

THÈSE DE DOCTORAT DE

NANTES UNIVERSITÉ

ÉCOLE DOCTORALE N° 641

*Mathématiques et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication*

Spécialité : Électronique, Télécommunications

Par

Sébastien MAUDET

Analyse et modélisation énergétiques des réseaux de communications pour l'IoT

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 24 juin 2024

Unité de recherche : Institut d'Électronique et des Technologies du numéRIque, UMR CNRS 6164

Rapporteurs avant soutenance :

Guillaume FERRÉ Professeur des Universités, Bordeaux INP ENSEIRB-MATMECA

Laurent TOUTAIN Professeur de l'École des Mines-IMT, IMT Atlantique

Composition du Jury :

Examineurs :

Olivier BERDER

Guillaume FERRÉ

Isabelle GUÉRIN-LASSOUS

Laurent TOUTAIN

Dir. de thèse :

Guillaume ANDRIEUX

Co-dir. de thèse :

Jean François DIOURIS

Co-encadrant de thèse :

Romain CHEVILLON

Professeur des Universités, Université de Rennes

Professeur des Universités, Bordeaux INP ENSEIRB-MATMECA

Professeur des Universités, Université Claude Bernard Lyon 1

Professeur de l'École des Mines-IMT, IMT Atlantique

Professeur des Universités, Nantes Université

Professeur des Universités, Nantes Université

Maître de Conférences, Nantes Université

Titre : Analyse et modélisation énergétiques des réseaux de communications pour l'IoT

Mot clés : Réseaux de capteurs sans fil, IoT, Consommation énergétique, Wi-Fi HaLow, LoRaWAN

Résumé : L'IoT est un concept innovant qui permet à des objets d'échanger des informations à travers des réseaux de communications. Ces objets sont généralement déployés avec des ressources énergétiques limitées et les protocoles de communications pour l'IoT doivent tenir compte de ces contraintes. Dans cette thèse, nous avons analysé et modélisé la consommation énergétique de deux des protocoles de communication les plus en vue de l'IoT. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés au Wi-Fi HaLow. Après une présentation descriptive de ce protocole et de ses mécanismes, ses performances ont été étudiées et qualifiées. Des campagnes de mesures ont montré son bon comportement en termes de portée, de débit et de latence. L'analyse du protocole ainsi que des mesures de l'énergie consommée sur du matériel ont permis d'établir un premier modèle

de consommation. Ce dernier tient compte des échanges nécessaires à l'établissement d'une communication. Le modèle a ensuite été affiné pour obtenir une modélisation basée sur une chaîne de Markov absorbante qui prend en compte l'environnement et la densité du réseau. Cette étude permet de valider l'utilisation de cette technologie dans différents domaines de l'IoT. Dans un second temps, nous nous sommes intéressés au protocole LoRaWAN. Des mesures de l'énergie consommée sur du matériel ont permis de proposer un nouveau modèle de consommation énergétique qui prend en compte l'environnement du nœud (retransmissions, erreurs et collisions). Finalement, une comparaison des métriques et de la consommation énergétique de ces deux protocoles a été réalisée, afin d'ouvrir une discussion sur les perspectives d'utilisation selon des cas d'usage.

Title: Energy analysis and modeling of IoT communication networks

Keywords: Wireless sensor networks, IoT, Energy consumption, Wi-Fi HaLow, LoRaWAN

Abstract: IoT is an innovative concept that enables objects to exchange data over communications networks. These objects are typically deployed with limited energy resources, and IoT communication protocols must take these constraints into account. In this thesis, we analyzed and modeled the energy consumption of two of the most prominent IoT communication protocols. First, we focused on Wi-Fi HaLow. After a descriptive presentation of this protocol and its mechanisms, performance was studied and characterized. Measurement campaigns showed that it performs well in terms of range, throughput and latency. Analysis of the protocol and measurements of the energy consumed on hardware have enabled us to establish an initial consumption model. This takes

into account the exchanges required to establish a communication. The model was then refined to obtain a model based on an absorbing Markov chain that takes into account the environment and network density. This study validates the use of this technology in various IoT domains. We then turned our attention to the LoRaWAN protocol. Measurements of the energy consumed on hardware enabled us to propose a new energy consumption model that takes into account the node's environment (retransmissions, errors and collisions). Finally, a comparison of the metrics and energy consumption of these two protocols was carried out, in order to open a discussion on the prospects for use cases.