.2 | Machine à états finis du protocole DC-DoRa . . . . .                                     | 104 |
| 4.5   | Évaluation des performances des protocoles DoRa et DC-DoRa face à la surécoute . . . . . | 105 |
| 4.5.1 | Scénario de simulation . . . . .   | 105 |
| 4.5.2 | Analyse des résultats avec le protocole DoRa . . . . .                                   | 106 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.5.3 | Analyse des résultats avec le protocole DC-DoRa . . . . .                                   | 108 |
| 4.5.4 | Comparaison des résultats . . . . .   | 110 |
| 4.6   | Évaluation des performances des protocoles DoRa et DC-DoRa face aux interférences . . . . . | 111 |
| 4.6.1 | Scénario de simulation . . . . .  | 112 |
| 4.6.2 | Analyse des résultats avec le protocole DoRa . . . . .                                      | 113 |
| 4.6.3 | Analyse des résultats avec le protocole DC-DoRa . . . . .                                   | 116 |
| 4.6.4 | Comparaison des résultats . . . . .   | 118 |
| 4.7   | Conclusion . . . . .  | 119 |

---

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons la conception du protocole DC-DoRa ainsi que l'évaluation de ses performances. Le protocole DC-DoRa est en fait une optimisation du protocole DoRa pour répondre à deux problèmes qui sont la surécoute et les interférences co-canal.

Avant d'entrer dans le vif du sujet, nous présenterons ces deux problématiques liées au protocole de télé-réveil. L'efficacité énergétique du protocole de télé-réveil pourrait être réduite à cause de ces problèmes. Il est donc potentiellement nécessaire de définir un nouveau protocole de télé-réveil, ou tout au moins de proposer une optimisation du protocole DoRa.

Nous proposons alors une optimisation du protocole DoRa nommé DC-DoRa. L'objectif du protocole DC-DoRa est de réduire ou d'éliminer le problème de surécoute et le problème des interférences co-canal. Le protocole DC-DoRa est ensuite présenté afin de montrer en quoi il se différencie du protocole DoRa.

Enfin, nous comparerons les performances des protocoles DoRa et DC-DoRa par simulation. Chacune des problématiques sera traitée de manière séparée afin de bien apprécier l'apport du protocole DC-DoRa pour chaque problème. De plus, chaque problème est traité avec un scénario de simulation différent afin d'accentuer l'impact du problème en question.

## 4.2 Problématiques

Dans cette section, nous présentons deux problèmes liés à l'écoute du canal qui subsistent avec le protocole DoRa. Ces deux problèmes se rejoignent sur le fait qu'ils peuvent augmenter la consommation d'énergie du récepteur de télé-réveil.

Cependant, ces problèmes diffèrent en raison de leur source. En fait, le problème de surécoute est un problème interne lié au RCSF. En ce qui concerne le problème des interférences co-canal, il provient d'un réseau externe qui fonctionnerait à proximité et à la même fréquence porteuse que le RCSF étudié. Pour cette raison, nous étudions ces problématiques séparément.

### 4.2.1 La problématique de surécoute

Comme annoncé précédemment, le premier problème est le phénomène de surécoute. Nous présentons ce problème au niveau du récepteur de télé-réveil dans cette sous-section.

L'écoute passive et la surécoute sont complètement supprimées au niveau de la radio principale en utilisant un système de télé-réveil avec adressage. Au niveau du récepteur de télé-réveil, il n'y a pas d'écoute passive du canal. En effet, le récepteur est en mode de sommeil profond en permanence avant détection d'un signal radio et il est activé lors de la réception d'un AdR ou d'une trame quelconque similaire.

Toutefois, la surécoute subsiste au niveau du récepteur de télé-réveil, puisque tous les récepteurs sont activés lorsqu'ils détectent un signal AdR. Ce problème de surécoute pourrait devenir particulièrement important si le récepteur de télé-réveil est souvent sollicité. C'est le cas lorsque la période de requête de la BS doit être assez faible pour interroger un grand nombre de nœuds ou pour générer un trafic dense dans le réseau. Jusqu'à maintenant, le problème de surécoute dans les RCSF qui intègrent un mécanisme de télé-réveil n'a pas encore été traité dans la littérature. La raison est probablement le fait que ces réseaux sont considérés pour des applications à faible trafic des données, d'où la faible influence du problème de surécoute.

Dans tous les cas, l'évaluation de la quantité d'énergie dépensée à cause de la surécoute permettra de montrer son influence sur la consommation globale du nœud. Plus particulièrement, on s'intéressera également à son influence sur la consommation du récepteur de télé-réveil. La consommation totale du nœud est fournie directement par le simulateur dans les résultats de simulation. Toutefois, la consommation effective de chaque composant ou encore la consommation reliée à un tel processus n'est pas donnée. Nous devons alors développer une méthode pour calculer la consommation de chaque processus du nœud. Pour y parvenir, nous ajoutons un compteur temporel pour chaque état des modules MAC afin de mesurer la durée totale de chaque état après simulation. Étant donné qu'on connaît la consommation de puissance de chaque état, on peut donc calculer l'énergie consommée par chaque état des couches MAC avec la relation :

$$E_e = P_e \times T_e \tag{4.1}$$

où

- $E_e$  est l'énergie totale consommée par l'état  $e$  au cours de la simulation,
- $P_e$  est la puissance consommée par l'état  $e$ ,
- $T_e$  est la durée totale occupée par l'état  $e$  durant la simulation.

Un ensemble d'états a été défini dans les modules MAC pour notre protocole DoRa. Pour rappel, ces états sont présentés dans la machine à états finis de la section 3.3.3. On utilisera une version simplifiée de cette machine à états finis avec deux états pour le module de la radio principale et deux états pour le récepteur de télé-réveil. Ce souci de simplification permet de distinguer plus clairement le mode actif et le mode inactif de chaque module. Pour la radio principale, les états  $e$  sont alors le mode veille et le mode Tx. L'état de transition du mode veille vers le mode Tx est comptabilisé dans le mode Tx. Concernant le récepteur de télé-réveil, les états  $e$  sont le mode veille et le mode décodage AdR. L'état de transition du mode veille vers le mode décodage AdR est compris dans le mode décodage AdR.

La surécoute intervient dans l'état décodage AdR, on décompose donc l'énergie consommée par cet état en deux processus. D'une part, on considère l'énergie dépensée pour recevoir et traiter les messages AdR qui sont destinés au nœud. On utilisera le terme d'écoute utile pour faire référence à ce processus, dont la définition est la suivante :

**Définition 5.** On appelle écoute utile l'écoute qui intervient au niveau du récepteur de télé-réveil lorsque celui-ci reçoit et traite un message AdR qui lui est destiné.

D'autre part, on considère l'énergie consommée pour traiter les AdR qui sont destinés aux autres nœuds. Ce processus fait partie de la surécoute qui intervient au niveau du récepteur de télé-réveil, avec la définition qui suit.

**Définition 6.** On appelle surécoute l'écoute qui intervient au niveau du récepteur de télé-réveil lorsque celui-ci reçoit et traite un message AdR qui est destiné aux autres nœuds du réseau.

Ces définitions nous permettent d'écrire la relation suivante :

$$E_{AdR} = E_{surecoute} + E_{ecoute\ utile} \tag{4.2}$$

Afin de calculer la proportion de chaque processus, il faut connaître le nombre de messages AdR adressés au nœud ainsi que le nombre total de signaux traités par le récepteur. On a justement défini les probabilités relatives à ces évènements dans la section 3.4.2. Afin de simplifier les calculs, on fait l'hypothèse que le récepteur consomme autant d'énergie pour traiter un signal lié à la surécoute qu'un signal lié à l'écoute utile. La proportion d'écoute utile est obtenue par la probabilité de validation du réveil en présence du signal, soit  $\mathbb{P}(VR)$ .

Nous définissons donc l'énergie consommée par l'écoute utile avec la relation :

$$E_{\text{écoute utile}} = E_{AdR} \times \mathbb{P}(VR) \quad (4.3)$$

On peut alors en déduire l'énergie consommée par la surécoute avec la relation :

$$E_{\text{surecoute}} = E_{AdR} \times (1 - \mathbb{P}(VR)) \quad (4.4)$$

Ainsi, ces calculs seront effectués pour divers scénarios de fonctionnement afin de répondre à la question suivante : la proportion d'énergie consommée à cause de la surécoute est-elle trop élevée par rapport à la consommation d'énergie due à l'écoute utile? La réponse à cette question permettra de justifier ou non le développement d'un nouveau protocole de télé-réveil.

#### 4.2.2 La problématique des interférences co-canal

Le second problème est le phénomène des interférences co-canal. Ces interférences proviennent de l'existence d'autres réseaux de transmission (WiFi, Bluetooth, Zigbee, ...) dans la même bande de fréquence que notre système de télé-réveil (2,45 GHz).

Le récepteur de télé-réveil est particulièrement sensible à ces sources d'interférence car son réveil est déclenché par une récupération d'énergie sans fil. En effet, les sources d'interférence peuvent activer le récepteur de télé-réveil sous une condition. Il faudrait que la puissance reçue par le récepteur de télé-réveil en provenance des sources d'interférence soit supérieure à la sensibilité de réception. Ce problème est d'autant plus pertinent qu'on a tendance à vouloir augmenter la sensibilité des récepteurs de télé-réveil, comme on a pu le voir dans l'état de l'art (cf. section 1.4).

Toutefois, le nœud restera en mode veille dans ces conditions car aucune adresse ne sera reçue par le récepteur de télé-réveil. Une quantité d'énergie doit tout de même être dépensée par le récepteur pour rejeter ces interférences. En fait, les signaux émis par les sources d'interférence sont considérées comme des fausses alarmes au niveau du récepteur de télé-réveil. Nous avons justement mis en place un compteur dans notre simulateur pour quantifier ces fausses alarmes. De la même manière que dans la sous-section précédente, on peut alors calculer l'énergie consommée à cause des interférences par la relation suivante :

$$E_{\text{interférence}} = E_{AdR} \times \mathbb{P}(FA) \quad (4.5)$$

Nous ajouterons des sources d'interférence dans le simulateur afin d'évaluer son influence sur l'efficacité énergétique du récepteur de télé-réveil. Il est certain que le récepteur

consommara plus d'énergie dans ces conditions. Nous devons étudier l'évolution de la proportion d'énergie consommée à cause des interférences en fonction du nombre de sources. En comparant cette proportion d'énergie à celle consommée par l'écoute utile, nous pourrions statuer sur la nécessité ou non d'une optimisation protocolaire.

### 4.2.3 Nécessité d'une optimisation protocolaire

Comme on a pu le voir dans les sous-sections précédentes, deux problèmes pourraient augmenter la consommation d'énergie du récepteur de télé-réveil. Bien que nous n'ayons pas encore quantifié cette augmentation, il nous apparaît nécessaire d'optimiser notre protocole DoRa dans l'objectif d'éviter ces problèmes. Ainsi, nous pourrions comparer l'apport d'un tel protocole par rapport au protocole DoRa sur les problèmes présentés.

Comme ce protocole devra être conçu spécifiquement pour éviter la surécoute et les interférences, il faudra également définir dans quel cadre son utilisation est nécessaire. Dans cette optique, divers scénarios de simulation seront considérés afin de montrer dans quelles conditions ce protocole est plus efficace que le protocole DoRa.

Nous présentons ce protocole dans la section suivante tout en donnant des éléments justifiant notre approche.

## 4.3 Présentation du protocole DC-DoRa

Le nouveau protocole que nous proposons est en fait une extension du protocole DoRa. On nomme ce protocole DC-DoRa pour *Duty-Cycled DoRa* car il fonctionne par cycle d'activité, comme nous le verrons dans la description du protocole. Nous présenterons également la structure des messages car ces derniers doivent être modifiés pour intégrer le fonctionnement par cycle. Enfin, nous décrirons l'accès au support avec le protocole DC-DoRa.

### 4.3.1 Évolution du protocole DoRa vers DC-DoRa

Le protocole DC-DoRa a pour objectif de réduire les problèmes potentiels de surécoute et d'interférences rencontrés avec le protocole DoRa. Dans cette optique, nous ajoutons un fonctionnement par cycle d'activité pour désactiver temporairement le récepteur de télé-réveil.

Le principe de communication du protocole DoRa a été présenté dans la section 3.2. On peut présumer de l'origine de la surécoute en examinant la description du protocole.

La raison est qu'en utilisant le protocole DoRa, tous les nœuds traitent les messages AdR envoyés par la BS. Ils doivent décoder l'adresse insérée dans ces messages pour connaître s'ils sont réquisitionnés par la BS ou non. Cette phase de traitement des AdR se produit de plus en plus fréquemment avec l'augmentation du nombre de nœuds ou la fréquence des requêtes de réveil.

Afin de limiter le traitement de tous ces messages AdR, nous proposons de désactiver la fonctionnalité de réveil pour un certain temps. Cette désactivation interviendra au niveau du nœud juste après qu'il ait envoyé ses données. Durant la période qui suit, aucun message AdR ne sera envoyé en destination de ce nœud. En effet, la BS doit interroger les autres nœuds avant de réinterroger le nœud en question.

Concernant la désactivation, nous définissons une période d'inactivité  $T_{off}$  durant laquelle la fonctionnalité de télé-réveil est éteinte. La période  $T_{off}$  permettra au récepteur de ne pas traiter les messages AdR à destination des autres nœuds, ce qui évitera la surécoute. De plus, les signaux provenant des sources d'interférence ne seront pas traités durant cette période d'inactivité.

Le calcul de la période  $T_{off}$  est donné par l'équation 4.6. Il prend en compte une marge temporelle égale à la moitié de la fenêtre d'attente  $T_{att}$ , afin que le récepteur soit toujours capable de recevoir le message AdR lui étant destiné. On évite également les problèmes de dérive d'horloge du microcontrôleur.

$$T_{off} = N \times T_{req} - \frac{T_{att}}{2} \quad (4.6)$$

La période d'inactivité  $T_{off}$  est calculée au niveau de la BS, en faisant l'hypothèse que la BS connaît l'ensemble des  $N$  nœuds du réseau (ou bien en faisant une découverte du réseau au préalable). La BS doit alors partager cette information avec les nœuds, ce qui nous amène à définir la structure des messages du protocole DC-DoRa.

### 4.3.2 Structure des messages du protocole DC-DoRa

Comme pour le protocole DoRa, nous définissons deux messages échangés entre la BS et les nœuds : le message AdR et le message de données.

En revanche, il faut modifier la structure du message AdR pour y ajouter la valeur de  $T_{off}$ . Son champ succède à celui de l'adresse du nœud destinataire comme illustré sur la figure 4.1. La période d'inactivité aurait également pu être définie au niveau de chaque nœud avant déploiement. Nous préférons néanmoins qu'elle soit envoyée par la BS pour une



meilleure flexibilité du réseau. Dans notre cas, il sera possible d'adapter dynamiquement la période d'inactivité selon l'application souhaitée.

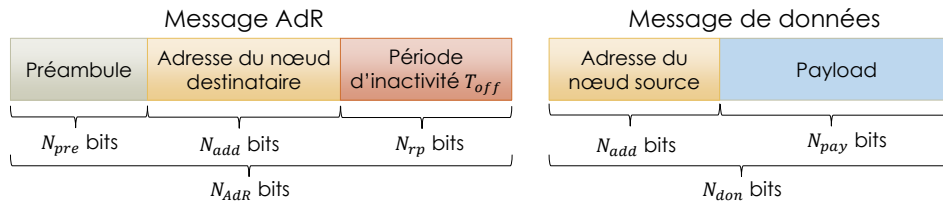


FIGURE 4.1: Structure de la trame des messages échangés entre la BS et les nœuds avec le protocole DC-DoRa.

À notre connaissance, le protocole DC-DoRa est le premier protocole de télé-réveil à utiliser un champ supplémentaire à part l'adressage dans le message AdR. L'augmentation de la taille du message AdR augmente la latence de télé-réveil, mais cela est nécessaire pour le fonctionnement du protocole DC-DoRa. Nous présentons comment le support de communication est géré dans la sous-section suivante.

### 4.3.3 Protocole DC-DoRa pour l'accès au support dans le RCSF

Le nouveau principe de communication du protocole DC-DoRa est présenté sur la figure 4.2. Cette figure montre bien le fait que chaque nœud traite uniquement le message AdR qui lui est destiné. La surécoute causée par les messages AdR en destination des autres nœuds sera donc complètement supprimée avec ce mécanisme.

Pour ce qui est des interférences co-canal, elles pourront perturber les récepteurs de télé-réveil uniquement dans la période où la fonctionnalité de télé-réveil est activée. L'effet des interférences co-canal devrait alors être réduit, mais non supprimé.

En pratique, l'implémentation d'un tel protocole est totalement faisable avec le récepteur de télé-réveil que nous proposons. En effet, la fonctionnalité de télé-réveil peut être éteinte temporairement par le microcontrôleur en manipulant les registres adéquats. Lors du mode veille du PIC24F, deux minuteurs à basse consommation peuvent être en marche. D'une part, le *Deep Sleep Watchdog Timer* (DSWDT) est le plus performant avec une consommation typique de  $0,55 \mu A$ . Il possède néanmoins l'inconvénient de ne pas pouvoir être modifié après déploiement puisque la durée du mode veille est définie de façon constante dans le programme uniquement. En revanche, le *Real-Time Clock and Calendar* (RTCC) permet d'allouer une durée dynamique du mode veille dans le programme. La consommation typique de ce mode est toutefois de  $0,80 \mu A$ . Notre choix se porte vers le minuteur RTCC étant donné qu'on souhaite avoir un système dynamique. Durant ce nouveau mode veille, l'IRQ par lequel arrive le signal AdR sera désactivé pour empêcher le réveil externe

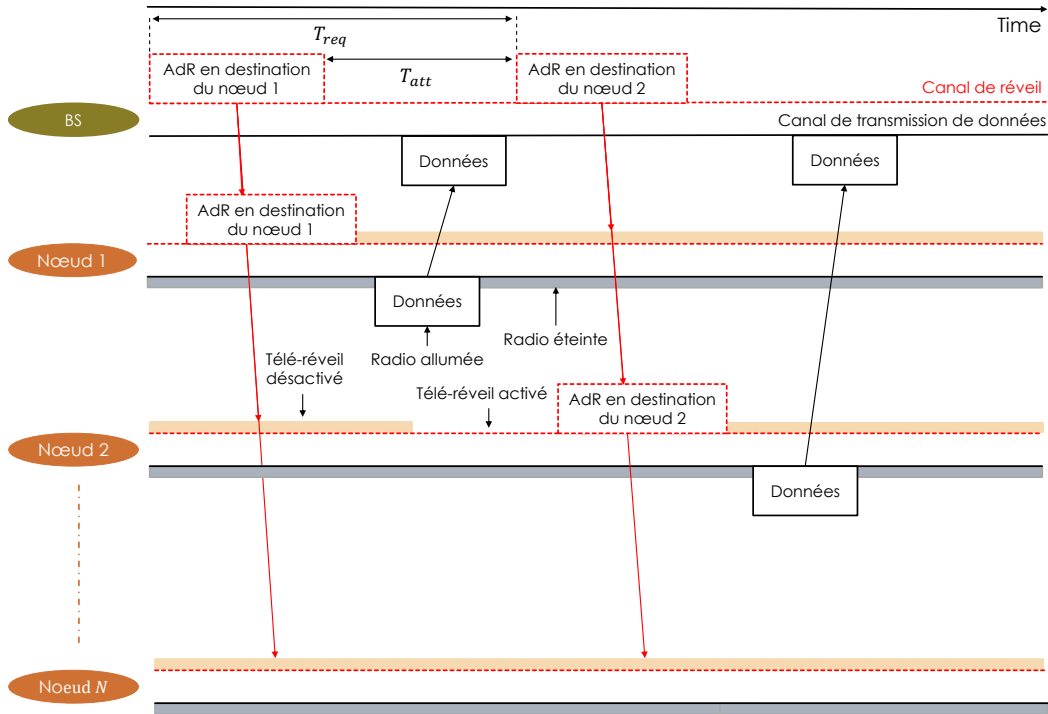


FIGURE 4.2: Principe de communication du protocole DC-DoRa.

du microcontrôleur. Cette partie pratique sera présentée plus en détails dans le chapitre suivant.

Dans le but d'évaluer les performances du protocole DC-DoRa, nous présentons tout d'abord son implémentation dans la section suivante.

## 4.4 Implémentation du protocole DC-DoRa sous OMNeT++

Comme pour le protocole DoRa, nous avons implémenté le protocole DC-DoRa sous OMNeT++ avec la librairie INET. Étant donné que ces protocoles ont un tronc commun, nous avons réutilisé les modules implémentés pour le protocole DoRa. Nous présentons dans la partie suivante les modules modifiés pour l'implémentation du protocole DC-DoRa.

### 4.4.1 Modules et fonctionnalités supplémentaires du protocole DC-DoRa

Nous avons principalement effectué deux modifications au niveau des modules du protocole DoRa.

La première modification se fait au niveau du module de la BS car elle doit envoyer le message AdR contenant un champ supplémentaire. La période d'inactivité du nœud  $T_{off}$

est calculée par ce module et elle est ensuite ajoutée dans le champ correspondant. Le fonctionnement de la BS reste inchangé par rapport au protocole DoRa.

La deuxième modification consiste à implémenter le fonctionnement du protocole DC-DoRa au niveau du module MAC du récepteur de télé-réveil. Nous avons appelé ce module DC-DoRaMacLayer dans le simulateur. En comparaison au protocole DoRa, nous ajoutons un état de sommeil dans lequel la fonction de réveil est désactivée. Un compteur temporel est également ajouté pour contrôler la durée du mode sommeil.

Avant d'entrer dans cet état de sommeil, le module DC-DoRaMacLayer envoie un message de contrôle au module de la couche physique. Ce message permet de faire transiter la radio dans un mode de sommeil. Ainsi, aucun signal radio n'est traité par le module radio dans cet état.

Dans la sous-section suivante, nous positionnons cet état de sommeil dans la machine à états finis du protocole DC-DoRa.

#### 4.4.2 Machine à états finis du protocole DC-DoRa

La machine à états finis du protocole DC-DoRa est très similaire au protocole DoRa, comme on peut le constater sur la figure 4.3.

Conformément à la description du protocole, nous avons ajouté un état de sommeil dans le module DC-DoRaMacLayer après l'envoi des données. Le module quitte cet état uniquement après la fin du compteur *wakeup\_timer*. Il retourne alors dans l'état où il peut traiter les messages AdR.

Cette implémentation n'est certes pas très différente du protocole DoRa, mais elle change fondamentalement son fonctionnement. En effet, le protocole DoRa fait partie des protocoles à la demande où chaque nœud peut être réveillé à n'importe quel moment par un message AdR. En revanche, le protocole DC-DoRa est un protocole hybride qui combine un réveil à la demande et un fonctionnement par cycle d'activité. Ainsi, les nœuds ne peuvent être réveillés qu'à certaines périodes mais le réveil s'effectue toujours à la demande à travers le message AdR.

Par la suite, nous évaluerons l'apport du protocole DC-DoRa concernant les problèmes de surécoute et d'interférences co-canal.

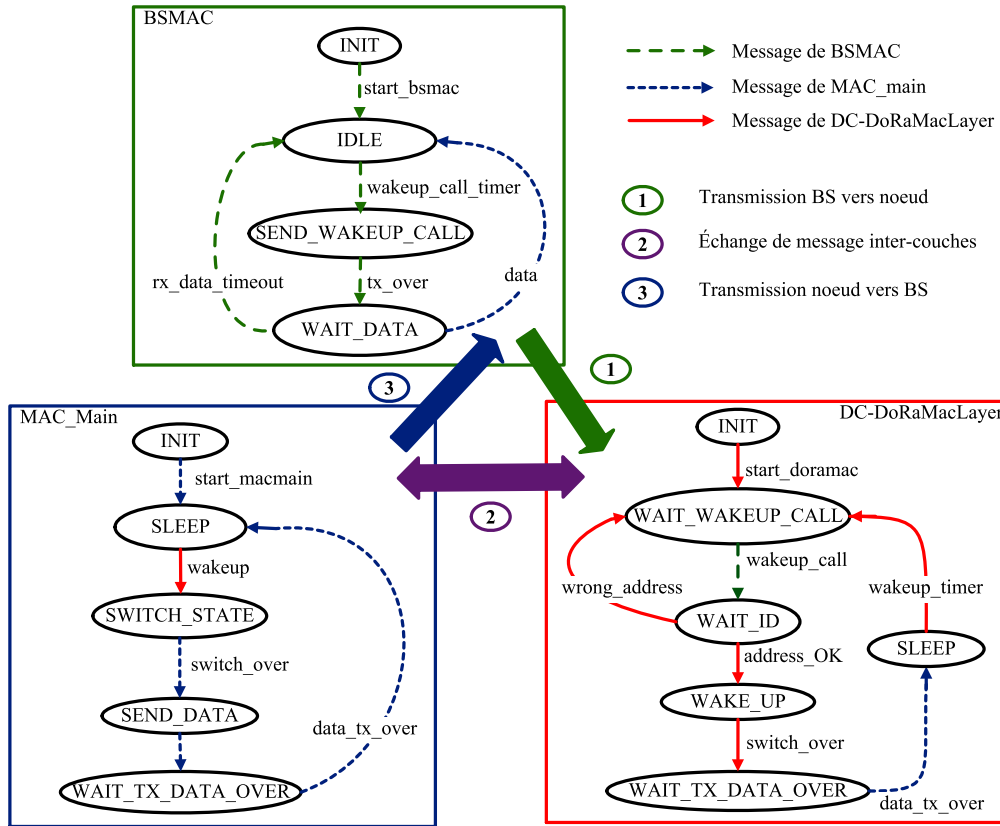


FIGURE 4.3: Machine à états finis des protocoles MAC liés au télé-réveil, incluant le protocole DC-DoRa.

## 4.5 Évaluation des performances des protocoles DoRa et DC-DoRa face à la surécoute

Dans cette section, nous traiterons le problème de surécoute en évaluant les performances du protocole DC-DoRa par rapport au protocole DoRa. Nous définirons dans un premier temps le scénario de simulation ainsi que les principaux paramètres. L'analyse des résultats pour chaque protocole nous permettra par la suite de comparer leur performance.

### 4.5.1 Scénario de simulation

Pour les simulations de cette section, nous considérons un réseau de 40 nœuds disposés de manière aléatoire sur une surface de 400 m<sup>2</sup>. Cette forte densité de nœuds permet d'accentuer le phénomène de surécoute. On présente dans le tableau 4.1 les paramètres essentiels de simulation ainsi que les paramètres liés à chaque protocole.

Le protocole DC-DoRa dispose d'un paramètre supplémentaire qui est la consommation en mode sommeil. On a un facteur de 8 entre la consommation en mode sommeil et la consommation en mode sommeil profond. Les résultats de simulations montreront si

l'utilisation du protocole DC-DoRa peut justifier cette consommation relativement élevée du mode sommeil.

Nous avons également une différence au niveau de la taille du message AdR. En effet, nous avons inclus 8 bits supplémentaires dans le message AdR pour le protocole DC-DoRa. Ces 8 bits correspondent à l'information nécessaire pour définir la période d'inactivité  $T_{off}$  au niveau des nœuds.

TABLEAU 4.1: Paramètres de simulation pour l'évaluation comparative des performances.

| Protocole               | Paramètre                            | Valeur             |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| Commun                  | Surface du réseau                    | 400 m <sup>2</sup> |
|                         | Nombre de nœuds                      | 40                 |
|                         | Taille des données                   | 100 octets         |
|                         | Capacité de la batterie              | 2900 mAh           |
|                         | Radio principale :                   |                    |
|                         | Débit binaire                        | 250 kbps           |
|                         | Consommation en mode veille          | 400 nA             |
|                         | Consommation en mode Rx              | 16.6 mA            |
| Consommation en mode Tx | 21.2 mA                              |                    |
| DoRa                    | Consommation en mode sommeil profond | 110 nA             |
|                         | Consommation en mode Rx              | 23,8 $\mu$ A       |
|                         | Débit binaire                        | 4 kbps             |
|                         | Fenêtre d'attente                    | 10 ms              |
|                         | Taille du message AdR                | 30 bits            |
| DC-DoRa                 | Consommation en mode sommeil         | 800 nA             |
|                         | Consommation en mode sommeil profond | 110 nA             |
|                         | Consommation en mode Rx              | 23,8 $\mu$ A       |
|                         | Débit binaire                        | 4 kbps             |
|                         | Fenêtre d'attente                    | 10 ms              |
|                         | Taille du message AdR                | 38 bits            |

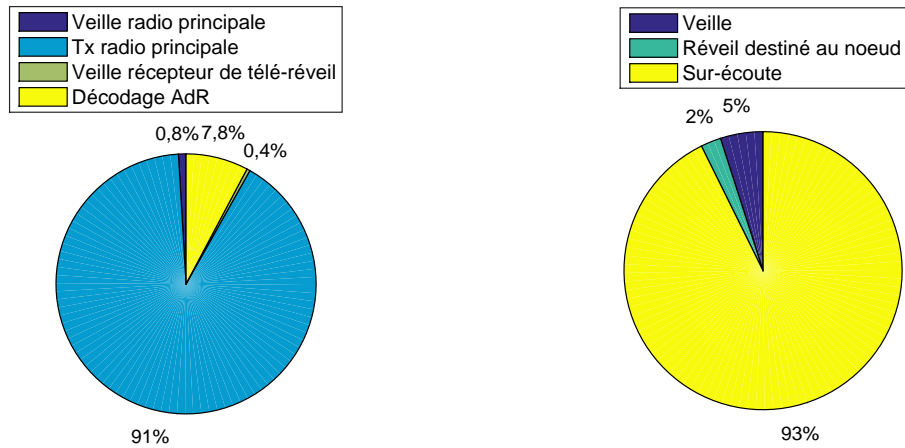
La période  $T_{req}$  n'est pas précisée dans le tableau car on effectue des simulations en faisant varier ce paramètre. Le fait de varier la période  $T_{req}$  permet de varier la fréquence de transmission des messages AdR, et par conséquent l'ampleur du phénomène de surécoute. Nous préciserons ce paramètre dans les parties suivantes avec l'analyse des résultats.

#### 4.5.2 Analyse des résultats avec le protocole DoRa

Nous étudions dans un premier temps les résultats obtenus avec le protocole DoRa.

Tout d'abord, considérons une période de requête  $T_{req} = 50$  ms. On s'intéresse à la quantité d'énergie consommée par chaque état des modules de communication du nœud, c'est-à-dire la radio principale et le récepteur de télé-réveil. Afin de mieux comparer ces valeurs, nous calculons la proportion d'énergie consommée de chaque état par rapport à la consommation totale du nœud. Nous calculons alors l'énergie  $E_e$  dépensée dans chaque état

$e$  avec la relation 4.1. En divisant cette énergie  $E_e$  par l'énergie totale consommée par le nœud, nous obtenons les résultats présentés sur la figure 4.4(a).



(a) Radio principale et récepteur de télé-réveil      (b) Récepteur de télé-réveil uniquement

FIGURE 4.4: Répartition de l'énergie consommée par les modules de communication avec le protocole DoRa.

Les résultats de la figure 4.4(a) montrent clairement le problème de surécoute. En regardant la consommation globale du nœud sur la figure 4.4(a), on s'aperçoit que 7,8 % de l'énergie consommée provient du décodage des messages AdR. La proportion du mode veille est de seulement 1,2 % et la transmission par la radio principale représente 91 % de la consommation du nœud. La consommation du récepteur de télé-réveil est censée être relativement faible par rapport à la radio principale. Or, une part d'énergie non négligeable est utilisée par le récepteur de télé-réveil lors du décodage des AdR. La figure 4.4(b) présente alors la source du problème au niveau du récepteur de télé-réveil. En effet, la surécoute représente à elle seule 93 % de l'énergie consommée par le récepteur de télé-réveil. Le mode veille et le décodage de messages AdR destinés au nœud représente respectivement 2 % et 5 % de l'énergie du récepteur. On a donc 93 % de l'énergie qui est gaspillée pour décoder d'autres AdR en destination des autres nœuds.

Toutefois, ces proportions dépendent beaucoup de la période à laquelle les nœuds sont réveillés pour l'envoi de données. Il est donc intéressant d'effectuer la même étude pour différentes périodes de requête. On choisit une période  $T_{req}$  variant entre 30 ms et 2 s tout en gardant la même taille de données. La répartition d'énergie du récepteur de télé-réveil est présentée sur la figure 4.5 pour chacune des périodes  $T_{req}$ . On constate une réduction de la part d'énergie consommée par la surécoute lorsqu'on augmente la période  $T_{req}$ . Cette part d'énergie est récupérée par le mode veille qui suit une tendance inverse à la surécoute. En revanche, la part d'énergie pour le décodage des AdR destinés au nœud reste identique quelle que soit la période de requête. Le temps passé en mode veille augmente indubitablement

en augmentant la période  $T_{req}$ , d'où la croissance de sa part d'énergie. Néanmoins, on se retrouve dans un cas où l'énergie est perdue dans le mode veille au lieu de la surécoute. Bien que l'énergie soit globalement réduite dans ce cas, on rappelle que le système est plus efficace pour les faibles périodes de requête (cf. chapitre 2). Quoi qu'il en soit, le problème de surécoute reste l'élément majeur de consommation puisque sa part d'énergie varie entre 66 et 94,5 % de la consommation du récepteur.

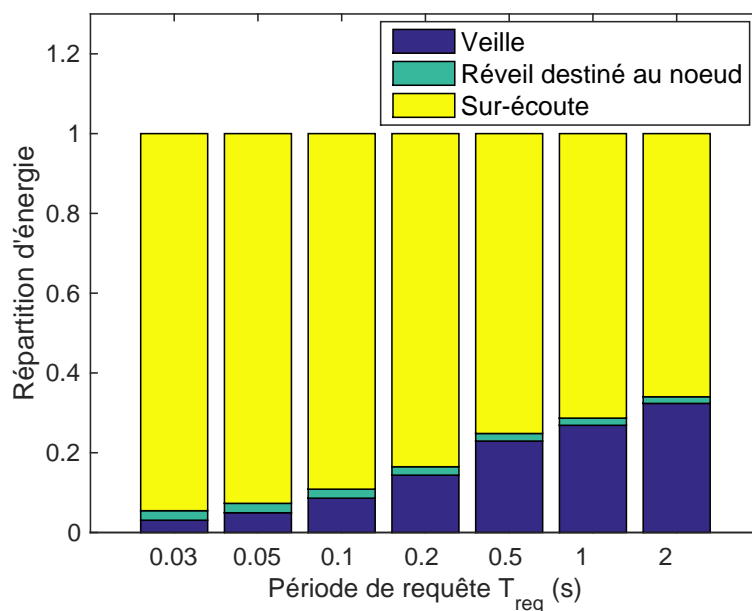


FIGURE 4.5: Répartition de l'énergie consommée par le récepteur de télé-réveil en fonction de la période de requête avec le protocole DoRa.

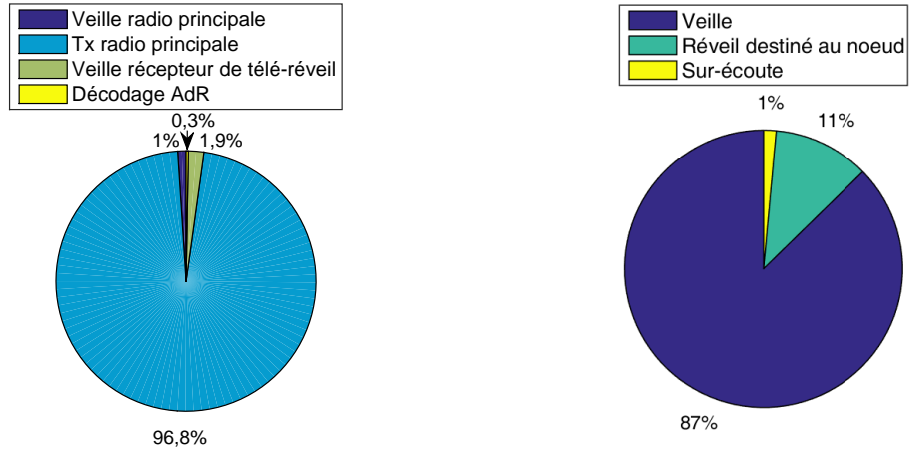
Ces résultats exposent donc les limites du protocole DoRa avec la part d'énergie consommée par le phénomène de surécoute. De plus, ces résultats montrent qu'il est bien nécessaire d'optimiser le protocole DoRa. Nous verrons dans la sous-section suivante si le protocole DC-DoRa est une solution viable à ce problème.

### 4.5.3 Analyse des résultats avec le protocole DC-DoRa

Dans cette partie, nous analysons les résultats avec le protocole DC-DoRa avec les mêmes conditions de simulation.

En premier lieu, on représente la répartition d'énergie consommée par les modules de communication sur la figure 4.6. On considère là aussi une période de requête  $T_{req} = 50$  ms. La figure 4.6(a) nous indique que l'état de transmission du module radio représente 97 % de la consommation totale du nœud, soit 6 % de plus qu'avec le protocole DoRa. La différence s'explique par une diminution de la consommation du mode décodage AdR. En effet, sa proportion d'énergie consommée passe de 7,8 % à 0,3 % en utilisant le protocole

DC-DoRa. D'après cette diminution, on peut déjà dire que le protocole DC-DoRa effectue bien son rôle fondamental avec la réduction de la surécoute. Par ailleurs, la consommation du récepteur de télé-réveil représente uniquement 2 % de la consommation du module radio principale, ce qui est très faible.



(a) Radio principale et récepteur de télé-réveil      (b) Récepteur de télé-réveil uniquement

FIGURE 4.6: Répartition de l'énergie consommée par les modules de communication avec le protocole DC-DoRa.

Puis, on représente la part d'énergie des processus du récepteur de télé-réveil sur la figure 4.6(b). On constate que la surécoute ne représente plus que 1 % de l'énergie consommée, contre 93 % précédemment avec le protocole DoRa. Le mode veille est désormais l'élément majeur de consommation avec 87 % de l'énergie consommée par le récepteur. Ce mode veille comprend à la fois le mode sommeil et le mode sommeil profond. En utilisant le protocole DC-DoRa, on supprime quasiment le problème de surécoute en remplaçant ces processus par un mode veille. C'est la raison pour laquelle la proportion d'énergie consommée par le mode veille a augmenté.

Afin d'avoir une meilleure représentativité des résultats, on varie ensuite la période de requête au niveau de la BS. La figure 4.7 donne la répartition d'énergie obtenue pour chaque valeur de  $T_{req}$ . Ainsi, on peut voir que le problème de surécoute reste très faible quelle que soit la période  $T_{req}$ . Une évolution est tout de même observée pour les autres processus. En effet, la proportion de l'énergie consommée par le mode veille augmente avec la période  $T_{req}$ , à l'inverse du processus de décodage d'AdR destiné au nœud. Les résultats sont cohérents dans la mesure où le nœud restera plus longtemps en mode veille si on l'interroge moins fréquemment.

Ces résultats montrent que la proportion d'énergie consommée par la surécoute a été pratiquement supprimée en utilisant le protocole DC-DoRa. Le protocole DC-DoRa est donc une bonne solution pour ce problème. En revanche, on ne sait pas quelle quantité



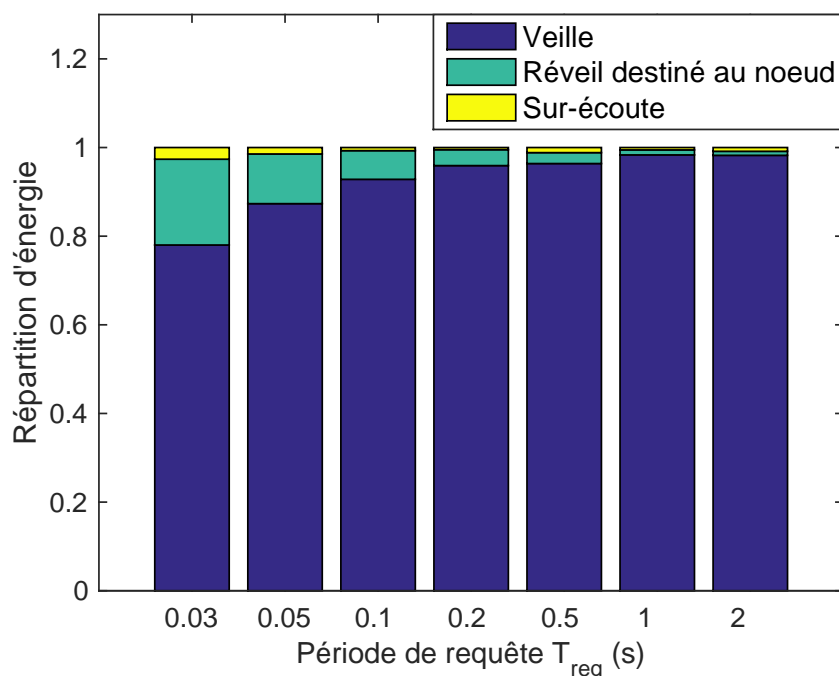


FIGURE 4.7: Répartition de l'énergie consommée par le récepteur de télé-réveil en fonction de la période de requête avec le protocole DC-DoRa.

d'énergie a été réduite à travers les précédents résultats. Dans la sous-section suivante, nous étudierons l'énergie consommée par les deux protocoles en fonction de l'ampleur du phénomène de surécoute.

#### 4.5.4 Comparaison des résultats

L'objectif de cette sous-section est de comparer les performances de chaque protocole d'un point de vue énergétique. Nous focalisons cette approche sur la consommation du récepteur de télé-réveil, puisque c'est à ce niveau que les protocoles diffèrent.

On représente alors sur la figure 4.8 la puissance moyenne consommée par le récepteur de télé-réveil en fonction de la période  $T_{req}$ . Les résultats montrent que le protocole DC-DoRa est plus efficace que le protocole DoRa pour des périodes  $T_{req}$  faibles. En effet, le problème de surécoute s'accroît lorsqu'on augmente la fréquence d'envoi des messages AdR. Comme le protocole DC-DoRa n'est quasiment pas affecté par ce problème de surécoute, la consommation du récepteur de télé-réveil augmente très peu avec la réduction de la période  $T_{req}$ . À titre de comparaison, le protocole DC-DoRa permet de diviser par 5 la puissance moyenne consommée par les nœuds pour une période  $T_{req} = 30$  ms. À l'inverse, le protocole DC-DoRa est un peu moins efficace que le protocole DoRa pour des grandes périodes  $T_{req}$ . Étant donné que le mode veille du protocole DC-DoRa consomme plus d'énergie, l'efficacité du protocole DC-DoRa diminue en augmentant la période  $T_{req}$ .

Ainsi, pour des périodes  $T_{req}$  inférieures à 1 s, il est préférable d'utiliser le protocole DC-DoRa pour éviter la perte d'énergie causée par la surécoute. Pour des périodes  $T_{req}$  supérieures à 1 s, on peut garder le protocole DoRa pour une meilleure efficacité énergétique.

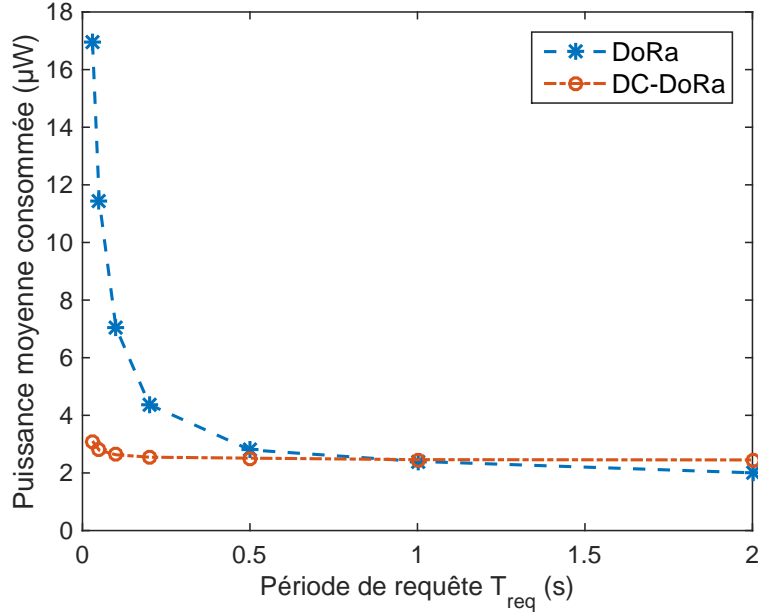


FIGURE 4.8: Puissance moyenne consommée par le récepteur de télé-réveil en fonction de la période de requête avec les protocoles DoRa et DC-DoRa.

D'une façon générale, le protocole DoRa est particulièrement adapté pour les applications de réseau qui mesure un phénomène physique lent. En revanche, le protocole DC-DoRa est beaucoup plus adapté lorsque le phénomène physique mesuré par le réseau de capteurs est très dynamique.

En résumé, l'évaluation de la répartition d'énergie a permis de quantifier la proportion d'énergie consommée par chaque composante. Dans un premier temps, nous avons pu identifier le problème de surécoute qui apparaît avec le protocole DoRa. Ensuite, nous avons montré que la surécoute est pratiquement supprimée avec le protocole DC-DoRa. Ceci entraîne une baisse de la puissance consommée par le récepteur de télé-réveil lorsque la période de requête des données est faible.

## 4.6 Évaluation des performances des protocoles DoRa et DC-DoRa face aux interférences

Cette section vise à évaluer les performances des protocoles DoRa et DC-DoRa dans un milieu présentant des interférences co-canal. De manière similaire à la section précédente,

on présentera le scénario de simulation avant d'analyser les résultats obtenus avec chaque protocole.

### 4.6.1 Scénario de simulation

Dans cette section, le scénario de simulation est relativement différent des cas précédents car nous devons y ajouter des sources d'interférence.

On considère une topologie de réseau illustré sur la figure 4.9. On distingue deux réseaux qui fonctionnent indépendamment l'un de l'autre mais qui sont déployés dans la même zone. Le premier réseau est en fait un RCSF intégrant notre système de télé-réveil. Il se compose d'une BS positionnée au centre et de  $N$  nœuds disposés aléatoirement. Le deuxième réseau est un réseau WiFi de norme 802.11g composé de  $N_{int}$  appareils qui représentent les sources d'interférence pour le RCSF. Plus spécifiquement, il se compose d'un point d'accès et de  $N_{int} - 1$  nœuds. Concernant les paramètres physiques de transmission, les deux réseaux fonctionnent dans la bande des 2,4 GHz sur le même canal. La technique de modulation est toutefois différente. Le RCSF utilise une modulation OOK pour le message AdR et une modulation OQPSK pour les données. Le réseau WiFi utilise une modulation d'amplitude en quadrature à 16 états (QAM-16).

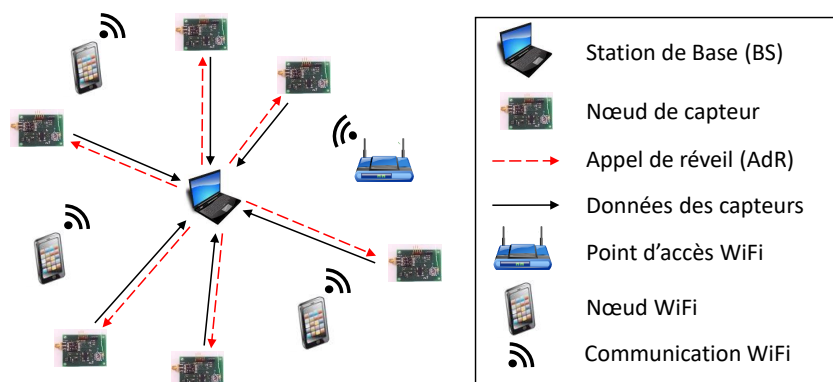


FIGURE 4.9: Topologie du réseau considéré avec des interférences provenant de sources externes.

Les nouveaux paramètres définis dans le simulateur sont présentés dans le tableau 4.2. Nous faisons varier deux paramètres au cours des simulations. Du côté du RCSF, la période de requête varie car on ne limite pas le champ d'étude à une seule application dont le trafic de données serait fixe. Au niveau du réseau WiFi, nous varions le nombre de nœuds interféreurs afin de considérer plusieurs niveaux de trafic du réseau interféreur. Ainsi, nous pouvons étudier les performances de chaque protocole dans diverses situations.

Nous avons également fait varier la taille des données et la puissance de transmission du réseau WiFi au lieu du nombre de nœuds interféreurs. Les résultats obtenus ne montraient

TABLEAU 4.2: Paramètres de simulation pour l'évaluation des interférences.

| Réseau | Paramètre                      | Valeur             |
|--------|--------------------------------|--------------------|
| Commun | Surface du réseau              | 400 m <sup>2</sup> |
|        | Fréquence porteuse             | 2,45 GHz           |
|        | Capacité de la batterie        | 2900 mAh           |
| RCSF   | Nombre de nœuds                | 10                 |
|        | Taille des données             | 800 bits           |
|        | Puissance de transmission (BS) | 100 mW             |
|        | Période de requête             | 0,1 à 20 s         |
|        | Largeur de bande               | 1 MHz              |
| WiFi   | Nombre de points d'accès       | 1                  |
|        | Nombre de nœuds                | 0 à 5              |
|        | Taille des données             | 8 kbits            |
|        | Fréquence d'envoi des données  | 1 s                |
|        | Débit binaire                  | 2 Mbps             |
|        | Largeur de bande               | 20 MHz             |
|        | Puissance de transmission      | 100 mW             |
|        | Protocole                      | 802.11g            |

pas une évolution significative des résultats, c'est pourquoi nous ne les présentons pas. La puissance de transmission des nœuds WiFi influe toutefois sur le fait qu'il puisse réveiller ou non le récepteur de télé-réveil, avec une forte dépendance vis-à-vis de la distance séparant les nœuds WiFi du récepteur de télé-réveil. Ce problème relève plutôt du déploiement de chaque réseau. Nous orientons notre étude vers une coexistence de ces réseaux avec une puissance des nœuds WiFi de 100 mW, ce qui est assez élevé pour réveiller tous les récepteurs de télé-réveil du réseau considéré.

#### 4.6.2 Analyse des résultats avec le protocole DoRa

On s'intéresse dans un premier temps à l'effet du nombre d'interféreurs sur les performances du protocole DoRa.

Nous retenons trois critères ici pour l'évaluation des performances. Dans un premier temps, l'énergie par bit consommée par les nœuds permettra d'avoir une vision globale de l'efficacité énergétique du protocole. Ensuite, le taux moyen de livraison des données présentera la fiabilité de transmission des données. Enfin, on analysera la probabilité de fausse alarme en tant qu'indicateur de l'influence des interférences sur le système. Nous faisons varier le nombre de nœuds WiFi entre 0 et 6. Concernant le RCSF avec télé-réveil intégré, la période de requête varie toujours entre 0,1 et 20 s.

Tout d'abord, l'énergie par bit est représentée sur la figure 4.10. L'influence du nombre d'interféreurs est relativement faible lorsque le trafic des communications du RCSF est assez dense. En effet, on observe une efficacité énergétique similaire lorsque la période  $T_{req}$  est

inférieure à 0,5 s, quel que soit le nombre  $N_{int}$ . Cependant, son influence est visible pour des périodes  $T_{req}$  plus élevées. Lorsque  $T_{req}$  est supérieure à 0,5 s, on constate que l'énergie par bit augmente avec le nombre  $N_{int}$ . D'un point de vue énergétique, le protocole DoRa est donc de moins en moins efficace lorsqu'on augmente le nombre d'interfereurs. Le récepteur de télé-réveil consomme moins d'énergie pour les périodes  $T_{req}$  élevées. C'est pour cette raison que l'influence des interférences y est plus visible. Dans le pire des cas, l'énergie par bit est multipliée par deux pour  $N_{int} = 6$  et  $T_{req} = 20$  s en ajoutant de l'interférence dans le réseau. Cette baisse d'efficacité énergétique pourrait s'expliquer de deux façons différentes. Soit les données sont moins bien reçues en présence d'interférences, soit le système consomme plus d'énergie en raison du traitement des interférences. Il se peut également que les deux raisons soient vraies, c'est pour cela qu'on analyse les deux critères qui suivent.

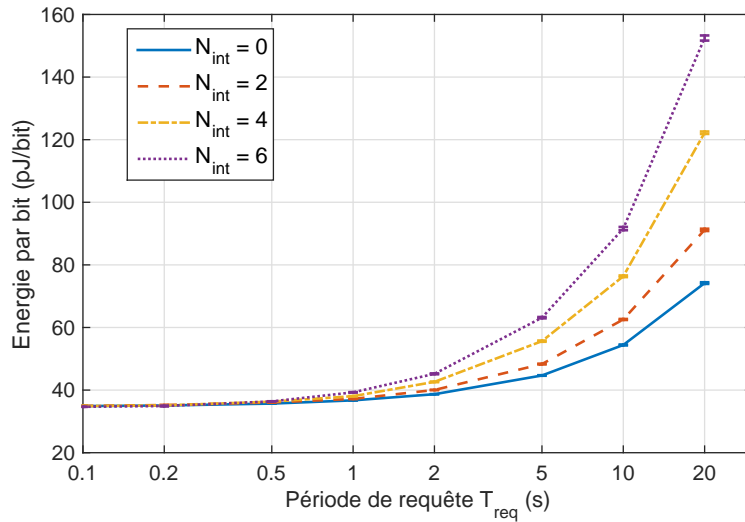


FIGURE 4.10: Évolution de l'énergie moyenne consommée par bit des nœuds en fonction de la période de requête de la BS et du nombre d'interfereurs.

Les résultats concernant le taux moyen de livraison des trames de données à la BS sont présentés sur la figure 4.11. En absence d'interférence, le taux moyen de livraison est toujours égal à 1. Pour des périodes  $T_{req}$  supérieures à 1 s, le taux de livraison est toujours égal à 1 quel que soit le nombre  $N_{int}$ . Étant donné que le trafic du RCSF est assez faible dans ces conditions, la probabilité que les interférences perturbent les transmissions est plus faible. Ensuite, on observe une baisse du taux de livraison pour des périodes  $T_{req}$  inférieures à 1 s. Globalement, le taux de livraison des trames baisse de plus en plus en augmentant le nombre d'interfereurs. Les résultats restent tout de même acceptables puisque le taux de livraison ne descend pas en dessous de 97,5 %. La fiabilité de transmission de données ne serait donc pas la cause de la baisse d'efficacité énergétique.

Pour finir, on analyse les résultats de probabilité de fausse alarme présentés sur la figure 4.12. La probabilité  $\mathbb{P}(FA)$  est toujours inférieure à 5 % lorsqu'il n'y a pas de nœuds

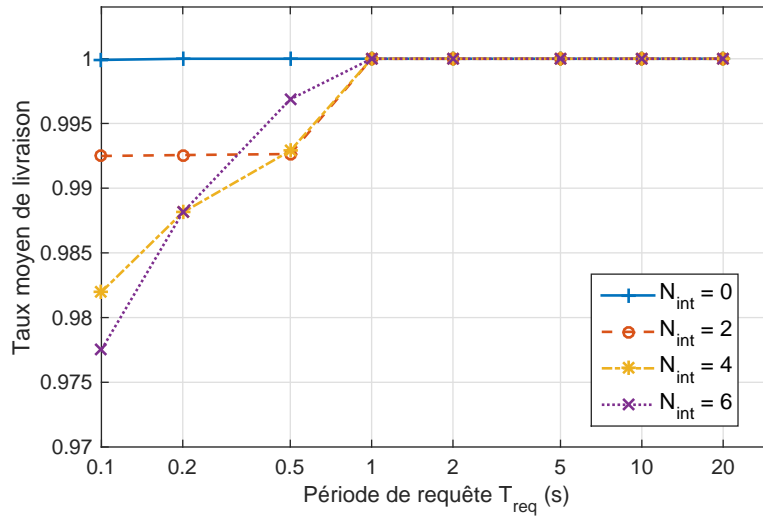


FIGURE 4.11: Évolution du taux moyen de livraison des trames de données en fonction de la période de requête de la BS et du nombre d'interféreurs.

interféreurs. En présence d'interférence, la probabilité  $\mathbb{P}(FA)$  évolue de façon logarithmique en fonction de la période  $T_{req}$ . Cette croissance s'explique par le fait que le trafic du réseau WiFi reste constant alors qu'on diminue celui du RCSF. Les fausses alarmes engendrées par le réseau WiFi deviennent alors prépondérantes par rapport aux signaux de télé-réveil du RCSF. En augmentant le nombre  $N_{int}$ , on accroît encore plus la probabilité  $\mathbb{P}(FA)$ . Ces résultats montrent que le système perd en efficacité en y ajoutant des sources d'interférence car le récepteur de télé-réveil consomme de l'énergie pour traiter ces fausses alarmes.

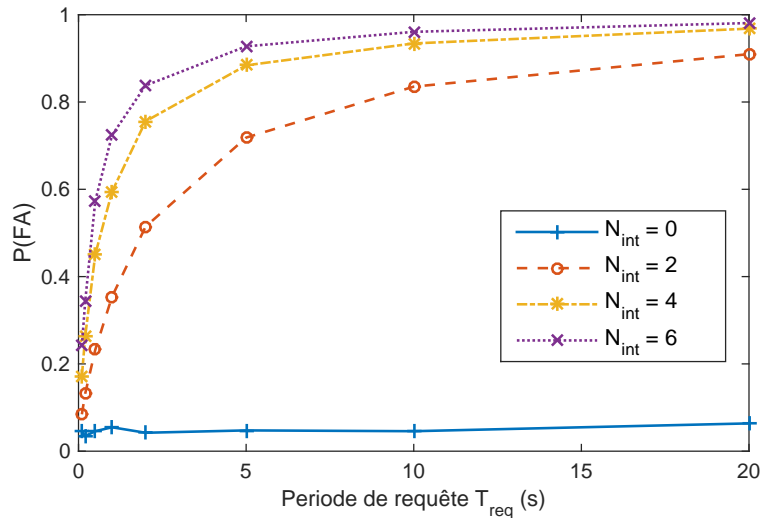


FIGURE 4.12: Évolution de la probabilité de fausse alarme en fonction de la période de requête à la BS et du nombre d'interféreurs.

Bien que ces interférences influencent très peu la fiabilité de transmission du réseau, leur impact sur l'efficacité énergétique des nœuds est assez contraignant. Dans les scénarios

présentés ici, l'efficacité peut être divisée par deux en présence d'interférences. Ces conditions s'apparentent à une situation dans laquelle le trafic du réseau interféreur est beaucoup plus intense que le trafic du réseau de capteurs, ce qui est toujours vrai dans la bande fortement encombrée des 2,4 GHz.

Afin de remédier à ce problème, on propose d'évaluer les performances du protocole DC-DoRa dans ces mêmes conditions. À la base, le protocole DC-DoRa a été conçu pour résoudre le problème de surécoute. Étant donné que ces interférences pourraient être évitées de la même manière que la surécoute, le protocole DC-DoRa pourrait tout aussi bien réduire le problème d'interférence.

### 4.6.3 Analyse des résultats avec le protocole DC-DoRa

On considère le même scénario de simulation que la partie précédente. Le protocole DC-DoRa est néanmoins choisi à la place du protocole DoRa afin de comparer leur performance.

On s'intéresse uniquement à l'efficacité énergétique pour effectuer la comparaison de performance des protocoles. On étudie dans un premier temps l'évolution de l'énergie par bit en fonction de la période  $T_{req}$  pour les deux protocoles. Les résultats sont présentés sur la figure 4.13 pour  $N_{int} = 0$  et  $N_{int} = 6$ . Sans interférences, le protocole DoRa est globalement plus efficace. Les résultats sont plus mitigés pour des faibles périodes  $T_{req}$  où le protocole DC-DoRa consomme légèrement moins d'énergie. Cette tendance s'explique par le fait que le problème de surécoute est plus prononcé pour des faibles périodes  $T_{req}$ . En présence d'interférences, le protocole DC-DoRa est plus efficace quelle que soit la période  $T_{req}$ . Dans le pire des cas énoncé précédemment, le protocole DC-DoRa réduit de 46 % l'énergie par bit consommée par les nœuds, comparé au protocole DoRa. Dans ces mêmes conditions, on rappelle que le protocole DoRa a augmenté de 50 % la consommation des nœuds en présence des interféreurs. Le protocole DC-DoRa a donc quasiment contrebalancé cette perte d'efficacité. On peut en déduire que le protocole DC-DoRa réduit bien le problème d'interférence.

Afin de quantifier cette réduction, on représente sur les figures 4.14 et 4.15 la répartition de l'énergie consommée par le récepteur de télé-réveil pour chaque protocole. On considère le cas où  $N_{int} = 6$  pour avoir une meilleure indication de l'efficacité face aux interférences. La proportion d'énergie consommée par les interférences est calculée de la même manière que dans la section 4.2.1. Les interférences sont comptabilisées à l'aide de la probabilité de fausses alarmes  $\mathbb{P}(FA)$ .

Tout d'abord, la surconsommation causée par l'interférence avec le protocole DoRa est présentée sur la figure 4.14. De plus, cette consommation augmente avec la période  $T_{req}$ ,

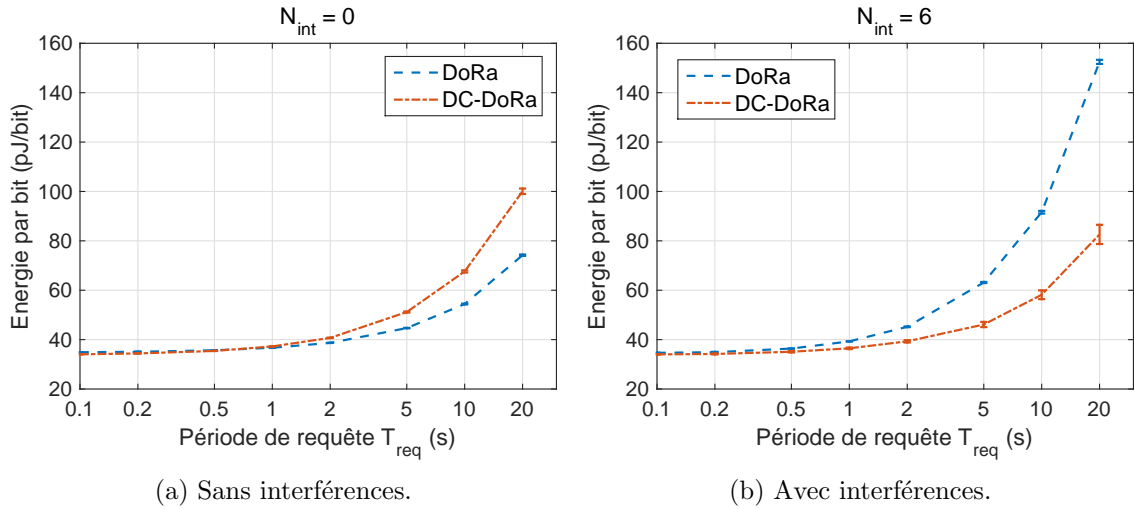


FIGURE 4.13: Évolution de l'énergie moyenne consommée par bit des nœuds en fonction de la période de requête à la BS avec les protocoles DoRa et DC-DoRa.

avec une variation comprise entre 33 % et 65 % de l'énergie du récepteur. Par ailleurs, le problème de surécoute est toujours existant dans le scénario considéré ici. La consommation causée par la surécoute varie entre 0,6 % et 51 %, son effet est plus marqué pour les faibles périodes  $T_{req}$ . Enfin, la consommation cumulée du mode veille et de l'écoute utile varie entre 16 % et 34 %. Au vu de ces proportions, on peut comprendre la perte d'efficacité du protocole DoRa dans ces conditions.

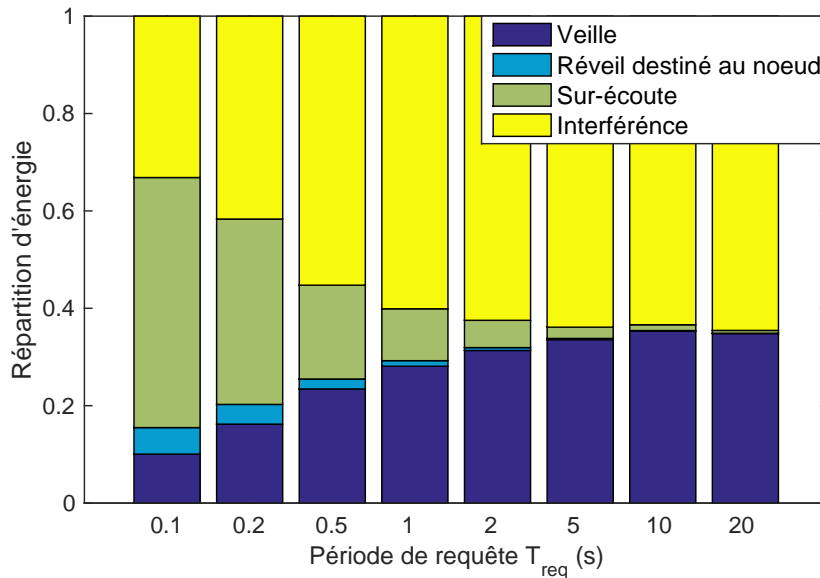


FIGURE 4.14: Répartition de l'énergie consommée par le récepteur de télé-réveil avec le protocole DoRa, en présence d'interféreurs ( $N_{int} = 6$ ).

Ensuite, la répartition d'énergie du récepteur de télé-réveil avec le protocole DC-DoRa est présentée sur la figure 4.15. On constate une très nette réduction des deux problèmes. La proportion d'énergie consommée par les interférences varie entre 6 % et 12 %, soit une



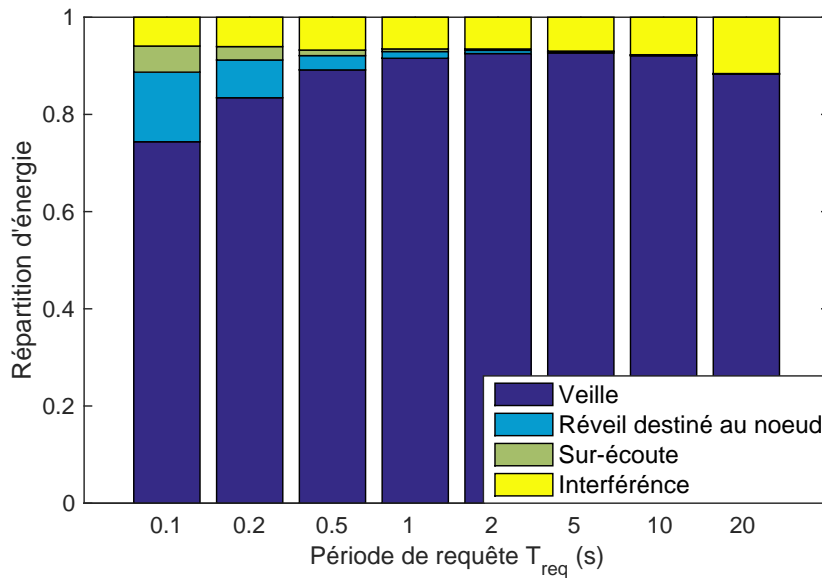


FIGURE 4.15: Répartition de l'énergie consommée par le récepteur de télé-réveil avec le protocole DC-DoRa, en présence d'interfereurs ( $N_{int} = 6$ ).

réduction d'un facteur 5 en utilisant le protocole DC-DoRa. Les interférences affectent le récepteur de télé-réveil dans la période où sa fonctionnalité de télé-réveil est activée. En diminuant cette période active, on pourrait réduire encore plus l'effet des interférences. On risquerait toutefois de diminuer la fiabilité du RCSF puisque les nœuds pourraient rater un message AdR. Les résultats montrent donc que le protocole DC-DoRa permet de réduire considérablement l'énergie consommée par les interférences.

Dans cette sous-section, nous avons évalué les performances du protocole DC-DoRa en variant la période de requête  $T_{req}$  et pour un nombre fixe de nœuds interféreur  $N_{int}$ . Dans la partie suivante, nous comparons les performances de chaque protocole en variant le nombre  $N_{int}$ .

#### 4.6.4 Comparaison des résultats

Nous étudions ici l'évolution de l'énergie moyenne consommée par bit des nœuds en fonction du nombre de nœuds interféreur  $N_{int}$ . Cette étude sert à montrer si la réduction de consommation d'énergie par le protocole DC-DoRa est fixe ou bien si elle varie en fonction des interférences.

Les résultats sont présentés sur la figure 4.15 pour une période  $T_{req} = 5$  s. La consommation d'énergie par bit augmente de façon linéaire avec le nombre  $N_{int}$  pour le protocole DoRa. À l'exception de  $N_{int} = 0$ , on observe une évolution similaire pour le protocole DC-DoRa. L'énergie consommée par les nœuds est bien entendu inférieure avec le protocole DC-DoRa,

avec un écart qui augmente avec le nombre  $N_{int}$ . L'utilisation du protocole DC-DoRa est donc de plus en plus avantageuse avec une taille du réseau interféreur qui augmente.

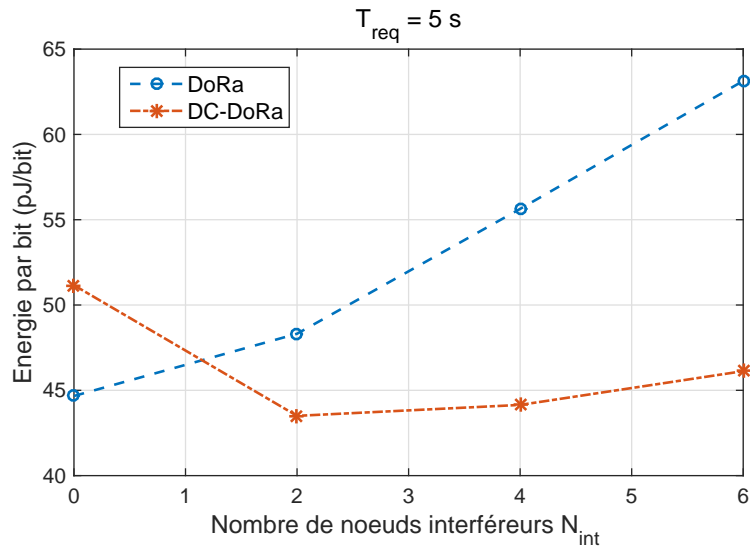


FIGURE 4.16: Évolution de l'énergie moyenne consommée par bit des nœuds en fonction du nombre de nœuds interféreurs avec les protocoles DoRa et DC-DoRa.

Ces résultats montrent bien qu'il y a uniquement deux cas de figure à considérer : un milieu avec ou sans interférences co-canal. Dans un milieu sans interférences, on préconisera l'utilisation du protocole DoRa car le protocole DC-DoRa y augmente l'énergie consommée par bit des nœuds de 13 %. Dans un milieu avec interférences, il est préférable d'utiliser le protocole DC-DoRa car l'énergie par bit croît 5,7 fois plus rapidement avec le nombre de nœuds interféreurs en utilisant le protocole DoRa. Le protocole DC-DoRa est donc toujours sensible aux interférences mais dans une moindre mesure que le protocole DoRa.

## 4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité les problèmes de surécoute et d'interférences co-canal. Tout d'abord, nous avons expliqué dans quel contexte interviendraient ces problèmes. Nous avons ensuite proposé le protocole DC-DoRa en tant que solution potentielle à ces problèmes. L'implémentation de ce protocole DC-DoRa a été effectuée sur la même plateforme de simulation que le protocole DoRa.

Les résultats obtenus avec le protocole DoRa ont montré que la surécoute et les interférences peuvent réduire l'efficacité énergétique du système de télé-réveil. Le système de télé-réveil reste tout de même fonctionnel malgré ces problèmes. En effet, la fiabilité de transmission des données est peu perturbée par ces problèmes. Néanmoins, l'énergie consommée pour rejeter la surécoute ou les interférences est la cause de cette baisse d'efficacité.

Il était donc nécessaire d'optimiser le protocole DoRa pour résoudre ou diminuer l'ampleur de ces problèmes.

Le protocole DC-DoRa est un protocole hybride qui ajoute un fonctionnement par cycle d'activité par rapport au protocole DoRa. Ce mécanisme permet de désactiver la fonctionnalité de télé-réveil pendant les périodes d'inactivité du récepteur. Ainsi, le récepteur évite la surécoute tout en diminuant la réception de signaux en provenance de sources d'interférence.

Une étude comparative des performances de chaque protocole a ensuite été menée pour valider notre approche. Les résultats obtenus sont très concluants au regard des performances du protocole DC-DoRa. En effet, le protocole DC-DoRa permet de réduire d'un facteur 5 la proportion d'énergie consommée à cause des interférences. Pour ce qui est de la surécoute, elle est pratiquement supprimée en utilisant le protocole DC-DoRa. Il permet donc de réduire considérablement l'énergie consommée par la surécoute et les interférences, tout en gardant une qualité de service identique.

Il faut toutefois utiliser le protocole DC-DoRa dans des conditions spécifiques où le problème de surécoute ou d'interférences co-canal serait présent. En absence de ces problèmes, le protocole DoRa reste plus efficace au niveau de la consommation énergétique des nœuds. Cela s'explique par le fait que le fonctionnement par cycle d'activité du protocole DC-DoRa possède un coût énergétique supplémentaire.

## Chapitre 5

# Mise en œuvre expérimentale du système et des protocoles de télé-réveil

### Table des matières

---

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.1   | Introduction . . . . .   | 122 |
| 5.2   | Présentation des matériels utilisés et développés . . . . .                  | 123 |
| 5.2.1 | Développement de l'émetteur de télé-réveil . . . . .                         | 123 |
| 5.2.2 | Développement du récepteur de télé-réveil . . . . .                          | 126 |
| 5.2.3 | Programmation du microcontrôleur . . . . .                                   | 132 |
| 5.2.4 | Présentation des antennes (émission) et de la rectenna (réception) . . . . . | 135 |
| 5.2.5 | Présentation des modules radio . . . . .                                     | 136 |
| 5.2.6 | Récapitulatif des matériels . . . . .  | 138 |
| 5.3   | Validation expérimentale du dispositif de télé-réveil . . . . .              | 138 |
| 5.3.1 | Réponse temporelle de la rectenna . . . . .                                  | 139 |
| 5.3.2 | Mesure analogique de la tension délivrée par la rectenna . . . . .           | 142 |
| 5.3.3 | Lecture numérique du signal par le microcontrôleur . . . . .                 | 143 |
| 5.3.4 | Décodage du message par UART . . . . .                                       | 144 |
| 5.3.5 | Conclusion . . . . .   | 146 |
| 5.4   | Validation expérimentale des protocoles de télé-réveil . . . . .             | 147 |
| 5.4.1 | Scénario de validation expérimentale . . . . .                               | 147 |
| 5.4.2 | Validation expérimentale du protocole DoRa . . . . .                         | 148 |
| 5.4.3 | Validation expérimentale du protocole DC-DoRa . . . . .                      | 150 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.4.4 | Comparaison entre l'expérimentation et la simulation . . . . .                         | 151 |
| 5.4.5 | Conclusion . . . . .   | 152 |
| 5.5   | Mesure des caractéristiques et optimisation énergétique du système de télé-réveil      | 153 |
| 5.5.1 | Mesure de la sensibilité du récepteur de télé-réveil . . . . .                         | 153 |
| 5.5.2 | Mesure de la portée de télé-réveil . . . . .   | 155 |
| 5.5.3 | Méthode de mesure de la consommation énergétique du récepteur de télé-réveil . . . . . | 157 |
| 5.5.4 | Mesure statique de consommation de courant du récepteur de télé-réveil                 | 160 |
| 5.5.5 | Mesure et optimisation de la consommation énergétique du micro-contrôleur . . . . .    | 164 |
| 5.6   | Comparaison des résultats avec la littérature . . . . .                                | 167 |
| 5.7   | Conclusion . . . . .   | 171 |

---

## 5.1 Introduction

Ce chapitre présente la mise en œuvre expérimentale du système et des protocoles de télé-réveil. L'objectif principal est de valider la mise en pratique des protocoles DoRa et DC-DoRa. L'expérimentation permet également de vérifier la viabilité du système de télé-réveil en caractérisant les performances du récepteur.

Dans un premier temps, nous présenterons les matériels qui ont été utilisés et développés pour valider notre approche. Tout d'abord, l'émetteur de télé-réveil sera présenté. Cet émetteur a été développé pour réveiller les prototypes du récepteur de télé-réveil. Nous avons développé et optimisé trois prototypes du récepteur de télé-réveil. Ils seront présentés pour montrer son évolution au cours du développement. En effet, nous avons démarré avec une version platine d'essai contenant uniquement le microcontrôleur pour finir avec une carte électronique complète. La carte électronique est la version la plus élaborée car elle offre plusieurs possibilités d'utilisation. De plus, ces prototypes sont présentés car la validation et les résultats ont été obtenus avec chacun d'eux.

Nous validerons ensuite par étapes le fonctionnement de notre système de télé-réveil. Tout d'abord, nous étudierons la réponse temporelle de la rectenna pour calculer le débit maximal de réception. Puis, nous présenterons les résultats concernant le traitement du signal de réveil par le microcontrôleur. De plus, la fonctionnalité d'adressage sera validée en montrant que le récepteur de télé-réveil est capable de décoder un message en provenance de l'émetteur de télé-réveil.

Puis, les protocoles DoRa et DC-DoRa seront implémentés sur la plateforme expérimentale afin de valider le principe de communication des protocoles. Nous proposerons également

une validation croisée entre la simulation et l'expérimentation, bien que ces deux approches n'aient pas le même objectif. En effet, la simulation permet de s'affranchir de l'aspect matériel pour évaluer les performances d'un réseau incorporant un grand nombre de nœuds. En revanche, la partie expérimentale se focalise essentiellement à valider le principe de communication entre la BS et un nœud. Par ailleurs, certaines caractéristiques mesurées telles que la sensibilité de réception et la consommation de courant sont injectées dans le simulateur afin de le rendre plus réaliste.

Enfin, nous présenterons les résultats de mesure des caractéristiques du système de télé-réveil. Ces mesures permettront de comparer les performances de notre approche avec ceux de la littérature. Par ailleurs, on analysera le choix de la fréquence d'horloge du microcontrôleur. Ce paramètre influe beaucoup sur l'énergie consommée par le système ainsi que sa réactivité. Le fait de choisir la bonne fréquence d'horloge permet d'optimiser la consommation énergétique du microcontrôleur, et donc du récepteur de télé-réveil.

## 5.2 Présentation des matériels utilisés et développés

Dans le cadre du développement de notre banc expérimental du système de télé-réveil, nous présentons les matériels utilisés et développés dans cette section. Cette description du matériel permet également d'assurer une reproductibilité des résultats tout en précisant le contexte dans lequel les résultats ont été obtenus.

### 5.2.1 Développement de l'émetteur de télé-réveil

Dans cette section, l'émetteur de télé-réveil que nous avons développé est présenté. Son rôle est de transmettre les messages AdR en suivant le protocole DoRa ou DC-DoRa.

Afin de réaliser l'émetteur de télé-réveil, on utilise le matériel USRP-2922 (*Universal Software Radio Peripheral*), combiné à un PC disposant du logiciel LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*). Ce matériel USRP a été choisi en raison de la plage de fréquence porteuse disponible, allant de 400 MHz à 4,4 GHz. Le prototype de l'émetteur est donc créé par le biais de l'USRP pour l'aspect matériel et de LabVIEW pour l'aspect logiciel.

Afin de contrôler le matériel USRP, il est nécessaire de développer un instrument virtuel noté VI<sup>1</sup> sous LabVIEW qui contiendra le programme sous forme de schéma fonctionnel. La combinaison de LabVIEW et de l'USRP forme ainsi une plate-forme de radio définie par logicielle, aussi connue sous le nom de SDR<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Abréviation anglaise : *Virtual Instrument*.

<sup>2</sup>Abréviation anglaise : *Software Defined Radio*.



FIGURE 5.1: Le matériel NI USRP-2922 [112].

La programmation sous LabVIEW s'effectue de manière graphique en établissant le schéma fonctionnel dans la face arrière du VI. On présente notre schéma fonctionnel du VI sur la figure 5.2. On peut y distinguer une boucle principale pour l'envoi de plusieurs messages AdR. À l'extérieur de la boucle, le programme initialise et configure la communication avec le matériel USRP pour l'envoi des signaux RF. À l'intérieur de la boucle, le message est d'abord codé avec la génération des bits. Le message est ensuite modulé en amplitude (ASK) pour former le signal à transmettre. On a également ajouté des modules pour retranscrire le signal sous forme graphique sur notre face avant du VI.

Les paramètres des différents modules peuvent être définis de façon constante ou variable à travers l'interface de la face avant du VI. On présente dans le tableau 5.1 les paramètres constants définis dans la face arrière du VI. Le taux d'échantillonnage I/Q est la vitesse à laquelle les données I/Q sont échantillonnées. En divisant le taux d'échantillonnage par le nombre d'échantillons par symbole, on obtient le nombre de symboles par seconde. Pour une modulation OOK, un bit est représenté par un symbole. On obtient donc le débit binaire souhaité en jouant sur le taux d'échantillonnage I/Q et le nombre d'échantillons par seconde. Les paramètres présentés dans le tableau 5.1 nous donnent un débit binaire de 4 kbps.

TABLEAU 5.1: Paramètres de la face arrière du VI sous LabVIEW.

| Paramètre                          | Valeur       |
|------------------------------------|--------------|
| Adresse IP de l'USRP               | 192.168.10.2 |
| Fréquence porteuse                 | 2,45 GHz     |
| Type de modulation                 | ASK          |
| Nombre de niveaux de la modulation | 2 (OOK)      |
| Taux d'échantillonnage I/Q         | 200 kHz      |
| Échantillons par symbole           | 50           |

La face avant du VI est l'interface qui permet à un utilisateur d'interagir avec le VI. On représente la face avant de notre VI sur la figure 5.3. Il comprend les paramètres d'entrées que nous avons choisi, un affichage graphique de la forme d'onde du signal émis et également un affichage d'erreurs.

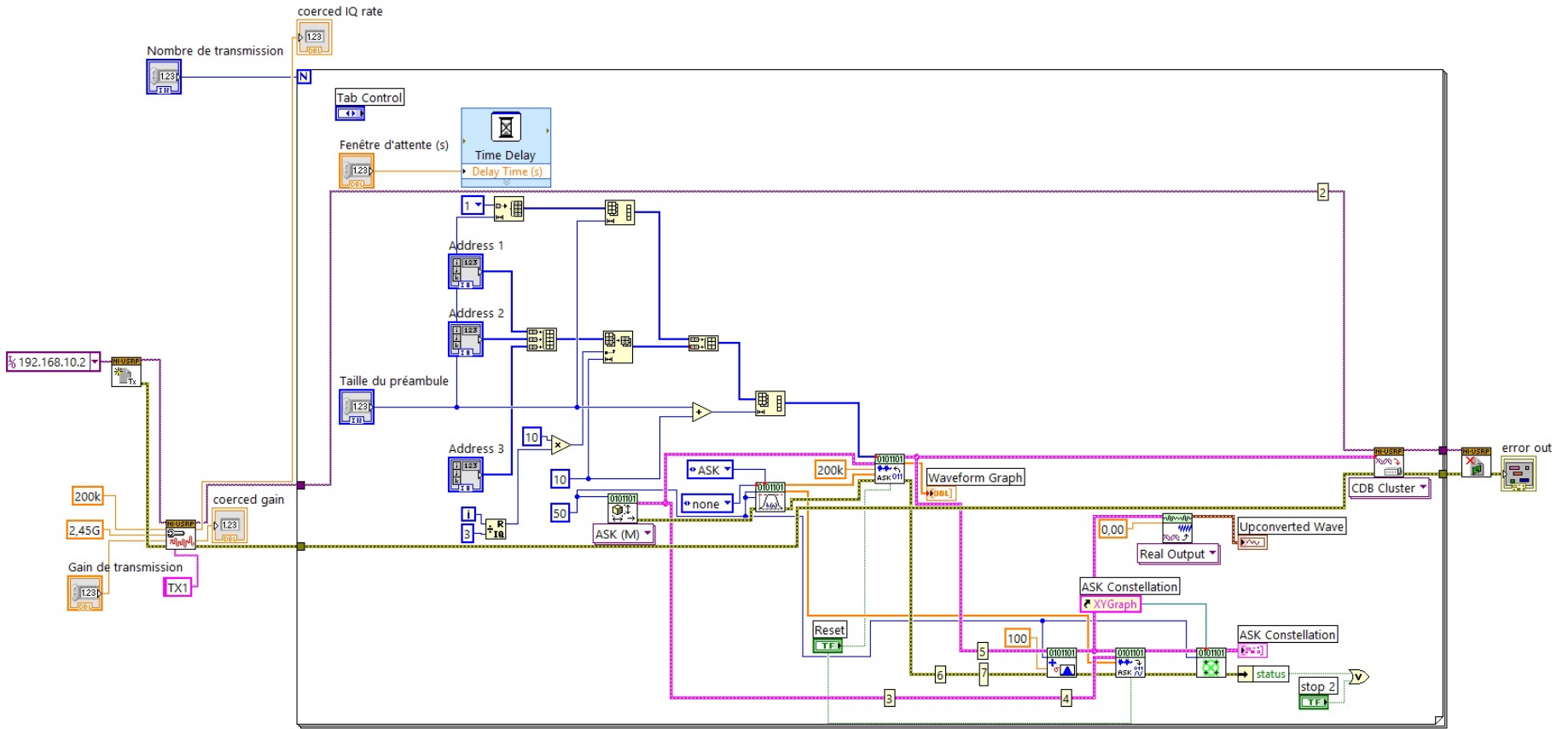


FIGURE 5.2: Schéma fonctionnel du VI (face arrière).



Les paramètres à définir dans la face avant sont les suivants :

- Adresse des nœuds à interroger sous forme binaire (8 bits), 3 adresses distinctes peuvent être définis actuellement bien qu'il soit concevable d'en rajouter ;
- Nombre de transmissions des messages AdR ;
- Fenêtre d'attente en secondes, c'est le temps entre chaque envoi des messages AdR ;
- Gain de transmission compris entre 0 dB et 31 dB, la puissance de transmission maximale correspondante est de 100 mW ;
- Taille du préambule du message AdR en bits, il doit être au minimum de 22 bits afin que le récepteur de télé-réveil soit prêt à traiter le reste du message.

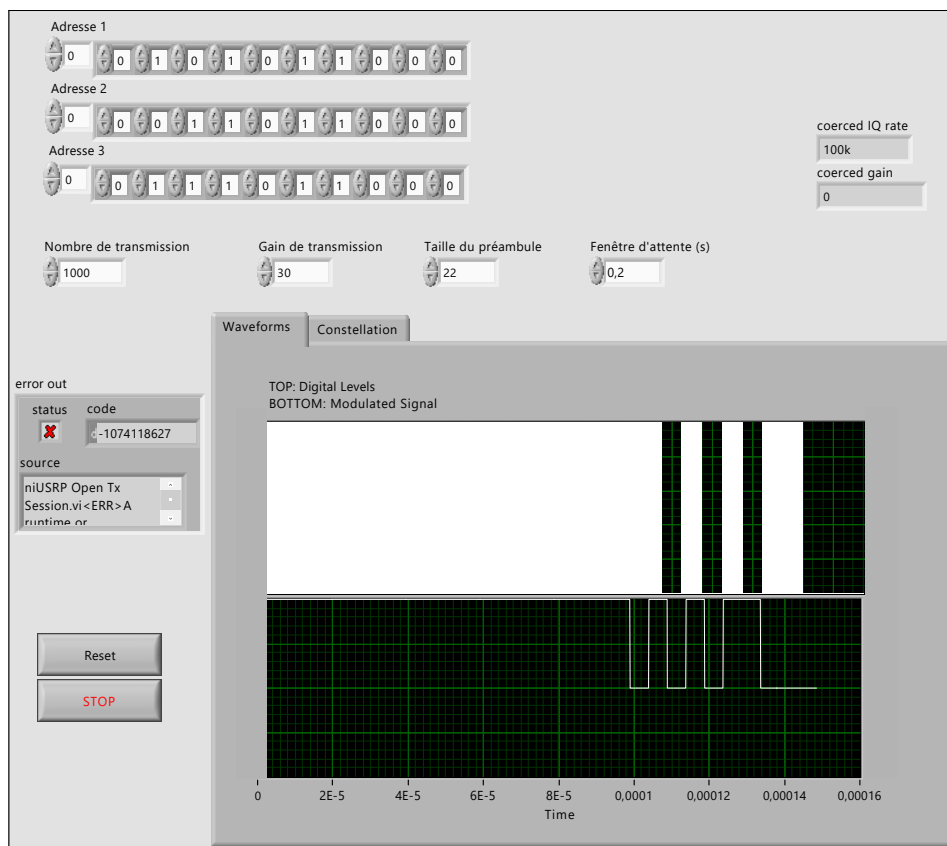


FIGURE 5.3: Face avant du VI pour l'entrée des paramètres.

Les messages envoyés par cet émetteur sont destinés à des récepteurs de télé-réveil qu'on présentera dans la section suivante.

### 5.2.2 Développement du récepteur de télé-réveil

On présente ici les différents prototypes du récepteur de télé-réveil qui ont été conçus et réalisés. Les résultats présentés dans ce mémoire ont été obtenus à partir de chacun des prototypes, ce qui explique pourquoi nous les décrivons. Nous présenterons ces prototypes du plus simple au plus complet.

Une première version a été réalisée avec une carte Arduino Uno car elle facilite grandement le développement d'un premier prototype. Ce premier prototype a permis de valider le fonctionnement du système de télé-réveil sans se préoccuper d'une efficacité énergétique optimale. La plateforme Arduino a également facilité la prise de mesure et le débogage du premier programme.

Ensuite, nous avons développé notre système sur un microcontrôleur PIC24F pour obtenir une meilleure efficacité énergétique. Le système a dans un premier temps été développé sur une platine d'expérimentation. Cette deuxième version du prototype a permis de tester le microcontrôleur dans notre système. On a également pu mesurer la consommation énergétique du PIC24F uniquement à l'aide de cette version platine.

Enfin, nous avons finalisé le développement du prototype par une carte électronique avec circuit imprimé. Cette carte a été réalisée dans le cadre d'un partenariat avec le Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes (LCIS) à Valence.

### 5.2.2.1 Prototype 1 : platine d'essai - ATmega328P

Nous décrivons ici le prototype 1 du récepteur de télé-réveil. Ce prototype utilise un microcontrôleur ATmega328P monté sur une platine d'essai.

Ce prototype 1 a été réalisé à partir d'une carte Arduino. On a extrait le microcontrôleur ATmega328P de la carte Arduino pour utiliser uniquement le microcontrôleur. L'utilisation de l'ATmega328P seul sans toute la carte Arduino permet de réduire la consommation énergétique. On connecte également le port UART de l'ATmega328P à une carte Arduino (qui ne possède pas de microcontrôleur). Cette connexion fait office d'interface de communication entre l'ATmega328P et le PC. Trois diodes électroluminescentes (LED) sont branchées sur des sorties digitales pour exprimer le bon fonctionnement du protocole DoRa. La platine d'essai est illustrée sur la figure 5.4.

Étant donné qu'on utilise un microcontrôleur extrait de la carte Arduino, une manipulation supplémentaire est nécessaire pour le rendre fonctionnel. On doit flasher une autre séquence d'initialisation<sup>3</sup> pour que le microcontrôleur puisse fonctionner avec l'oscillateur interne à 8 MHz [113]. Par défaut sur la carte Arduino, il utilise un oscillateur externe à 16 MHz. En connectant cet oscillateur à notre ATmega328P, on peut flasher une autre séquence d'initialisation à partir du logiciel Arduino. Le moyen le plus simple aurait été d'avoir un ATmega328P vierge, c'est-à-dire sans séquence d'initialisation.

---

<sup>3</sup>De l'anglais *bootloader*.

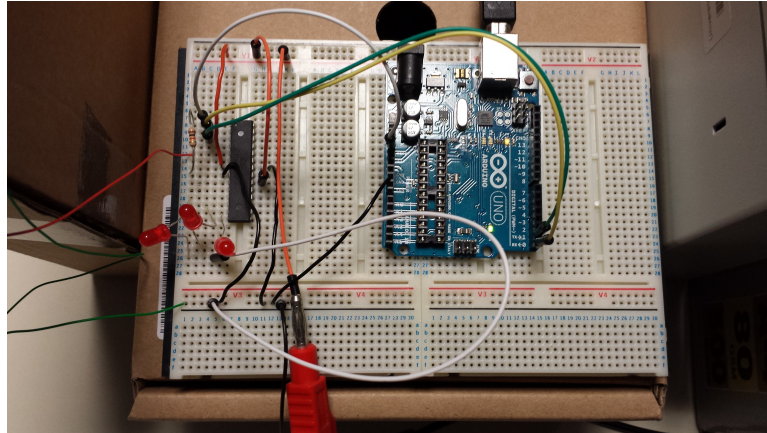


FIGURE 5.4: Photographie de la platine d'essai pour le microcontrôleur ATmega328P.

### 5.2.2.2 Prototypage 2 : platine d'essai - PIC24F

L'inconvénient de l'ATmega328P est sa consommation énergétique trop élevée. Par la suite, on change de microcontrôleur pour le PIC24F16KA102 qui fait partie des microcontrôleurs à ultra-basse consommation. Les PIC24F possèdent une architecture 16 bits et peuvent effectuer jusqu'à 16 millions d'instructions par seconde (MIPS). La technologie XLP (*Extremely Low-Power technology*) permet au microcontrôleur de descendre jusqu'à 20 nA de consommation en mode veille.

D'après le document technique du PIC24F ([97], p. 17), un minimum de connexions est nécessaire afin de rendre fonctionnel le microcontrôleur. On utilise des condensateurs de découplage à 100 nF entre la masse et la tension d'entrée pour stabiliser l'alimentation du microcontrôleur. La broche  $\overline{MCLR}$  est reliée à la tension d'alimentation par le biais d'un circuit RC pour éviter des redémarrages non souhaités lors des baisses de tension. Ces connexions suffisent pour faire fonctionner correctement le PIC24F. On connecte ensuite le réseau de rectenna (présenté en section 5.2.4) au PIC24F. La tension de sortie  $V_{DC}$  du réseau de rectenna est reliée aux broches U2RX et INT0 du PIC24F. La broche INT0 est utilisée pour réveiller le microcontrôleur avec le préambule du message AdR. L'adresse du message AdR est ensuite décodée à partir de la broche U2RX, qui correspond au port de réception du deuxième module UART. Le schéma du circuit du récepteur de télé-réveil est ainsi présenté sur la figure 5.5.

Nous avons conçu le circuit du récepteur de télé-réveil sur une platine de développement. Cette platine est illustrée sur la figure 5.6 avec le réseau de rectenna utilisé. Cette version platine nous permet de prendre facilement des mesures car on a accès à toutes les broches du microcontrôleur. Des composants peuvent également être ajoutés ou changés sans avoir à effectuer des soudures.

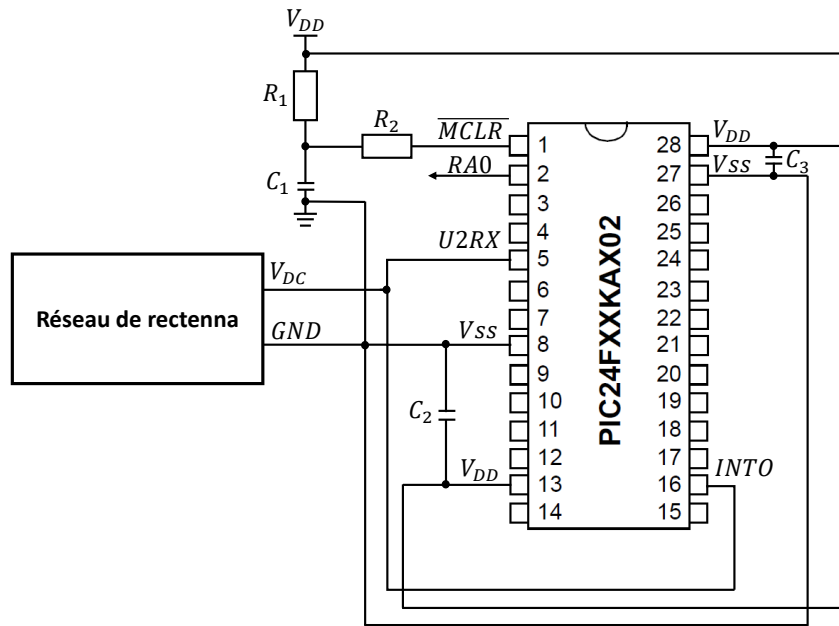


FIGURE 5.5: Circuit du récepteur de télé-réveil avec le PIC24F.  
 $C_1 = 10 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 100 \text{ nF}$ ,  $C_3 = 100 \text{ nF}$ ,  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 470 \Omega$ .

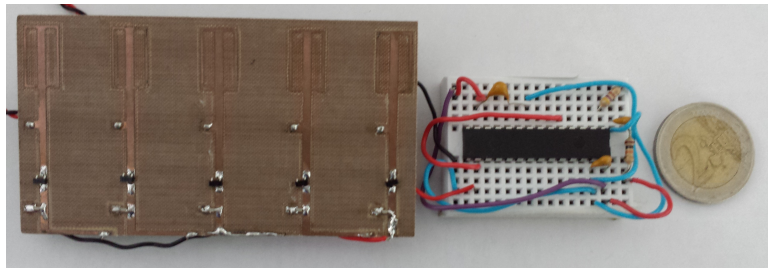


FIGURE 5.6: Photographie de la platine d'essai pour le microcontrôleur PIC24F.

La platine d'essai du récepteur de télé-réveil nous a permis d'effectuer des mesures concluantes, notamment pour consommation d'énergie du microcontrôleur (cf. section 5.5.4). L'étape suivante a été de réaliser une carte électronique du système.

### 5.2.2.3 Prototypage 3 : carte électronique - PIC24F

Les deux prototypes précédents sont uniquement des récepteurs de télé-réveil. La carte électronique comprend le récepteur de télé-réveil mais également la radio principale de communication, à l'image de la configuration 2 de l'architecture du nœud présentée en section 2.2. La carte électronique peut également être utilisée pour la configuration 1 en déconnectant le module radio principal.

Cette carte a été effectuée en collaboration avec le LCIS. Pour la réalisation de cette carte, nous avons utilisé EAGLE 7.5 qui est un logiciel de conception assisté par ordinateur.

Tout d'abord, nous avons conçu le schéma du circuit électronique présenté sur la figure 5.7. Les composants principaux du circuit sont un microcontrôleur PIC24F, un comparateur TLV3691 [114], un module radio A2500R24C [115] et un récepteur Powercast P2110 [116]. Le récepteur Powercast a été ajouté à notre circuit pour de futurs travaux. Il peut être sélectionné à la place de la rectenna pour assurer la fonction de convertisseur RF/DC. Le récepteur Powercast dispose également d'un module de gestion d'énergie pour stocker l'énergie dans un condensateur. Un connecteur ICSP (*In-Circuit Serial Programming*) est ajouté pour permettre la programmation du PIC24F après la réalisation de la carte.

La majorité des composants électroniques sont disponibles dans la librairie d'EAGLE, ce qui facilite la réalisation de la carte avec les empreintes des composants. Les composants manquants sont le module radio A2500R24C et le récepteur P2110. Nous avons donc créé les schémas électroniques et empreintes associés en nous basant sur la documentation technique des composants.

Ensuite, nous avons réalisé le routage du circuit imprimé en double couche. Le résultat est présenté sur la figure 5.8 avec les liaisons de la face avant représentées en rouge et les liaisons de la face arrière en bleu. Nous avons également fait un effort pour minimiser la taille de la carte puisqu'elle fait 6 cm de largeur pour 4 cm de longueur.

La production du circuit imprimé a été sous-traitée à une entreprise spécialisée. La soudure des composants a ensuite été réalisée au sein du LCIS. Les composants CMS ont été soudés à l'aide d'un four à refusion alors que les composants traversants ont été soudés manuellement. Nous avons pu concevoir 5 cartes identiques avec ce procédé, ce qui nous permettra de tester différentes configurations du circuit. La carte produite est présentée sur la figure 5.9. On notera que les entrées (rectenna ou récepteur Powercast) se trouvent à gauche tandis que les sorties sont placées à droite (radio principale ou sortie digitale de réveil).

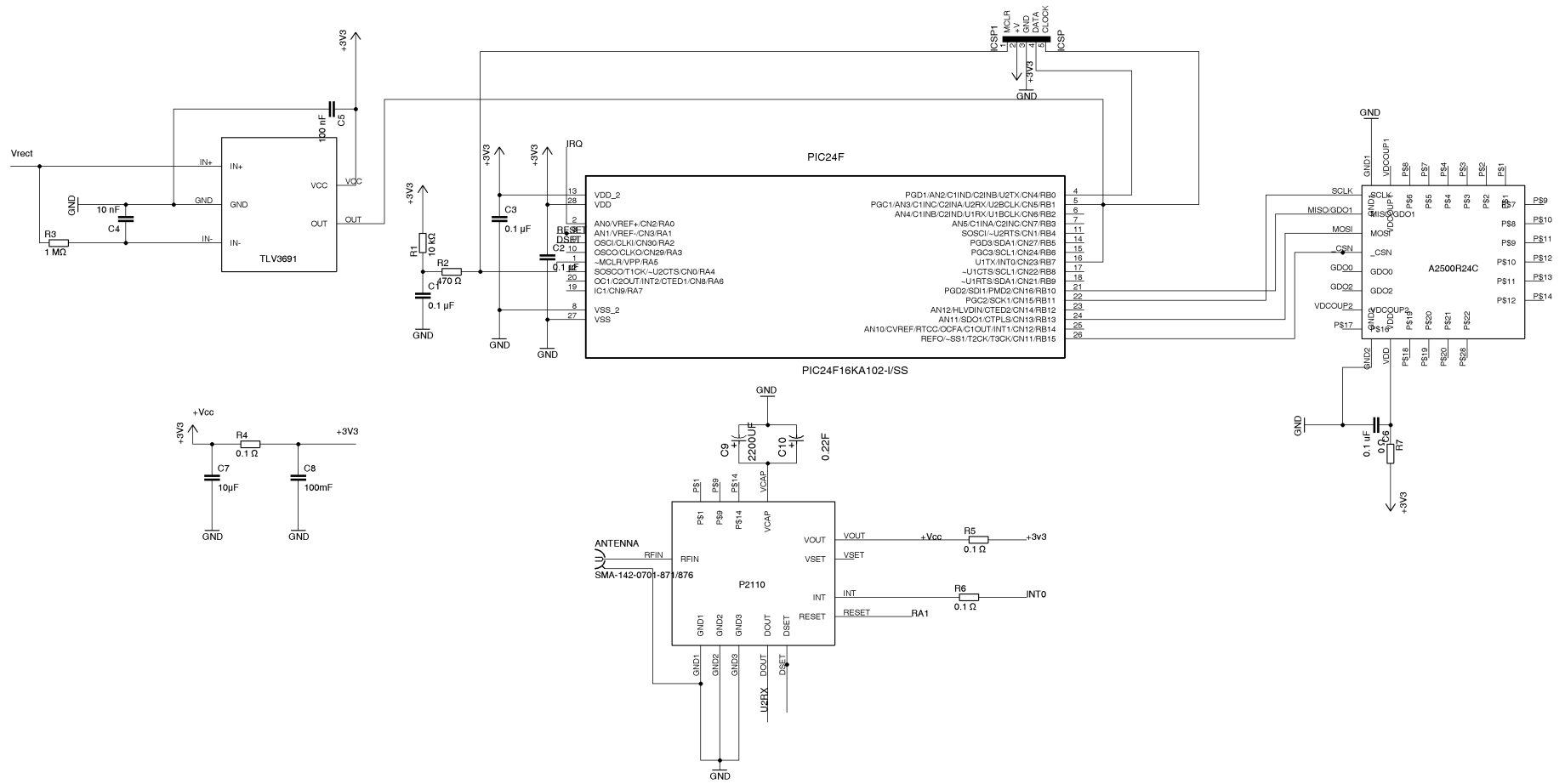


FIGURE 5.7: Schéma du circuit électronique.

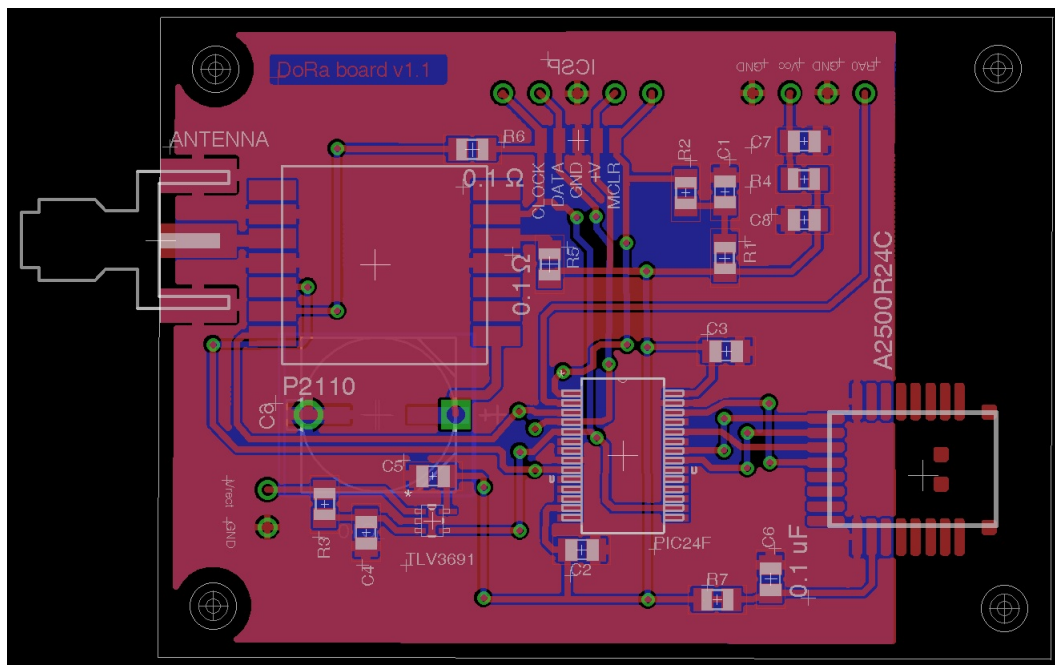


FIGURE 5.8: Routage de la carte électronique.

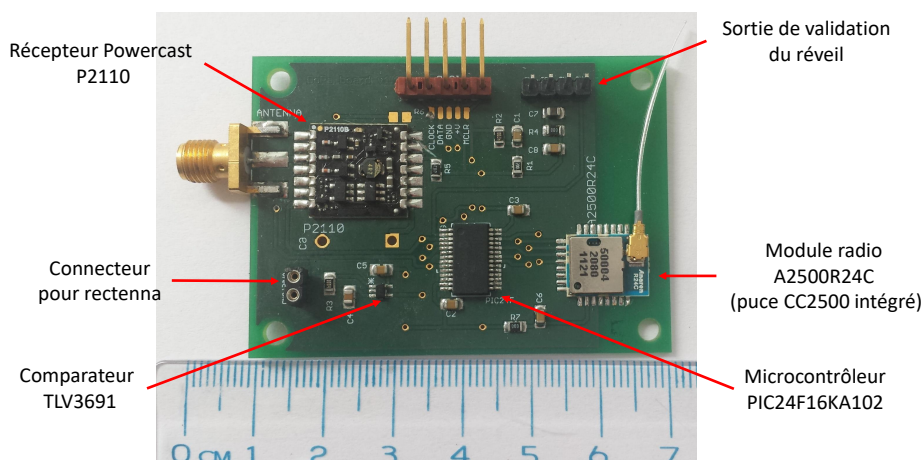


FIGURE 5.9: Photographie de la carte électronique avec le microcontrôleur PIC24F.

Afin que ces prototypes soient fonctionnels, il faut programmer le microcontrôleur incorporé pour qu'il traite le signal AdR en adoptant le protocole DoRa ou DC-DoRa. La programmation du microcontrôleur est donc traitée dans la partie suivante.

### 5.2.3 Programmation du microcontrôleur

Nous discuterons ici des directives à prendre pour programmer le microcontrôleur. On a vu précédemment que deux microcontrôleurs ont été considérés pour les versions de prototypes. On prendra comme exemple le PIC24F dans cette sous-section en gardant à l'esprit que la programmation de l'ATmega328P suit la même logique.

Nous avons programmé le PIC24F en langage C en utilisant le logiciel MPLAB X v3.30. On présente dans un premier temps les configurations possibles du microcontrôleur à travers les registres dans le programme.

### Configuration de l'oscillateur :

Le PIC24F dispose de 5 sources d'horloge à choisir au préalable. En fait, deux oscillateurs peuvent être connectés en externe et trois oscillateurs internes différents sont disponibles. On choisit de travailler avec les oscillateurs internes puisque ceux-ci sont adaptés à un mode de basse consommation énergétique. On dispose des choix suivants :

- l'oscillateur de type FRC (Fast RC) à 8 MHz ;
- l'oscillateur de type LPFRC (Low-Power FRC) basse consommation à 500 kHz ;
- l'oscillateur de type LPRC (Low-Power RC) à 32 kHz.

Il faut alors choisir un de ces oscillateurs en début de programme et définir le diviseur (*prescaler*) si on souhaite réduire la fréquence d'horloge.

L'horloge d'instruction  $F_{cy}$  est égale à la moitié de la fréquence de l'oscillateur  $F_{osc}$ . On peut vérifier que le microcontrôleur fonctionne correctement et que l'horloge est bien définie en capturant le signal fourni sur le port OSCO du PIC24F, qui doit être un signal carré à la fréquence  $F_{cy}$ . Cette vérification sera mis en évidence dans la section 5.5.4.

### Définition des entrées/sorties :

Il est nécessaire de définir les entrées/sorties qu'on souhaite utiliser en début de programme. Nous avons essentiellement deux entrées/sorties à définir :

- le port INT0 est défini en tant qu'une entrée numérique, cette entrée est utilisée pour le réveil du microcontrôleur par IRQ ;
- le port RA0 est défini en tant que sortie numérique, car elle est utilisée pour la validation du réveil après décodage de l'adresse.

Pour les entrées/sorties qui ne seront pas utilisées par notre circuit, il est recommandé de les définir en tant que sortie numérique et de les mettre au niveau bas (ou haut) afin de réduire la consommation d'énergie.

### UART :

Le PIC24F dispose de 2 interfaces UART<sup>4</sup> qui permettent de communiquer avec d'autres appareils ou dispositifs internes au circuit. Dans notre cas, cette interface de communication

---

<sup>4</sup>Abréviation anglaise : Universal Asynchronous Receiver Transmitter.



sera utilisée dans un premier temps pour le débogage du programme et sa finalité sera le décodage du signal reçu en sortie de la rectenna.

Nous décidons d'utiliser le port UART2 car la broche INT0 (utilisé pour la requête d'interruption du mode veille) est connectée à la même broche de transmission de l'interface UART1. Pour notre système, il est nécessaire de relier la broche INT0 à la broche de réception de l'interface UART2, car ils doivent traiter le même signal reçu par la rectenna.

### Fonctionnement du programme :

Une fois les configurations précédentes définies, nous devons définir une boucle principale dans le programme. Cette boucle principale définit le fonctionnement du microcontrôleur une fois qu'il a démarré. Nous présentons le fonctionnement de la boucle principale du programme avec les diagrammes d'états présentés dans la figure 5.10. Comme deux protocoles ont été définis pour notre système de télé-réveil, nous présentons chacun d'un sur la figure 5.10.

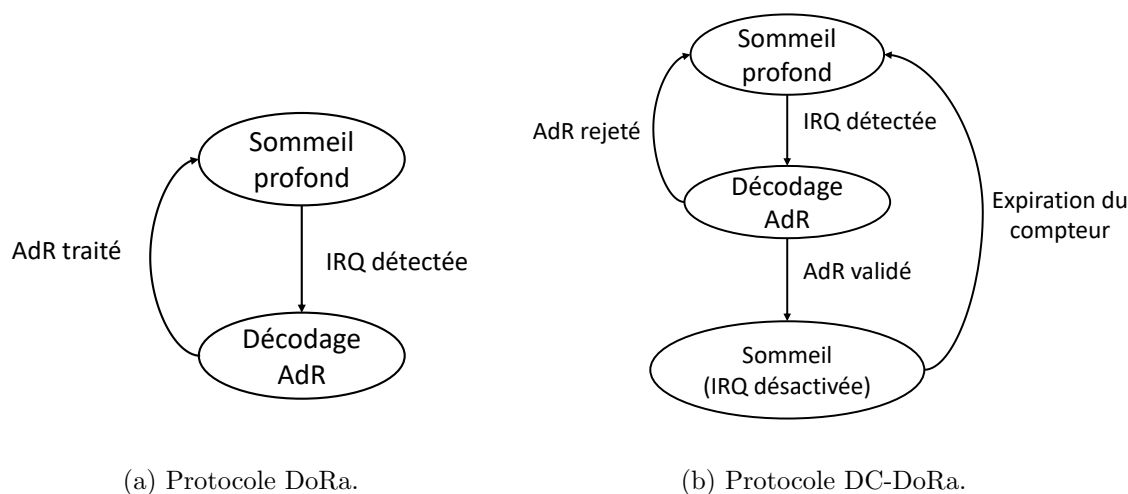


FIGURE 5.10: Diagramme d'états du microcontrôleur selon le protocole défini.

Pour chaque protocole, l'état initial est le mode sommeil profond. Lorsqu'une IRQ est détectée, le microcontrôleur se réveille pour décoder le message AdR reçue sur le port UART. Si l'adresse reçue correspond à celle définie dans le programme, le port digitale RA0 est mis au niveau haut pendant un cours instant. La durée du niveau haut correspond à un cycle d'instruction si on n'ajoute pas de délai entre les niveaux haut et bas. Ce délai n'est pas nécessaire s'il faut juste transmettre une IRQ, mais il est requis si on veut faire clignoter une LED. La suite dépend du protocole implémenté.

Avec le protocole DoRa, le microcontrôleur repasse ensuite en mode sommeil profond après avoir traité le message AdR. Le diagramme d'états du protocole DoRa ne fait pas

apparaître de différence entre une adresse validée et une adresse rejetée. La seule différence est l'activation du port RA0 si l'adresse est validée.

Avec le protocole DC-DoRa, le microcontrôleur repasse en mode sommeil profond si le message AdR ne lui est pas destiné. Si le message AdR lui est destiné, il transite vers un mode sommeil où l'interruption matérielle IRQ est désactivée. Un compteur est lancé au début de ce mode sommeil afin de réveiller le microcontrôleur au bout d'une durée fournie par le message AdR. Après ce réveil, l'interruption IRQ est réactivée et le microcontrôleur passe directement en mode sommeil profond.

L'interruption matérielle IRQ est fournie par la rectenna lorsqu'un message AdR est reçu. La bonne réception du message AdR dépend de la rectenna utilisée mais également de l'antenne utilisée en émission. On présente justement la rectenna et les antennes utilisées dans la sous-section suivante.

#### 5.2.4 Présentation des antennes (émission) et de la rectenna (réception)

Les antennes et le réseau de rectenna qui sont utilisés pour nos expériences ont été fabriqués au laboratoire LE2P par l'équipe spécialisée dans le transport d'énergie sans fils. Le type d'antenne utilisée influe sur la portée de télé-réveil, il faut donc considérer leurs caractéristiques pour optimiser ce paramètre.

La rectenna est constituée d'une antenne inspirée des métamatériaux et d'un circuit de redressement compact et simple [102]. La fréquence de réception de l'antenne est centrée sur 2,45 GHz avec une bande passante de 100 MHz.

En pratique, un réseau de rectenna en série est considéré. Ce type d'association permet de fournir une plus grande tension qu'une simple rectenna pour la même puissance reçue [117]. De plus, l'association série permet d'abaisser le minimum de puissance reçue pour obtenir le seuil de tension  $V_s$  nécessaire pour traiter le signal AdR. En abaissant le minimum de puissance reçue, on augmente logiquement la portée de télé-réveil. L'association en série est donc mieux adaptée pour notre système de télé-réveil.

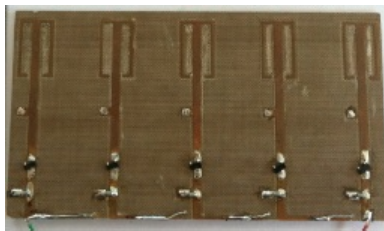


FIGURE 5.11: Réseau de rectenna en série [117], dimensions :  $9 \times 5$  cm.

Concernant les antennes réservées à l'émetteur de télé-réveil, nous utiliserons trois types d'antenne distinctes :

- une antenne de type dipôle dont le gain est de 2 dBi ;
- une antenne de type patch dont le gain est de 4 dBi ;
- une antenne de type BiQuad dont le gain est de 10 dBi.

Les gains des antennes varient en raison de leur directivité. Plus on augmente la directivité, plus le gain de l'antenne augmente. Il faut toutefois faire attention à bien aligner les antennes en cas de forte directivité de l'antenne émettrice. Les antennes sont illustrées sur la figure 5.12.

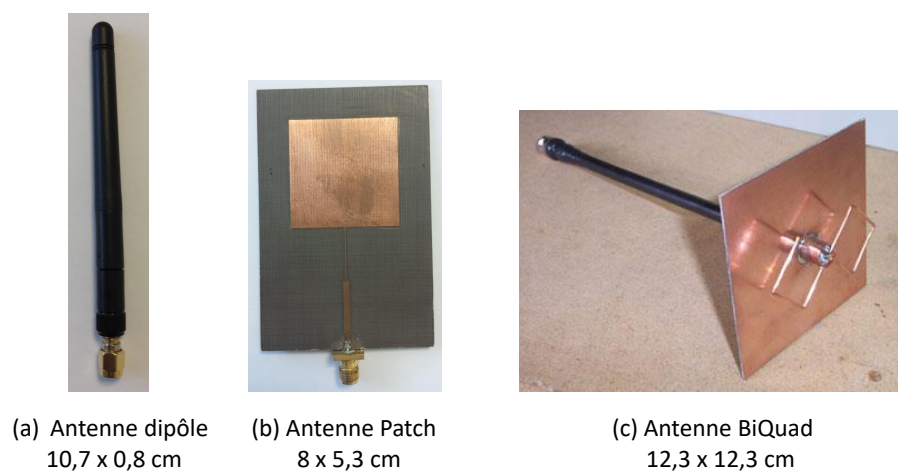


FIGURE 5.12: Types d'antennes utilisés pour l'émetteur de télé-réveil.

Les antennes présentées concernent uniquement le système de télé-réveil. Par la suite, nous décrivons les modules radio utilisés pour nos expériences.

### 5.2.5 Présentation des modules radio

Nous avons pris en compte deux choix pour la radio principale qui est utilisée pour la transmission des données en provenance des nœuds. Ces choix s'apparentent aux deux architectures du nœud présentées en section 2.2.

Dans la caractérisation théorique et les simulations des chapitres précédents, nous avons considéré le module radio CC2500 dans l'architecture 2 avec un seul microcontrôleur. Le module CC2500 a bien été intégré dans notre carte électronique (prototype 3), mais la configuration et la programmation du module CC2500 par le PIC24F n'est pas terminée actuellement.

Afin de diversifier notre étude, nous avons également considéré un module LoRa<sup>5</sup> [118], représenté sur la figure 5.13, à la place du CC2500. La technologie LoRa est utilisée pour les réseaux bas débit et à longue portée, tout en optimisant la consommation énergétique du module radio. Ainsi, on expérimente avec l'architecture 1 comprenant deux microcontrôleurs : le microcontrôleur STM32L151Cx du module LoRa et le PIC24F du récepteur de télé-réveil. Toutefois, le module LoRa communique à la fréquence porteuse de 868 MHz. Nous utilisons ainsi deux canaux physiques séparés pour la transmission de données et le télé-réveil. Cela aurait pu être évité en réalisant des rectennes dans la bande 868 MHz, puisque le reste du circuit est indépendant de la fréquence porteuse.

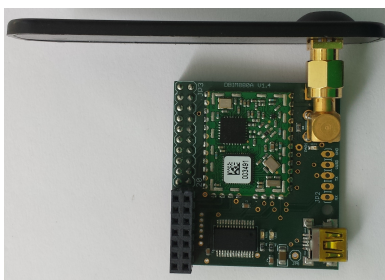


FIGURE 5.13: Photographie du module radio LoRa utilisé, dimensions : 4,3 × 3,9 cm.

Le module LoRa est utilisé dans les expériences qui suivent. Bien que les protocoles DoRa et DC-DoRa ne soient pas exactement les mêmes dans cette configuration, cela permet de tester et valider le système de télé-réveil appliqué sur un module radio fonctionnel du marché. Nous présentons dans le tableau 5.2 les paramètres qui ont été définis pour le module LoRa. Ces paramètres permettent d'obtenir un débit de 5,4 kbps, ce qui est relativement élevé pour cette technologie. Nous n'avons pas besoin de la portée maximale pour cette étude, c'est pourquoi nous avons défini le plus petit facteur d'étalement.

TABLEAU 5.2: Paramètres de configuration du module LoRa.

| Paramètre            | Valeur  |
|----------------------|---------|
| Fréquence porteuse   | 868 MHz |
| Puissance d'émission | 5 dBm   |
| Bande passante       | 125 kHz |
| Facteur d'étalement  | 7       |
| Taux de codage       | 1       |

Nous avons vu un ensemble de matériels dans les parties précédentes. Avant de passer à la validation expérimentale, on présente ensuite un récapitulatif des matériels utilisés et développés.

<sup>5</sup>Abréviation anglaise : *Long Range*.

### 5.2.6 Récapitulatif des matériels

On récapitule dans les tableaux 5.3 et 5.4 la liste des matériels requis pour conduire les expériences présentées dans cette thèse. Nous avons séparé les matériels du démonstrateur et les matériels de mesure. Les expériences sont réalisables avec du matériel différent à condition qu'ils soient du même type et qu'ils assurent les mêmes fonctionnalités. Par exemple, il est tout à fait envisageable d'utiliser des microcontrôleurs ou comparateurs provenant d'autres fabricants. La consommation du circuit ne sera toutefois pas la même, mais la fonctionnalité est identique.

TABLEAU 5.3: Liste des matériels utilisés pour le démonstrateur.

| Types d'appareil     | Appareils utilisés                        |
|----------------------|---|
| Plateforme SDR       | NI-USRP 2922<br>PC avec LabVIEW           |
| Convertisseurs RF/DC | Réseau de rectenna<br>Récepteur Powercast |
| Microcontrôleurs     | ATmega328P<br>PIC24F16KA102               |
| Comparateur          | TLV3691                                   |
| Antennes             | Omnidirectionnelle<br>Patch<br>BiQuad     |
| Modules radio        | A2500R24C (CC2500)<br>LoRa (iM880A)       |

TABLEAU 5.4: Liste des matériels de mesure.

| Types d'appareil     | Appareils utilisés  |
|----------------------|---------------------|
| Oscilloscope         | Agilent DSO-X 2014A |
| Multimètre           | FI 701X             |
| Analyseur de spectre | SPECTRAN HF-6065    |

Étant donné que l'ensemble des matériels a été présenté, nous proposons ensuite un ensemble d'expérimentations pour valider le fonctionnement du système de télé-réveil.

## 5.3 Validation expérimentale du dispositif de télé-réveil

Dans cette section, nous présentons les résultats qui ont été obtenus avec les matériels présentés dans la section précédente. Le prototype 1 du récepteur de télé-réveil a été utilisé pour l'ensemble des mesures effectuées dans cette section. Avant de procéder à la validation expérimentale des protocoles, il convient de valider le système sur lequel ils seront implémentés. L'objectif est de valider chaque étape de la réception d'un signal au niveau du récepteur de télé-réveil.

Nous commencerons par étudier la réponse temporelle de la rectenna afin de vérifier que la rectenna délivre un signal identique à celui qui est émis. À partir de cette étude, nous calculerons également le débit binaire maximal recevable avec la rectenna.

Notre deuxième étude porte sur la mesure analogique de la tension délivrée par la rectenna. Cette mesure permet d'étudier la réponse en amplitude de la rectenna pour diverses puissances reçues. Cette étude est nécessaire car la puissance reçue varie en fonction de la position du nœud dans le réseau.

Puis, la troisième étude consiste à analyser la lecture numérique du signal par le microcontrôleur. Cette étude permettra de montrer que la conversion analogique/numérique en réception retranscrit bien le signal numérique défini au niveau de l'émetteur de télé-réveil.

Enfin, la dernière étude de cette section sera consacrée au décodage du message par l'interface UART du microcontrôleur. L'objectif est de montrer que les adresses envoyées par l'émetteur sont correctement reçues par le récepteur.

### 5.3.1 Réponse temporelle de la rectenna

Pour cette première expérience, on souhaite étudier la réponse temporelle de notre rectenna lors de l'émission d'un signal prédéfini. L'étude de cette réponse temporelle permettra de calculer le débit binaire maximal d'information que la rectenna peut recevoir.

Le signal binaire émis est en fait une alternance entre des niveaux haut et bas {010101...}, ce qui devrait correspondre à une tension à la sortie de la rectenna qui suit la même évolution. Parmi les caractéristiques mesurées du signal, l'information la plus importante ici est le temps de montée  $T_m$ .

On construit alors un premier dispositif expérimental assez simple. On connecte le matériel USRP au PC et une antenne patch directive est branchée en sortie de l'USRP. Le réseau de rectenna est placé en face de l'antenne et à une distance de 20 cm. La tension de sortie et la masse de la rectenna sont branchées en entrée de l'oscilloscope à l'aide d'une sonde. La figure 5.14 est une photographie du montage expérimental, montrant également le signal délivré par la rectenna sur l'oscilloscope à gauche.

Pour une meilleure visibilité, une capture d'écran de l'oscilloscope est illustrée sur la figure 5.15. On obtient bien un signal carré, dont la fréquence est de 3,125 kHz et dont la tension délivrée par la rectenna alterne entre 0 et 890 mV. On mesure également un temps de montée égal à 2,8  $\mu$ s par l'oscilloscope.

Ce temps de montée mesuré n'est pas celui qu'il faudrait considérer dans notre cas, puisque le phénomène transitoire n'est pas terminé au bout de 2,8  $\mu$ s. Avec une mesure

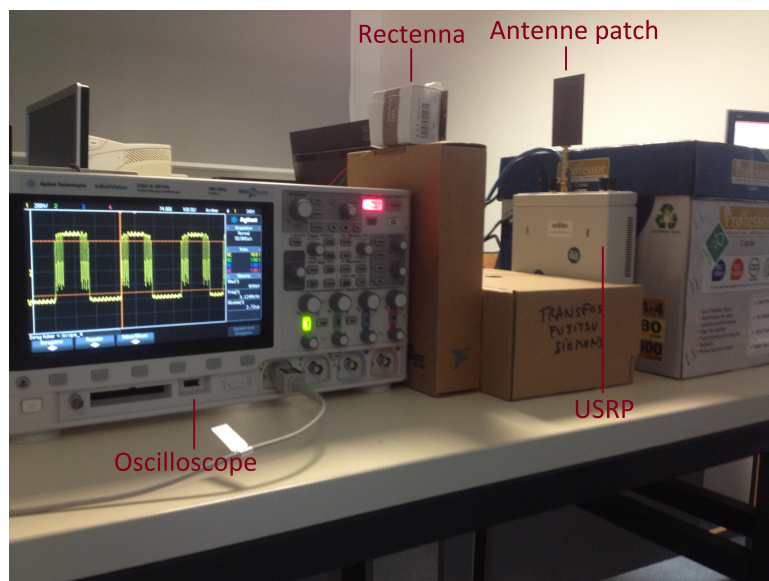


FIGURE 5.14: Photographie du montage expérimental lors de la réception du signal sans fil.

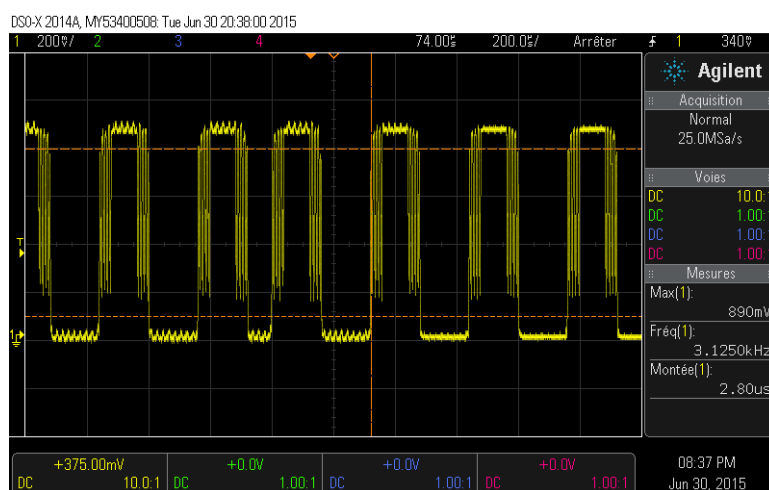


FIGURE 5.15: Capture d'écran de l'oscilloscope lors de la réception du signal sans fil.

manuelle, on mesure un temps de montée  $T_m$  de  $48 \mu\text{s}$  comprenant entièrement la phase transitoire du signal comme illustré sur la figure 5.16. En fait, l'intervalle qu'on choisit de prendre en considération commence à la fin du niveau bas et se termine au début du niveau haut.

On définit la durée  $T_b$  comme étant la durée d'un niveau haut ou bas, comme illustrée sur la figure 5.16. Pour une modulation OOK, la durée  $T_b$  est l'inverse du débit binaire  $D_b$ .

Afin que le signal reçu soit bien considéré comme un signal carré, il faut que la durée de transmission d'un bit  $T_b$  soit suffisamment supérieure au temps de montée  $T_m$ . On fait l'hypothèse qu'un facteur d'au moins 2 entre ces temps est suffisant pour considérer le signal reçu comme carré. Ce facteur de 2 a été choisi puisque la durée d'un bit comprend une partie

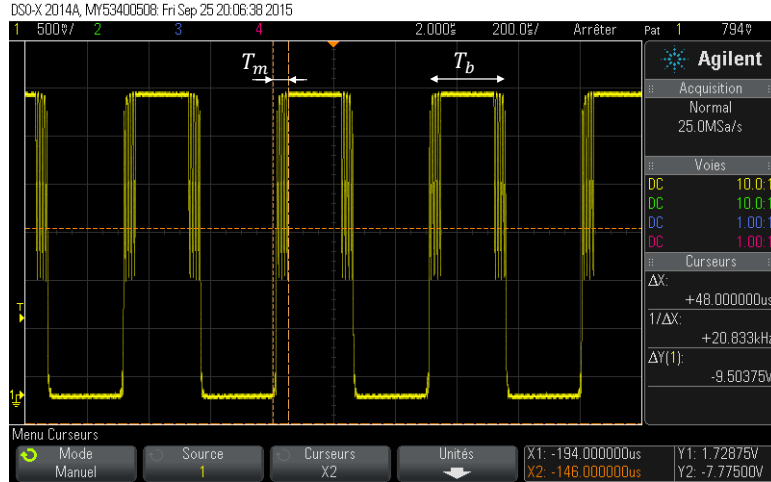


FIGURE 5.16: Illustration du temps de montée  $T_b$  et de la durée d'un bit  $T_b$ .

du temps de montée et une partie du temps de descente. De plus, on fait l'hypothèse que le temps de descente est égal au temps de montée  $T_m$ . Nous avons donc la relation :

$$T_b > 2 \times T_m \quad (5.1)$$

Ainsi, on peut calculer le débit binaire  $D_b$  maximum atteignable avec cette rectenna :

$$D_b < \frac{1}{2 \times T_m} \quad (5.2)$$

Le calcul nous donne alors :

$$D_b < 10,4 \text{ kbps} \quad (5.3)$$

Ce débit binaire maximale de 10,4 kbps est relativement faible comparé aux modules radio utilisés dans les RCSF. À titre d'exemple, la puce CC2500 offre un débit maximal de 250 kbps alors que les modules LoRa ont un débit maximal de 38,4 kbps. Dans le contexte du récepteur de télé-réveil, ce débit est tout à fait respectable et il répond à nos attentes. En effet, on souhaitait avoir un débit de l'ordre du kbps afin d'être au même niveau que la littérature sur ce point.

Pour conclure sur cette partie, nous validons bien l'obtention d'un signal numérique en sortie de la rectenna lorsque le signal radio envoyé avec une modulation OOK. De plus, l'étude de la réponse temporelle de la rectenna montre que le message AdR peut être reçu avec un débit maximal de 10,4 kbps.

Pour la suite, le montage expérimental précédent (cf. figure 5.14) est conservé à l'exception de l'oscilloscope qui est remplacé par une carte Arduino. On s'intéressera notamment à l'évolution de la tension mesurée en sortie de la rectenna à l'aide du microcontrôleur.



### 5.3.2 Mesure analogique de la tension délivrée par la rectenna

Dans cette sous-section, nous présenterons la réponse en tension de la rectenna en faisant varier la puissance reçue au niveau de la rectenna. Cette étude permet de contrôler la puissance en émission lors de nos expériences afin d'émettre une puissance suffisante et non excessive pour nos futures expériences.

Dans la pratique, la tension de sortie de la rectenna est mesurée sur un port analogique de l'Arduino. On fait varier le gain en émission au niveau de l'USRP afin de faire varier la puissance reçue au niveau de la rectenna. Ainsi, l'environnement des mesures reste identique puisque nous ne déplaçons pas l'émetteur ou le récepteur. Toutefois, il faut faire attention à ne pas dépasser une tension de 5 V en sortie de la rectenna, sous peine d'endommager le microcontrôleur. En effet, il n'y a pas de circuit de protection au niveau des entrées du microcontrôleur pour le moment. On démarre donc avec un faible gain et on augmente légèrement ce gain jusqu'à obtenir une tension proche de 5 V.

Il faut noter que la trame du message binaire envoyé est une suite de 1, correspondant à une émission continue du signal radio. Ainsi, on obtient une tension continue en sortie de la rectenna. Les résultats des différentes mesures sont regroupés dans le tableau 5.5.

| Gain en émission (dB)          | -30  | -15  | 0    | 5    | 10   | 15   | 20   | 23   | 25   |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Tension de sortie rectenna (V) | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,35 | 0,79 | 1,51 | 2,63 | 3,64 | 4,43 |

TABLEAU 5.5: Tension mesurée sur le port analogique de l'Arduino en fonction du gain en émission de l'émetteur radio (USRP) pour  $d = 20$  cm.

Le gain en émission est celui qu'on définit dans le programme LabVIEW, il se peut que le gain réel de transmission soit inférieur du fait des pertes de connexions à travers plusieurs adaptateurs SMA mal-femelle pour brancher l'antenne émettrice à l'USRP. D'après les spécifications techniques de l'USRP [112], un gain d'émission de 31 dB correspond à une puissance d'émission maximale de 100 mW. Nous avons effectivement mesuré cette puissance d'émission grâce à l'analyseur de spectre SPECTRAN [119].

L'évolution de la tension délivrée par la rectenna aux bornes de l'Arduino est représentée en fonction du gain en émission sur la figure 5.17. Ces résultats nous permettent de savoir sur quelle gamme de gain en émission il faut travailler. Pour les paramètres de cette expérience, il faut travailler avec des gains compris entre 20 et 25 dB. En dessous de 20 dB, le microcontrôleur ne fera pas de différence entre le niveau haut et le niveau bas puisque la tension sera inférieure à 2,5 V. Au-dessus de 25 dB, il y a des risques d'endommager le microcontrôleur (une marge de sécurité de 0,57 V est conservée).

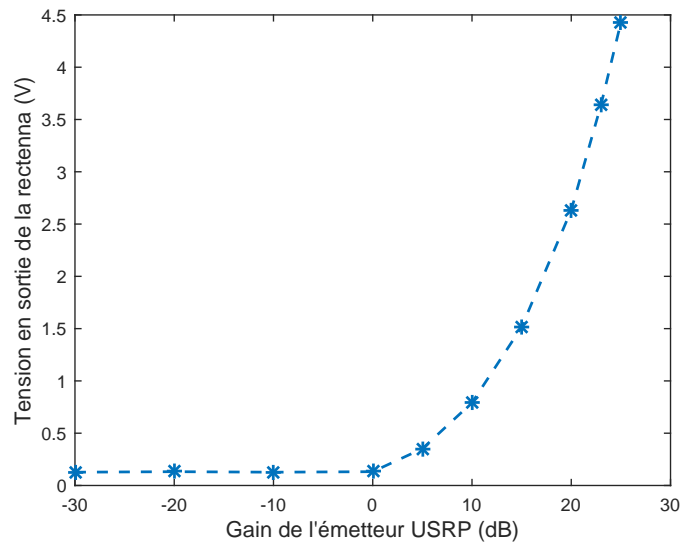


FIGURE 5.17: Évolution de la tension en sortie de la rectenna en fonction du gain en émission.

Par ailleurs, on observe une tendance polynomiale d'ordre 2 pour l'évolution de la tension en sortie de la rectenna en fonction du gain en émission. Cette tendance semble contradictoire avec l'équation 2.7 présentée dans le chapitre 2, où la tension  $V_{DC}$  est proportionnelle à  $\sqrt{P_t}$ . La raison de cette différence est que le rendement de conversion  $\eta$  varie en fonction de la puissance reçue au niveau de la rectenna, ce qui n'est pas pris en compte par l'équation 2.7.

Ces deux dernières sous-sections consistaient en une mesure analogique de la tension délivrée par la rectenna. Ainsi, nous avons pu étudier la réponse temporelle et en amplitude de la rectenna. On s'intéresse ensuite à la lecture numérique du signal, donc après conversion analogique/numérique. Le décodage du message est effectué à travers une lecture numérique du signal, c'est pour cette raison qu'on l'étudie dans la section suivante.

### 5.3.3 Lecture numérique du signal par le microcontrôleur

On branche ensuite la tension de sortie de la rectenna sur un port digital de l'Arduino (pin digital 10). L'objectif est de valider la lecture numérique du signal reçu en sortie de la rectenna.

On écrit un programme qui lit le port digital à intervalle de temps régulier de manière à retranscrire le signal numérique reçu par l'Arduino. La lecture du port digital est échantillonnée à une fréquence de 31,25 kHz, ce qui représente un sur-échantillonnage d'un facteur de 10 puisque le signal transmis est modulé à 3,125 Khz. On obtient un signal carré relativement proche du signal réel transmis, comme on peut le constater sur la figure 5.18.

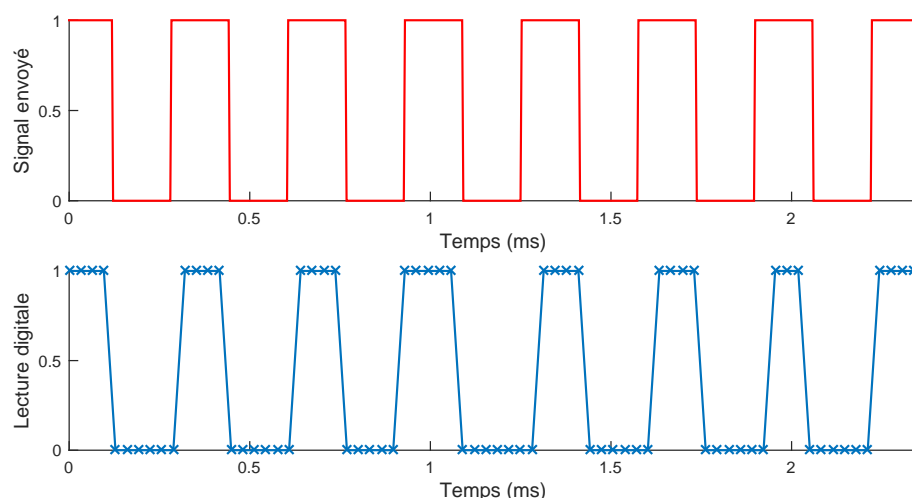


FIGURE 5.18: Lecture numérique du signal reçu par l'Arduino en sortie de la rectenna.

On peut également remarquer que la durée des niveaux bas est plus élevée que la durée des niveaux hauts. Il est intéressant de mesurer la durée d'un bit  $T_b$  reçue et de différencier les niveaux haut et bas pour cette mesure. Le résultat est obtenu en moyennant la durée d'un niveau haut ou bas sur le nombre de niveaux haut ou bas, présenté dans le tableau 5.6. Cette mesure confirme l'observation précédente puisqu'on observe une différence de  $44,8 \mu\text{s}$  entre les niveaux haut et bas. Cette différence est légèrement inférieure au temps de montée  $T_m$  ( $48 \mu\text{s}$ ). On peut donc expliquer cette différence par le fait que le signal est majoritairement lu comme un niveau bas lors de la charge/décharge de la résistance par la rectenna. Pour rappel, ce phénomène transitoire avait été mis en évidence dans la sous-section 5.3.1 et la fréquence du signal transmis ici est inférieure à la fréquence maximale. Il faut tout de même noter que la moyenne de la durée  $T_b$  des niveaux haut et bas est égale à la durée  $T_b$  transmis, ce qui veut dire que le signal numérique reçu est à la bonne fréquence.

|                         | Niveau 0 | Niveau 1 | Moyenne | Transmis |
|-------------------------|----------|----------|---------|----------|
| $T_b$ ( $\mu\text{s}$ ) | 182,6    | 137,8    | 160,2   | 160      |

TABLEAU 5.6: Durée d'un bit  $T_b$  pour le signal numérique reçu et transmis.

Comme la lecture numérique du signal est validée, l'étape suivante est de vérifier que le récepteur peut décoder correctement le message envoyé par l'émetteur de télé-réveil.

### 5.3.4 Décodage du message par UART

On conserve le même montage que précédemment dans cette section. On souhaite maintenant décoder un message envoyé par le PC à travers l'USRP. Quelques changements sont effectués au niveau de la face avant du programme LabVIEW pour la transmission d'un message particulier.

Afin de mieux contrôler la validation du procédé de décodage, il est plus adapté d'envoyer le message une seule fois ou un nombre limité de fois. On considère l'envoi d'une seule trame *AdR* dans cette sous-section.

On choisit un débit binaire  $D_b$  de 4800 bps pour la transmission du message AdR par l'émetteur de télé-réveil, ce qui équivaut à 4800 bauds pour une modulation OOK. Cette valeur est prise en charge par le microcontrôleur ATmega328P via une communication UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter). On peut définir un tel débit avec notre VI en prenant les paramètres donnés dans le tableau 5.7.

| Paramètre                  | Valeur  |
|----------------------------|---------|
| Taux d'échantillonnage I/Q | 202 kHz |
| Échantillons par symbole   | 42      |

TABLEAU 5.7: Paramètres pour obtenir un débit binaire de 4800 bps.

Dans notre VI, l'adresse incluse dans la trame doit être écrite en binaire, une attention doit être portée à l'ordre d'écriture des bits puisqu'on doit commencer par le bit de poids faible, autrement dit le LSB<sup>6</sup>.

Afin de valider la réalisation du prototype 1, on présente son bon fonctionnement en allumant des LED selon l'état du récepteur. On présente dans un premier temps le programme du microcontrôleur pour cette expérience. Après le démarrage ou redémarrage du microcontrôleur, les 3 LED sont allumées et le microcontrôleur reste en mode actif pendant deux secondes. Il passe ensuite en mode veille en éteignant les LED au préalable. S'il reçoit un préambule, une première LED s'allume. Si une adresse est reçue après le préambule et si cette adresse correspond à l'adresse du nœud, alors une deuxième LED est allumée pendant 1 seconde. Dans ce cas, deux LED sont allumées pendant cette période. Le microcontrôleur se réveille et allume ensuite les 3 LED pendant 2 secondes. Enfin, il repasse en mode veille avec l'extinction des LED. Si l'adresse reçue n'est pas correcte, le microcontrôleur repasse en mode veille en éteignant les LED. Dans ce cas, on a donc la première LED qui effectue un clignotement.

Nous avons ensuite réalisé une expérience pour valider le décodage du message en envoyant plusieurs messages AdR contenant des adresses différentes. Au cours de cette expérience, l'adresse du nœud est le chiffre 5 en code ASCII<sup>7</sup>, soit 10101100 en binaire. Nous avons envoyé 4 messages AdR de façon discontinue en incluant les adresses dans cet ordre : 10101100, 11101100, 10101100, 10111100. Comme on peut le noter, un seul bit varie entre l'envoi de chaque message.

<sup>6</sup>Abréviation anglaise : *Least Significant Bit*.

<sup>7</sup>Abréviation anglaise : *American Standard Code for Information Interchange*.

Une vidéo a été réalisée pour montrer le succès de l'expérience, dans la mesure où les 2 possibilités ont été mises en évidence [Lien vidéo<sup>8</sup>]. La première possibilité est la réception du message AdR avec une bonne adresse. La deuxième possibilité est la réception du message AdR avec une mauvaise adresse. La figure 5.19 montrent l'affichage du port série à la fin de l'expérience.

```

COM3
Start
Reveille depuis 0sec
Reveille depuis 1sec
Reveille depuis 2sec
Timer: Entre en mode veille
Detection d'un preambule...
Bonne adresse, passage en mode actif
Reveille depuis 0sec
Reveille depuis 1sec
Reveille depuis 2sec
Timer: Entre en mode veille
Detection d'un preambule...
Mauvaise adresse, passage en mode veille
Detection d'un preambule...
Bonne adresse, passage en mode actif
Reveille depuis 0sec
Reveille depuis 1sec
Reveille depuis 2sec
Timer: Entre en mode veille
Detection d'un preambule...
Mauvaise adresse, passage en mode veille
  
```

FIGURE 5.19: Validation de la version 1 du prototype. [Lien vidéo].

Cette expérience valide le décodage du message par une communication UART. Le système de télé-réveil développé possède donc un système d'adressage fonctionnel qui permet à l'émetteur d'envoyer un signal de réveil au récepteur souhaité.

### 5.3.5 Conclusion

Pour conclure cette section, nous avons présenté quatre études pratiques qui valident la réception d'un signal de réveil par notre récepteur. Les deux premières études se basent sur une mesure analogique du signal délivré par la rectenna, alors que les deux dernières études ont été effectuées avec une lecture numérique du signal.

D'une part, l'analyse de la réponse temporelle a montré qu'il est possible de recevoir un message modulé en OOK avec un débit maximal de 10,4 kbps. Ce débit correspond à nos attentes pour le récepteur de télé-réveil. De plus, l'analyse de la réponse en tension délivrée par la rectenna nous indique dans quelle gamme de puissance il faut travailler pour nos

<sup>8</sup><https://youtu.be/jlhR2p69mYg>

expériences si on ne filtre pas en sortie de la rectenna. Cette étude est également un bon support pour la gestion de la puissance d'émission.

D'autre part, la lecture numérique du signal délivrée par la rectenna montre que le signal numérique peut être reconstruit au niveau du récepteur de télé-réveil. La durée des niveaux hauts et bas n'est pas identique pour le signal reçu, mais leur moyenne est identique au signal émis. Toutefois, cela ne pose pas de problème pour le décodage du message par UART comme nous l'avons montré en pratique.

Finalement, cette section montre que notre récepteur de télé-réveil est capable de traiter un message AdR et de décoder l'adresse incluse dans le message. Nous avons donc un système de télé-réveil qui permet de sélectionner le nœud à réveiller. Nous pouvons donc passer à la validation des protocoles de télé-réveil en utilisant ce système de télé-réveil.

## 5.4 Validation expérimentale des protocoles de télé-réveil

Comme le fonctionnement du récepteur de télé-réveil a été validé en pratique, il reste maintenant à valider les protocoles de communication entre la BS et un nœud.

Dans un premier temps, nous décrirons le scénario mis en place pour la validation expérimentale des protocoles. Chaque protocole sera validé séparément car le protocole DC-DoRa doit être validé en présence d'interférences. Enfin, nous présenterons une comparaison entre des résultats expérimentaux et simulés.

### 5.4.1 Scénario de validation expérimentale

Cette sous-section présente le scénario de validation expérimentale pour les protocoles DoRa et DC-DoRa. La validation du protocole DC-DoRa nécessite un aménagement de l'environnement pour y ajouter de l'interférence dans le canal. Toutefois, la plateforme expérimentale de base est la même pour les deux protocoles. On donnera ensuite pour chaque protocole les paramètres qui varient par rapport au scénario présenté ici.

Pour valider ces protocoles, nous disposons de deux choix pour la configuration du nœud (cf. section 2.2). On présente les résultats pour la configuration 1 dans lequel le récepteur de télé-réveil est séparé du nœud de capteur. Pour la radio principale, on utilise le module LoRa qui communique dans la bande de fréquences située autour de 868 MHz. On considère le montage présenté sur la figure 5.20.

Le module LoRa du nœud est programmé pour passer en mode veille après démarrage du microcontrôleur. La sortie du mode veille est gérée uniquement par une interruption

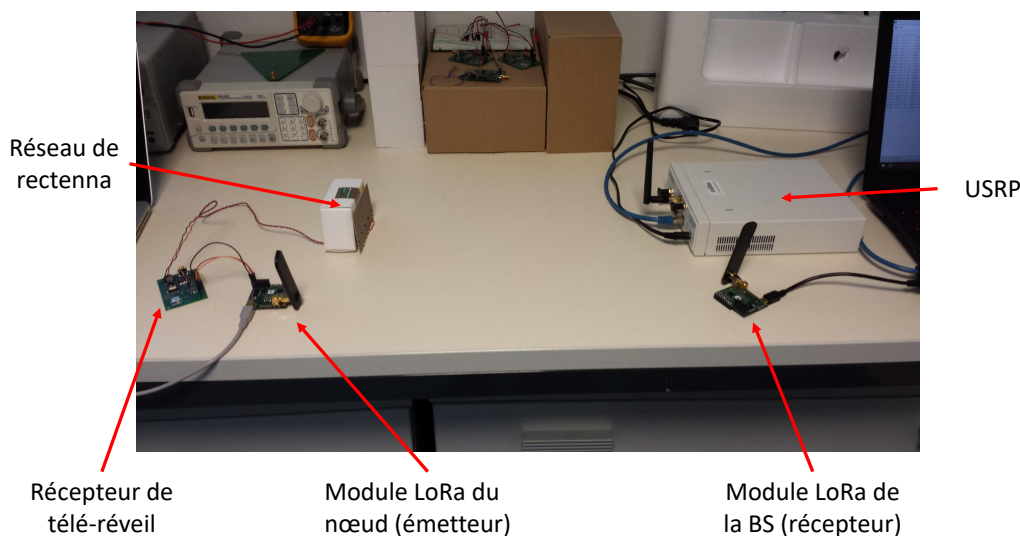


FIGURE 5.20: Photo du montage expérimental pour la validation du protocole de communication DoRa.

externe sur la broche WKUP1<sup>9</sup>. Après sortie du mode veille, le module envoie une seule trame de données qui sera DATA1 ici. Le module LoRa repasse ensuite en mode veille après transmission des données.

Le récepteur de télé-réveil est alimenté par le module LoRa du nœud. La sortie IRQ (pin RA0) du récepteur de télé-réveil est connectée à la broche WKUP1 pour réveiller le module LoRa une fois un message AdR validé.

Le module LoRa de la BS est en permanence en mode réception. Les messages reçus sont affichés sur le port série avec un compteur du nombre de messages reçus. On affiche également un minuteur à la réception de chaque message qui démarre au moment de la réception du premier message.

#### 5.4.2 Validation expérimentale du protocole DoRa

Nous validons dans un premier temps le protocole DoRa à travers le scénario présenté précédemment. Deux cas de figures ont été considérés pour cette expérience.

Dans le premier cas, un seul nœud est interrogé par la BS. Nous programmons l'USRP pour émettre un total de 200 messages AdR avec un espacement de 2 secondes entre les émissions. L'adresse insérée dans le message est toujours celle du nœud interrogé, qui est le chiffre 3 en code ASCII (51 en décimale ou 11001100 en binaire).

<sup>9</sup>Abréviation anglaise : *Wake-Up Pin* 1.

Dans le second cas, trois nœuds sont interrogés par la BS. L'USRP est programmé pour émettre un total de 300 messages AdR avec le même espacement de 2 secondes entre les émissions. À chaque nouveau message, l'adresse varie de manière à interroger le nœud suivant, ce qui équivaut à envoyer 100 messages par nœud.

Une capture d'écran des résultats est présentée sur la figure 5.21 pour le premier cas. Comme on peut le remarquer sur le terminal du port série, 199 messages ont été reçus avec le module LoRa de la BS. On a donc un taux de livraison des données à 99,5 %. De plus, on reçoit toujours la bonne information dans le message (DATA1). Enfin, les messages sont reçus avec un intervalle régulier de 2 secondes. Aucune latence supplémentaire n'est donc ajoutée par le système.

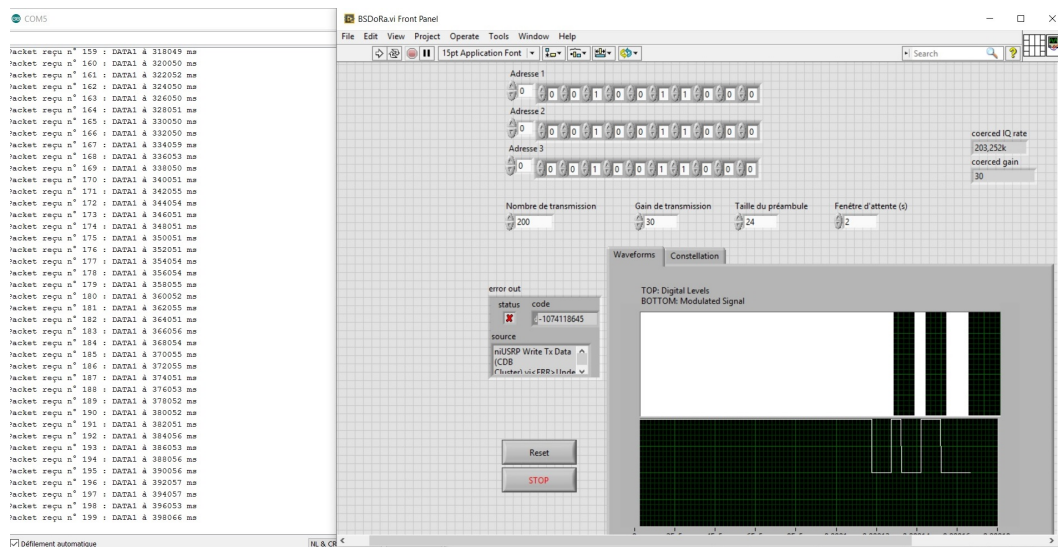


FIGURE 5.21: Capture d'écran des résultats de communication avec le module LoRa réveillé avec le protocole DoRa.

Nous présentons les résultats de chaque cas dans le tableau 5.8. On constate une baisse du taux de livraison lorsque 3 nœuds sont interrogés, avec 94 % contre 99,5 % pour un seul nœud interrogé. Il peut y avoir plusieurs raisons pour expliquer cette perte de trames, celles qui suivent sont les plus probables :

- des messages AdR non détectés ou mal décodés par le récepteur de télé-réveil, le nœud ne se réveille donc pas ;
- un échec d'envoi ou de réception par le module radio LoRa, la trame de données n'est donc pas reçue ;
- un problème d'interférence ou un mauvais état du canal radio par moment, cela peut perturber le réveil ou la transmission des données.

Ces résultats expérimentaux montrent que le protocole DoRa fonctionne correctement, bien que toutes les requêtes de réveil n'aient pas abouti. Un taux de livraison à 94 % reste



| Nombre de nœuds | Nombre de messages AdR envoyés | Nombre de messages de données reçus | Taux de livraison |
|-----------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| 1               | 200                            | 199                                 | 99,5 %            |
| 3               | 300                            | 282                                 | 94 %              |

TABLEAU 5.8: Résultats de la validation expérimentale du protocole DoRa.

toutefois correct pour une implémentation dans un cadre expérimental. Nous n'avons pas investigué les sources de perte de trames plus en détail car la perte n'est pas importante. Toutefois, le problème d'interférence est traité dans la partie suivante à travers la validation du protocole DC-DoRa.

### 5.4.3 Validation expérimentale du protocole DC-DoRa

Nous validons ensuite le protocole DC-DoRa en ajoutant de l'interférence dans le milieu. Une seule modification est effectuée au montage précédent. Comme illustré sur la figure 5.22, un point d'accès est positionné au même endroit que notre émetteur de télé-réveil.

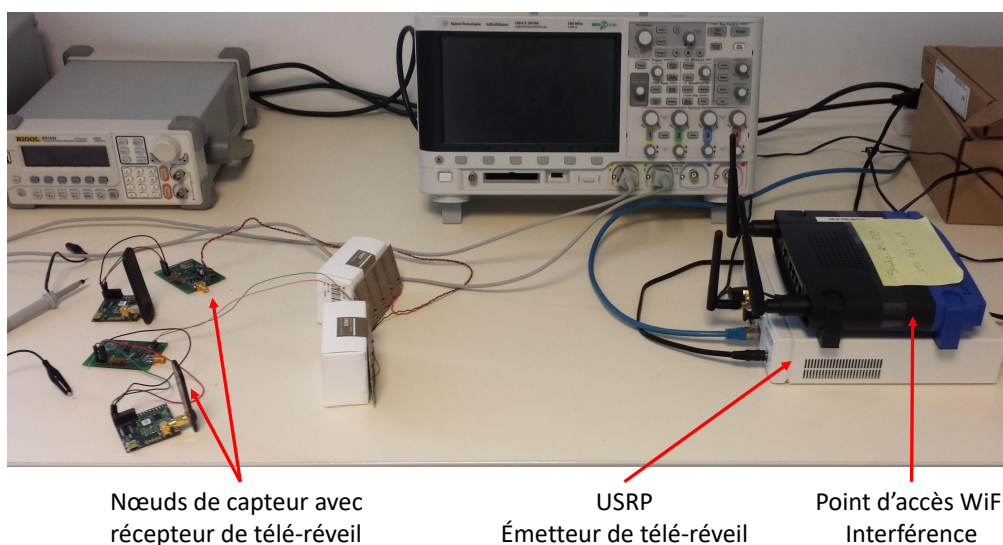


FIGURE 5.22: Photo du montage expérimental pour la validation du protocole DC-DoRa.

Concernant la configuration du point d'accès, le canal 9 est choisi (2,452 GHz) pour coïncider avec la fréquence porteuse de télé-réveil. Exceptionnellement pour cette partie, la puissance d'émission WiFi est réglée à 70 mW alors que la puissance d'émission de l'USRP est réglée à 100 mW. Ainsi, on peut dissocier les signaux WiFi et les messages AdR au niveau du récepteur. Le point d'accès émet périodiquement une trame balise, il n'est donc pas nécessaire d'y associer un client pour générer de l'interférence. Ainsi, on génère un trafic constant car l'intervalle de temps entre les émissions de trames balises est constant.

Nous avons placé deux nœuds pour ce montage afin de comparer les deux protocoles de télé-réveil dans la même situation. La BS interroge ces deux nœuds uniquement avec une période de requête  $T_{req} = 0,6$  s. La différence majeure entre les protocoles DoRa et DC-DoRa se situe au niveau de l'activité du récepteur de télé-réveil. L'activité des récepteurs est en fait mesurée à travers l'activité du microcontrôleur, le récepteur étant actif ou inactif lorsque l'oscillateur est respectivement allumé ou éteint. Nous comparons l'activité des récepteurs pour chaque protocole lorsque la durée entre les trames balises WiFi est fixée à 100 ms. Le trafic sera augmenté dans la sous-section suivante. Les résultats sont présentés sur la figure 5.23.

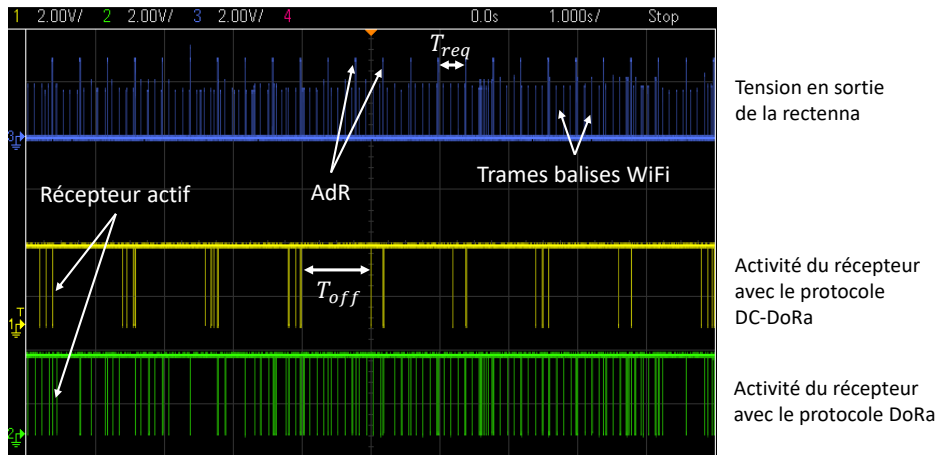


FIGURE 5.23: Mesure de l'activité des récepteurs selon le protocole utilisé.

On constate une activité beaucoup plus faible avec le protocole DC-DoRa. Cela signifie que la désactivation du récepteur de télé-réveil après la validation d'un message est bien prise en compte. On retrouve d'ailleurs une période d'inactivité  $T_{off}$  constante car le nombre de nœuds et la période de requête  $T_{req}$  sont constants.

Cette expérience valide donc l'implémentation du protocole DC-DoRa au niveau du récepteur de télé-réveil. Dans la sous-section suivante, on s'intéresse à l'implémentation sur le nœud dans sa totalité en effectuant une comparaison entre les résultats obtenus par expérimentation et par simulation.

#### 5.4.4 Comparaison entre l'expérimentation et la simulation

Avant de conclure sur la validation expérimentale des protocoles, on confronte notre simulateur avec l'implémentation réelle.

Nous conservons le même montage que la sous-section précédente avec un seul nœud. Nous modélisons également ce scénario dans le simulateur avec les mêmes paramètres. Dans le simulateur, des trames de données sont échangées entre deux nœuds WiFi afin d'avoir le

même taux d'occupation du canal. Le seul paramètre que nous varions en expérimental est la durée entre les trames balises. Ainsi, on peut faire varier le taux d'occupation du canal WiFi sur une gamme assez large.

La mesure des performances est plus limitée dans le cadre expérimental, c'est pourquoi on s'intéresse uniquement au taux de livraison des données en provenance des capteurs. Les résultats sont présentés sur la figure 5.24. On constate une évolution similaire pour les deux cadres d'évaluation. Le taux de livraison des données des capteurs diminue lorsque le taux d'occupation du canal WiFi augmente. Cette baisse est directement liée au fait que la bonne réception du message AdR est perturbée si le canal WiFi est trop occupé.

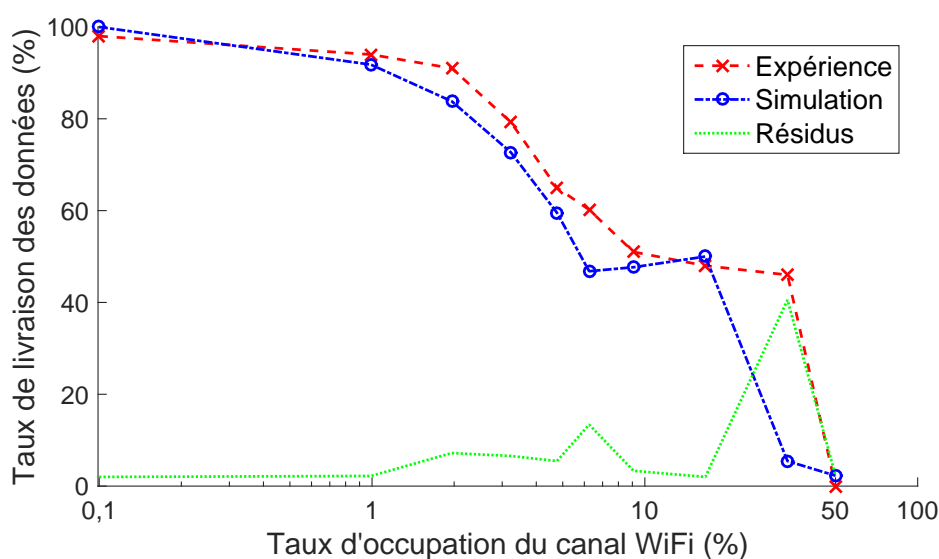


FIGURE 5.24: Évolution du taux de livraison des données en provenance des capteurs en fonction du taux d'occupation du canal WiFi.

La différence absolue entre les résultats expérimentaux et simulés est en moyenne de 8,5 %. On a donc une correspondance relativement correcte. Cette différence pourrait s'expliquer par une différence liée au fait que les modules radio pour la transmission des données ne sont pas les mêmes en simulation et en expérience. En simulation, nous avons choisi des modules CC2500 à 2,45 GHz alors que des modules LoRa à 868 MHz sont utilisés dans le cadre expérimental. Il pourrait donc y avoir des interférences supplémentaires dans le simulateur, ce qui expliquerait le taux de livraison inférieur.

#### 5.4.5 Conclusion

En résumé, cette section a présenté diverses expériences pour valider expérimentalement nos protocoles de télé-réveil.

La première expérience concernait le protocole DoRa avec un réseau de 3 nœuds incluant chacun un récepteur de télé-réveil. Tous les nœuds ont pu être réveillés selon le protocole DoRa afin de transmettre leurs données par le module LoRa.

La deuxième partie de cette section était consacrée au protocole DC-DoRa avec l'ajout d'interférence dans le milieu. Nous avons montré la baisse d'activité du récepteur avec le protocole DC-DoRa comparé au protocole DoRa. Comme on l'avait vu dans le chapitre 4, la baisse d'activité du récepteur de télé-réveil engendre une baisse de la consommation d'énergie du nœud. Le protocole DC-DoRa a donc été validé expérimentalement. Nous avons également présenté une comparaison des résultats expérimentaux et simulés afin de conforter la validité de notre approche.

Pour conclure, cette étape de validation montre que nos protocoles DoRa et DC-DoRa fonctionnent correctement avec une implémentation sur le système de télé-réveil que nous avons développé. Ces validations assurent également que les mesures présentées dans la section suivante sont effectuées sur un système fonctionnel.

## **5.5 Mesure des caractéristiques et optimisation énergétique du système de télé-réveil**

Dans les deux précédentes sections, nous avons validé à la fois le fonctionnement du système de télé-réveil et le fonctionnement des protocoles de télé-réveil. Nous pouvons alors effectuer des mesures pour caractériser les performances du système.

Les caractéristiques mesurées sont notamment la sensibilité du récepteur, la portée de télé-réveil et la consommation énergétique. Nous présentons chacune de ces mesures dans les parties qui suivent avec la méthode associée. Enfin, ces mesures nous permettent de présenter une optimisation de la consommation d'énergie du microcontrôleur lors du décodage de l'adresse.

### **5.5.1 Mesure de la sensibilité du récepteur de télé-réveil**

Dans un premier temps, nous présentons la mesure de la sensibilité du récepteur de télé-réveil. La sensibilité d'un récepteur représente sa capacité à traiter un signal radio de faible puissance. Il est impératif de quantifier la sensibilité de notre récepteur afin d'évaluer comparativement ses performances à d'autres récepteurs de télé-réveil.

Pour rappel, la sensibilité correspond à la puissance minimale reçue au niveau de l'antenne pour décoder correctement le message AdR. Pour mesurer cette puissance minimale, nous avons suivi la démarche suivante.

Nous avons fixé une distance de 20 cm entre l'émetteur et le récepteur de télé-réveil. Un message AdR contenant l'adresse du récepteur de télé-réveil est envoyé périodiquement. Une LED est allumée au niveau du récepteur pour signaler qu'un message AdR a été correctement reçu. Dans cette configuration, nous avons diminué le gain d'émission sur LabVIEW de manière graduelle en commençant par le maximum. Nous avons ainsi déterminé le gain minimal pour lequel le récepteur reçoit correctement le message AdR. Le gain minimal obtenu pour la distance de 20 cm est fixé par la suite.

On a ensuite remplacé le récepteur de télé-réveil par un analyseur de spectre équipé d'une antenne log-périodique, comme illustré sur la figure 5.25. La distance entre l'antenne log-périodique et l'antenne de l'USRP est fixée à 20 cm également. Nous avons configuré l'analyseur de spectre pour qu'il prenne en compte le gain apporté par l'antenne log-périodique. Il suffisait ensuite de lire la puissance reçue sur l'analyseur de spectre pour connaître la sensibilité du récepteur. Nous avons ainsi mesuré une sensibilité de -45 dBm.

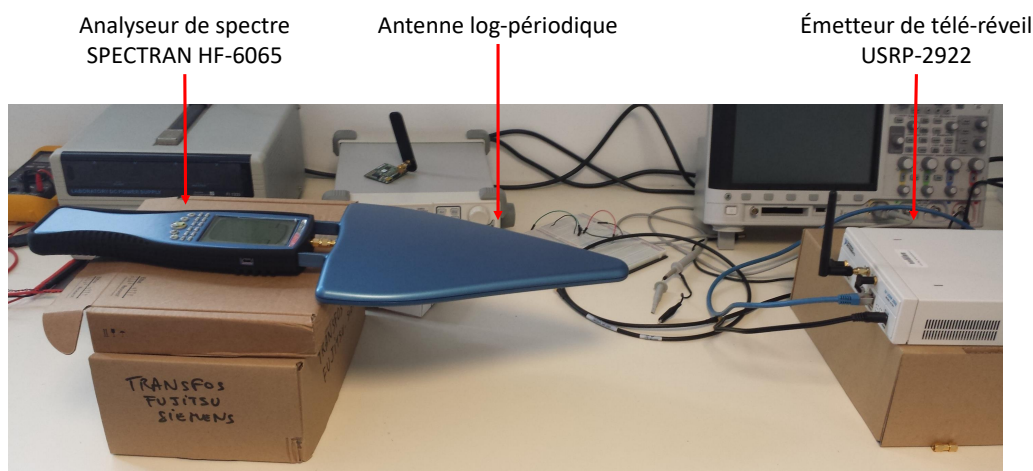


FIGURE 5.25: Photographie du montage expérimental pour la mesure de la sensibilité du récepteur de télé-réveil.

Une sensibilité de -45 dBm est relativement correcte pour un récepteur de télé-réveil. Nous verrons dans la section 5.6 une comparaison avec ceux de la littérature. La prochaine caractéristique mesurée est la portée de télé-réveil. Elle est directement liée à la sensibilité de réception mais elle dépend aussi de l'émetteur et du milieu de propagation. On précisera le contexte de mesure dans la sous-section suivante.

### 5.5.2 Mesure de la portée de télé-réveil

Comme énoncé précédemment, on s'intéresse ici à la portée de télé-réveil du système. La mesure de cette caractéristique sert à prouver la viabilité de notre système d'un point de vue applicatif.

Le montage utilisé dans cette sous-section est présentée sur la figure 5.26. Il est nécessaire de pouvoir déplacer convenablement le nœud de capteur lors de ces mesures afin de modifier la distance séparant l'émetteur et le récepteur. C'est pour cette raison que le nœud est placé sur une plateforme mobile en fonctionnant sur batterie.

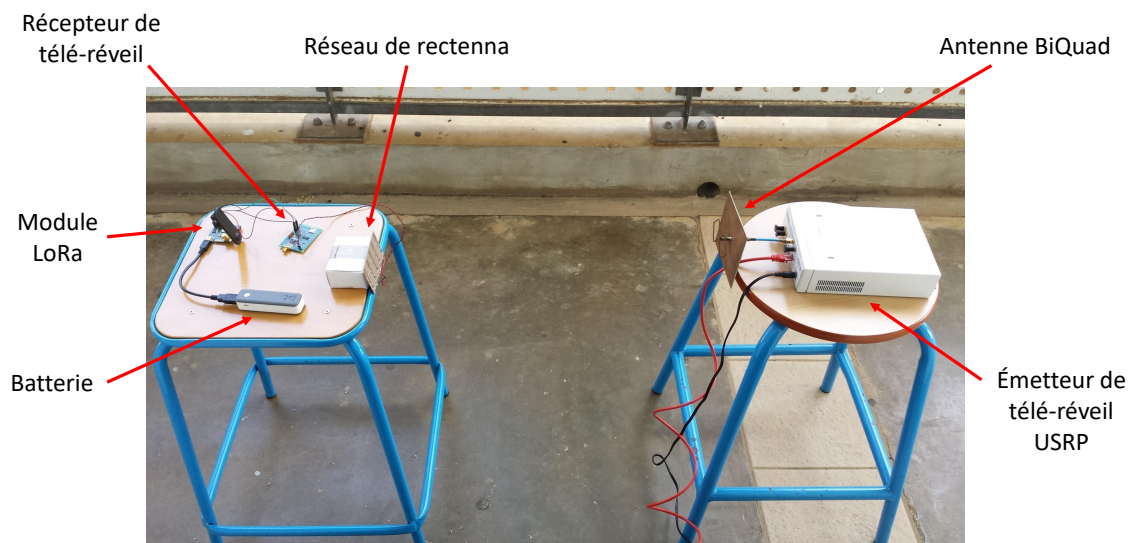


FIGURE 5.26: Photographie du montage expérimental pour la mesure de portée de télé-réveil.

Dans un premier temps, on étudie l'évolution de la probabilité de validation du réveil  $\mathbb{P}(VR)$  en fonction de la distance séparant l'émetteur et le récepteur. Cette étude montre la démarche appliquée pour mesurer la portée télé-réveil. On applique ensuite la même méthode avec plusieurs antennes au niveau de l'émetteur pour avoir les meilleurs résultats possibles.

Pour obtenir la distance maximale à laquelle le récepteur peut être réveillé, on augmente la distance séparant l'émetteur et le récepteur de façon graduelle. Pour chaque distance séparant l'antenne de l'USRP et la rectenna, on mesure la probabilité de validation de réveil  $\mathbb{P}(VR)$  jusqu'à obtenir une probabilité nulle.

Dans cette étude, l'antenne connectée sur l'USRP est omnidirectionnelle avec un gain de  $G_t = 2$  dBi. Le gain linéaire de transmission au niveau de LabVIEW est fixé à 31 dB, ce qui correspond à une puissance de transmission de  $P_t = 100$  mW. Ces paramètres influent

énormément sur la portée de télé-réveil, c'est pourquoi il est préférable qu'ils soient les plus élevés possible. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.9.

| Distance (cm)        | 10 | 35 | 60 | 85 | 110 | 120 | 130 | 135 | 140 |
|----------------------|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\mathbb{P}(VR)$ (%) | 98 | 98 | 98 | 99 | 99  | 97  | 86  | 93  | 0   |

TABLEAU 5.9: Probabilité de validation du réveil  $\mathbb{P}(VR)$  mesurée en fonction de la distance émetteur-récepteur de télé-réveil pour  $P_t = 100$  mW et  $G_t = 2$  dBi.

On constate ici une portée de télé-réveil de 1,35 m avec l'antenne omnidirectionnelle, puisque au-delà de cette distance la probabilité  $\mathbb{P}(VR)$  est toujours nulle. On remarque également le fait que cette probabilité a chuté de 93 % à 0 % en seulement 5 cm d'écart entre les mesures. Ces résultats sont cohérents puisque le récepteur ne traite pas correctement le signal de réveil en dessous d'un seuil de tension  $V_s$  en sortie de la rectenna. Cette tension  $V_s$  correspond également à la sensibilité du récepteur présenté précédemment. Elle est obtenue pour une distance comprise entre 135 cm et 140 cm ici.

Cette portée est relativement faible pour un récepteur de télé-réveil. Toutefois, le fait d'utiliser une antenne omnidirectionnelle est un facteur contraignant pour la récupération d'énergie. On effectue la même démarche avec deux antennes supplémentaires qui sont plus directives avec un gain linéaire plus élevé. Les antennes en questions sont une antenne Patch de gain 4 dBi et une antenne BiQuad de gain 10 dBi. On présente dans le tableau 5.10 les résultats obtenus avec les différentes antennes.

| Type d'antenne     | Gain $G_t$ (dBi) | Portée de télé-réveil (m) |
|--------------------|------------------|---------------------------|
| Omnidirectionnelle | 2                | 1,35                      |
| Patch              | 4                | 3,6                       |
| BiQuad             | 10               | 25                        |

TABLEAU 5.10: Portée de télé-réveil en fonction des antennes utilisées à l'émission.

On constate que l'antenne émettrice joue un rôle déterminant dans la portée de télé-réveil. En augmentant la directivité et le gain de l'antenne, la portée passe de 1,35 m à 25 m. Cette portée de 25 m est très acceptable pour les récepteurs de télé-réveil, en comparaison des autres récepteurs de la littérature.

Par ailleurs, nous avons utilisé un réseau rectenna dimensionné pour la récupération d'énergie RF ambiante. Il serait intéressant d'effectuer le dimensionnement d'une rectenna pour un fonctionnement associé à notre récepteur de télé-réveil. Dans ce cas, il serait envisageable d'adapter les impédances de sortie de la rectenna avec l'impédance d'entrée de notre système pour une meilleure efficacité, et donc une plus grande portée de télé-réveil. Cette étude ne peut toutefois pas être conduite dans le cadre de cette thèse en raison de l'expertise nécessaire pour réaliser une rectenna.

### 5.5.3 Méthode de mesure de la consommation énergétique du récepteur de télé-réveil

La consommation énergétique du récepteur de télé-réveil est un élément crucial pour approuver notre approche. On présente ici comment cette consommation est mesurée en pratique avec le montage expérimental et l'exploitation des mesures.

#### Montage expérimental

On alimente le récepteur de télé-réveil par un générateur de tension continue. On place deux dispositifs de mesure de la consommation de courant entre le récepteur et le générateur de tension continue. On peut choisir entre l'ampèremètre et la résistance de mesure grâce à l'interrupteur. L'ampèremètre permet d'avoir une mesure de consommation statique du système alors que la résistance sera essentiellement utilisée pour étudier la consommation dynamique du système. On peut également effectuer une validation croisée des mesures avec ces deux dispositifs.

On utilise aussi 3 sondes qui sont branchées en entrées de l'oscilloscope. On place la première sonde pour mesurer la tension aux bornes de la résistance afin de mesurer le courant consommé par le récepteur. La deuxième sonde est placée à la sortie du convertisseur RF/DC afin de déceler l'arrivée du message AdR. Enfin, la troisième sonde est connectée à la sortie IRQ du récepteur de télé-réveil. Le schéma synoptique du circuit est présenté sur la figure 5.27.

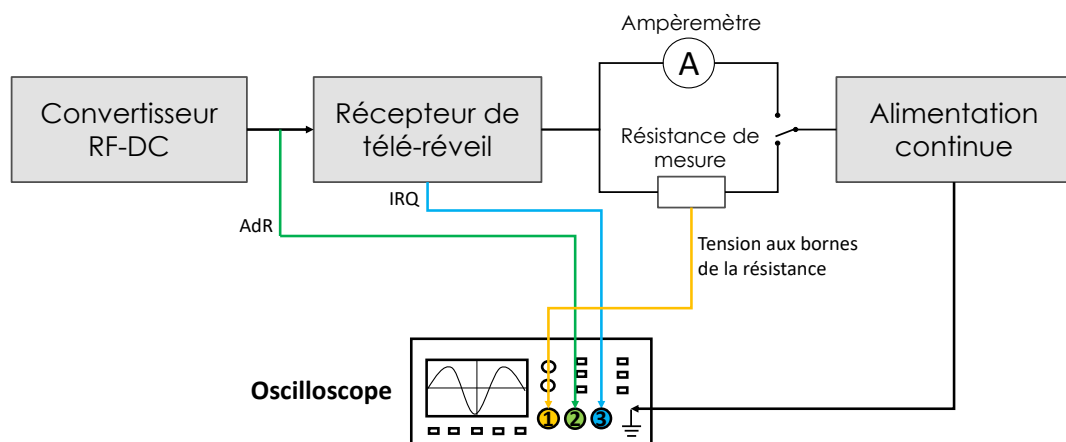


FIGURE 5.27: Schéma synoptique de mesure de consommation de courant du récepteur de télé-réveil.

On présente ensuite le circuit électronique du montage lorsque le récepteur de télé-réveil est la version platine du PIC24F sur la figure 5.28. La tension délivrée par le générateur est



notée  $U_{Gen}$  et la valeur de la résistance de mesure est notée  $R_m$ . On a toujours le PC qui envoie le message AdR à travers le matériel USRP et le logiciel LabVIEW. Le programme sous LabVIEW est défini pour l'envoi d'une seule trame du message AdR.

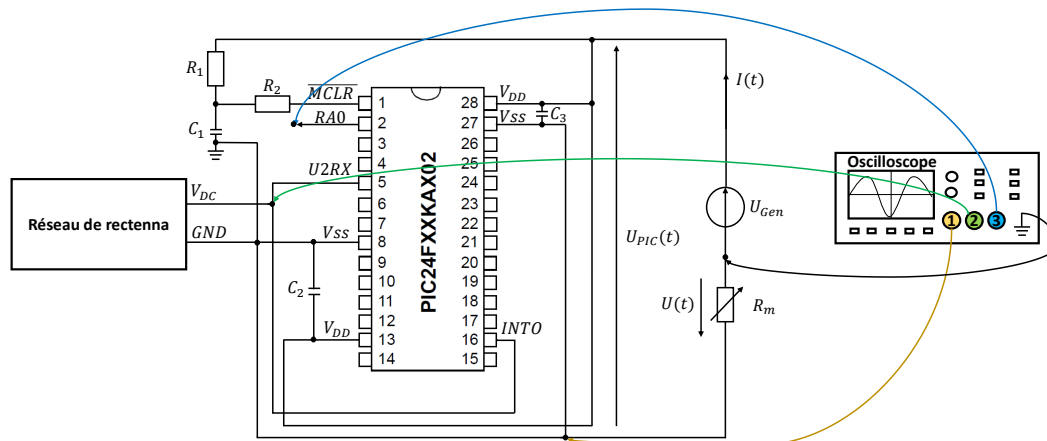


FIGURE 5.28: Circuit du montage pour la mesure de consommation d'énergie du PIC24F lors de la réception de l'AdR.

### Calcul de l'énergie consommée

On présente sur la figure 5.29 les signaux mesurés par l'oscilloscope lors de la réception de l'AdR. La réception du préambule réveille bien le PIC24F du mode sommeil profond vers un mode actif. En effet, la tension aux bornes de la résistance  $R_m$  augmente au moment de la réception du préambule. Cela signifie que la consommation de courant du système augmente également étant donné que le microcontrôleur se réveille. Après réception, décodage et validation de l'adresse, le PIC24F envoie une IRQ par le biais du port RA0 comme on peut le voir sur l'oscilloscope.

On souhaite quantifier deux paramètres importants pour caractériser les performances du système de télé-réveil, qui sont le délai de réveil et l'énergie consommée pour traiter un AdR. Le délai de réveil est défini comme étant le temps écoulé entre le début de réception du préambule et l'envoi de l'IRQ. Ce délai se mesure directement sur l'oscilloscope comme illustré sur la figure 5.29.

Concernant l'énergie consommée pour traiter un message AdR, le profil de tension mesurée aux bornes de la résistance nous permet de calculer le courant consommé par le système. Notons  $U_m(t)$  la tension mesurée aux bornes de la résistance  $R_m$ ,  $I(t)$  le courant parcourant le circuit au cours du temps  $t$ . La loi d'Ohm nous permet d'écrire :

$$U_m(t) = R_m \times I(t) \quad (5.4)$$

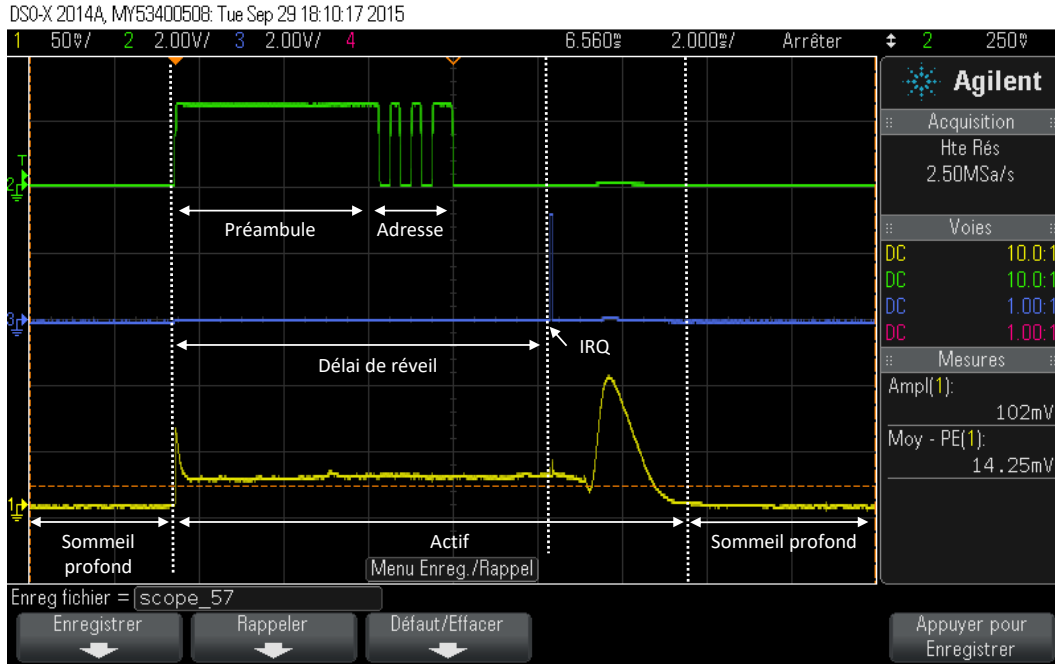


FIGURE 5.29: Capture d'écran de l'oscilloscope lors de la réception d'un message AdR.

La tension aux bornes du PIC24F est notée  $U_{PIC}$  et se calcule par :

$$U_{PIC}(t) = U_{Gen} - U_m(t) \quad (5.5)$$

La puissance instantanée  $P(t)$  consommée par le PIC24F est définie par :

$$P(t) = U_{PIC}(t) \times I(t) \quad (5.6)$$

$$P(t) = (U_{Gen} - U_m(t)) \times \frac{U_m(t)}{R_m} \quad (5.7)$$

On définit ensuite l'énergie consommée  $E$  au cours d'une période  $\Delta T$  par :

$$E = \int_0^{\Delta T} P(t) dt \quad (5.8)$$

$$E = \int_0^{\Delta T} (U_{Gen} - U_m(t)) \times \frac{U_m(t)}{R_m} dt \quad (5.9)$$

On peut simplifier le calcul à partir d'ici en faisant l'hypothèse que  $U_m(t)$  est négligeable devant  $U_{Gen}$ , soit  $U_m(t) \ll U_{Gen}$ . Cette hypothèse est assurée en choisissant la bonne résistance  $R_m$  par rapport au courant mesuré. Si on utilise une résistance shunt, la valeur de la résistance est assez faible pour que la tension  $U_m$  qui la traverse reste très faible. Si on utilise une résistance normale, il faut connaître l'ordre de grandeur du courant consommée pour choisir la valeur de résistance adéquate. Dans l'exemple de la figure 5.29, on peut voir que la tension  $U_m(t)$  est au maximum égale à 102 mV, ce qui équivaut à 3 % de la tension

$U_{Gen}$ . Avec cette hypothèse, on peut écrire :

$$E = \int_0^{\Delta T} U_{Gen} \times \frac{U_m(t)}{R} dt \quad (5.10)$$

$$E = \frac{U_{Gen}}{R_m} \int_0^{\Delta T} U_m(t) dt \quad (5.11)$$

On fait intervenir la valeur moyenne de la tension  $U_m(t)$ , noté  $\bar{U}$ , puisque celle-ci est calculable au niveau de l'oscilloscope. La valeur moyenne est définie de la manière suivante :

$$\bar{U} = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} U_m(t) dt \quad (5.12)$$

On a donc l'énergie consommée par le PIC24F par la relation :

$$E = \frac{U_{Gen}}{R_m} \times \bar{U} \Delta T \quad (5.13)$$

En ne faisant pas l'hypothèse plus haut, on peut arriver à une forme similaire si ce n'est un facteur additif :

$$E = \frac{U_{Gen}}{R_m} \times \bar{U} \Delta T - \frac{1}{R} \int_0^{\Delta T} U_m(t)^2 dt \quad (5.14)$$

Ce montage expérimental permet de mesurer la consommation instantanée de courant du récepteur de télé-réveil. De plus, nous pouvons calculer la consommation d'énergie du microcontrôleur pour décoder le message AdR avec la méthode présentée. Nous présentons les résultats de mesure dans les deux prochaines sous-sections.

#### 5.5.4 Mesure statique de consommation de courant du récepteur de télé-réveil

Avant de mesurer la consommation énergétique du système lors du fonctionnement, on s'intéresse à la consommation statique du récepteur de télé-réveil selon l'état dans lequel il se trouve. Cette consommation dépend essentiellement du microcontrôleur, c'est pourquoi on présente les résultats de chaque version du prototype séparément.

##### Atmega328P

On présente ici les résultats de mesure de courant obtenu avec l'ampèremètre pour la version 1 du prototype avec l'ATmega328P. La tension d'alimentation est de 5 V, on choisit de mesurer le courant consommé lorsque l'ATmega328P se trouve en mode *Power-down* et en mode actif. Le mode *Power-down* correspond au mode veille tandis que le mode actif correspond au décodage de l'AdR. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.11 et sont

comparés aux valeurs données dans le document technique pour un fonctionnement à 5 V et 25 °C.

| Mode de fonctionnement | <i>Power-down</i> | Actif  |
|------------------------|-------------------|--------|
| Courant mesuré         | 100 $\mu$ A       | 7 mA   |
| Document technique     | 0,1 $\mu$ A       | 5,4 mA |

TABLEAU 5.11: Mesure de courant pour les deux modes de fonctionnement.

On constate un écart notable entre le courant mesuré et les valeurs fournies dans le document technique, surtout pour le mode *Power-down*. Il est probable que ce mode ne soit pas bien défini avec la librairie Arduino. Quoi qu'il en soit, l'ATmega328P ne fait pas partie des microcontrôleurs à très basse consommation. On l'avait choisi pour sa rapidité de programmation à travers la plateforme Arduino. C'était aussi le seul microcontrôleur dont on disposait au moment du premier prototypage. On décidera par la suite de prendre un PIC24F16KA102 à la place, celui-ci étant défini comme un microcontrôleur à consommation extrêmement basse, tout en ayant les mêmes fonctionnalités que l'ATmega328P.

## PIC24F

On s'intéresse à la consommation statique de courant du PIC24F pour différents modes de fonctionnement. Cette consommation dépend notamment de la configuration de l'oscillateur choisi. On mesure donc la consommation de courant du microcontrôleur pour plusieurs configurations de l'oscillateur.

Le PIC24F est alimenté par le générateur de tension continue à 3,3 V et l'ampèremètre est utilisé dans un premier temps pour la mesure de courant. L'oscilloscope permet de visualiser l'horloge à partir d'une sonde placée sur la patte OSCO du PIC24F. Un PICkit 3 est connecté au PIC24F afin de programmer le microcontrôleur par ICSP<sup>10</sup>. Il faut absolument déconnecter ce dernier lors des mesures de courant puisqu'il augmente la consommation globale du circuit.

On choisit de considérer cinq modes de fonctionnement. Le premier est un fonctionnement assez typique où l'oscillateur interne FRC à 8 MHz est utilisé, avec comme programme principal une boucle vide qui tourne infiniment ( `while(1) { }` ). Le résultat du dispositif est présenté sur la figure 5.30 avec la photographie du dispositif et une capture d'écran de l'oscilloscope. Le courant mesuré est de 4,56 mA, cette valeur est comprise dans l'intervalle donné par le document technique. On constate également que la fréquence d'instruction  $F_{cy}$  est de 4 MHz, ce qui correspond bien à un oscillateur cadencé à 8 MHz.

<sup>10</sup> Abréviation anglaise : *In-Circuit Serial Programming*.

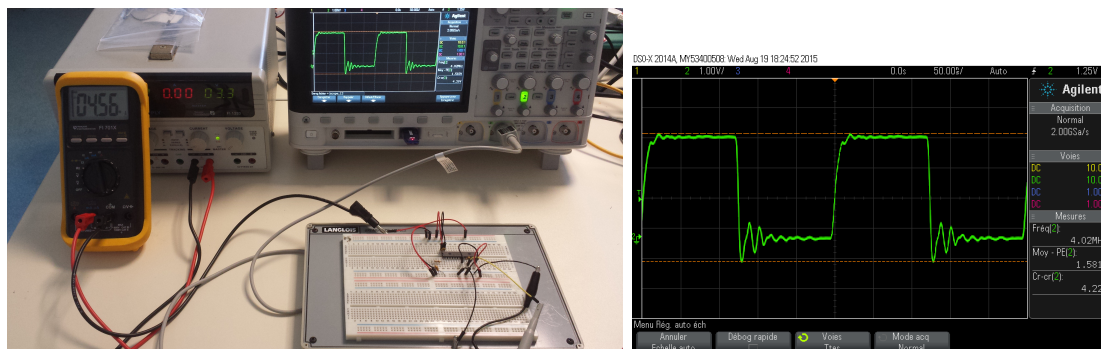


FIGURE 5.30: Fonctionnement avec l'oscillateur de type FRC à 8 MHz.

Ensuite, on décide de diminuer la fréquence de cet oscillateur FRC à 31 kHz en définissant le prescaler adéquat. Le programme reste le même que le précédent, on change juste les registres OSCCON et CLKDIV de la manière suivante :

```
OSCCON = 0b0111000000000000
```

```
CLKDIV = 0b0000011100000000
```

Les résultats sont présentés sur la figure 5.31. Le courant est descendu à  $300 \mu\text{A}$ , le document technique ne spécifie pas de valeur pour ce mode de fonctionnement. On constate également que l'oscillateur est à la bonne fréquence.

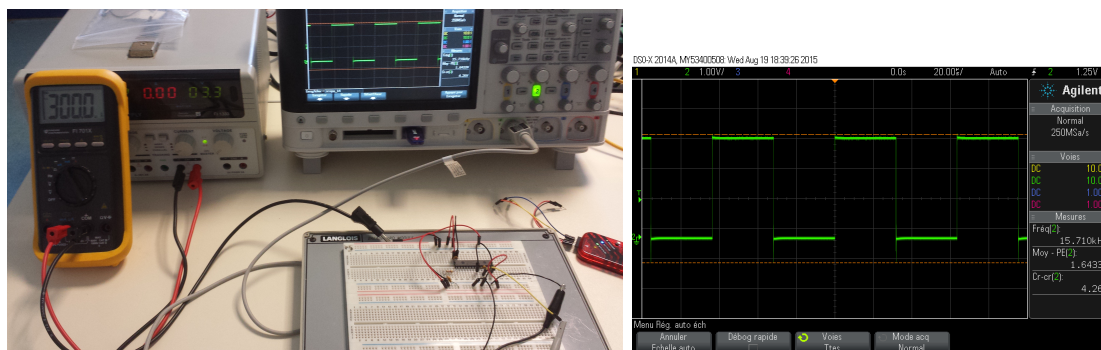


FIGURE 5.31: Fonctionnement avec l'oscillateur de type FRC à 31 kHz.

On change d'oscillateur pour que le microcontrôleure fonctionne avec l'oscillateur à basse consommation LPRC à 32 kHz. Le programme est toujours une boucle vide infinie. La figure 5.32 nous indique que le courant est descendu à  $28 \mu\text{A}$ , ce qui est dix fois moins que le précédent cas où l'oscillateur FRC fonctionnait à une fréquence assez similaire.

On éteint maintenant les oscillateurs en mettant le PIC24F en mode veille à travers l'instruction `sleep()`. Comme on peut le constater sur la figure 5.33, le microcontrôleure est bien en mode veille puisqu'il n'y a aucun signal d'horloge. Le courant consommé par le PIC24F est alors de  $6,2 \mu\text{A}$ . Cette valeur est validée par le document technique puisqu'elle doit être comprise entre  $4,5$  et  $6,6 \mu\text{A}$ .

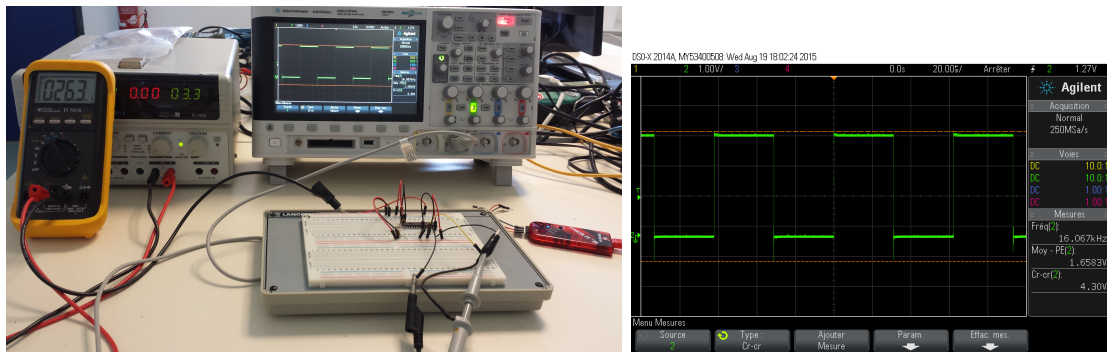


FIGURE 5.32: Fonctionnement avec l'oscillateur de type LPRC à 32 kHz.

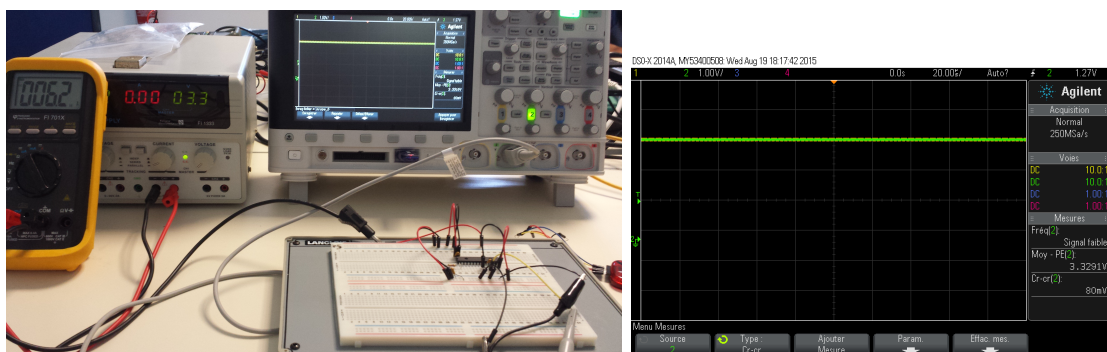


FIGURE 5.33: Fonctionnement en mode sleep.

On active ensuite le mode sommeil profond en modifiant le registre associé, de la manière suivante par exemple :

$$DSCONbits.DSEN = 1$$

La figure 5.34 indique que le courant est descendu à  $0,9 \mu\text{A}$ , ce qui est supérieur aux valeurs données dans la documentation technique. On ne peut toutefois pas être assez précis dans cette mesure avec l'ampèremètre. En effet, le plus petit calibre est utilisé pour des mesures de l'ordre du  $\mu\text{A}$  avec une sensibilité de  $0,1 \mu\text{A}$ .

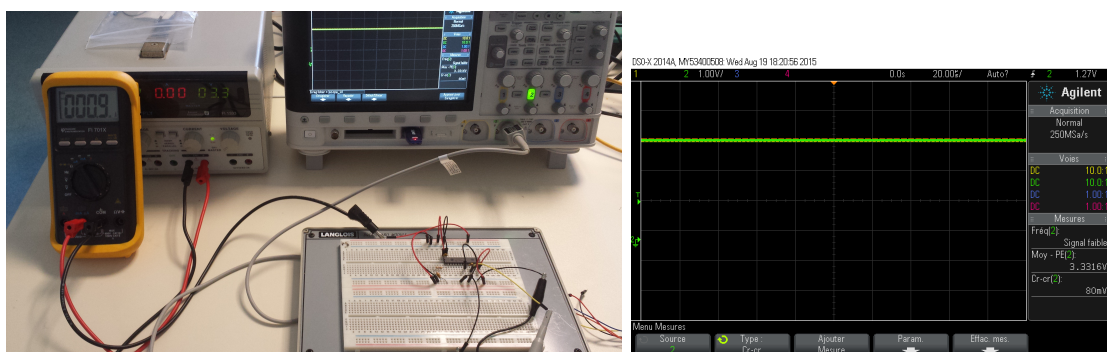


FIGURE 5.34: Fonctionnement en mode deep sleep.

On choisit de remplacer l'ampèremètre par une résistance pour cette dernière mesure de courant. En prenant une résistance de  $1 \text{ M}\Omega$ , on mesure une tension moyenne de  $205,1 \text{ mV}$  lorsque le PIC24F est en mode sommeil profond. La loi d'Ohm nous indique que le courant

consommé est de 205,1 nA. Cette valeur est bien comprise dans l'intervalle donné par le document technique.

On synthétise dans le tableau 5.12 les valeurs mesurées de courant consommé pour les modes de fonctionnement retenus, avec une comparaison avec les valeurs données dans le document technique. Cette sous-section permet de valider la mise en pratique des différents modes de fonctionnement et surtout le niveau de consommation énergétique associé.

| Mode               | FRC / 8 MHz  | LPRC / 32 kHz | Sommeil profond |
|--------------------|--------------|---------------|-----------------|
| Courant mesuré     | 4,56 mA      | 28 $\mu$ A    | 205,1 nA        |
| Document technique | 3,05-4,60 mA | 15-55 $\mu$ A | 35-300 nA       |

TABLEAU 5.12: Mesure de courant pour différents modes de fonctionnement.

### 5.5.5 Mesure et optimisation de la consommation énergétique du microcontrôleur

Dans la continuité de la sous-section précédente, on s'intéresse maintenant à l'énergie consommée par le récepteur pour traiter un message AdR.

Le choix de la fréquence d'horloge influe beaucoup sur la consommation du microcontrôleur. Le fait de travailler à basse fréquence permet de baisser la consommation de courant comme on a pu le voir précédemment. Cependant, le temps d'exécution des instructions est diminué lorsque l'on baisse la fréquence de l'oscillateur. Pour effectuer une tâche à faible fréquence d'horloge, on consomme peu d'énergie pendant un temps assez long. À fréquence d'horloge élevée, on consomme certes plus d'énergie mais le temps d'exécution est plus rapide. Il serait intéressant de comparer l'énergie consommée pour effectuer une même tâche avec des horloges différentes. Dans notre cas, la tâche est de décoder l'adresse reçue après un réveil du microcontrôleur.

On peut intégrer la consommation du microcontrôleur sur un cycle de réveil, qui correspond au démarrage de l'oscillateur suivi du décodage de l'adresse. Diverses instructions sont également réalisées pour réduire la consommation d'énergie et activer par la suite le mode veille. On utilise le même programme pour effectuer ces mesures de consommation, si ce n'est le choix de l'oscillateur et le choix de la fréquence qui varient dans le programme.

Concernant l'intervalle temporel d'intégration de la consommation, il commence lorsque le signal AdR est reçu au niveau du microcontrôleur et il se termine lorsque le microcontrôleur repasse à nouveau en mode veille, après validation de l'adresse.

La méthode de mesure présentée en section 5.5.3 est appliquée pour différentes configurations de l'oscillateur. À titre représentatif, les étapes de mesures et de calculs sont détaillées

pour l'utilisation de l'oscillateur de type LPRC, à la fréquence de 32 kHz. La longueur minimale de préambule est ici de 18 bits, le choix d'une longueur de 20 bits offre une petite marge de sécurité. Le débit binaire considéré est de 4 kbps puisque c'est le débit maximal atteignable avec cet oscillateur. En effet, le débit maximal est égal au quart de la fréquence d'instruction  $F_{cy}$  qui est ici de 16 kHz.

Au niveau de la résistance de mesure, les résultats de consommation de courant obtenus dans la section 5.5.4 permettent de choisir la résistance adaptée pour cette mesure. Pour rappel, le courant mesuré est de 28  $\mu\text{A}$  lorsque le microcontrôleur fonctionne avec cet oscillateur. Afin de respecter la condition  $U_m(t) \ll U_{Gen}$ , une résistance de 1 k $\Omega$  est choisie. La tension  $U_m(t)$  est donc de l'ordre de 28 mV, ce qui est très faible comparé à la tension du générateur de 3,3 V. La figure 5.35 permet de calculer l'énergie consommée lors du réveil du PIC24F.

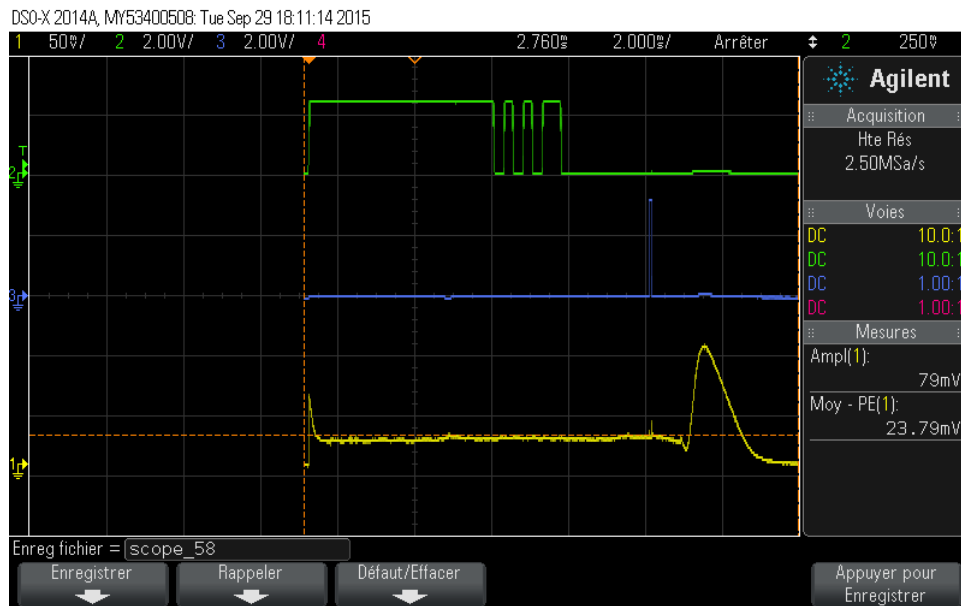


FIGURE 5.35: Capture d'écran de l'oscilloscope lors de la réception d'un *Appel de réveil*.

La tension moyenne  $\bar{U}$  au cours du fonctionnement du MCU après le réveil est de 23,79 mV, mesurée pendant un intervalle  $\Delta T$  de 12,87 ms. L'énergie consommée au cours du mode actif est alors égale à :

$$E = \frac{3,3}{1000} \times 23,79 \cdot 10^{-3} \times 12,87 \cdot 10^{-3} \quad (5.15)$$

$$E = 1,01 \mu\text{J}$$

Cette démarche est conduite pour les différentes configurations de l'oscillateur ou les configurations propres à notre message de réveil. Les résultats sont groupés dans le tableau 5.13. Concernant les mesures effectuées pour l'oscillateur de type FRC, une variation de la



longueur du préambule et du débit binaire a été considérée afin d'étudier leur influence. La longueur du préambule peut être très largement réduite avec cet oscillateur puisque le réveil du microcontrôleur s'effectue beaucoup plus rapidement. En jouant sur ces deux paramètres, on obtient une énergie consommée de  $16,6 \mu\text{J}$ . Pour l'oscillateur de type LPFRC, on a choisi de travailler avec deux fréquences différentes. Avec la fréquence maximale de 500 kHz et la longueur minimale de préambule de 5 bits, on obtient sensiblement la même énergie consommée qu'en utilisant la fréquence de 62,5 kHz et une longueur de préambule minimale de 10 bits. Le délai de réveil est tout de même beaucoup plus faible avec la fréquence de 500 kHz, puisque le démarrage est plus rapide et le préambule plus petit. Aucune variation n'a été effectuée pour l'oscillateur de type LPRC puisqu'on est dans le cas optimum pour cette fréquence de l'oscillateur.

| Type d'oscillateur                  | FRC   |      |      | LPFRC   |          | LPRC   |
|-------------------------------------|-------|------|------|---------|----------|--------|
| Fréquence                           | 8 MHz |      |      | 500 kHz | 62,5 kHz | 32 kHz |
| Longueur Préambule (bits)           | 20    | 2    | 2    | 5       | 10       | 20     |
| Débit binaire (kbps)                | 4     | 4    | 8    | 8       | 8        | 4      |
| Délai de réveil (ms)                | 7,53  | 2,94 | 1,59 | 1,94    | 3,42     | 8,88   |
| Courant consommé ( $\mu\text{A}$ )  | 3337  | 3196 | 2970 | 181     | 95,5     | 23,8   |
| Énergie consommée ( $\mu\text{J}$ ) | 83,7  | 32,7 | 16,6 | 1,79    | 1,71     | 1,01   |

TABLEAU 5.13: Délais de réveil et énergie consommée lors d'un réveil avec l'utilisation de différents types d'oscillateurs.

Ces résultats montrent qu'il est préférable d'utiliser l'oscillateur LPRC pour notre système de réveil. En effet, cette configuration donne de meilleures performances au niveau de la consommation énergétique avec une énergie consommée de  $1,01 \mu\text{J}$  lors du mode actif. Le mode actif comprend le décodage de l'adresse et l'envoi de l'IRQ pour réveiller les autres composants du nœud. Au niveau réactivité, ce choix n'est pas le plus adéquat puisque le délai de réveil est de 8,88 ms contre des délais de 1,59 ms et 1,94 ms pour les oscillateurs de type FRC et LPFRC respectivement. S'il faut faire un compromis entre réactivité du réveil et énergie consommée, le choix de l'oscillateur de type LPFRC à 500 kHz est relativement performant puisqu'il permet un réveil 4 fois plus rapide pour moins du double en énergie.

Pour être plus précis dans la comparaison précédente, il faudrait comparer l'énergie consommée sur le même intervalle de temps, étant donné que la durée du mode actif n'est pas identique pour chaque mode. Le fonctionnement avec l'oscillateur de type LPRC est le plus long, il est donc préférable de le prendre comme référentiel. L'énergie supplémentaire à ajouter aux autres modes est en fait l'énergie consommée en mode sommeil profond pendant le différentiel de temps d'activité. Par ailleurs, cette correction ne fera que renforcer notre conclusion précédente puisque l'énergie consommée pour le mode de fonctionnement avec oscillateur LPRC reste inchangée.

Le courant consommé en mode sommeil profond est de 205,1 nA. On calcule l'énergie supplémentaire  $\Delta E$  à ajouter pour le mode de fonctionnement avec oscillateur FRC à 8 MHz. Comme c'est le mode le plus rapide, le différentiel de temps est le plus grand et ainsi l'énergie supplémentaire du mode veille est la plus grande parmi les modes choisis.

$$\Delta E = 3,1 \times 205,1 \cdot 10^{-9} \times (12,9 - 3,1) \times 10^{-3} \quad (5.16)$$

$$\Delta E = 6,2 \text{ nJ}$$

L'énergie supplémentaire  $\Delta E$  du mode sommeil profond est de l'ordre du nJ alors que l'énergie consommée en mode actif est de l'ordre du  $\mu\text{J}$ . Il n'est donc pas utile de l'incorporer dans le calcul précédent puisqu'il ne changera pas le résultat. Ce calcul montre également le fait que la potentielle réduction d'énergie doit passer par la réduction d'énergie lors du mode actif du microcontrôleur.

Pour conclure cette section, nous avons vu un ensemble de mesures qui permettent de caractériser le système de télé-réveil, et plus particulièrement le récepteur. La section suivante s'appuie sur ces mesures pour effectuer une comparaison avec les récepteurs de la littérature.

## 5.6 Comparaison des résultats avec la littérature

Dans le but d'évaluer les performances du récepteur de télé-réveil proposé, on effectue une comparaison avec les récepteurs de télé-réveil proposés dans la littérature.

Comme mentionné dans le chapitre 1, l'état de l'art sur les récepteurs de télé-réveil présente différents types de récepteurs de télé-réveil. Nous y avons sélectionné les récepteurs les plus performants parmi ceux qui existent afin d'effectuer une comparaison sur les critères standards tels que le courant consommé, la portée ou encore le débit binaire. À notre connaissance, il n'existe pas de travaux qui prennent en considération le délai de réveil ainsi que le temps d'activité du système de réveil pour calculer l'énergie consommée par le système lors du traitement d'un AdR. En effet, le critère de comparaison au niveau de l'énergie est souvent pris comme étant le courant consommé en mode inactif et en mode actif pour le décodage. Cependant, tous les systèmes ne disposent pas du même temps de traitement pour le décodage de l'adresse ni le même délai de réveil, ce qui ne permet pas de les comparer efficacement avec seulement la donnée du courant consommé par le système. Ne disposant pas des temps d'activité lors du traitement d'un AdR pour tous les autres systèmes, on analyse dans un premier temps le courant consommé pour l'étude comparative.

| Type              | Référence | $F_p$ (MHz) | Adressage | $S$ (dBm)          | Portée (m)                 | $D_b$ (kbps) | $I_c$ ( $\mu$ A)        | $V_{cc}$ (V) |
|-------------------|-----------|-------------|-----------|--------------------|----------------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| Faible complexité | [80]      | 433         | Non       | -51                | 10 (+10 dBm) <sup>11</sup> | 2 - 80       | 0,18                    | 1,5          |
|                   | [79]      | 868         | Non       | N.C. <sup>12</sup> | 15 (+27 dBm)               | 2            | 0,876                   | 3            |
|                   | [81]      | 915 / 2400  | Non       | -80 / -69          | N.C.                       | 10           | 51                      | 1            |
|                   | [82]      | 928         | Oui       | -73                | N.C.                       | 1 / 200      | 4,7 / 599 <sup>13</sup> | 1,8          |
| Hétérodyne        | [84]      | 35          | Non       | -55                | N.C.                       | 200          | 55,7                    | 0,7          |
|                   | [85]      | 868         | Non       | -78                | N.C.                       | 0,5 - 4      | 34,1                    | 1,2          |
|                   | [83]      | 2400        | Non       | -82                | N.C.                       | 500          | 346                     | 1,2          |
| Corrélateur       | [86]      | 0,15        | Oui       | -67                | 5 (+33 dBm)                | 0,5 - 8      | 2,6 / 8,3               | 3            |
|                   | [70]      | 868         | Oui       | -53                | 100 (+20 dBm)              | 0,5 - 8      | 2,7 / 8,4               | 3            |
|                   | [87]      | 2400        | Oui       | -50                | 4 (0 dBm)                  | 50           | 19                      | 1            |
|                   | [88]      | 2400        | Oui       | -55                | N.C.                       | 100          | 8,5                     | 1,5          |
| RFID              | [89]      | 900         | Oui       | N.C.               | 5                          | N.C.         | 0                       | 3            |
|                   | [90]      | 915         | Non       | N.C.               | 11,2                       | N.C.         | 0                       | 3            |
| Microcontrôleur   | [92]      | 868         | Non       | -51                | 3 (+4,7 dBm)               | 0,86         | 57                      | 3            |
|                   | [93]      | 868         | Oui       | -32                | 7 (0 dBm)                  | 10           | 0,11                    | 1,8          |
| Microcontrôleur   | DoRa      | 2450        | Oui       | -45                | 25 (+20 dBm)               | 4            | 0,11 / 23,8             | 3,3          |

TABLEAU 5.14: Comparaison des caractéristiques de notre récepteur de télé-réveil avec la littérature .

<sup>11</sup>Puissance émise par l'émetteur.<sup>12</sup>Non Communiqué.<sup>13</sup>Consommation en mode veille / Consommation en mode actif.

On présente dans le tableau 5.14 un comparatif des récepteurs de télé-réveil. Comme on peut le voir, les récepteurs ne fonctionnent pas tous à la même fréquence porteuse, ce qui limite déjà les possibilités de comparaison. La sensibilité de notre récepteur est globalement inférieure aux autres récepteurs présentés ici. Une sensibilité de -45 dBm reste acceptable, surtout pour une fréquence porteuse à 2,45 GHz.

La portée de télé-réveil varie entre 3 et 100 m alors que la nôtre est de 25 m. La portée de notre récepteur de télé-réveil est donc assez convenable, étant donné qu'un seul récepteur dépasse les 25 m de portée. La portée de télé-réveil des récepteurs dans la bande des 2,4 GHz n'est pas donnée pour les autres récepteurs, à l'exception d'un récepteur à base de corrélateur [87]. De plus, on rappelle que la portée de notre récepteur pourrait être améliorée en travaillant sur un circuit de conversion RF/DC spécifique et surtout adapté au récepteur. Toutefois, il faut nuancer cette comparaison par le fait que les puissances d'émission du signal de réveil ne sont pas identiques. Il n'y a pas de standard actuellement pour le télé-réveil bien qu'il faille respecter les normes concernant les puissances d'émission, ce qui explique cette diversité des expérimentations.

Le débit binaire de notre récepteur de télé-réveil est relativement faible comparé à ceux proposés dans la littérature. En effet, il varie entre 0,5 et 500 kbps alors que le nôtre est de 4 kbps. On peut également faire varier notre débit binaire, mais la consommation résultante varie également. Généralement, la consommation de courant augmente avec le débit binaire bien que le décodage du message de réveil se fasse plus rapidement.

Notre étude porte essentiellement sur l'optimisation énergétique. Comme la consommation de courant des autres récepteurs n'est pas systématiquement fournie pour les deux modes de fonctionnement, il est difficile d'effectuer une bonne comparaison. La consommation de notre récepteur en mode veille est inférieure à tout ce qui est proposé dans la littérature ici, avec une consommation de courant au moins 10 fois inférieure aux autres récepteurs. Pour ce qui est du mode décodage, la consommation de courant est tout à fait correcte, surtout comparé aux autres récepteurs à base de microcontrôleur.

On retient par la suite deux récepteurs de télé-réveil pour la comparaison de consommation énergétique. Le récepteur basé sur un corrélateur [70] et un autre basé sur un microcontrôleur [93] sont retenus. Pour le corrélateur, ses caractéristiques font qu'il se place parmi les plus performants à l'heure actuelle. Les données de consommation énergétique en mode inactif et actif, ainsi que la durée du mode actif sont fournis pour le corrélateur, ce qui facilitera notre comparaison. Pour le récepteur à base de microcontrôleur, on dispose uniquement de la consommation en mode veille. On complétera les informations à partir de nos mesures effectuées car on utilise également un microcontrôleur de la même famille (PIC12LF). On se focalise ici sur la consommation énergétique liée au décodage d'adresse,

car c'est l'élément qui consomme le plus d'énergie dans le récepteur de télé-réveil, si ce n'est le seul pour certains récepteurs.

Afin de prendre en considération la période inactive et la période active du récepteur dans la consommation énergétique, on s'intéresse à la consommation moyenne de courant. Comme deux états sont définis pour le récepteur ici, la consommation moyenne est obtenue en pondérant les consommations de chaque état par la proportion de temps passé dans un état. On fait intervenir la période de requête  $T_{req}$ , qui est la période à laquelle les récepteurs de télé-réveil sont interrogés. Cette période  $T_{req}$  correspond au trafic du réseau et elle varie selon l'application du RCSF. Nous considérons une variation de  $T_{req}$  comprise entre 25 ms et 3 s pour représenter une multitude d'applications potentielles.

La consommation moyenne de courant est donnée par la relation suivante :

$$\bar{I} = \frac{T_{req} - T_{act}}{T_{req}} I_{inact} + \frac{T_{act}}{T_{req}} I_{act} \quad (5.17)$$

où

- $I_{inact}$  est la consommation de courant en mode inactif ( $\mu\text{A}$ ),
- $I_{act}$  est la consommation de courant en mode actif ( $\mu\text{A}$ ), item  $T_{act}$  est la durée du mode actif pour le décodage d'un message AdR (s).

| Composant d'adressage | $I_{inact}$ ( $\mu\text{A}$ ) | $I_{act}$ ( $\mu\text{A}$ ) | $T_{act}$ (ms) |
|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------|
| Corrélateur [70]      | 2,6                           | 8,8                         | 10,2           |
| MCU - FRC(8 MHz) [93] | 0,2                           | 1970                        | 1,7            |
| MCU - LPFRC (500 kHz) | 0,2                           | 181                         | 3,3            |
| MCU - LPRC (32 kHz)   | 0,2                           | 23,8                        | 12,87          |

TABLEAU 5.15: Paramètres considérés pour le calcul de consommation moyenne de courant pour divers composants d'adressage.

Les paramètres de consommation pour chaque approche sont donnés dans le tableau 5.15. Pour notre approche, on présente les résultats pour les oscillateurs LPFRC à 500 kHz et LPRC à 32 kHz. On représente sur la figure 5.36 l'évolution de la consommation moyenne de courant en fonction de la période  $T_{req}$ . On constate que notre approche consomme globalement moins d'énergie que les deux autres récepteurs. En fait, le corrélateur consomme moins de courant lorsque la période  $T_{req}$  est inférieure à 0,1 s. Dans ces conditions, le récepteur de télé-réveil est sollicité très fréquemment. Comme la consommation du corrélateur en mode actif est la plus faible, cela explique pourquoi il consomme moins d'énergie que les autres approches. À l'inverse, notre approche consomme moins d'énergie pour des périodes  $T_{req}$  supérieures à 0,1 s car la consommation en mode inactif est plus faible. C'est d'ailleurs ce type de scénario qui est privilégié à l'heure actuelle puisque les récepteurs de télé-réveil sont envisagés pour des RCSF à faible taux d'activité. Par ailleurs, l'utilisation de l'oscillateur

FRC n'est pas la plus adéquate ici, à moins de vouloir une réponse rapide du nœud de capteur.

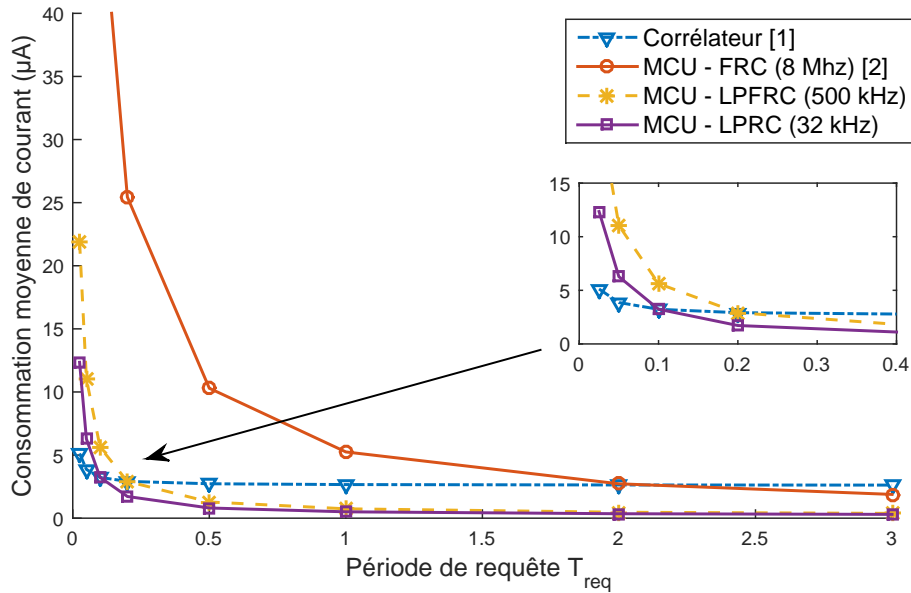


FIGURE 5.36: Évolution de la consommation moyenne de courant du système d'adressage en fonction de la période de requête.

Nous pouvons donc dire que notre approche présente globalement les meilleures performances au niveau de la consommation énergétique. Cette faible consommation s'obtient toutefois au détriment d'une sensibilité et d'un débit plus faible du récepteur.

## 5.7 Conclusion

Ce chapitre était consacré à la mise en œuvre expérimentale de notre approche. L'objectif était de valider l'implémentation des protocoles DoRa et DC-DoRa conjointement au système de télé-réveil. Le système ainsi développé a permis d'effectuer des mesures de performance dans un cadre expérimental.

Dans la première partie du chapitre, nous avons présenté le contexte expérimental avec les matériels utilisés et développés. Cette partie est également un support pour aider à la reproduction des résultats si nécessaire.

Pour ce qui est des résultats obtenus, nous avons dans un premier temps présenté les résultats intermédiaires qui valident notre approche et le fonctionnement du système. Les expériences ont montré que les récepteurs peuvent être réveillés de manière sélective à travers l'adresse insérée dans le message AdR. Les protocoles de communication DoRa et DC-DoRa ont également pu être implémentés en pratique avec le système développé. Par ailleurs,

nous avons effectué une validation croisée de notre implémentation en comparant les résultats expérimentaux et simulés. Les caractéristiques mesurées telles que la sensibilité de réception ou la consommation énergétique ont aussi été injectées dans le simulateur afin de le rendre plus réaliste.

Enfin, nous avons caractérisé les performances du système de télé-réveil avec des mesures expérimentales. Certaines mesures ne mettent pas forcément en avant le système développé ici. On pense notamment à la sensibilité du récepteur qui est de -45 dBm, mais il est tout à fait envisageable d'améliorer cet aspect. Notre objectif principal est avant tout l'optimisation de la consommation énergétique. Le récepteur de télé-réveil proposé répond à cette problématique puisque sa consommation est globalement plus faible que ceux proposés dans la littérature.

# Conclusion générale et perspectives

## Synthèse

Ce mémoire de thèse présente une optimisation énergétique des RCSF à travers un système et deux protocoles de télé-réveil que nous avons développés. Nos travaux conjoints sur le système et les protocoles DoRa et DC-DoRa ont permis une évaluation des performances de manière simulée et de manière expérimentale. Bien que ces éléments aient été présentés dans des chapitres différents, il y a une forte interdépendance entre le système et les protocoles de télé-réveil. En effet, les paramètres du système sont utilisés dans le simulateur pour l'évaluation des performances des protocoles. Il est alors primordial que la consommation énergétique du système soit optimisée pour que le protocole de télé-réveil puisse être efficace.

En ce sens, nous avons présenté la conception de notre système de télé-réveil ainsi qu'une caractérisation théorique de ses performances. Cette caractérisation théorique a notamment permis de connaître la consommation énergétique du système en mode veille et en mode actif. Nous avons bien un système à très basse consommation car la consommation en mode veille est de 110 nA contre 15,1  $\mu$ A en mode actif pour une alimentation à 3,3 V. De plus, nous avons caractérisé la durée des procédés de communication avec le système de télé-réveil. Cette étude a permis de connaître la latence de télé-réveil ainsi que la période minimale à laquelle on peut réveiller les nœuds. Les paramètres ainsi caractérisés donnent un aperçu des performances du système de télé-réveil, et ils sont utilisés en tant que paramètres d'entrée du simulateur. Cette étude a permis de considérer des paramètres concrets pour l'évaluation des performances des deux protocoles de télé-réveil.

D'une part, le protocole DoRa est le plus simple des deux protocoles de télé-réveil. Avec le protocole DoRa, les nœuds sont interrogés par la BS de manière sélective et en série sans problème de contention ou d'interférences internes dans le réseau. Nous avons montré que ce protocole est robuste par rapport au canal de propagation ou encore la taille du réseau. Nous avons également comparé ses performances avec deux protocoles MAC actuellement utilisés dans les RCSF, qui sont les protocoles 802.15.4 MAC et B-MAC. Le protocole 802.15.4



MAC utilisé est la version sans technique d'économie d'énergie alors que le protocole B-MAC intègre un fonctionnement par cycle d'activité pour économiser l'énergie des batteries. Les résultats obtenus montrent essentiellement que le protocole DoRa est plus efficace que ces deux protocoles d'un point de vue énergétique. En effet, on observe une différence d'au moins trois ordres de grandeur pour l'énergie par bit moyenne consommée par les nœuds en utilisant le protocole DoRa. Cette différence se situe au niveau de l'écoute passive du canal avec un récepteur de télé-réveil dont la consommation est effectivement de trois ordres de grandeur en dessous des modules radio traditionnels ( $15,1 \mu\text{A}$  avec le récepteur de télé-réveil contre  $16,6 \text{ mA}$  pour le module CC2500).

D'autre part, le protocole DC-DoRa est une optimisation du protocole DoRa. Bien que le protocole DoRa soit relativement efficace, le récepteur de télé-réveil rencontre toutefois deux problèmes identiques à un module radio traditionnel : la surécoute et les interférences co-canal. Nous avons ainsi traité ces deux problèmes intervenant au niveau du récepteur de télé-réveil. Nous avons proposé le protocole DC-DoRa afin d'éviter un gaspillage d'énergie causé par ces problèmes. Le principe du protocole DC-DoRa est d'implémenter un fonctionnement par cycle d'activité au niveau du récepteur de télé-réveil afin de désactiver le récepteur de télé-réveil temporairement. Nous avons par la suite analysé les performances des protocoles DoRa et DC-DoRa dans des conditions où les phénomènes de surécoute ou d'interférence co-canal sont accentués. Les résultats montrent que le protocole DC-DoRa est effectivement plus efficace car la proportion d'énergie causée par la surécoute ou les interférences sont considérablement réduites.

Toutefois, le protocole DC-DoRa a pour inconvénient d'augmenter la consommation d'énergie du nœud lorsqu'il n'y a pas de surécoute ou d'interférence notable dans le réseau, en comparaison au protocole DoRa. Il convient donc d'utiliser le protocole DoRa en cas d'absence d'interférences co-canal ou de phénomène de surécoute intense. Dans le cas contraire, on utilisera le protocole DC-DoRa pour réduire la consommation d'énergie du nœud.

De plus, nous avons mis en place un banc d'essai pour valider et caractériser le système et les protocoles de télé-réveil de manière expérimentale. Dans un premier temps, cela a permis de valider chaque étape du procédé de télé-réveil en intégrant la partie adressage notamment. Ensuite, les protocoles ont pu être validés expérimentalement sur des scénarios concrets. Pour finir, nous avons effectués des mesures de performances sur cette plateforme expérimentale afin de caractériser notre système de télé-réveil. Nous avons globalement obtenu des mesures qui concordent avec la caractérisation théorique que nous avons effectuée. Les mesures telles que la sensibilité, le débit binaire ou la consommation d'énergie ont permis de comparer notre approche de façon complète avec la littérature. Il en ressort que notre système de télé-réveil fait partie des plus performants en raison de sa faible consommation d'énergie. Cette faible consommation d'énergie est certes contrebalancée par une

sensibilité de -45 dBm et un débit de 4 kbps. Ces valeurs sont certes relativement faibles mais ils restent convenables pour un récepteur de télé-réveil.

## Perspectives

Dans la poursuite des travaux présentés dans ce mémoire de thèse, nous discuterons ici des différents points sur lesquels il est possible de poursuivre afin d'optimiser encore plus la durée de vie des nœuds.

- L'intégration de la récupération d'énergie sans fil dans notre système est la perspective la plus prometteuse. Notre récepteur de télé-réveil dispose déjà d'une rectenna pour la récupération d'énergie sans fil. L'ajout d'un module de gestion d'énergie telle que ceux présent dans le module Powercast permettra de récupérer l'énergie sans fil des messages envoyés dans le réseau. Cette énergie pourra alimenter en partie ou totalement le récepteur de télé-réveil, voir le nœud si l'énergie récupérée est suffisante. Ces travaux se trouvent dans un sujet d'actualité qui est le transfert simultané d'information et d'énergie sans fil<sup>14</sup>. Nous pensons que le système de télé-réveil pourrait être la base d'un système pouvant à la fois récupérer l'énergie sans fil et l'information.
- L'ajout du mécanisme de récupération d'énergie doit également être pris en compte d'un point de vue protocolaire. Le protocole DC-DoRa semble être une base adaptée pour ce type de protocole en raison de son fonctionnement par cycle d'activité. En fait, on peut envisager d'utiliser le module de récupération d'énergie sans fil lorsque le récepteur de télé-réveil est désactivé. Une fois que ce dernier est activé, on désactiverait la récupération d'énergie sans fil pour qu'il soit utilisé par le récepteur de télé-réveil. On aurait alors un fonctionnement intermittent entre réception d'énergie sans fil et récepteur de télé-réveil.
- La combinaison automatisée des protocoles DoRa et DC-DoRa permettrait au réseau d'être le plus économe d'un point de vue énergétique. Actuellement, nous préconisons l'emploi de l'un des protocoles selon l'environnement et l'application voulu. Il serait intéressant de développer un protocole adaptatif qui choisirait un des protocoles selon l'état du canal radio. Par exemple, le protocole en question pourrait adopter le comportement du protocole DC-DoRa en présence d'interférences co-canal alors qu'il commuterait sur le protocole DoRa une fois les interférences co-canal terminées. La commutation serait gérée par la BS qui informerait les nœuds par le biais d'un message de contrôle ou en ajoutant cette information dans le message AdR.
- L'amélioration du protocole de télé-réveil dans des topologies plus généralistes est également envisageable pour étendre le domaine d'application du protocole. Dans

---

<sup>14</sup>De l'anglais *Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT)*.

notre cas, une simple topologie en étoile a été considérée avec un accès statique à chaque nœud par une seule BS. On pourrait par exemple augmenter le nombre de BS pour former un réseau de type de cluster. Une autre approche est le réveil multi-saut où les nœuds peuvent réveiller leurs voisins pour communiquer, bien que l'émission d'un message AdR consomme actuellement trop d'énergie.

- L'amélioration de la portée de télé-réveil est un aspect important afin de faciliter le déploiement de cette technologie. Pour ce faire, il est envisageable d'ajouter des composants passifs ou à très basse consommation pour augmenter la sensibilité de réception. Cette étude devrait faire un compromis entre le gain en sensibilité et l'augmentation de la consommation d'énergie, afin que le système reste efficace d'un point de vue énergétique.

# Bibliographie

- [1] IHS Technology. IoT platforms: enabling the Internet of Things, March 2016. White paper.
- [2] Cisco. The Internet of Things, How the Next Evolution of the Internet is Changing Everything, 2011. White paper.
- [3] Luigi Atzori, Antonio Iera, and Giacomo Morabito. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15):2787–2805, October 2010.
- [4] Eleonora Borgia. The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues. *Computer Communications*, 54:1–31, December 2014.
- [5] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4):393–422, 2002.
- [6] Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee, and Dipak Ghosal. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52(12):2292–2330, August 2008.
- [7] Vidyasagar Potdar, Atif Sharif, and Elizabeth Chang. Wireless Sensor Networks: A Survey. In *Advanced Information Networking and Applications Workshops*, pages 636–641. IEEE, May 2009.
- [8] Priyanka Rawat, Kamal Deep Singh, Hakima Chaouchi, and Jean Marie Bonnin. Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies. *The Journal of Supercomputing*, 68(1):1–48, April 2014.
- [9] Sang Hyuk Lee, Soobin Lee, Heecheol Song, and Hwang Soo Lee. Wireless sensor network design for tactical military applications : Remote large-scale environments. In *Military Communications Conference*, pages 1–7. IEEE, October 2009.
- [10] Shizhuang Lin, Jingyu Liu, and Yanjun Fang. ZigBee Based Wireless Sensor Networks and Its Applications in Industrial. In *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, pages 1979–1983. IEEE, August 2007.
- [11] Luís M. Oliveira and Joel J. Rodrigues. Wireless Sensor Networks: a Survey on Environmental Monitoring. *Journal of Communications*, 6(2), April 2011.

- [12] Affoua Thérèse Aby. *Réseaux de capteurs sans fil étendus dédiés aux collectes de données environnementales*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2016.
- [13] A.S.M. Zahid Kausar, Ahmed Wasif Reza, Mashad Uddin Saleh, and Harikrishnan Ramiah. Energizing wireless sensor networks by energy harvesting systems: Scopes, challenges and approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38:973–989, October 2014.
- [14] Tianqing Wu and Hong-Chuan Yang. RF Energy Harvesting With Cooperative Beam Selection for Wireless Sensors. *IEEE Wireless Communications Letters*, 3(6):585–588, December 2014.
- [15] Muhammad R. A. Khandaker and Kai-Kit Wong. Robust Secrecy Beamforming With Energy-Harvesting Eavesdroppers. *IEEE Wireless Communications Letters*, 4(1):10–13, February 2015.
- [16] Minghe Mao, Ning Cao, Yunfei Chen, and Yulin Zhou. Multi-Hop Relaying Using Energy Harvesting. *IEEE Wireless Communications Letters*, 4(5):565–568, October 2015.
- [17] Neha Jain and Vivek Bohara. Energy Harvesting and Spectrum Sharing Protocol for Wireless Sensor Networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, pages 1–1, 2015.
- [18] Sennur Ulukus, Aylin Yener, Elza Erkip, Osvaldo Simeone, Michele Zorzi, Pulkit Grover, and Kaibin Huang. Energy Harvesting Wireless Communications: A Review of Recent Advances. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33(3):360–381, March 2015.
- [19] Xiao Lu, Ping Wang, Dusit Niyato, Dong In Kim, and Zhu Han. Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 17(2):757–789, 2015.
- [20] Laurent Chane Kuang Sang. *Stratégie de contrôle hybride d'un magnétron verrouillé par injection pour un Transport d'Énergie Sans Fil par onde hyperfréquence*. PhD thesis, Université de La Réunion, 2002.
- [21] Jérôme Rivière. *Conception et réalisation de rectenna en technologie guide d'onde coplanaire pour de faibles niveaux de puissance*. PhD thesis, Université de La Réunion, 2016.
- [22] Somasekhar Kandukuri, Nour Murad, and Richard Lorion. A single-hop clustering and energy efficient protocol for wireless sensor networks. In *Radio and Antenna Days of the Indian Ocean*, pages 1–2. IEEE, September 2015.

- 
- [23] Somasekhar Kandukuri, Jean Lebreton, Richard Lorion, Nour Murad, and Jean Daniel Lan-Sun-Luk. Energy-efficient data aggregation techniques for exploiting spatio-temporal correlations in wireless sensor networks. In *Wireless Telecommunications Symposium*, pages 1–6. IEEE, April 2016.
- [24] Somasekhar Kandukuri, Jean Lebreton, Nour Murad, Richard Lorion, and Denis Genon-Catalot. Data window aggregation techniques for energy saving in Wireless Sensor Networks. In *IEEE Symposium on Computers and Communications*, pages 226–231. IEEE, June 2016.
- [25] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco, and Andrea Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 7(3):537–568, May 2009.
- [26] Rahim Kacimi. *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université de Toulouse, 2009.
- [27] Tifenn Rault, Abdelmadjid Bouabdallah, and Yacine Challal. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey. *Computer Networks*, 67:104–122, July 2014.
- [28] Shan Lin, Jingbin Zhang, Gang Zhou, Lin Gu, John A. Stankovic, and Tian He. ATPC: adaptive transmission power control for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 223–236. ACM, 2006.
- [29] Luiz H.A. Correia, Daniel F. Macedo, Aldri L. dos Santos, Antonio A.F. Loureiro, and José Marcos S. Nogueira. Transmission power control techniques for wireless sensor networks. *Computer Networks*, 51(17):4765–4779, December 2007.
- [30] Shuguang Cui, A.J. Goldsmith, and A. Bahai. Energy-constrained modulation optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 4(5):2349–2360, September 2005.
- [31] Felipe M. Costa and Hideki Ochiai. A Comparison of Modulations for Energy Optimization in Wireless Sensor Network Links. In *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, pages 1–5. IEEE, December 2010.
- [32] A. Nosratinia, T.E. Hunter, and A. Hedayat. Cooperative communication in wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 42(10):74–80, October 2004.
- [33] Jin Woo Jung, Wensi Wang, and Mary Ann Ingram. Cooperative transmission range extension for duty cycle-limited wireless sensor networks. In *Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology (Wireless VITAE)*, pages 1–5. IEEE, February 2011.

- [34] Hong Dai. Throughput and delay in wireless sensor networks using directional antennas. In *5th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, pages 421–426. IEEE, December 2009.
- [35] Eirini Karapistoli, Ioannis Gragopoulos, Ioannis Tsetsinas, and Fotini-Niovi Pavlidou. A MAC protocol for low-rate UWB wireless sensor networks using directional antennas. *Computer Networks*, 53(7):961–972, May 2009.
- [36] Moshe Masonta, Yoram Haddad, Luca De Nardis, Adrian Kliks, and Oliver Holland. Energy efficiency in future wireless networks: Cognitive radio standardization requirements. In *17th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, pages 31–35. IEEE, September 2012.
- [37] M. Riduan Ahmad, Eryk Dutkiewicz, and Xiaojing Huang. A survey of low duty cycle MAC protocols in wireless sensor networks. *Book Chapter in, Wireless Sensor Network*, 2009.
- [38] Bashir Yahya and Jalel Ben-Othman. Towards a classification of energy aware MAC protocols for wireless sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 9(12):1572–1607, December 2009.
- [39] V. Rajendran, J.J. Garcia-Luna-Aceves, and K. Obraczka. Energy-efficient, application-aware medium access for sensor networks. In *International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference*, pages 623–630. IEEE, 2005.
- [40] Lodewijk FW Van Hoesel and Paul JM Havinga. A lightweight medium access protocol (LMAC) for wireless sensor networks: Reducing preamble transmissions and transceiver state switches. In *International Workshop on Networked Sensing Systems (INSS)*, 2004.
- [41] Surjya Ray, Ilker Demirkol, and Wendi Heinzelman. ATMA: advertisement-based TDMA protocol for bursty traffic in wireless sensor networks. In *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE*, pages 1–5. IEEE, 2010.
- [42] Sachin Gajjar, Nilav Choksi, Mohanchur Sarkar, and Kankar Dasgupta. LEFT: A Latency and Energy Efficient Flexible TDMA Protocol for Wireless Sensor Networks. *International Journal of Computer Network and Information Security*, 7(2):1–14, January 2015.
- [43] Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 95–107. ACM, 2004.

- [44] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1567–1576. IEEE, 2002.
- [45] Tijs Van Dam and Koen Langendoen. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 171–180. ACM, 2003.
- [46] Gang Lu, B. Krishnamachari, and C.S. Raghavendra. An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium*, pages 224–231. IEEE, 2004.
- [47] A. Ephremides and O.A. Mowafi. Analysis of a Hybrid Access Scheme for Buffered Users-Probabilistic Time Division. *IEEE Transactions on Software Engineering*, SE-8(1):52–61, January 1982.
- [48] Injong Rhee, A. Warrior, M. Aia, Jeongki Min, and M.L. Sichitiu. Z-MAC: A Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16(3):511–524, June 2008.
- [49] Paolo Santi. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. *ACM Computing Surveys*, 37(2):164–194, June 2005.
- [50] Ramesh Rajagopalan and Pramod Varshney. Data-aggregation techniques in sensor networks: a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 8(4):48–63, 2006.
- [51] Elena Fasolo, Michele Rossi, Jorg Widmer, and Michele Zorzi. In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: a survey. *IEEE Wireless Communications*, 14(2):70–87, April 2007.
- [52] N. Kimura and S. Latifi. A survey on data compression in wireless sensor networks. In *International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC)*, pages 8–13 Vol. 2. IEEE, 2005.
- [53] Samir Goel and Tomasz Imielinski. Prediction-based monitoring in sensor networks: taking lessons from MPEG. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 31(5):82, October 2001.
- [54] Cesare Alippi, Giuseppe Anastasi, Cristian Galperti, Francesca Mancini, and Manuel Roveri. Adaptive Sampling for Energy Conservation in Wireless Sensor Networks for Snow Monitoring Applications. In *International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS)*, pages 1–6. IEEE, October 2007.



- [55] C. Alippi, G. Anastasi, M. Di Francesco, and M. Roveri. An Adaptive Sampling Algorithm for Effective Energy Management in Wireless Sensor Networks With Energy-Hungry Sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(2):335–344, February 2010.
- [56] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *System sciences, 2000. Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on*, pages 10–pp. IEEE, 2000.
- [57] Huan Li, Yanlei Liu, Weifeng Chen, Weijia Jia, Bing Li, and Junwu Xiong. COCA: Constructing optimal clustering architecture to maximize sensor network lifetime. *Computer Communications*, 36(3):256–268, February 2013.
- [58] Xuxun Liu. A Survey on Clustering Routing Protocols in Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 12(12):11113–11153, August 2012.
- [59] Anfeng Liu, Ju Ren, Xu Li, Zhigang Chen, and Xuemin (Sherman) Shen. Design principles and improvement of cost function based energy aware routing algorithms for wireless sensor networks. *Computer Networks*, 56(7):1951–1967, May 2012.
- [60] Sungoh Kwon and Ness B. Shroff. Energy-efficient unified routing algorithm for multi-hop wireless networks. *IEEE Transactions on wireless communications*, 11(11):3890–3899, 2012.
- [61] Xiaobing Wu, Guihai Chen, and S.K. Das. Avoiding Energy Holes in Wireless Sensor Networks with Nonuniform Node Distribution. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 19(5):710–720, May 2008.
- [62] Mohamed Younis and Kemal Akkaya. Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 6(4):621–655, June 2008.
- [63] Arnab Chakrabarti, Ashutosh Sabharwal, and Behnaam Aazhang. Using predictable observer mobility for power efficient design of sensor networks. In *Information Processing in Sensor Networks*, pages 129–145. Springer, 2003.
- [64] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas. Sink mobility protocols for data collection in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th ACM international workshop on Mobility management and wireless access*, page 52. ACM Press, 2006.
- [65] Sujesha Sudevalayam and Purushottam Kulkarni. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 13(3):443–461, 2011.

- [66] Fei Zhang, S.A. Hackworth, Xiaoyu Liu, Haiyan Chen, R.J. Scلابassi, and Mingui Sun. Wireless energy transfer platform for medical sensors and implantable devices. In *International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pages 1045–1048. IEEE, September 2009.
- [67] Yi Shi, Liguang Xie, Y. Thomas Hou, and Hanif D. Sherali. On renewable sensor networks with wireless energy transfer. In *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, pages 1350–1358. IEEE, 2011.
- [68] Abtin Keshavarzian, Huang Lee, and Lakshmi Venkatraman. Wakeup scheduling in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 322–333. ACM, 2006.
- [69] Vana Jelicic, Michele Magno, Davide Brunelli, Vedran Bilas, and Luca Benini. Analytic comparison of wake-up receivers for wsns and benefits over the wake-on radio scheme. In *Proceedings of the 7th ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks*, pages 99–106. ACM, 2012.
- [70] Joaquim Oller, Ilker Demirkol, Jordi Casademont, Josep Paradells, Gerd Gamm, and Leonhard Reindl. Performance Evaluation and Comparative Analysis of SubCarrier Modulation Wake-up Radio Systems for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 14(1):22–51, December 2013.
- [71] Lucas D.P. Mendes and Joel J.P.C. Rodrigues. A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 34(2):523–534, March 2011.
- [72] Tommaso Melodia, Mehmet C. Vuran, and Dario Pompili. The state of the art in cross-layer design for wireless sensor networks. In *Wireless Systems and Network Architectures in Next Generation Internet*, pages 78–92. Springer, 2006.
- [73] Ritesh Madan, Shuguang Cui, Sanjay Lall, and Nd Goldsmith. Cross-Layer Design for Lifetime Maximization in Interference-Limited Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(10):3142–3152, November 2006.
- [74] Pranesh Sthapit and Jae-Young Pyun. Effects of Radio Triggered Sensor MAC Protocol over Wireless Sensor Network. In *11th IEEE International Conference on Computer and Information Technology*, pages 546–551. IEEE, 2011.
- [75] Moshaddique Al Ameen, Ullah Niamat, Chowdhury M. Sanaullah, and Kwak Kyung-sup. A MAC Protocol for Body Area Networks using Out-of-Band Radio. In *Wireless Conference 2011 - Sustainable Wireless Technologies (European Wireless), 11th European*, Berlin; [Piscataway, N.J.], 2011. VDE Verlag ; IEEE.

- [76] Joaquim Oller, Ilker Demirkol, Jordi Casademont, Josep Paradells, Gerd Ulrich Gamm, and Leonhard Reindl. Wake-up radio as an energy-efficient alternative to conventional wireless sensor networks MAC protocols. In *Proceedings of the 16th ACM international conference on Modeling, analysis & simulation of wireless and mobile systems*, pages 173–180. ACM Press, 2013.
- [77] Vignesh raja Karuppiah Ramachandran, Berend Jan van der Zwaag, Nirvana Meratnia, and Paul J.M. Havinga. Evaluation of MAC Protocols with Wake-up Radio for Implantable Body Sensor Networks. *Procedia Computer Science*, 40:173–180, 2014.
- [78] Lin Gu and John A. Stankovic. Radio-Triggered Wake-Up Capability for Sensor Networks. In *IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, pages 27–37, 2004.
- [79] Junaid Ansari, Dmitry Pankin, and Petri Mahonen. Radio-triggered Wake-ups with Addressing Capabilities for Extremely Low Power Sensor Network Applications. *International Journal of Wireless Information Networks*, 16(3):118–130, September 2009.
- [80] Stevan J. Marinkovic and Emanuel M. Popovici. Nano-Power Wireless Wake-Up Receiver With Serial Peripheral Interface. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 29(8):1641–1647, September 2011.
- [81] Xiongchuan Huang, Simonetta Rampu, Xiaoyan Wang, Guido Dolmans, and Harmke de Groot. A 2.4ghz/915mhz 51 uW wake-up receiver with offset and noise suppression. In *International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC)*, pages 222–223. IEEE, February 2010.
- [82] Dae-Young Yoon, Chang-Jin Jeong, Justin Cartwright, Ho-Yong Kang, Seok-Kyun Han, Nae-Soo Kim, Dong-Sam Ha, and Sang-Gug Lee. A New Approach to Low-Power and Low-Latency Wake-Up Receiver System for Wireless Sensor Nodes. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 47(10):2405–2419, October 2012.
- [83] Salvatore Drago, Domine M. W Leenaerts, Fabio Sebastiano, Lucien J. Breems, Kofi A. A. Makinwa, and Bram Nauta. A 2.4ghz 830pj/bit duty-cycled wake-up receiver with -82dbm sensitivity for crystal-less wireless sensor nodes. In *International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC)*, pages 224–225. IEEE, February 2010.
- [84] Hyunwoo Cho, Joonsung Bae, and Hoi-Jun Yoo. A 37.5 uW Body Channel Communication Wake-Up Receiver With Injection-Locking Ring Oscillator for Wireless Body Area Network. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, 60-I:1200–1208, 2012.

- [85] Emilio Torres Armas, Dailos Ramos-Valido, Sunil L. Khemchandani, and J. del Pino. A 40.9 uW high sensitivity wake-up radio for wireless sensor networks using uncertain-IF architecture. In *Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS)*, pages 1–6. IEEE, November 2015.
- [86] AAS3932/AS3933 LF detector ICs Datasheet, 2010.
- [87] Philippe Le-Huy and Sébastien Roy. Low-Power Wake-Up Radio for Wireless Sensor Networks. *Mobile Networks and Applications*, 15(2):226–236, April 2010.
- [88] Marco Spinola Durante and Stefan Mahlknecht. An Ultra Low Power Wakeup Receiver for Wireless Sensor Nodes. In *Third International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, pages 167–170. IEEE, June 2009.
- [89] He Ba, Ilker Demirkol, and Wendi Heinzelman. Feasibility and benefits of passive RFID wake-up radios for wireless sensor networks. In *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE*, pages 1–5. IEEE, 2010.
- [90] Li Chen, Stephen Cool, He Ba, Wendi Heinzelman, Ilker Demirkol, Ufuk Muncuk, Kaushik Chowdhury, and Stefano Basagni. Range extension of passive wake-up radio systems through energy harvesting. In *Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, pages 1549–1554. IEEE, 2013.
- [91] Li Chen, Jeremy Warner, Wendi Heinzelman, and Ilker Demirkol. MH-REACH-Mote: Supporting multi-hop passive radio wake-up for wireless sensor networks. In *Communications (ICC), 2015 IEEE International Conference on*, pages 6512–6518. IEEE, 2015.
- [92] Bas Van der Doorn, Winelis Kavelaars, and Koen Langendoen. A prototype low-cost wakeup radio for the 868 MHz band. *International Journal of Sensor Networks*, 5(1):22–32, 2009.
- [93] Michele Magno and Luca Benini. An ultra low power high sensitivity wake-up radio receiver with addressing capability. In *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2014 IEEE 10th International Conference on*, pages 92–99. IEEE, 2014.
- [94] Ruben Sandoval, Antonio-Javier Garcia-Sanchez, Felipe Garcia-Sanchez, and Joan Garcia-Haro. Evaluating the More Suitable ISM Frequency Band for IoT-Based Smart Grids: A Quantitative Study of 915 MHz vs. 2400 MHz. *Sensors*, 17(1):76, December 2016.
- [95] IEEE P802.11 - Wake-Up Radio (WUR) Study Group - Meeting Update. [http://www.ieee802.org/11/Reports/wur\\_update.htm](http://www.ieee802.org/11/Reports/wur_update.htm).

- [96] Alexandre Douyère. *Méthodologie de synthèse et d'optimisation de radiopile bornée à un domaine de fonctionnement*. PhD thesis, Université de La Réunion, 2010.
- [97] PIC24f16ka102 Family Data Sheet. Microchip, [www.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39927c.pdf](http://www.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39927c.pdf), 2011.
- [98] CC2500, Low-Cost Low-Power 2.4 GHz RF Transceiver. Texas Instruments, [www.ti.com/lit/ds/swrs040c/swrs040c.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/swrs040c/swrs040c.pdf), 2014.
- [99] Joseph A. Shaw. Radiometry and the Friis transmission equation. *American Journal of Physics*, 81(1):33, 2013.
- [100] Zied Harouni, Lotfi Osman, and Ali Gharsallah. Efficient 2.45 GHz rectenna design with high harmonic rejection for wireless power transmission. *International Journal of Computer Science Issues IJCSI*, 7(5):424–427, 2010.
- [101] Jerome Riviere, Alexandre Douyere, Frederic Alicalapa, and Jean-Daniel Lan Sun Luk. DC-pass filter conception for CPW rectenna design. In *Radio and Antenna Days of the Indian Ocean*, pages 1–2. IEEE, September 2015.
- [102] Jerome Riviere, Alexandre Douyere, and Jean Daniel Lan Sun Luk. Impact of the coupling effect and the configuration on a compact rectenna array. In *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, volume 67, 2014.
- [103] E. N. Harmonized. Final draft ETSI EN 300 328 V1. 7.1 (2006-05). 2006.
- [104] Joaquim Oller, Ilker Demirkol, Jordi Casademont, Josep Paradells, Gerd Ulrich Gamm, and Leonhard Reindl. Has Time Come to Switch From Duty-Cycled MAC Protocols to Wake-Up Radio for Wireless Sensor Networks? *IEEE/ACM Transactions on Networking*, pages 1–1, 2015.
- [105] András Varga and Rudolf Hornig. An overview of the OMNeT++ simulation environment. In *Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*, page 60. ICST, 2008.
- [106] Andreas Kopke, Michael Swigulski, Karl Wessel, Daniel Willkomm, P. T. Haneveld, Tom EV Parker, Otto W. Visser, Hermann S. Lichte, and Stefan Valentin. Simulating wireless and mobile networks in OMNeT++ the MiXiM vision. In *Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*, page 71. ICST, 2008.
- [107] Hervé Abdi. Signal detection theory (SDT). *Encyclopedia of measurement and statistics*, pages 886–889, 2007.

- [108] Jean Mickael Lebreton, Nour Murad, and Richard Lorion. Real-time radio signal mapping using an autonomous robot. In *Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO)*, pages 1–2. IEEE, September 2015.
- [109] IEEE Computer Society, LAN/MAN Standards Committee, Institute of Electrical and Electronics Engineers, and IEEE-SA Standards Board. *IEEE standard for local and metropolitan area networks. Part 15.4, Part 15.4.*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2011.
- [110] Michael Buettner, Gary V. Yee, Eric Anderson, and Richard Han. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 307–320. ACM, 2006.
- [111] Amre El-Hoiydi and Jean-Dominique Decotignie. WiseMAC: An ultra low power MAC protocol for multi-hop wireless sensor networks. In *International Symposium on Algorithms and Experiments for Sensor Systems, Wireless Networks and Distributed Robotics*, pages 18–31. Springer, 2004.
- [112] NI USRP - 2922 Device specifications, 400 MHz to 4.4 Ghz Tunable RF Transceiver. [www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-355](http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-355). National Instruments.
- [113] Arduino Website. From Arduino to a Microcontroller on a Breadboard. <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/ArduinoToBreadboard>.
- [114] TLV3691 0.9 V to 6.5 V, Nanopower Comparator. Texas Instruments, [www.ti.com/lit/gpn/TLV3691](http://www.ti.com/lit/gpn/TLV3691), 2015.
- [115] A2500r24x User’s Manual. <https://www.anaren.com/>. Anaren.
- [116] Product Datasheet, P2110 - 915 MHz RF Powerharvester Receiver. Powercast.
- [117] Jérôme Rivière, Alexandre Douyère, and Jean Daniel Lan Sun Luk. Analyse des performances d’un réseau de rectennas miniatures pour la télé-alimentation de dispositifs à faible consommation. In *XIXèmes Journées Nationales Microondes*, 2015.
- [118] WiMOD iM880a Datasheet. <https://wireless-solutions.de/products/discontinued-products/im880a.html>. IMST.
- [119] Aaronia. Handheld Spectrum Analyzer SPECTRAN® V4. <http://www.aaronia.com>.