

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

SYSTÈME HYBRIDE DE GESTION ET MAINTENANCE À DISTANCE D'ÉCLAIRAGE DE  
SÉCURITÉ À DEL, BASÉ SUR MODBUS/WI-FI

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INFORMATIQUE, CONCENTRATION EN SYSTÈMES  
ÉLECTRONIQUES

PAR

KUDA N. ARISTIDE YANNIC

MAY 2026

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.12-2023). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

La réussite académique est le fruit d'un grand travail développé. Cependant, si je suis arrivé jusqu'ici, ce n'est seulement pas grâce à mes propres efforts. Je voudrais profiter de l'occasion qui m'est offerte de rédiger ce mémoire de recherche de maîtrise dans la filière Informatique, concentration électronique, pour rendre un hommage à tous ceux et celles qui m'ont aidé. Je pense notamment :

Aux responsables et professeur(e)s de l'UQAM

- El Alaoui Ismaili Zakaria
- Fayomi Christian
- Wessam Ajib
- Aléna Tsikhanovich
- Driouch Elmahdi

A mes collègues de Troy Life Fire and Safety

- Zitouni et Mohamed

À ma famille

- Stela Kuda, ma tendre épouse et mes enfants Kuda David, Miguel, Blessing et Elsie.
- Ma mère Ndjeundam Martine et mes frères, Steves, Cyrille, Fabrice et Armel.
- Ma belle-mère Jacqueline Djuikoua.

## TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES FIGURES .....	vii
LISTE DES TABLEAUX .....	ix
ACRONYMES.....	x
NOTATION.....	xii
RÉSUMÉ .....	xiii
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 ÉTATS DES LIEUX .....	6
1.1 États des lieux au Canada .....	6
1.1.1 Relevés de sites .....	8
1.2 États des lieux des fabricants internationaux et limites .....	12
1.2.1 Solution Schneider Electric .....	12
1.2.2 Solution Stanpro .....	12
1.2.3 Solution Legrand .....	13
1.3 Conceptualisation du prototype .....	14
1.3.1 Objectif de communication : .....	14
1.3.2 Objectif de contrôle :.....	15
1.3.3 Objectif de maintenance : .....	15
CHAPITRE 2 SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC À DISTANCE AU MOYEN DU PRO- TOCOLE DE COMMUNICATION MODBUS .....	19
2.1 Les enjeux liés à la communication Modbus.....	19
2.2 Protocole Modbus dans l'automatisation industrielle.....	19
2.2.1 Description du protocole Modbus.....	20
2.2.2 Structure du protocole Modbus .....	20

2.2.3	Mode ASCII .....	21
2.2.4	Mode RTU .....	22
2.2.5	Protocole Modbus dans le modèle OSI .....	24
2.3	Applications du protocole de communication Modbus .....	25
2.3.1	Dans le secteur industriel .....	25
2.3.2	Dans le secteur tertiaire .....	26
2.3.3	Avantages du protocole de communication Modbus .....	28
2.3.4	Inconvénients du protocole de communication Modbus .....	28
2.4	Systèmes de surveillance à distance .....	29
2.4.1	Système d'accès .....	30
2.4.2	Système de collecte de données .....	30
2.4.3	Système de surveillance radio .....	30
2.5	Techniques de Diagnostic et de Détection de Pannes .....	31
2.5.1	Analyse prédictive et Identification du problème .....	31
2.5.2	Proposition de solution en vue de résoudre le problème.....	31
2.5.3	Analyse prédictive et l'apprentissage machine .....	32
2.6	Intégration de Modbus avec les technologies de surveillance à distance.....	32
2.6.1	Modbus RTU dans les systèmes embarqués .....	32
2.6.2	Cas applicatif du Modbus TCP dans un kit embarqué libre d'application .....	33
2.6.3	Piste d'optimisation de la transmission Modbus.....	33
CHAPITRE 3 ANALYSE DE LA COMMUNICATION IOT POUR SYSTÈMES EMBAR-		
QUÉS : CAS DES APPAREILS D'ÉCLAIRAGE DE SÉCURITÉ .....		36
3.1	Protocoles de communications IoT.....	36
3.2	Gestion des paramètres d'éclairage par le Wi-Fi.....	37

3.2.1	Approches et utilités .....	37
3.2.2	Analyse et condensé de la revue d'articles.....	38
3.3	Gestion d'appareillage communicant par le Bluetooth.....	39
3.4	Gestion d'appareillage communicant par le ZigBee .....	40
3.5	Bilan comparatif des protocoles de communication.....	42
3.5.1	Particularité du protocole ZigBee .....	43
3.5.2	Particularité du protocole Bluetooth .....	44
3.5.3	Particularité du protocole WiFi.....	45
3.6	Cas applicatifs des communications IoT .....	45
3.6.1	Collecte des données dans une maison intelligente via l'IoT .....	46
3.6.2	Déploiement d'une architecture pilotant des lumières d'urgences pour maison connecté. ....	46
3.7	Conclusion partielle sur la communication sans fil (Wi-Fi, ZigBee et BlueTooth) .....	47
CHAPITRE 4 CONCEPTION DU SYSTÈME .....		53
4.1	Typologie de l'architecture.....	53
4.2	Modules fonctionnels .....	54
4.2.1	Architecture du système .....	55
4.2.2	Système de communication .....	59
4.3	Conception de la carte électronique de contrôle.....	62
4.3.1	Liste des entrées-sorties de la carte électronique de contrôle.....	63
4.3.2	Schéma électronique.....	64
4.3.3	Broches de connexions lampe droite vers la carte Arduino .....	66
4.4	Prototype et environnement de test.....	68
4.4.1	Présentation de la maquette.....	68

4.4.2	Validation fonctionnelle de la maquette .....	69
4.5	Configuration de la communication entre le poste de contrôle et kit embarqué .....	69
4.6	Lampe d'appareil d'éclairage d'urgence éteinte .....	70
4.7	Lampe d'appareil d'éclairage d'urgence allumée .....	72
4.8	Batterie défectueuse .....	75
4.8.1	Programmation via la plateforme Arduino .....	77
4.8.2	Diagnostic de la communication Modbus.....	78
4.8.3	Programmation et structure de la communication WiFi .....	81
4.9	Évaluation du coût matériel du système conçu .....	84
4.10	Présentation du circuit imprimé du prototype .....	85
4.11	Rentabilité et portée du travail proposé .....	88
4.11.1	Systèmes d'éclairage d'urgence existants .....	88
4.11.2	Contributions aux limites des systèmes d'éclairage d'urgence existants.....	88
4.11.3	Condensé de relevé des compagnies.....	89
4.11.4	Discussion sur la rentabilité économique .....	92
4.11.5	Conclusion partielle .....	93
4.11.6	Restriction de notre solution .....	93
4.11.7	Domaines d'application .....	94
	CONCLUSION .....	95
	BIBLIOGRAPHIE .....	98

## TABLE DES FIGURES

Figure 2.1	Requête client-serveur Modbus .....	21
Figure 2.2	Trame ASCII du Modbus .....	22
Figure 2.3	Trame RTU Modbus .....	23
Figure 2.4	Schéma de raccordements du Modbus 02 fils.....	23
Figure 2.5	Protocole Modbus dans le modèle OSI .....	24
Figure 2.6	Trame Modbus TCP complète .....	25
Figure 2.7	Code fonction du protocole Modbus .....	27
Figure 3.1	Architecture fonctionnelle de gestion d'éclairage via Wi-Fi .....	38
Figure 3.2	Architecture acquisition Bluetooth.....	40
Figure 3.3	Connectivité module Bluetooth au Kit ARM LPC2142 .....	40
Figure 3.4	Architecture de communication Zigbee .....	41
Figure 3.5	Topologie en étoile, ZigBee .....	42
Figure 4.1	Architecture du nouveau système de gestion d'éclairage de sécurité .....	55
Figure 4.2	Architecture ayant plusieurs appareils d'éclairage de sécurité .....	55
Figure 4.3	Reseau Sans Fil WiFi .....	61
Figure 4.4	Circuit de contrôle d'une lampe d'urgence .....	65
Figure 4.5	Principe du schéma Pull-Down.....	67
Figure 4.6	Pull-Down transmission des états de la lampe droite à la carte Arduino .....	68
Figure 4.7	Pull-Down transmission des états de la lampe gauche à la carte Arduino .....	68

Figure 4.8	Prototype .....	69
Figure 4.9	Test communication Modbus TCP/IP.....	70
Figure 4.10	Appareil d'éclairage d'urgence conventionnel équipé du système de communication Modbus et WiFi, lampe éteinte .....	71
Figure 4.11	Wi-Fi, lampe éteinte .....	72
Figure 4.12	Modbus, lampe éteinte.....	73
Figure 4.13	Appareil d'éclairage d'urgence conventionnel équipé du système de communication Modbus et Wi-Fi, lampe éteinte .....	74
Figure 4.14	Wi-Fi, lampe allumée .....	75
Figure 4.15	Modbus, lampe allumée.....	76
Figure 4.16	Wi-Fi, remplacer la batterie .....	77
Figure 4.17	Modbus, remplacer la batterie.....	78
Figure 4.18	Lampe Droite allumée, registre 300 102 = 1 .....	79
Figure 4.19	Lampe Droite éteinte, registre 300 102 = 0 .....	79
Figure 4.20	Lampe Droite circuit ouvert, registre 300 103 = 1.....	80
Figure 4.21	Lampe Droite court-circuit, registre 300 104 = 1 .....	80
Figure 4.22	Interface Web des données lues via un téléphone Android .....	83
Figure 4.23	PCB - Circuit électronique, vue composants .....	85
Figure 4.24	PCB - Circuit électronique, vue arrière des composants et points de connexions ..	86
Figure 4.25	Schéma du circuit de la carte électronique - vue connexion et composants .....	87

## LISTE DES TABLEAUX

Table 1.1	: Choix des compagnies sollicitées pour les relevés des unités d'éclairage d'urgence.	7
Table 1.2	: Relevé des unités d'urgences site de Walmart.....	8
Table 1.3	: Relevé des unités d'urgences site de Ikea. ....	9
Table 1.4	: Relevé des unités d'urgences site de Cascade. ....	10
Table 1.5	: Relevé des unités d'urgences site de Versacold. ....	11
Table 3.1	: Tableau comparatif des réseaux WiFi-Bluetooth-Zigbee. ....	43
Table 3.2	: Tableau synthèse des réseaux WiFi-Bluetooth-Zigbee.....	49
Table 4.1	Caractéristique Arduino Ethernet Shield Rev2 .....	60
Table 4.2	Caractéristique Arduino Uno WiFi Rev2 .....	62
Table 4.3	Tableau des entrées-sorties.....	63
Table 4.4	Adresse Modbus et désignation des variables de maintenance .....	70
Table 4.5	Coût estimatif du prototype du système d'éclairage d'urgence proposé .....	84
Table 4.6	: Condensé relevé Walmart, Ikea, Cascade et Versacold. ....	89
Table 4.7	: Réduction des coûts de maintenance Walmart, Ikea, Cascade et Versacold. ....	90

## ACRONYMES

**2W** Configuration sur deux fils conducteurs.

**4W** Configuration sur quatre fils conducteurs.

**ADU** Application Data Unit.

**ASCII** American Standard Code for Information Interchange.

**BLUETOOTH** A short-range wireless communication technology based on IEEE 802.15.1.

**BSD** Berkeley Software Distribution.

**CRC** Cyclic Redundancy Check.

**CSA** Canadian Standards Association.

**DEL** Diode ÉlectroLuminescente.

**ERP** Enterprise Resource Planning.

**GMAO** Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur.

**GPRS** General Packet Radio Service.

**GSM** Global System for Mobile Communication.

**IA** Intelligence Artificielle.

**I2C** Inter-Integrated Circuit.

**IETF** Internet Engineering Task Force.

**IGH** Immeuble de Grande Hauteur.

**IO** Input Output.

**IP** Internet Protocol.

**ISO** International Organization for Standardization.

**LED** Light Emitting Diode.

**LRC** Longitudinal Redundancy Check.

**MAC** Medium Access Control.

**MB** Modbus.

**MBAP** MODBUS Application Protocol.

**MSL** Maximum Segment Lifetime.

**OSI** Open Systems Interconnection.

**PDU** Protocol Data Unit.

**PLC** Programmable Logic Controller.

**RS232** EIA/ TIA 232 Standard.

**RS485** EIA/ TIA -485 Standard.

**RTP** Real Time Protocol.

**RTT** Round Trip Time.

**RTU** Remote Terminal Unit.

**SCADA** Supervisory Control And Data Acquisition.

**SMS** Short Message Service.

**SPI** Serial Peripheral Interface.

**TCP** Transport Control Protocol.

**TLS** Transport Layer Security.

**UQAM** Université du Québec à Montréal.

**VPN** Virtual Private Network.

**VOIP** Voice over Internet Protocol.

**Wi-Fi** A wireless networking technology based on the IEEE 802.11 standards.

**ZTNA** Zero Trust Network Access.

**ZIGBEE** A low-power wireless communication technology based on IEEE 802.15.4.

## NOTATION

### Nombres

$a$  un scalaire.

$A$  une matrice.

### Unités

$m$ , un mètre.

$W$ , un Watt.

$V$ , Tension en Volt.

$I$ , Courant en Ampère.

$Hz$ , Fréquence en Hertz.

$dB$ , Décibel en Bel.

## RÉSUMÉ

Dans les bâtiments du secteur tertiaire et secondaire, tels que les immeubles de grande hauteur (IGH), les entrepôts, les commerces et les sites industriels, les modules autonomes d'éclairage de sécurité constituent un élément essentiel de la protection des personnes et des biens. Conformément aux exigences du Code national du bâtiment et aux normes canadiennes applicables, ces dispositifs doivent assurer l'éclairage des voies d'évacuation et des zones critiques en cas d'incendie, de panne ou de coupure du réseau électrique principal. Malgré leur importance, la gestion et la maintenance de ces équipements demeurent encore largement contraintes par des approches conventionnelles reposant sur des inspections physiques, manuelles et souvent coûteuses.

La motivation principale de ce mémoire provient des limites observées sur le terrain dans le cadre d'activités professionnelles liées à l'alarme incendie et à la maintenance des équipements de sécurité. Ces observations ont mis en évidence plusieurs contraintes majeures, notamment l'absence de supervision centralisée, la difficulté d'accès physique aux unités, le manque d'identification fiable des modules sur site, l'impossibilité d'acquiescer automatiquement les états de fonctionnement et les niveaux de tension des batteries, l'absence de communication avec un poste de contrôle, ainsi que la difficulté d'intégrer les unités d'éclairage de sécurité dans un environnement industriel ou tertiaire automatisé. Ces limitations entraînent une faible efficacité opérationnelle, une maintenance peu optimisée, des coûts d'intervention élevés et une visibilité réduite sur l'état réel des installations.

Pour répondre à cette problématique, le travail réalisé s'est structuré autour de plusieurs contributions. Tout d'abord, une analyse des solutions existantes et de leurs limites dans le contexte canadien a été menée. Cette étude a permis d'identifier les insuffisances fonctionnelles des systèmes actuels, notamment en matière de supervision, de communication et de maintenance. Ensuite, une étude comparative des technologies de communication adaptées aux systèmes embarqués et à l'Internet des objets a été réalisée afin de justifier le choix d'une architecture intégrant à la fois une communication filaire industrielle et une communication sans fil.

Sur cette base, une solution technique a été conçue autour d'un prototype électronique de reprise et d'acquisition, associé à un kit embarqué communicant. La carte électronique développée joue le rôle d'interface entre le module d'éclairage de sécurité et le système de supervision. L'architecture proposée intègre aussi deux modes complémentaires de communication. D'une part, une communication Modbus TCP a été retenue afin de permettre l'intégration du système dans un poste de supervision local ou dans un environnement industriel de contrôle-commande, en cohérence avec les pratiques largement répandues dans les systèmes numériques de contrôle-commande. D'autre part, une communication Wi-Fi a été implémentée afin de permettre un accès direct au système à partir d'un appareil mobile, tel qu'un téléphone Android ou une tablette, facilitant ainsi les opérations de maintenance, de diagnostic et de contrôle sur site.

Le travail accompli a ainsi permis de proposer une architecture embarquée communicante répondant à plusieurs contraintes concrètes du domaine, notamment la remontée d'informations en temps réel, l'identification numérique des modules, la supervision locale, le contrôle à distance et l'intégration potentielle dans un environnement automatisé de bâtiment ou d'industrie. Cette approche constitue une avancée vers une maintenance plus intelligente, plus ciblée et plus efficace des systèmes d'éclairage de sécurité.

Les résultats obtenus montrent que l'intégration d'un système embarqué de supervision et de communication permet de réduire la dépendance aux inspections manuelles systématiques, d'améliorer la disponibilité des informations techniques sur les unités, de faciliter les opérations de maintenance et d'ouvrir la voie à une meilleure gestion globale des installations d'éclairage d'urgence. Ce travail met également en évidence la pertinence du protocole Modbus TCP pour l'intégration industrielle, ainsi que l'intérêt du Wi-Fi pour les opérations locales de maintenance mobile.

En conclusion, ce mémoire démontre qu'il est possible de moderniser la gestion des modules autonomes d'éclairage de sécurité au moyen d'une solution embarquée communicante intégrant les technologies Modbus TCP et Wi-Fi. Le message principal porté par ce travail est qu'un système traditionnellement passif, isolé et difficile à maintenir peut être transformé en un système intelligent, supervisable, communicant et mieux intégré aux infrastructures techniques contemporaines. Cette contribution ouvre ainsi des perspectives intéressantes en matière de maintenance prédictive, d'intégration aux bâtiments intelligents et de gestion technique centralisée des équipements de sécurité.

Mots-clés

Éclairage de sécurité, systèmes embarqués, supervision à distance, Wi-Fi, Modbus TCP, maintenance intelligente, communication industrielle.

## Abstract

In tertiary and industrial infrastructures such as high-rise buildings (HRBs), warehouses, commercial facilities, and industrial sites, self-contained emergency lighting units play a critical role in ensuring the safety of people and property. In accordance with the National Building Code and applicable Canadian standards, these devices are required to provide illumination for evacuation routes and critical areas during fire events, power outages, or failures of the main electrical supply. Despite their importance, the management and maintenance of these systems still largely rely on conventional approaches based on manual, physical, and often costly inspections.

The main motivation of this thesis arises from field observations conducted during professional activities related to fire alarm systems and safety equipment maintenance. These observations revealed several major limitations, including the absence of centralized supervision, difficulties in physically accessing the units, lack of reliable on-site identification, inability to automatically acquire operating states and battery voltage levels, absence of communication with a control station, and challenges in integrating emergency lighting units into industrial or tertiary automated environments. These limitations result in low operational efficiency, poorly optimized maintenance processes, high intervention costs, and limited visibility into the actual condition of the installations.

In this context, this thesis proposes the design of an embedded system for management, supervision, and remote control of self-contained LED emergency lighting units. The main objective is to improve maintainability, traceability, supervision, and technical integration of these units within a modern control-command ecosystem. To address this problem, the work is structured around several contributions. First, an analysis of existing solutions and their limitations in the Canadian context is conducted, highlighting the functional shortcomings of current systems, particularly in terms of supervision, communication, and maintenance. Second, a comparative study of communication technologies suitable for embedded systems and the Internet of Things is carried out to justify the choice of a hybrid architecture combining industrial wired communication and wireless communication.

The proposed architecture integrates two complementary communication modes. On one hand, Modbus TCP communication is implemented to enable system integration into a local supervisory station or an industrial control environment, in line with widely adopted practices in digital control systems. On the other hand, Wi-Fi communication is implemented to provide direct system access via a mobile device, such as an Android smartphone or tablet, thereby facilitating on-site maintenance, diagnostics, and control operations.

The results demonstrate that integrating an embedded supervision and communication system significantly reduces dependence on systematic manual inspections, improves access to real-time technical information, enhances maintenance efficiency, and enables better overall management of emergency lighting installations. This work also highlights the relevance of Modbus TCP for industrial integration and the effectiveness of Wi-Fi for local mobile maintenance operations.

In conclusion, this thesis demonstrates that the management of self-contained emergency lighting units can be modernized through a communicating embedded solution integrating Modbus TCP and Wi-Fi technologies. The main contribution of this work lies in transforming a traditionally

passive and isolated system into an intelligent, supervisable, and connected system, better integrated into modern technical infrastructures. This approach opens promising perspectives for predictive maintenance, smart building integration, and centralized technical management of safety equipment.

#### Keywords

Emergency lighting, embedded systems, remote supervision, Wi-Fi, Modbus TCP, smart maintenance, industrial communication

## INTRODUCTION

Dans le contexte de la protection des personnes et des biens des infrastructures du secteur tertiaire et secondaire, le Code National du Bâtiment (Régie du Bâtiment, 2022) énonce : « Les appareils d'éclairage de sécurité autonomes doivent être conformes à la norme CSA (Canadian Standards Association) C22.2 No 141, 'Emergency Lighting Equipment'. » Cette loi exige que les bâtiments d'habitation, les infrastructures publiques et parapubliques, ainsi que les sites industriels soient équipés de modules d'éclairage de sécurité. Les appareils d'éclairage de sécurité assurent l'éclairage des voies d'accès, des corridors, des planchers ou des zones spécifiques afin de garantir l'évacuation des personnes en cas d'incendie, de panne du réseau d'alimentation électrique ou lors d'essais planifiés dans le bâtiment.

Dans la ville de London, en Ontario, puis dans la région de Montréal, au Québec, le poste de représentant en alarme incendie m'a permis de constater les défis et contraintes liés à la commande et à la maintenance des modules d'éclairage de sécurité. Notamment, les coûts élevés de maintenance pour les compagnies d'alarme incendie, ainsi que pour les compagnies de vente et d'industrie, la difficulté d'opérabilité des lampes d'urgence par les techniciens de maintenance et la non-disponibilité des données des modules d'éclairage de sécurité en temps réel durant les périodes d'essais et de maintenance. Le besoin de gestion des unités d'éclairage de sécurité dans un écosystème industriel se fait ressentir, notamment par l'utilisation d'un protocole de communication adapté. Ces difficultés se traduisent par plusieurs contraintes majeures :

*La contrainte de communication :*

La plupart des modules d'éclairage de sécurité sont autonomes et ne rapportent pas leur état à une station de contrôle. L'accès aux informations nécessite souvent des moyens de levage coûteux (plateformes élévatrices), alors qu'une supervision centralisée permettrait de réduire considérablement ces coûts.

*La contrainte d'acquisition :*

Il est impossible de récupérer automatiquement les données des modules (statut, tension batterie) sans un système électronique dédié.

*La non-identification visible des modules sur sites :*

Les modules sont difficilement identifiables. Même lorsque certains modules sont identifiés, les mar-

quages manuels se dégradent avec le temps, rendant l'identification peu fiable.

*La contrainte d'accessibilité :*

La plupart des modules sont situés à des emplacements difficiles d'accès (nécessitant des moyens de levage). Ce qui exige des coûts de location de nacelles ou de chariots élévateurs pour y intervenir, engendrant des coûts financiers supplémentaires relatifs à la maintenance des modules. De ce fait, un module de sécurité qui s'avère fonctionnel et dont les indicateurs de fonctionnement sont observables pourrait avoir une maintenance planifiée uniquement dans le cas du remplacement d'une composante défectueuse et non de l'ensemble des modules. Ceci soulève la problématique non seulement du coût, mais aussi de l'efficacité de la maintenance.

*La surveillance et le contrôle à distance :*

La vérification manuelle de chaque module est fastidieuse, surtout pour les grands sites, entraînant une inefficacité opérationnelle.

*La non-connaissance du nombre exact de modules :*

Le recensement des modules reste imprécis, rendant difficile l'estimation des coûts de maintenance.

*L'intégration dans les systèmes industriels :*

Il n'existe pas de solution standardisée utilisant Modbus pour superviser ces modules, malgré sa forte présence dans les systèmes industriels et tertiaires. Dans les systèmes de gestion du bâtiment, les automates programmables et le concept de l'Internet des objets (IoT, Internet of things) sont de plus en plus utilisés pour assurer la gestion intégrale, automatique et intelligente du bâtiment. L'intégration des modules d'éclairage de sécurité permettra d'avoir un écosystème complet, car ils pourront être contrôlés par des automates programmables industriels. Il n'existe pas de panneau centralisé d'éclairage de sécurité communiquant par Modbus au Canada, encore moins un système qui supervise les modules d'éclairage de sécurité via ce protocole, tant dans l'industrie que dans le secteur tertiaire. Or, le protocole de communication filaire Modbus est présent dans la quasi-totalité des automates programmables. Cette solution permettrait d'intégrer aisément les unités d'éclairage de sécurité dans le réseau de contrôle des automates.

*L'utilisation des lampes conventionnelles :*

Certaines installations utilisent encore des lampes énergivores au lieu des DEL.

Au vu de ces contraintes, ce travail a pour objectif la conception d'un système de gestion de l'éclairage de sécurité à DEL, pouvant dialoguer via le protocole de communication filaire Modbus et

sans fil Wi-Fi. Ce système permet de faciliter la maintenance des modules d'éclairage de sécurité par le biais d'un prototype électronique de reprise qui permet de collecter les données des unités d'éclairage. Le système proposé possède des fonctionnalités de communication filaire Modbus et de communication WiFi, populaires dans l'internet des objets (Zhao *et al.*, 2019). La communication Modbus offre l'avantage de s'intégrer dans les communications industrielles et tertiaires, tandis que le WiFi facilitera la connexion entre les objets connectés, à l'instar d'une plateforme de supervision (Pandey *et al.*, 2019). De ce fait, le présent travail vise à concevoir un prototype électronique permettant la supervision, la commande et l'intégration des modules d'éclairage de sécurité dans un environnement industriel, afin de résoudre les problématiques ci-après.

*Levée des contraintes d'acquisition :*

Concevoir une carte électronique permettant de collecter les données des modules et de les transmettre à un système embarqué. En effet, une carte électronique d'acquisition servira d'interface entre le kit Wi-Fi et le module d'éclairage de sécurité. Cette carte permet de collecter les données des lampes (lampe allumée, lampe éteinte, lampe en circuit ouvert et lampe en circuit fermé), d'identifier le module (renseigne sur le numéro du module), d'assurer la commande des lampes (commande d'activation et de désactivation des lampes), et de relever le niveau de tension de la batterie pour un module d'éclairage de sécurité (la tension de la batterie est exprimée en Volt). Cette carte électronique transmettra ces données à un kit embarqué. Ce kit facilitera, d'une part, la communication Modbus et, d'autre part, son intégration dans un écosystème industriel. De plus, ce kit sera doté d'une communication Wi-Fi. On retrouve les écosystèmes industriels dans les systèmes de contrôle-commande et de supervision. Dans ces écosystèmes, les automates assurent la gestion automatisée du système et communiquent tous avec le protocole Modbus, ainsi qu'avec d'autres types de protocoles de communication (Profibus, Profinet, BacNet, etc). De ce fait, un module d'éclairage de sécurité pourra être géré dans un SNCC (Système Numérique de Contrôle-Commande).

*Supervision via communication filaire :*

Mettre en œuvre une communication Modbus pour intégrer les modules dans un SNCC (Pandey *et al.*, 2019).

*Levée des contraintes de supervision via une communication sans fil :*

Permettre une interaction directe entre les modules et un appareil mobile via Wi-Fi. L'intention visée est de munir chaque module de lampe d'urgence d'une communication supplémentaire sans fil, permettant un contrôle direct et indépendant de chaque module par le technicien de maintenance (Zhao *et al.*, 2019).

La méthodologie adoptée dans ce travail est de type appliqué, descriptive et expérimentale. Elle repose sur l'analyse des contraintes liées à la maintenance des modules d'éclairage de sécurité, la conception d'un prototype électronique de supervision, ainsi que la validation expérimentale des communications mises en œuvre. Dans un premier temps, une étude des besoins et des contraintes techniques observées dans les environnements industriels et tertiaires a été réalisée. Cette analyse a permis d'identifier les principales problématiques liées aux modules d'éclairage de sécurité, notamment l'absence de supervision à distance, la difficulté d'acquisition des états des lampes et de la batterie, ainsi que les contraintes de maintenance et d'accessibilité des équipements. Dans un deuxième temps, une étude comparative des technologies de communication filaires et sans fil a été menée afin de sélectionner une architecture adaptée au contexte industriel. Cette analyse a conduit au choix d'une architecture hybride reposant sur le protocole Modbus TCP pour les communications industrielles filaires et sur le Wi-Fi pour les opérations de supervision locale et de maintenance via un appareil mobile. Par la suite, la conception électronique du système d'acquisition a été réalisée à l'aide du logiciel "ISIS Professional" et du circuit imprimé (PCB - Printed Circuit Board), à l'aide du logiciel "ISIS ARES". Le choix du logiciel ISIS a été motivé par la proximité, la simplicité et le coût d'acquisition contrairement à d'autres logiciels professionnels de conception électronique. Une carte électronique d'acquisition a ainsi été développée afin de collecter les différents états des lampes DEL des modules d'éclairage de sécurité, à savoir : la lampe allumée, la lampe éteinte, la lampe en circuit ouvert et la lampe en court-circuit. Cette carte permet également de mesurer la tension de la batterie du module d'éclairage de sécurité. Nous avons conçu cette carte afin de rendre le système d'acquisition indépendant d'un système à microcontrôleur et de garantir l'autonomie du système d'acquisition. Les données acquises sont ensuite transmises vers un module Arduino Uno Wi-Fi Rev2 assurant le traitement des informations et la gestion des communications. Afin de permettre l'intégration du système dans un environnement industriel, une carte Arduino Ethernet a été associée au module Arduino Uno Wi-Fi Rev2 afin d'implémenter la communication Modbus TCP. Enfin, une phase expérimentale a été menée afin de valider le fonctionnement du prototype conçu. Les essais réalisés ont permis de vérifier la lecture des états des lampes DEL et de la tension de la batterie, ainsi que la transmission des données via Modbus TCP depuis un poste distant. Grâce à l'application Modbus Poll de Modbus.org, nous avons validé l'acquisition des données Modbus de la carte Arduino Uno. Des tests de communication Wi-Fi (configuré comme point d'accès) ont

également été effectués à partir d'un téléphone Android afin de valider les fonctions de supervision et de commande à distance du système proposé.

Le mémoire est structuré comme suit : Le premier chapitre présente l'état des lieux. Nous évoquerons les solutions existantes et les limites éventuelles des modules d'éclairage de sécurité au Canada. Le deuxième chapitre traite des communications industrielles. Nous aborderons la notion de surveillance et de diagnostic à distance au moyen du protocole filaire Modbus TCP. Le troisième chapitre présente la conception du système. Nous réaliserons une analyse comparative de la communication IoT pour les systèmes embarqués afin de choisir et de justifier la meilleure communication sans fil adaptée au contexte des appareils d'éclairage de sécurité. Le quatrième chapitre expose les résultats et analyses. Nous mettrons en lumière la conception des modules du système électronique de gestion de l'éclairage de sécurité à DEL (diode électroluminescente), communiquant par Modbus, ainsi que les fonctions de communication sans fil accessibles via un téléphone Android. Nous allons également présenter le schéma fonctionnel du système électronique d'acquisition des états logiques et des commandes d'une unité d'urgence, tel qu'il a été conçu. Puis, nous reprendrons par la suite l'analyse effectuée sur les sites avec le système conçu (tel que présenté dans le chapitre 1), afin de voir les avantages que procure notre solution. Une conclusion générale clôturera le mémoire. Nous avons également associé à nos travaux des recherches bibliographiques antérieures sur lesquelles nos travaux se sont appuyés.

# CHAPITRE 1

## ÉTATS DES LIEUX

### 1.1 États des lieux au Canada

Les appareils d'éclairage de sécurité permettent de guider les usagers vers les sorties d'évacuation dans les établissements recevant du public (ERP). Ils sont utilisés en cas de défaillance de l'éclairage standard du bâtiment et rassurent les usagers en cas de panne de courant du réseau électrique normal ou en cas d'incendie. Les appareils d'éclairage de sécurité sont équipés de batteries. Ainsi, la batterie assure l'éclairage de sécurité en cas d'évacuation.

Tel que mentionné dans le CNB (Code National du Bâtiment du Canada) article 3.2.7.4.2, les systèmes d'éclairage d'urgence existants sont des modules autonomes (appareils) d'éclairage assurant la sécurité du public. Un module d'éclairage de sécurité est constitué d'une alimentation primaire sous 120 volts, d'une batterie (soit 5, 9 ou 12 volts en tension continue) et de deux lampes. Le Code National du Bâtiment du Canada article 3.2.7.4.2 ne fait pas allusion au panneau centralisé d'éclairage de sécurité, ni à la possibilité de faire la supervision par une station distante.

Les lumières d'urgence doivent être entretenues mensuellement et annuellement.

- Mensuellement : Les essais mensuels consistent à vérifier l'état des lampes par le biais de tests de routine. Lors de ces essais, l'état de la batterie est vérifié pour déterminer si les lampes s'allument. Des anomalies peuvent donc être détectées si une lampe est défectueuse ou en raison d'une tension de batterie faible. Alors, la lampe ou la batterie défectueuse doit être remplacée.
- Annuellement : Les essais annuels consistent à reproduire les essais mensuels, mais de manière approfondie, en vérifiant la tension seuil et le voltage de la batterie, ainsi que l'état des composants internes. On procède aussi aux éventuels remplacements des lampes défectueuses et de la batterie de secours interne.

Au Canada, plus spécifiquement au Québec, nous avons effectué une étude des sites où des appareils d'éclairage de sécurité sont installés. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur le CNB A-3.1.2, qui précise le classement de l'activité exercée en fonction de l'usage commercial, tertiaire ou industriel du bâtiment. Nous avons, pour des raisons d'équité, choisi deux entreprises commerciales et deux entreprises industrielles pour la collecte des données. Les données recueillies font état des lieux des modules d'urgence installés sur ces sites, à savoir :

- Les caractéristiques des modules d'éclairage de sécurité et leurs quantités ;
- Leurs emplacements et les moyens utilisés pour y accéder ;
- Le coût moyen de l'unité pour une estimation d'ensemble ;
- Le cadre de maintenance applicable et les coûts associés à la maintenance ;

Le tableau 1.1 illustre le choix des compagnies sélectionnées qui disposent d'appareils d'éclairage de sécurité comme moyen de prévention en cas de sinistre<sup>1</sup>.

<b>Compagnie</b>	<b>Localisation</b>	<b>CNB</b>	<b>Description des usages principaux</b>
WALMART	Walmart Longueuil, Québec	CNB A-3.1.2.1.1, Groupe E	Établissements commerciaux, Supermarchés
IKEA	Ikea Cavendish Ville St-Laurent, Québec	CNB A-3.1.2.1.1, Groupe E	Établissement commerciaux, Supermarchés
VERSACOLD	Versacold, Québec	CNB A-3.1.2.1.1, Groupe F division 2	Établissement industriel, Entrepôts frigorifiques
CASCADE	Cascade, 108 Boul. Montcalm Candiac	CNB A-3.1.2.1.1, Groupe F division 1	Établissement industriel, usine de recyclage du papier

TABLEAU 1.1 : Choix des compagnies sollicitées pour les relevés des unités d'éclairage d'urgence.

Dans la catégorie des grandes surfaces et des entrepôts de vente au Canada, Walmart et Ikea figurent parmi ceux qui disposent du plus grand nombre de modules d'unités d'éclairage de sécurité, d'après nos relevés sur le site. Le site d'IKEA Saint-Laurent demande deux techniciens pour une durée de deux à trois semaines d'inspection. Afin de diversifier l'étude, nous avons choisi deux entreprises industrielles qui respectent le CNB (Code National du Bâtiment) et pour lesquelles un contrat de maintenance des appareils d'éclairage de sécurité est à jour. Il s'agit des sociétés Cascade et Versacold.

---

1. Les entreprises évoquées au tableau 1.1 sont celles pour lesquelles la représentation en alarme incendie est conforme au CNB 2010.

### 1.1.1 Relevés de sites

Nous avons pu obtenir les données relatives aux appareils d'éclairage de sécurité des sites Walmart, Ikea, Cascade et Versacold, consignées dans les tableaux 1.2, 1.3, 1.4 et 1.5 ci-dessous.

#### 1.1.1.1 Relevé de la compagnie Walmart

Le tableau 1.2 présente la localisation, la quantité, le type de lampe, la tension de la batterie, les coûts et les exigences de maintenance.

Établissement commercial							
Société	Lieu	Quantité	Batterie	PrixU. (\$)	Coût Location (\$)	Coût Entretien (\$)	Maintenance sur site
Walmart	Magasin /Plafond	44	6v	164	250	800	Module en hauteur : échelle
	RDC /Entrepôt	15	6v	164	1875	800	Module en hauteur : équipement de levage
	Mezzanine /Entrepôt	15	6v	164	1875	800	Module en hauteur : équipement de levage
<b>Total</b>		74	-	12136	4000	2400	-

TABLEAU 1.2 : Relevé des unités d'urgences site de Walmart.

Les appareils d'éclairage de sécurité de Walmart sont constitués de soixante-quatorze (74) modules de sécurité répartis sur trois emplacements distincts, à savoir : le magasin, l'entrepôt et la mezzanine. Chaque module contient une batterie de secours de six (6) volts pour l'alimentation de sécurité en cas de coupure de la tension normale. Le prix unitaire d'un module est de 164\$<sup>2</sup>. La maintenance des modules d'éclairage de sécurité exige des coûts de location pour des appareils de levage (chariot élévateur, nacelle ou plateforme élévatrice). Cette location est requise à chaque itération de maintenance, notamment pour les modules en hauteur. Le coût journalier moyen de location est de 750\$ (zone de Montréal), pour une durée globale d'une semaine de travail (cinq jours), soit un total de 3750\$. Vu les coûts élevés, les entreprises d'alarme incendie préfèrent les utiliser uniquement lors de la maintenance annuelle. Cependant, les appareils d'éclairage de sécurité éloignés du sol doivent également être testés mensuellement.

---

2. Le prix d'un appareil d'éclairage de sécurité (voir tableau 1.2) diffère d'un site à un autre et d'un manufacturier à un autre.

Les coûts d'entretien sont relatifs à la main-d'œuvre des agents en charge de la maintenance. Le coût estimé est basé minimalement sur deux (02) techniciens à 100\$ l'heure pour une durée de douze (12) heures (durée minimale).<sup>3</sup>

#### 1.1.1.2 Relevé de la compagnie Ikea

Le tableau 1.3 présente la localisation, la quantité, le type de lampe, la batterie, les coûts et les exigences de maintenance.

Établissement commercial							
Société	Lieu	Quantité	Batterie	PrixU. (\$)	Coût Location (\$)	Coût Entretien (\$)	Maintenance sur site
Ikea	RDC /Sortie	12	6v	164	1875	600	Module en hauteur : équipement de levage
	RDC /Salle de montre	16	6v	164	250	600	Module en hauteur : besoin d'échelle
	RDC /Entrepôt	28	6v	164	1875	600	Module en hauteur : équipement de levage
	Aire /Bureau	36	6v	164	250	600	Module en hauteur : besoin une échelle
<b>Total</b>		92	-	15088	4250	2400	-

TABLEAU 1.3 : Relevé des unités d'urgences site de Ikea.

L'éclairage de sécurité d'Ikea (Saint-Laurent, Québec) est constitué de quatre-vingt-douze (92) modules de sécurité répartis sur quatre emplacements distincts, à savoir : le corridor du rez-de-chaussée, la salle de montre, l'entrepôt et les bureaux. Chaque module contient une batterie de six (6) volts pour l'alimentation de sécurité en cas de coupure de la tension normale. Nous avons maintenu le coût de location à 750\$ par jour, soit 3750\$ pour cinq (05) jours. De plus, nous avons gardé le même taux horaire que pour Walmart, soit 2400\$, pour le coût global de l'entretien.

Dans le tableau 1.3, les modules d'éclairage d'urgence nécessitant un équipement de levage sont situés au rez-de-chaussée et dans l'entrepôt.

3. La durée d'entretien sur le site de Walmart est de trois (03) à cinq (5) jours facturables au client.

### 1.1.1.3 Relevé de la compagnie Cascade

Dans la compagnie industrielle Cascade (spécialisée dans les solutions d'emballage, d'hygiène et de matériaux faits à base de fibres), nous présentons dans le tableau 1.4 la localisation, la quantité, le type de lampe, la batterie, les coûts et les exigences de maintenance.

Établissement industriel							
Société	Lieu	Quantité	Batterie	PrixU. (\$)	Coût Location (\$)	Coût Entretien (\$)	Maintenance sur site
Cascade	Aire /Bureau	6	6v	164	250	800	Module en hauteur : échelle
	Aire /Entrepôt A	8	6v	164	1875	800	Module en hauteur : équipement de levage
	Aire /Entrepôt B	5	6v	164	1875	800	Module en hauteur : besoin équipement de levage
<b>Total</b>		19	-	3116	4000	2400	-

TABLEAU 1.4 : Relevé des unités d'urgences site de Cascade.

L'éclairage de sécurité de la compagnie industrielle Cascade (Montcalm-Candiac, Québec) est constitué de dix-neuf (19) modules de sécurité répartis sur trois emplacements distincts, à savoir : l'aire de bureau, l'entrepôt A et l'entrepôt B. Chaque module contient une batterie de six (6) volts pour l'alimentation de sécurité en cas de coupure de la tension normale. Nous avons maintenu le coût de location à 750\$ par jour, soit 3750\$ pour cinq (05) jours. De plus, nous avons gardé le même taux horaire que pour Walmart, soit 2400\$, pour le coût global de l'entretien.

Dans le tableau 1.4, les modules d'éclairage d'urgence nécessitant un équipement de levage sont situés dans les entrepôts A et B.

### 1.1.1.4 Relevé de la compagnie Versacold

Dans la compagnie industrielle Versacold (spécialisée dans les chaînes d'approvisionnement alimentaires nécessitant de basses températures), nous avons relevé et consigné dans le tableau 1.5 la localisation, la quantité, le type de lampe, la batterie, les coûts et les exigences de maintenance.

Établissement industriel							
Société	Lieu	Quantité	Batterie	PrixU. (\$)	Coût Location (\$)	Coût Entretien (\$)	Maintenance sur site
Versacold	Bureaux /2ème Étage RDC	8	6v	164	250	1200	Module en hauteur : besoin échelle
	/Centre- Nord	6	6v	164	2250	1200	Module en hauteur : équipement de levage
<b>Total</b>		14	-	2296	2500	2400	-

TABLEAU 1.5 : Relevé des unités d'urgences site de Versacold.

L'éclairage de sécurité de la compagnie industrielle Versacold, Québec, est constitué de quatorze (14) modules de sécurité répartis sur deux emplacements distincts, à savoir : l'aire de bureau du deuxième étage et l'entrepôt situé au rez-de-chaussée. Chaque module contient une batterie de six (6) volts pour l'alimentation de sécurité en cas de coupure de la tension normale. Nous avons maintenu le coût de location à 750\$ par jour, soit 2250\$ pour cinq (05) jours. Car le site n'a pas, comparativement à Walmart et Ikea, suffisamment de modules dans les entrepôts. De plus, nous avons gardé le même taux horaire que pour Walmart, soit 2400\$ pour le coût global de l'entretien. En effet, l'exigence du coût horaire est invariante, indépendamment du site.

Dans le tableau 1.4, les modules d'éclairage d'urgence nécessitant un équipement de levage sont situés dans les entrepôts A et B.

En guise de conclusion de cette section, Les appareils d'éclairage d'urgence au Canada sont des modules autonomes permettant d'assurer l'éclairage de secours dans les bâtiments recevant du public. Les sites de Walmart, Ikea, Cascade et Versacold illustrent bien leur utilisation. Cependant, ces appareils d'éclairage d'urgence des sites sont soumis aux problématiques, aux défis et aux contraintes évoqués dans l'introduction du mémoire.

Afin d'adopter une perspective plus large, il convient d'examiner l'état actuel des unités d'éclairage d'urgence proposées par plusieurs des principaux fabricants mondiaux.

## 1.2 États des lieux des fabricants internationaux et limites

Dans cette section, nous présentons les solutions courantes des appareils d'éclairage d'urgence des principaux fabricants mondiaux.

### 1.2.1 Solution Schneider Electric

Le fabricant européen Schneider Electric (SE) fabrique des coffrets de contrôle pour l'éclairage général dans la zone Europe. Il y a une version approuvée par l'Association canadienne de normalisation (CSA) en vente au Canada, disponible sur le site officiel de Schneider-Electric (Schneider, 2025).

Aux États-unis, la version de contrôle pour l'éclairage général fabriquée par Schneider Electric est communément appelée 'Emergency Lighting Control Panelboard'. Cet équipement se compose de relais de contrôle de charge automatique qui permettent d'envoyer une tension (110-120 Vac) vers les unités d'éclairage lorsqu'il y a une coupure ou une perte de tension du réseau normal.

Cependant, le panneau de SE est essentiellement un panneau de puissance destiné à l'éclairage standard applicable en cas d'urgence lorsqu'il y a une éventuelle perte du réseau d'alimentation normal en énergie électrique. Il n'offre toutefois pas de solution de surveillance pour les unités autonomes d'éclairage de sécurité.

### 1.2.2 Solution Stanpro

La compagnie canadienne Stanpro est spécialisée dans les produits d'éclairage, notamment les lampes conventionnelles, les ballasts, les pilotes des systèmes d'éclairage, les lumières industrielles, l'éclairage d'évacuation (panneaux de sortie et de direction) et l'éclairage d'urgence (ou d'ambiance). La gamme de l'éclairage d'urgence de Stanpro est utilisée sur les sites de Walmart, d'Ikea et dans la plupart des supermarchés et des grandes surfaces au Canada et en Amérique du Nord.

L'offre d'éclairage d'urgence de Stanpro ne renseigne pas sur l'unité d'urgence en question et ne fournit pas les états de tension des batteries ni des lumières d'urgence. La maintenance de ces appareils d'éclairage d'urgence est confrontée aux problématiques abordées dans la section Introduction.

### 1.2.3 Solution Legrand

Toujours en Europe, le constructeur Legrand fabrique des produits d'éclairage de sécurité connectés intégrant les fonctions de l'internet des objets grâce à sa gamme *SATI*. Elle offre une gamme complète pour l'éclairage standard, l'éclairage par les unités d'urgence et un système d'évacuation d'urgence. Cette gamme est basée sur la norme française NFC 15-100 et utilise les fonctions de l'internet des objets. Les modules d'urgence peuvent être pilotés depuis un appareil mobile via le Wi-Fi (Legrand, 2025a). La gamme Legrand, commercialisée au Canada et respectant les normes CSA et CAN/ULC, est la gamme *URA21*. Les informations utiles du fabricant Legrand sont disponibles sur le site web (Legrand, 2025b)

Par ailleurs, l'offre de Legrand est en adéquation avec l'environnement résidentiel. En effet, sur le site de Legrand, il est bien indiqué que la gamme des produits offerts (*SATI* et *URA21*) est exclusivement destinée au résidentiel.

La structure physique des appareils d'éclairage d'urgence en Amérique du Nord diffère de celle de l'Europe. Ceux du Canada sont munis de lampes visibles et d'une batterie interne (C22.2 No 141). Tant dis qu'en Europe, l'éclairage de sécurité ou l'éclairage d'évacuation est associé à des pictogrammes d'évacuation. La gamme Legrand, *URA21*, utilisée au Canada, n'offre ni la communication Wi-Fi ni la supervision depuis un poste de contrôle. La gamme *SATI* et la gamme *URA21* n'offrent pas de communication Modbus.

Une étude sur la congestion des communications sans fil, présentée dans le travail (Burciu *et al.*, 2022), met en lumière des environnements industriels où le WiFi peut également être perturbé par des réseaux sans fil à proximité, par le bruit de divers signaux électromagnétiques, ou par l'évanouissement du signal, qui est très important dans les milieux industriels. Ceci peut limiter le débit et, à terme, affecter l'expérience utilisateur.

Une solution d'appui à apporter à la communication sans fil est la communication filaire, indispensable pour les zones identifiées comme perturbatrices. En effet, les travaux (You et Ge, 2019) utilisent le protocole Modbus, dont les avantages sont la robustesse, la fiabilité et la simplicité. Il traite de l'application du protocole Modbus dans les maisons intelligentes afin d'assurer l'interconnexion des équipements tout en les ouvrant aux connexions industrielles. Vu que le nombre de capteurs et d'actionneurs est sans cesse croissant dans les maisons intelligentes, le protocole Modbus a fait ses preuves dans l'écosystème industriel.

### 1.3 Conceptualisation du prototype

Dans cette section, nous allons justifier le choix technologique de l'approche mise en relief de notre travail, afin d'atteindre notre objectif principal, à savoir : "concevoir un système électronique de gestion d'éclairage de sécurité à LED communiquant par Modbus et WiFi."

La gestion des appareils d'éclairage d'urgence, telle qu'elle est faite au Canada sur les sites témoins pris pour analyse (Walmart, Ikea, Cascade et Versacold), présente un défi, comme mentionné en introduction. Nous nous permettons d'en faire une synthèse en guise de rappel, à savoir : la non-identification visible des modules sur site, la contrainte d'accessibilité des modules d'urgence due aux moyens d'équipement de levage, la problématique de surveillance et de contrôle à distance, la non-connaissance du nombre exact de modules d'un site donné, la non-intégration des unités d'éclairage dans l'écosystème industriel et tertiaire, et l'utilisation de lampes conventionnelles dans certains cas pour l'éclairage d'urgence. Ce sont des problématiques pour lesquelles nous avons produit ce travail.

Le but de notre travail est de proposer un système embarqué permettant non seulement de relever les défis cités ci-dessus, mais aussi de faciliter la gestion, le contrôle et la maintenance des appareils d'éclairage d'urgence. À cet objectif, notre travail sera articulé autour de trois (03) sous-objectifs visés.

#### 1.3.1 Objectif de communication :

L'une des contraintes majeures relatives à la gestion des unités d'éclairage d'urgence est la communication. Nous associerons la communication sans fil et la communication filaire au sein du même kit embarqué<sup>4</sup>. Les critères à atteindre sont les suivants :

- Le choix d'une communication filaire simple, robuste et fiable, utilisée à la fois dans le secteur industriel et dans le secteur tertiaire, tout en étant compatible avec le réseau Éthernet.
- Le choix de la communication sans fil (IoT) permettra la reconnaissance du kit embarqué au moyen d'un téléphone Android, largement utilisé par les agents de maintenance des systèmes d'éclairage d'urgence.

---

4. Tout au long de notre travail, nous utiliserons le mot 'hybride' pour désigner l'utilisation du protocole de communication filaire Modbus et du protocole Wi-Fi au sein du même kit embarqué. D'autres contextes d'utilisation du mot 'hybride' seront précisés.

### 1.3.2 Objectif de contrôle :

La commande des appareils d'éclairage d'urgence actuels se fait généralement par un bouton situé sur le module. Or, l'accès à ces appareils nécessite non seulement une échelle, mais bien souvent des machines de levage. Le contrôle à distance est donc un critère indispensable à intégrer dans le kit embarqué pour la commande d'allumage et la commande d'extinction des lampes.

### 1.3.3 Objectif de maintenance :

La conduite de la maintenance sera résolue d'une part par la communication filaire, qui permettra d'assurer une supervision à distance via un ordinateur. D'autre part, elle sera levée par la communication sans fil, qui permettra de collecter les données d'une unité d'urgence par l'intermédiaire d'un téléphone mobile (Android) près de l'appareil en question.

Les données à collecter de façon standard dans une unité d'urgence sont réparties en acquisition et en commande :

#### 1. En acquisition :

- Tension de la batterie
- États des lampes allumées
- États des lampes éteintes
- États des lampes en court-circuit
- États des lampes en circuit-ouvert
- États des lampes correctes (lampe en bon état, sans défaut apparent)

#### 2. En commande :

- Commande d'allumage des lampes
- Commande d'extinction des lampes

Afin d'atteindre notre objectif, notre méthodologie est basée sur l'analyse, la conception d'une maquette, suivie de l'expérimentation.

1. Analyse :

- Au niveau de l'analyse, nous résolvons les contraintes liées à la communication Modbus et au choix de la variante Modbus à adopter (entre Modbus TCP ou RTU). Le protocole de communication Modbus est largement utilisé dans l'industrie. Nous allons exploiter sa robustesse pour faciliter les échanges à longues distances. Nos modules d'éclairage seront donc non seulement utiles dans le secteur tertiaire, mais aussi dans l'industrie.
  - Par ailleurs, nous réaliserons une analyse sur la communication sans fil la mieux adaptée pour la collecte de données. Notre choix, en marge des justifications à venir, s'est porté sur le WiFi, car grâce à un point d'accès, il sera possible de communiquer avec un appareil de sécurité d'éclairage d'urgence depuis un téléphone mobile.
- Le dernier axe de l'analyse sera l'écriture de l'algorithme d'acquisition des données.

2. Conception :

- Nous allons concevoir une carte électronique (sur la base des principes de l'électronique analogique), permettant de collecter les états logiques d'une lampe (allumée/éteinte, en circuit ouvert et en court-circuit) et de relever le niveau de tension de la batterie. Puis, d'assurer leur commande d'allumage et d'extinction à distance.
- Par la suite, nous allons utiliser un système à microcontrôleur ou un Kit Arduino-Uno WiFi qui collectera les données issues de la carte électronique. Le prototype (kit Arduino et carte Ethernet) aura pour but de faciliter la communication Modbus. La communication par Modbus offre la possibilité de faire communiquer le kit électronique avec des sites industriels équipés d'automates programmables (Salodkar *et al.*, 2023). D'autre part, la communication par Modbus permettra l'échange de données entre un ordinateur ou un automate industriel et les modules déportés dans les unités d'éclairage (Kuang, 2014).
- Faciliter l'identification des modules existants dans un écosystème IoT. Pour l'identification

des modules existants, nous allons exploiter les capacités de la carte WiFi intégrée (Pandey *et al.*, 2019). Et, grâce à un téléphone cellulaire, via une page Web, celui-ci sera facilement repérable au moyen de l'adresse IP renvoyée par l'interface série de l'IDE Arduino.

- Dans la carte Arduino Uno WiFi, nous proposerons un programme Web permettant à un utilisateur tiers muni d'un téléphone Android d'avoir accès aux états logiques des lampes et à la tension de la batterie. Par ailleurs, au moyen d'un PC, un opérateur pourra surveiller et diagnostiquer les données reçues via l'interface web d'une part, mais aussi via l'interface de diagnostic Modbus Scanner d'autre part.

### 3. Expérimentation :

Nous allons, une fois le prototype achevé, c'est-à-dire la carte électronique d'acquisition conçue et le kit Arduino fonctionnel, procéder aux phases de l'expérimentation, qui seront à cet effet :

- a- Carte électronique : Validation des entrées des lampes et sortie de commande
- b- Modbus : À travers la communication Modbus depuis un ordinateur, nous allons valider la collecte des données provenant d'un appareil d'éclairage d'urgence par l'intermédiaire de la carte électronique. Puis, effectuer des commandes d'allumage et d'extinction des lampes. Nous utiliserons l'outil Modbus Scanner pour valider les durées des échanges filaires via le protocole de communication Modbus TCP
- c- Wi-Fi : Après l'écriture du programme Web en HTML, à travers la communication Wi-Fi, nous allons valider la collecte des données et des commandes depuis un téléphone mobile Android.

### Conclusion :

Les motivations, les problématiques, l'objectif et la méthodologie évoqués en introduction nous ont permis de présenter une revue de l'état de l'art au chapitre 1. Dans un premier temps de ce chapitre 1, nous avons abordé le contexte d'utilisation des appareils d'éclairage de sécurité au Canada. Par la suite, nous avons relevé, à partir de sites commerciaux et industriels, les caractéristiques des appareils d'éclairage de sécurité et énuméré les différents fabricants dans le monde, tout en précisant leurs limites. Ceci nous a permis de mettre en lumière notre solution, qui consiste à proposer un

**"système hybride de gestion et de maintenance à distance de l'éclairage de sécurité à DEL, basé sur le Modbus/Wi-Fi".**

Au chapitre 2, nous allons passer en revue les domaines d'application du protocole de communication Modbus.

## CHAPITRE 2

### SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC À DISTANCE AU MOYEN DU PROTOCOLE DE COMMUNICATION MODBUS

Ce chapitre a pour but de présenter l'utilité du protocole de communication Modbus dans les secteurs industriels et tertiaires, ce qui a motivé notre choix de recherche. Nous allons introduire le concept de surveillance et de diagnostic à distance dans les environnements industriels. Nous discuterons du rôle du protocole Modbus dans l'automatisation industrielle et de son importance pour la surveillance à distance, notamment dans le cas applicable des lumières d'urgence.

#### 2.1 Les enjeux liés à la communication Modbus

Les enjeux liés à la communication Modbus sur lesquels nous nous pencherons peuvent être formulés à travers les questions ci-dessous :

- Comment les réseaux Modbus peuvent-ils être optimisés pour une surveillance et des diagnostics à distance efficaces pour des appareils d'éclairage d'urgence ?
- Quels sont les paramètres clés à surveiller dans les équipements industriels pour la détection précoce des pannes ?
- Comment les données collectées peuvent-elles être efficacement analysées et visualisées pour une prédictibilité rapide ?

Nous allons proposer un système de surveillance à distance en utilisant le protocole de communication Modbus TCP (à définir) pour la collecte et le dépannage d'une unité d'éclairage d'urgence, tout en optimisant les paramètres clés de communication, à savoir la vitesse, la limitation des fonctions d'échange et l'optimisation des transmissions.

#### 2.2 Protocole Modbus dans l'automatisation industrielle

Le protocole de communication Modbus est largement utilisé dans le secteur industriel et offre la stabilité et la robustesse dans les échanges entre systèmes ou unités de production automatisée (Mao *et al.*, 2022). Il permet le transport des données dans le cas où les échanges sans fil pourraient être compromis (évanouissement, affaiblissement, modification structurelle des infrastructures, etc.).

L'utilisation du Modbus s'est répandue dans le secteur tertiaire, avec son emploi dans les maisons connectées et dans l'internet des objets (Jiang, 2020). L'évolution des technologies pour les systèmes embarqués a aussi permis d'intégrer la communication Modbus afin de libéraliser le protocole Modbus, le rendant ainsi partie intégrante de l'écosystème des communications IoT (Internet des objets) (Kuang, 2014).

### 2.2.1 Description du protocole Modbus

Modbus est un protocole de communication série développé par Modicon et publié par Modicon® en 1979 pour une utilisation avec ses automates programmables (PLC)(Modbus, 2006). En termes simples, il s'agit d'une méthode utilisée pour transmettre des informations sur des lignes série (à l'origine) entre des appareils électroniques. L'appareil qui demande les informations est appelé le maître (ou client) Modbus, tandis que les appareils fournissant les informations sont les esclaves (ou serveurs) Modbus. Dans un réseau Modbus standard, il y a un serveur et jusqu'à 247 clients, chacun avec une adresse de client unique allant de 1 à 247. Le clients peut également écrire des informations sur les serveurs(Modbus, 2020).

Modbus est souvent utilisé pour connecter un ordinateur de supervision à une unité terminale distante (Remote Terminal Unit - RTU) dans les systèmes de contrôle de supervision et d'acquisition de données (SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition). Des versions du protocole Modbus existent pour les lignes série, à savoir : Modbus RTU et Modbus ASCII (American Standard Code for Information Interchange) et pour Ethernet (Modbus TCP).

### 2.2.2 Structure du protocole Modbus

Les échanges Modbus sont basés sur la requête du client et la réponse du serveur tel que défini dans la figure 2.1.

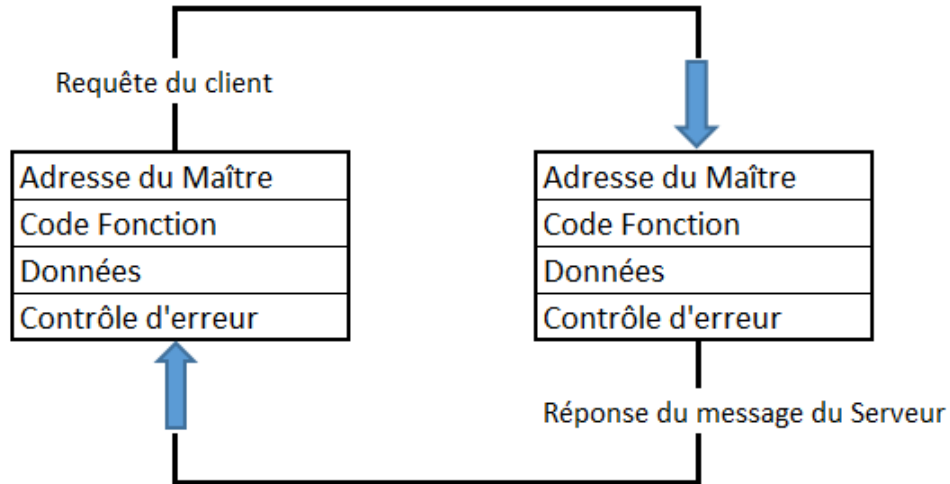


FIGURE 2.1 Requête client-serveur Modbus

**La requête** : le code de fonction dans la requête indique à l'appareil serveur, adressé depuis le client, le type d'action à effectuer. Les octets de données contiennent toutes les informations supplémentaires dont le serveur aura besoin pour exécuter la fonction. Par exemple, le code de fonction 03 demandera au serveur de lire les registres de maintien et de répondre avec leur contenu. Le champ de données doit contenir les informations indiquant au serveur par quel registre il faut démarrer et combien de registres à lire. Le champ de contrôle d'erreur fournit une méthode permettant au serveur de valider l'intégrité du contenu du message.

**La réponse** : Si le serveur donne une réponse normale, le code de fonction dans la réponse est un écho du code de fonction dans la requête. Les octets de données contiennent les informations collectées par le serveur, telles que les valeurs de registre ou l'état. Si une erreur se produit, le code de la fonction est modifié pour indiquer que la réponse est erronée et que les octets de données contiennent un code d'erreur. Le champ de contrôle d'erreur permet au client de confirmer que le contenu du message est valide.

Le Modbus série est constitué du Modbus ASCII (American Standard Code for Information Interchange) et du RTU (Remote Terminal Unit).

### 2.2.3 Mode ASCII

La figure 2.2 présente le mode ASCII (American Standard Code for Information Interchange). Les messages commencent par un caractère « deux-points » (ASCII 3A hexadécimal) et se terminent par

une paire « retour chariot – saut de ligne » (CRLF) (ASCII 0D et 0A hexadécimal). Les caractères autorisés transmis pour tous les autres champs sont hexadécimaux 0-9 et A-F. Les appareils en réseau surveillent en permanence le bus réseau pour le caractère « deux points ». Lorsqu'ils en reçoivent un, chaque appareil décode le champ suivant (le champ d'adresse) afin de déterminer s'il s'agit de l'appareil ciblé. Des intervalles pouvant aller jusqu'à une seconde peuvent s'écouler entre les caractères du message. Si un intervalle plus long survient, le récepteur suppose qu'une erreur s'est produite. Un cadre de message typique est illustré ci-dessous :

Debut	Adresse	Fonction	Données	Contôle LRC	Fin
1 caractère	2 caractères	2 caractères	n caractères	2 caractères	2 caractères

FIGURE 2.2 Trame ASCII du Modbus

#### 2.2.4 Mode RTU

En mode RTU, les messages commencent par un intervalle de silence d'au moins 3,5 caractères. Ceci est le plus facilement implémenté en tant que multiple de caractères au débit en bauds utilisé sur le réseau (voir la figure ci-dessous). Le premier champ transmis est l'adresse de l'appareil (adresse esclave : allant de 1 à 247). L'adresse 0 étant réservée au broadcasting. Le champ 'Function Code' permet de déterminer l'opération Modbus à effectuer (type de lecture ou type d'écriture). Les caractères autorisés (Data, allant jusqu'à 252 octets) transmis pour tous les champs en hexadécimal 0-9, A-F. Les appareils en réseau surveillent le bus en permanence, y compris les intervalles « silencieux ». Lorsque le premier champ (le champ d'adresse) est reçu, chaque appareil le décode pour savoir s'il s'agit de l'appareil adressé. Après le dernier caractère transmis, un intervalle similaire d'au moins 3,5 fois le caractère marque la fin du message. Un nouveau message peut commencer après cet intervalle. L'intégralité de la trame de message doit être transmise sous la forme d'un flux continu. Si un intervalle silencieux de plus de 1,5 caractères se produit avant la fin de la trame, le dispositif récepteur vide le message incomplet et suppose que l'octet suivant sera le champ d'adresse d'un nouveau message. De même, si un nouveau message commence moins de 3,5 caractères après un message précédent, l'appareil récepteur le considérera comme une continuation du message précédent.

La méthode de vérification de la trame est basée sur le contrôle de redondance cyclique (CRC) sur

16 bits.

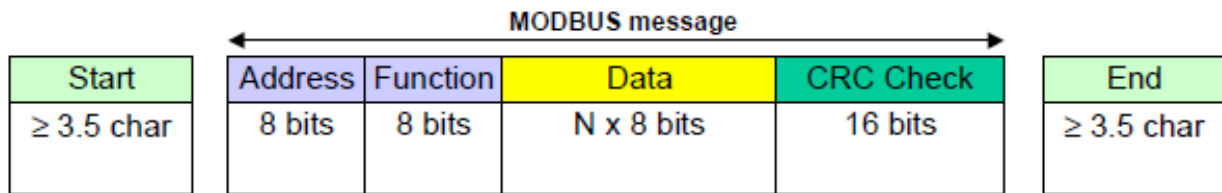


FIGURE 2.3 Trame RTU Modbus

La figure 2.4 montre comment connecter des équipements communicants via le Modbus série en mode deux fils<sup>1</sup>. Ce câblage inclut la protection des lignes (Modbus, 2006).

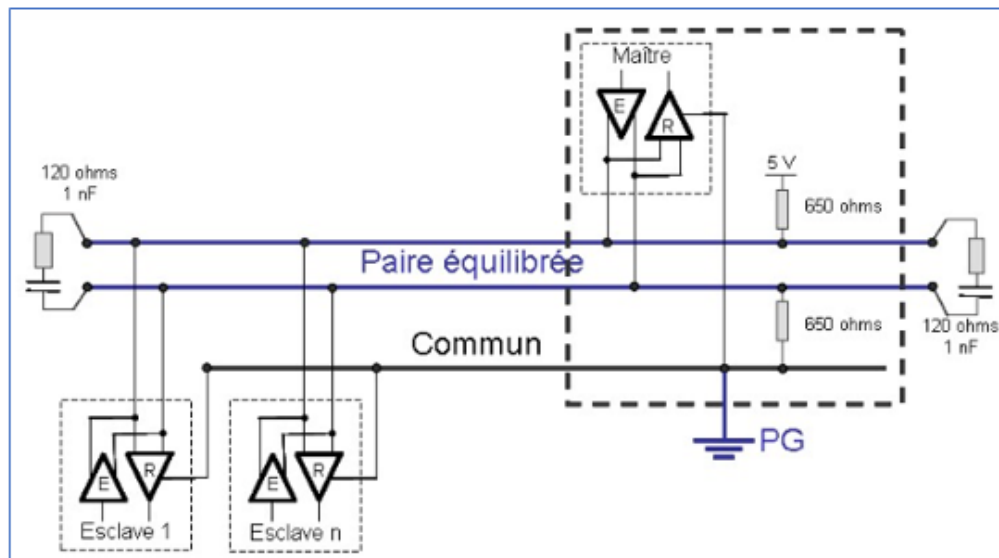


FIGURE 2.4 Schéma de raccords du Modbus 02 fils

Sur la figure 2.4, on remarque :

- Le Client : Il est constitué d'un tampon (buffer) émetteur de requêtes vers les esclaves et d'un tampon récepteur pour recevoir la réponse de ces esclaves. Lui seul écrit et lit dans ces hôtes.
- Le Serveur : chaque serveur dispose d'une adresse unique allant de 1 à 247, il est constitué d'un buffer d'émission de réponse vers le maître et d'un buffer de réception des requêtes en

1. les informations de la figure 2.4 ont été prises sur le site officiel de Schneider Electric : <https://www.se.com/fr/fr/faqs/FA22821/>

provenance du maître. Ne peut ni lire ni écrire dans un autre esclave.

- Fin de ligne : L'adaptation d'impédance est constituée du circuit R-C ( $R = 120$  ohms et  $C = 1$  nF) en bout de ligne (Modbus, 2006).

### 2.2.5 Protocole Modbus dans le modèle OSI

Le protocole Modbus TCP est un protocole client-serveur (Modbus, 2020). Ce protocole s'effectue aux niveaux 1, 2, 3, 4 et 7 du modèle OSI (Open Systems Interconnection), comme présenté à la figure 2.5. Le service de messagerie Modbus fournit une communication Client/Serveur entre des appareils connectés à un réseau Ethernet TCP/IP. Ce modèle client/serveur est basé sur quatre types de messages Modbus : la requête (émise par le client vers le serveur), l'indication (confirmation que le serveur a bien reçu la requête), la réponse (réponse du serveur au client) et la confirmation (confirmation de la réception par le client) (Modbus.org, 2006).

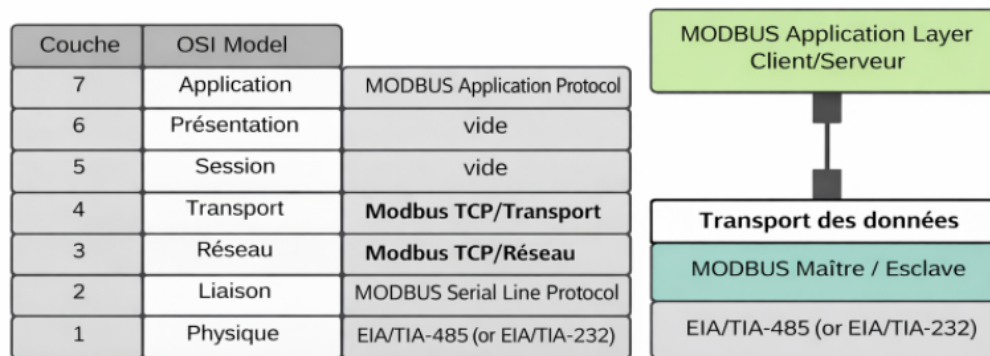


FIGURE 2.5 Protocole Modbus dans le modèle OSI

Le protocole de messagerie de la couche application MODBUS, positionné au niveau 7 du modèle OSI, assure la communication client/serveur entre des appareils connectés sur des bus ou des réseaux. Sur la ligne série Modbus, le rôle du client est assuré par le maître du bus série, et les nœuds esclaves agissent comme des serveurs.

Les champs de message Modbus de la figure 2.6 se composent de :

- d'un identifiant de trame de deux octets (pouvant aller de 0 à 255 pour l'identification de la trame) ;
- Les deux octets de protocole (0 pour Modbus TCP) ;
- La longueur de deux octets, représentant le nombre d'octets restants dans la trame ;
- L'ID, un octet, est l'adresse du dispositif sur le réseau (de 1 à 255 dispositifs, avec 0 réservé pour

la diffusion à tous les dispositifs). Le Modbus TCP utilise le port 502 ;

- La Fonction, un octet, permettant de définir la typologie de requête (voir Figure ‘Code fonction du protocole Modbus’);
- Le champ Donnée, dont la taille n dépend du volume d’information à émettre et du code de fonction ;

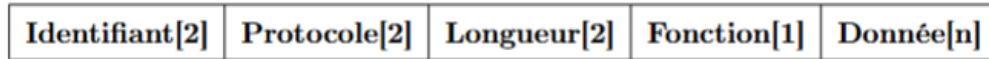


FIGURE 2.6 Trame Modbus TCP complète

### 2.3 Applications du protocole de communication Modbus

Cette partie traite de l’application du protocole de communication Modbus dans les secteurs industriel et tertiaire. Pour ce faire, nous avons sélectionné des articles devant apporter des solutions aux problématiques évoquées.

#### 2.3.1 Dans le secteur industriel

Le protocole de communication Modbus est utilisé dans les échanges de données entre un automate programmable et un poste de supervision(Santiago *et al.*, 2021), qui met en exergue une interface SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition) permettant de communiquer avec des équipements distants et de collecter des données via le protocole Modbus TCP au niveau des nœuds de terrain. Le travail (Santiago *et al.*, 2021) fournit la communication Modbus RTU et TCP. Le Modbus RTU est utilisé pour des équipements (capteurs) communiquant via la liaison série RS485 avec l’automate. Le Modbus TCP est utilisé pour des équipements intelligents (automates tiers ou serveur SCADA) supportant le réseau Ethernet et connectés à un automate industriel.

Le temps de cycle ( $T_c$ ), défini par (Santiago *et al.*, 2021) est un paramètre clé pour le Modbus. Il est le temps nécessaire pour l’exécution d’une requête :

$$T_c = \frac{1}{R_b} [N_b \cdot N_{\text{bit/byte}} + (N_b - 2) \cdot 1.5 \cdot N_{\text{bit/char}} + 3.5 \cdot N_{\text{bit/char}}] \times 1000 + t_{\text{proc}}$$

Avec :

-  $t_{\text{proc}}$  qui représente le temps fixe de latence induit par l’équipement lors d’une requête normale et

égale au temps d'exécution global du processus ;

- $R_b$  = vitesse de transmission en bits/s ;
- $N_b$  = nombre total d'octets du flux de communication ;
- $N_{bit}$  = nombre total de bits du flux de communication.

Par ailleurs, le travail présenté dans l'article (Mao *et al.*, 2022) démontre l'utilité des automates programmables pour le contrôle et la supervision industriels en proposant une variante temporelle logique PPLTL (PLC Past Linear Temporal Logic). Elle est basée sur un temps de cycle d'automate de  $20ms$  pour la supervision des pré-actionneurs, des actionneurs et des capteurs d'un système de contrôle axé sur un automate. Le module Arduino Uno WiFi est constitué d'un processeur ATmega-4809 à 16 MHz, soit une période d'exécution globale de :

$$exe = (1/(16 * 1000000)) * Nbr\_Instr$$

avec  $Nbr\_Instr$  égal au nombre d'instructions.

### 2.3.2 Dans le secteur tertiaire

L'idée majeure du travail présenté dans l'article (Jiang, 2020) est le contrôle des équipements d'une maison intelligente au moyen d'une transmission des données par SMS via un téléphone mobile. La communication Modbus TCP est réalisée entre l'automate de contrôle et le module serveur. Le module serveur, à son tour, assure la transmission des alarmes et des états des équipements aux différents téléphones mobiles spécifiés. Tandis que l'automate assure la commande des équipements qui lui sont rattachés via ses entrées et sorties.

Généralement, la programmation de la couche de communication Modbus TCP est assurée par l'automate programmable industriel, qui intègre toutes les fonctions du Modbus. En effet, dans un automate industriel, les fonctions de communication Modbus (comme présentées à la figure 2.7 ci-dessous) sont intégrées dans des blocs-fonctions paramétrables dans un automate programmable. La portée majeure du travail (Jiang, 2020) est d'exploiter les atouts du protocole Modbus dans le secteur tertiaire par le biais d'une application de maison connectée.

Code	Name	384	484	584	884	M84	984
01	Read Coil Status	Y	Y	Y	Y	Y	Y
02	Read Input Status	Y	Y	Y	Y	Y	Y
03	Read Holding Registers	Y	Y	Y	Y	Y	Y
04	Read Input Registers	Y	Y	Y	Y	Y	Y
05	Force Single Coil	Y	Y	Y	Y	Y	Y
06	Preset Single Register	Y	Y	Y	Y	Y	Y
07	Read Exception Status	Y	Y	Y	Y	Y	Y
08	Diagnostics (see Chapter 3)						
09	Program 484	N	Y	N	N	N	N
10	Poll 484	N	Y	N	N	N	N
11	Fetch Comm. Event Ctr.	Y	N	Y	N	N	Y
12	Fetch Comm. Event Log	Y	N	Y	N	N	Y
13	Program Controller	Y	N	Y	N	N	Y
14	Poll Controller	Y	N	Y	N	N	Y
15	Force Multiple Coils	Y	Y	Y	Y	Y	Y
16	Preset Multiple Registers	Y	Y	Y	Y	Y	Y
17	Report Slave ID	Y	Y	Y	Y	Y	Y
18	Program 884/M84	N	N	N	Y	Y	N
19	Reset Comm. Link	N	N	N	Y	Y	N
20	Read General Reference	N	N	Y	N	N	Y
21	Write General Reference	N	N	Y	N	N	Y

FIGURE 2.7 Code fonction du protocole Modbus

Dans le cadre de notre travail, nous optimiserons la couche de communication Modbus TCP dans le kit Arduino Uno WiFi uniquement pour les fonctions d'acquisition des registres d'entrée (Input Register, code fonction 4 de la figure 2.7) afin de collecter les états des lampes et la tension de la batterie. Une manière simplifiée d'appréhender le protocole Modbus TCP/IP consiste à le considérer comme un mécanisme d'encapsulation des trames Modbus RTU (Remote Terminal Unit). C'est essentiellement ce que Modbus a fait. De ce fait, Modbus TCP est également simple à mettre en œuvre.

L'article (You et Ge, 2019) présente l'utilité du protocole Modbus pour la connexion des unités (capteurs de température et d'humidité) dans les bâtiments intelligents couplés à l'internet des objets. Vu que le nombre de capteurs et d'actionneurs est sans cesse croissant dans les maisons intelligentes, et que le protocole Modbus a fait ses preuves dans l'écosystème industriel, l'article exploite la puissance du protocole Modbus RTU pour collecter les données des capteurs. La vitesse d'exécution est un paramètre clé pour le Modbus RTU. En général, 9600 bauds pour les cas usuels.

### 2.3.3 Avantages du protocole de communication Modbus

Fort des points des articles analysés ci-dessus, le protocole Modbus présente les avantages suivants :

- Efficace, simple et facile à mettre en œuvre : De nombreux microcontrôleurs acceptent au moins l'intégration d'une fonction Modbus (Kuang, 2014).
- L'appellation Maître-Esclave a été remplacée par Client-Serveur (Modbus, 2020). Ceci démontre l'intégration du protocole de communication Modbus aux règles d'échange TCP.
- Pratique pour des communications filaires à longue distance : Pouvant aller jusqu'à 1000 mètres à 19 200 bits par seconde pour un maximum de 32 équipements (Modbus, 2006).
- Évolutif : Le Modbus RTU s'intègre aisément dans une trame TCP/IP et permet ainsi au protocole TCP/IP de contrôler 32 équipements différents sur son réseau pour une seule adresse IP définie. L'Utilisation du protocole Modbus permettra d'intégrer les modules d'éclairage d'urgence dans des architectures GTC (Gestion Technique Centralisée), GTB (Gestion Technique du Bâtiment) et dans les RLI (Réseaux Locaux Industriels) (Modbus.org, 2006)
- Ouvert : les spécifications du protocole Modbus sont accessibles et disponibles gratuitement sur le site officiel du constructeur de ce protocole (Modbus.org, 2021)

### 2.3.4 Inconvénients du protocole de communication Modbus

- Le protocole de communication Modbus, comparé au protocole Ethernet/IP, n'est pas adapté aux applications qui nécessitent une transmission de données à haut débit et un temps réel de haute exigence (Exemples : (1) Transmission de données à haut débit de vidéo-surveillance. (2) Ethernet/IP prend en charge des débits de transmission allant jusqu'à 1 Gbit/s, tandis que le Modbus RTU à un débit compris entre 9600 et 115 200 bit/s) (Kuang, 2014).
- Les aspects sécuritaires et de cybersécurité n'ont pas été pris en compte à l'origine de la création du protocole Modbus (Dudak *et al.*, 2019). Ainsi, il est possible d'analyser et de décrypter une trame Modbus standard et de pirater une communication Modbus. C'est la raison pour laquelle des travaux de recherche ont été menés afin d'assurer la sécurité des paquets de transmission Modbus (Nyasore *et al.*, 2020). Depuis 2018, le protocole de sécurité Modbus (Modbus Security protocol) (Modbus.org, 2021) a été mis en place. Celui-ci offre une protection robuste grâce à la combinaison de la sécurité offerte par la couche de transport (TLS - Transport Layer Security) et du protocole Modbus traditionnel. TLS encapsule les paquets Modbus tout en assurant l'authentification et la protection de l'intégrité des messages.

## 2.4 Systèmes de surveillance à distance

Dans cette section, nous présentons les principales architectures de surveillance à distance utilisées dans le secteur industriel, en mettant en évidence le rôle du protocole de communication Modbus dans l'échange de données entre les équipements et les systèmes de supervision.

Le protocole Modbus, largement répandu dans les systèmes numériques de contrôle-commande (SNCC), permet la communication entre un dispositif maître (tel qu'un automate programmable industriel ou un système SCADA) et plusieurs dispositifs esclaves (capteurs, actionneurs ou équipements intelligents). Il est utilisé pour la lecture et l'écriture de registres, facilitant ainsi la supervision et le contrôle à distance des installations industrielles.

Dans ce contexte, trois grandes catégories de systèmes de surveillance ont été identifiées :

1. Les systèmes de contrôle d'accès et d'anti-intrusion : Ces systèmes intègrent des dispositifs tels que des lecteurs de cartes, des détecteurs de mouvement et des contrôleurs d'accès. Dans ces architectures, le protocole Modbus est utilisé pour assurer la communication entre les contrôleurs locaux et les automates ou les systèmes de supervision. Par exemple, un contrôleur d'accès peut transmettre l'état d'une porte (ouverte/fermée), des alarmes ou des événements de sécurité à un automate via Modbus TCP ou Modbus RTU. Cette communication permet une centralisation des données et une gestion en temps réel des accès.
2. Les systèmes de points de collecte de données : Ces systèmes reposent sur des unités d'acquisition (capteurs, modules d'entrées/sorties déportées, RTU) qui collectent des données physiques (température, pression, tension, courant, etc.). Le protocole Modbus est utilisé pour transmettre ces données vers un système central (PLC ou SCADA). Par exemple, un module d'acquisition peut exposer ses mesures sous forme de registres Modbus, accessibles par un automate via Modbus TCP ou Modbus RTU. Cette architecture permet une supervision continue et une historisation des données de procédé.
3. Les systèmes de surveillance radio : Dans les environnements où le câblage est difficile ou coûteux, les communications sans fil sont privilégiées. Dans ce cas, le protocole Modbus est encapsulé dans une liaison radio (radio industrielle, Wi-Fi, ou autre technologie sans fil). Les données Modbus sont ainsi transmises entre des stations distantes et un système central. Par exemple, un capteur distant peut envoyer ses données via un module radio qui transporte des

trames Modbus TCP vers une station de supervision. Cette approche permet d'étendre les capacités de surveillance à distance tout en conservant un protocole industriel standardisé.

#### 2.4.1 Système d'accès

En industrie, comme dans d'autres secteurs d'activité tertiaire, les systèmes d'accès comprennent, entre autres, des systèmes de contrôle d'accès, des systèmes anti-intrusion, etc. Ces systèmes utilisent diverses technologies allant des transmissions filaires aux transmissions sans fil, incluant des accès cloud. Cela engendre une variabilité des protocoles de communication en fonction des différents niveaux d'accès sécuritaires. À savoir, les systèmes d'accès basés sur :

- Les protocoles GSM et RTU (Kireeva et Pozdnyak, 2021)
- La norme IEEE 802.1x (sans fil) (Pei-qiang Zhang *et al.*, 2008)
- Les accès TCP et Web (Wang, 2006)

#### 2.4.2 Système de collecte de données

Les systèmes de collecte de données sont largement utilisés dans l'industrie. Il s'agit de systèmes de gestion de points d'accès par lesquels un automate central peut échanger des données avec des stations distantes constituées exclusivement de cartes de collecte d'entrées/sorties numériques et analogiques (Santiago *et al.*, 2021). Par ailleurs, les entreprises utilisent des plateformes d'accès distant à travers le VPN (Virtual Private Network), et ce dernier est maintenant sécurisé par le ZTNA (Zero Trust Network Access), qui représente une amélioration sécuritaire du VPN (Fang et Guan, 2022). En effet, le ZTNA exige une vérification stricte de chaque utilisateur et de chaque appareil avant de les autoriser à accéder aux ressources internes d'un réseau.

#### 2.4.3 Système de surveillance radio

Dans les sites éloignés où les réseaux Ethernet ne sont pas disponibles, les sites industriels utilisent des équipements qui intègre la technologie GSM. Les cas applicables sont notamment la gestion métrique et la gestion des relevés des compteurs (Zheng Wenzheng, 2010).

## 2.5 Techniques de Diagnostic et de Détection de Pannes

Le cœur des systèmes de contrôle-commande industriels repose sur les automates programmables industriels (API), qui assurent la supervision, le pilotage et le diagnostic des procédés. En fonction de l'architecture mise en œuvre, le processus de diagnostic peut être décrit selon les étapes suivantes (Martsenyuk *et al.*, 2019) :

1. L'analyse des données et l'identification des anomalies ou des défaillances potentielles.
2. La formulation et la mise en œuvre de solutions correctives adaptées.
3. L'amélioration continue du système par des approches d'analyse prédictive et d'apprentissage automatique.

### 2.5.1 Analyse prédictive et Identification du problème

Les systèmes automatisés industriels répondent à la norme ISA-88/ISA-95, établissant les règles qui régissent l'industrie 4.0 ainsi que les protocoles de communication tels que Modbus TCP, Profibus et Ethernet/IP. Ces protocoles sont des parties intégrantes des systèmes d'aides à la maintenance. Les programmes de contrôle des automates sont ainsi conçus pour collecter, analyser et identifier les causes récurrentes de défauts majeurs afin de permettre la planification d'une maintenance.

### 2.5.2 Proposition de solution en vue de résoudre le problème

L'industrie 4.0 permet l'intégration d'un ERP (Enterprise Resource Planning), qui est la première plateforme de ressources permettant de répertorier, d'exploiter et de maintenir les équipements industriels. L'ERP est généralement associé à un serveur de données permettant, en plus d'assurer les transactions entre l'automate et l'utilisateur. Les outils de GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur) permettent d'assurer la maintenance des équipements assujettis à un contrôle industriel. Il existe plusieurs gammes et logiciels d'application de GMAO (comme MaintainX, Excel et Corim). Cependant, le concept de l'Intelligence Artificielle (IA) pour la résolution des problèmes est en train de frayer un chemin dans l'industrie afin d'améliorer la précision des diagnostics.

### 2.5.3 Analyse prédictive et l'apprentissage machine

L'IA permet d'améliorer les processus d'aide à la décision. Elle est largement utilisée en télémédecine (Martsenyuk *et al.*, 2019), dans les finances, notamment sur le marché des bourses (Agrawal et Mukherjee, 2025). En industrie, le concept d'apprentissage machine est dans ses premières années d'intégration. L'apprentissage machine est utilisé en industrie dans le cadre de la maintenance prédictive, de l'essai de nouvelles plateformes de production de l'industrie 4.0, où un ensemble de comportements de la machine prédispose à une certaine panne prédictive et assure ainsi la réduction des temps d'arrêt de production (Al-Gumaei *et al.*, 2019).

Dans l'industrie, le volume des informations et leur hétérogénéité rendent difficile la conception d'une application prédictive de maintenance. Dans l'article (Kamm *et al.*, 2023), les auteurs proposent une architecture d'apprentissage machine permettant d'intégrer des données hétérogènes provenant de différentes couches de communication et de plateformes industrielles. L'un des aspects de la prédiction des pannes et de l'apprentissage machine dans l'industrie en pleine croissance est la prédiction des pannes des moteurs électriques pour une réduction des coûts de maintenance et l'anticipation des pannes électriques (Bhandari et Silwal, 2022).

Dans le cadre de notre travail, nous développerons une application d'état de machine qui aura pour fonction d'actualiser et de surveiller l'état réel des lampes en cas de court-circuit, de circuit ouvert, allumées ou éteintes, ainsi que du niveau de la tension de la batterie. Notre application n'intégrera pas de prédictions sur ces états. Car cela reviendrait à augmenter les coûts de développement et de production d'une unité.

## 2.6 Intégration de Modbus avec les technologies de surveillance à distance

Après avoir présenté le protocole Modbus, nous allons dans cette section, faire valoir l'intégration du protocole Modbus dans les systèmes électroniques embarqués.

### 2.6.1 Modbus RTU dans les systèmes embarqués

L'avantage du Modbus RTU (Modbus, 2006) est qu'il se déploie sur de longues distances. Le Modbus RTU est adapté à la communication des capteurs car il opère sur le support RS-485, ce qui permet de garder une architecture réseau simple. En effet, le Modbus RTU est utilisé pour la collecte des données de différentes stations de mesure de l'énergie électrique (Salodkar *et al.*, 2025).

Dans le cadre de nos travaux, les modules d'urgences sont des unités autonomes auxquelles nous associerons une communication TCP afin de les intégrer dans un écosystème IoT tout en ayant une ouverture éventuelle vers le contrôle industriel (You et Ge, 2019).

### 2.6.2 Cas applicatif du Modbus TCP dans un kit embarqué libre d'application

Vu que le besoin des modules d'éclairage de sécurité est bel et bien demandé en industrie, nous avons pensé à un système pouvant communiquer avec les automates programmables du milieu industriel, afin de faciliter son intégration au même titre que des pré-actionneurs, actionneurs et capteurs industriels. De ce fait, nous avons opté pour un système embarqué « matériel libre (open source hardware) », ayant un faible coût d'achat, alliant simplicité, puissance de contrôle, capable d'intégrer les protocoles de communication I2C, SPI, WiFi, Modbus et permettant d'opérer non seulement dans une architecture IoT, mais aussi dans un écosystème industriel.

Aujourd'hui, il est possible de faire communiquer un automate industriel en Modbus RTU avec une carte Arduino et une carte d'extension d'entrées-sorties. Le code fonction 03 (Holding Register) est utilisé à une vitesse de 9600 bauds pour établir la communication entre l'automate et le kit embarqué Arduino. Ceci permet ainsi d'optimiser le trafic Modbus en intégrant une seule fonction dans l'Arduino (Kuang, 2014).

Contrairement à l'article (Kuang, 2014), nous mettrons en œuvre une communication Modbus TCP/IP basée sur le Kit Arduino Uno et l'Ethernet Shield rev2. Ce qui implique que tout automate qui devra entrer en communication avec le Kit électronique s'alignera sur le protocole Modbus TCP pour communiquer.

De nos jours, la plupart des automates programmables ont un port TCP. La connexion TCP est assurée à travers le kit Arduino Ethernet Shield Rev2 avec lequel nous connecterons les liaisons filaires Modbus. Afin d'assurer une avancée de vitesse de transmission nous allons effectuer nos essais de transmission à une vitesse supérieure ou égale à 9600 bauds.

### 2.6.3 Piste d'optimisation de la transmission Modbus

#### a. Raison d'optimisation :

L'une des actions d'optimisation de la couche de communication Modbus est d'implémenter uniquement la fonction dont l'application aura un usage prépondérant. Dans notre cas, nous avons utilisé la fonction 04 (Input Register). Ceci nous permettrait uniquement de faire

preuve d'abstraction pour les autres fonctions Modbus, réduisant ainsi le temps de cycle de communication (Kuang, 2014).

b. Paramètres clés à surveiller :

D'après l'article (Mao *et al.*, 2022) et l'article (Kuang, 2014), nous avons noté l'importance du volume d'instructions à écrire dans l'IDE Arduino, mais aussi la vitesse de communication de la transmission. Ceci nous emmènera dans la section conception à relever les temps de cycle d'échange pour les vitesses de 9600 bauds et supérieures, afin de voir si l'on pourrait optimiser au-delà de la vitesse préconisée dans les travaux de (Kuang, 2014). Nous allons expérimenter des vitesses de transmission au-delà de 9600 bauds (19200 bauds) afin d'expérimenter s'il est possible d'améliorer le débit de transmission.

c. Analyse des données collectées :

Le protocole de communication Modbus est largement utilisé dans l'industrie pour des besoins de diagnostic et de supervision. Notre étude se limite au diagnostic des états des lampes d'urgence et du niveau de tension de la batterie destiné à l'alimentation des unités d'urgence.

Par conséquent, les données à collecter par le système embarqué proposé seront donc :

- La tension de la batterie
- L'indication de l'état de la batterie (à remplacer ou non).
- L'état des lampes en court-circuit.
- L'état des lampes en circuit ouvert.
- L'état des lampes allumées ou éteintes.
- Le numéro de module d'éclairage de sécurité.

Dans le cadre de la surveillance à distance, un des indicateurs importants est la vitesse de transmission. Notre étude n'englobera pas les contraintes de trafic et la latence induites par certains équipements réseau (routeurs, hubs, etc). Nous allons restreindre nos essais sur la vitesse de transmission d'une part et sur le temps de "*polling*"<sup>2</sup> du Modbus d'autre part.

De plus, nous ne pourrions pas modifier le temps de réponse du kit Arduino utilisé face aux échanges Modbus. En effet, l'article (Santiago *et al.*, 2021) définit le temps  $t_{\text{proc}}$  (qui représente le temps fixe de latence induit par l'équipement lors d'une requête normale) qui est égale au temps d'exécution global du processus ; Ce temps est un ajout fixe à la durée de

---

2. Une interrogation Modbus "Modbus pool" se produit donc lorsqu'un maître Modbus demande à un esclave Modbus des informations d'état actualisées.

traitement d'une requête que le kit Arduino Uno nous imposera.

L'un des outils de diagnostic du protocole de communication Modbus est l'application 'Modbus Scanner'. Qui permet de valider non seulement l'intégrité des données, mais aussi le temps de "*polling*" des données reçues.

Dans ce chapitre 2, nous avons fait le tour des applications du protocole filaire de communication Modbus dans les domaines de l'automatisation industrielle, des systèmes de surveillance à distance et des systèmes de diagnostic et de détection de pannes. Dans notre travail, nous utiliserons la communication Modbus pour collecter les données provenant d'un appareil d'éclairage d'urgence via un poste de contrôle. Comme évoqué en introduction, un opérateur, placé au pied d'un appareil d'éclairage, doit pouvoir le superviser sans avoir à retourner dans la salle de contrôle (en raison des distances entre la salle de contrôle et le site). Ainsi, au prochain chapitre, la communication sans fil sera l'option qui répondra à ce besoin.

Au chapitre 3, nous allons analyser la communication IoT pour les systèmes embarqués appliqués aux appareils d'éclairage de sécurité. Cela nous permettra de répondre à la partie hybride (communication filaire et sans fil) de notre travail.

## CHAPITRE 3

### ANALYSE DE LA COMMUNICATION IOT POUR SYSTÈMES EMBARQUÉS : CAS DES APPAREILS D'ÉCLAIRAGE DE SÉCURITÉ

Certains appareils d'éclairage de sécurité sont situés à des hauteurs nécessitant l'utilisation d'équipements de levage assez coûteux pour la maintenance, comme mentionné dans l'introduction. Le fait d'avoir des appareils d'éclairage d'urgence pouvant répondre, d'une part, aux contraintes de transmission filaire (réseau Modbus TCP, que nous avons relevé dans le chapitre 2, à partir de la section 2.2.1), de sorte qu'il puisse être supervisé depuis un poste de contrôle et d'autre part, assurer une transmission sans fil (utile pour tout technicien se trouvant sous un appareil d'éclairage d'urgence) afin de pouvoir interagir avec l'unité d'urgence pour relever ses états fonctionnels à distance (pour relever manuellement les états fonctionnels de l'unité). Ce système fera l'objet de la problématique majeure que nous allons résoudre dans le chapitre 3. Autrement dit, comment avoir accès aux données d'état d'un appareil d'éclairage d'urgence au pied de celui-ci, indépendamment de l'utilisation de moyens de levage coûteux. Seul un accès sans fil peut répondre à cette question. Quel sera le moyen de communication sans fil le mieux adapté ?

Dans cette section, nous aborderons des travaux qui ont visé le domaine des communications IoT (Wi-Fi, Bluetooth et Zigbee) axés sur les systèmes d'éclairage d'urgence. Nous étayerons les points saillants abordés afin de choisir la communication sans fil la mieux adaptée pour notre travail.

#### 3.1 Protocoles de communications IoT

L'internet des objets est présent partout dans les dispositifs de communication sans fil. Avec l'avancée des transmissions électroniques, les ingénieurs et les experts du domaine ont développé diverses technologies de transmission à faible consommation d'énergie ayant des caractéristiques communes. Il s'agit du Wi-fi, du ZigBee et du Bluetooth (Chen *et al.*, 2020).

Notre travail s'inscrit, d'une part, dans la sélection des standards de communication des réseaux sans fil, basés sur l'apport de l'Internet des Objets (IoT). Nous allons explorer les communications sans fil qui offrent la possibilité de collecter des informations provenant de différents capteurs et de les rendre accessibles via une page Web grâce à un accès à Internet, tel que décrit dans l'article (Nikolov et Gotseva, 2021). De plus, nous allons faire une analyse comparative des caractéristiques

temporelles, fréquentielles et de portée des protocoles de communication sans fil tels que le standard IEEE 802.11, ZigBee et Bluetooth(Tjensvold, 2007).

D'autre part, avec l'avancée des systèmes embarqués, l'intégration de ces protocoles est aujourd'hui possible et en expansion. En raison de la diversité des systèmes embarqués pouvant intégrer ces protocoles IoT, pour des raisons ergonomiques et économiques, nous avons opté pour l'utilisation des kits embarqués opérant avec les protocoles sans fil (Haque *et al.*, 2019).

Nous allons par la suite élucider des articles combinant l'internet des objets et les kits embarqués assujettis (Haque *et al.*, 2019), (Eid et Fath Allah, 2019), (Chengyi *et al.*, 2010), dans le cadre de l'identification et du déploiement à des échelles réduites des protocoles de communication IoT (ZigBee, WiFi et Bluetooth). Nous allons présenter une étude comparative et certaines associations entre le Wi-Fi, le ZigBee et le Bluetooth dans le cadre des transmissions et des reconnaissances des appareils d'éclairage de sécurité.

### 3.2 Gestion des paramètres d'éclairage par le Wi-Fi

Notre étude vise à contrôler et à gérer des lampes d'éclairage de sécurité. Nous allons, au moyen du protocole de communication sans fil WiFi (IEEE 802.11), assurer le pilotage d'un système d'éclairage et garantir le contrôle de la luminosité. Le Wi-Fi est une technologie de communication sans fil basée sur la famille de normes IEEE 802.11, utilisée pour les réseaux locaux sans fil (WLAN). Dans le contexte des systèmes embarqués, il permet l'échange de données entre équipements électroniques et facilite l'interaction avec des dispositifs mobiles tels que les téléphones intelligents et les tablettes. Nous nous focaliserons, dans cette section, sur l'utilisation du Wi-Fi comme moyen de communication sans fil pour l'identification et le contrôle d'un système d'éclairage intégré à un kit électronique embarqué. Nous allons nous appuyer sur l'article (Zhiguo et Haiyan, 2017).

#### 3.2.1 Approches et utilités

Notre approche pour une communication sans fil avec un appareil d'éclairage de sécurité est présentée comme suit : Le système est composé d'une interface mobile (téléphone portable), d'un système embarqué ayant des circuits intégrés facilitant la communication WiFi et d'une lampe à intensité variable. Le contrôle à distance sans fil d'un appareil à faible consommation énergétique s'est révélé un atout majeur pour le pilotage des systèmes à DEL (diodes électroluminescentes) utilisés dans les maisons connectées. En effet, le WiFi présente des caractéristiques satisfaisantes en termes de

transmission et d'économie d'énergie. Le Modbus est populaire dans les secteurs tertiaire et industriel et peut être utilisé pour la gestion de l'éclairage à des distances moyennes (0-250 m pour le WiFi 802.11 n) (Tjensvold, 2007). Les travaux de l'article (Zhiguo et Haiyan, 2017) portent sur une méthode de conception et d'expérimentation.

### 3.2.2 Analyse et condensé de la revue d'articles

En guise de résumé des résultats obtenus de l'article (Zhiguo et Haiyan, 2017), nous pouvons le bâtir sur deux axes.

Le premier axe est l'architecture du système à déployer.

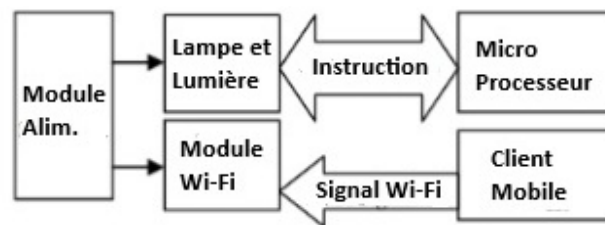


FIGURE 3.1 Architecture fonctionnelle de gestion d'éclairage via Wi-Fi

Dans la figure 3.1, le module d'alimentation permet de fournir l'énergie nécessaire au récepteur, qui est la lampe, au module WiFi et au microprocesseur. Les instructions de contrôle de la lampe sont gérées et pilotées par le microprocesseur, dont l'une des fonctions principales est de produire un signal modulé en largeur d'impulsion, abrégé MLI (PWM, Pulse Width Modulation), vers le récepteur afin de varier l'intensité de l'éclairage en fonction des besoins de l'utilisateur. À chaque variation du signal PWM, le microprocesseur reçoit l'état de l'éclairage via une communication bidirectionnelle compatible avec le récepteur. Le client mobile, quant à lui, est l'interface utilisateur. Il peut s'agir d'une tablette ou d'un téléphone portable, avec lequel l'utilisateur interagit avec le système afin de passer des commandes d'allumage, d'extinction et de variation du flux lumineux.

Le deuxième axe est le logiciel d'application. La plateforme mobile est l'interface entre l'utilisateur et le code fonctionnel écrit dans le MCU (en l'occurrence le kit STC15F2K60S2) (Zhiguo et Haiyan, 2017). Ce code permet l'utilisation du WiFi ainsi que sa gestion opérationnelle (vue graphique, bouton et animation) dans le client mobile. Nous avons trouvé intéressant l'apport de cet article, dont l'avantage majeur est d'utiliser un mobile client pour opérer une fonction spécifique sur l'éclairage. Ceci illustre bien un cas d'application de l'IoT. Par ailleurs, nous aurions aimé savoir comment les

chercheurs ont conçu le design graphique implémenté dans le client mobile. De ce fait, nous allons proposer une interface Web simple destinée à superviser les états critiques du module d'urgence. L'intégration de la communication Wi-Fi dans le système proposé peut être réalisée selon deux architectures principales : une architecture en mode infrastructure, nécessitant un routeur Wi-Fi, et une architecture en mode point d'accès, dans laquelle le module embarqué génère lui-même son propre réseau local sans fil. Le choix de l'une ou l'autre de ces architectures dépend des exigences de déploiement, de mobilité et d'intégration du système.

### 3.3 Gestion d'appareillage communicant par le Bluetooth

Dans cette section, l'acquisition des données au moyen du protocole de communication sans fil Bluetooth (IEEE 802.15.1) sera analysée dans le cadre de la gestion de l'appareil d'éclairage de sécurité, relevant de l'article (Hongjun *et al.*, 2009). Le kit embarqué est issu de la plateforme ARM utilisée pour faciliter la communication Bluetooth avec un équipement.

L'article (Hongjun *et al.*, 2009) s'appuie exclusivement sur une communication Bluetooth transmise par un équipement tiers vers un mini-centre de données composé d'un microcontrôleur ARM et d'une puce Bluetooth. L'équipement tiers ici est un capteur. Ainsi, les données de tout type de capteur peuvent être transmises par Bluetooth, réduisant ainsi l'utilisation des fils de connexion. Pour ce faire, l'article présente l'architecture d'acquisition comme base de l'article.

La figure 3.2 représente l'architecture d'un capteur dont le signal est conditionné, échantillonné, puis mis en forme et converti de l'analogique vers le numérique. Il est ensuite transmis au processeur ARM LPC2142 pour le traitement de l'information reçue du capteur et est finalement envoyé vers un équipement Bluetooth : le Rok101008.

D'autre part, les auteurs mentionnent la connectivité entre le module Bluetooth et le kit à microprocesseur ARM, à travers la figure 3.3 :

La figure 3.3 présente la connexion entre le kit Bluetooth ROK101008 et le microprocesseur LPC2142. Le microprocesseur communique avec le kit Bluetooth via la liaison série Rx et Tx.

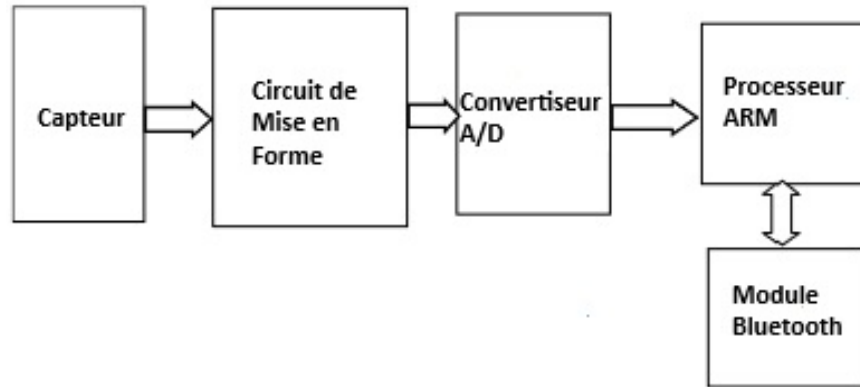


FIGURE 3.2 Architecture acquisition Bluetooth

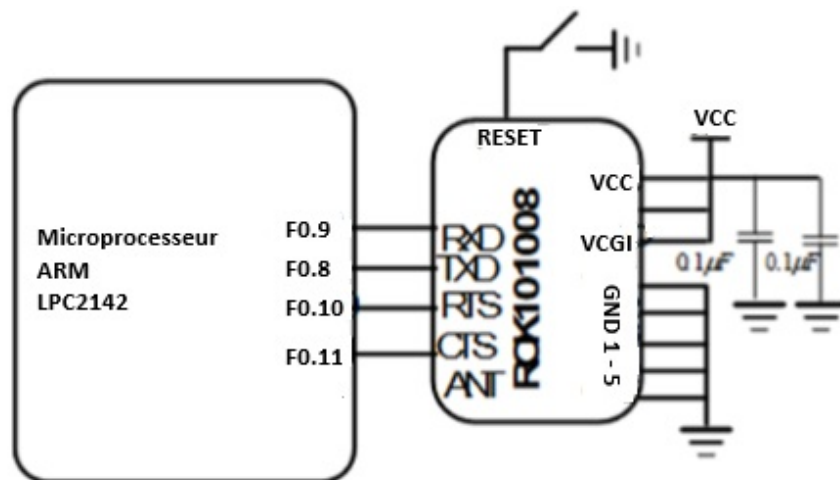


FIGURE 3.3 Connectivité module Bluetooth au Kit ARM LPC2142

Par la suite, le langage C est utilisé en raison de sa stabilité (Eder et Winter, 2024) pour l'écriture du code de connectivité chargé dans le kit ARM. L'ARM peut ainsi transmettre les données provenant de n'importe quel capteur vers un équipement communicant par Bluetooth, à l'instar d'un ordinateur. Les auteurs de l'article (Hongjun *et al.*, 2009) ont prouvé que la transmission des données par un réseau de capteurs câblés sur une courte distance peut être remplacée par une communication Bluetooth.

### 3.4 Gestion d'appareillage communicant par le ZigBee

Le défi de la transmission des données sans fil à faible coût et à faible consommation d'énergie est l'une des principales raisons de l'utilisation de ZigBee dans cette référence. (Chengyi *et al.*, 2010). Sa

contribution s'inscrit dans la domotique, le contrôle industriel et le contrôle à distance des patients hospitalisés. L'article est essentiellement basé sur le développement applicatif et l'expérimentation. Nous allons explorer les potentialités de la communication Zigbee dans le cadre de l'éclairage de sécurité.

La particularité de cet article (Chengyi *et al.*, 2010) est d'établir une communication via Internet sur une carte embarquée S3C2410 de Samsung, dotée d'un serveur Web intégré. La carte S3C2410 est à son tour connectée à un kit CC2430 ZigBee de Texas Instruments (TI) via une liaison RS232. Le coordinateur communique avec plusieurs autres équipements intégrant la communication ZigBee au moyen du kit CC2430 de TI, formant un réseau de capteurs.

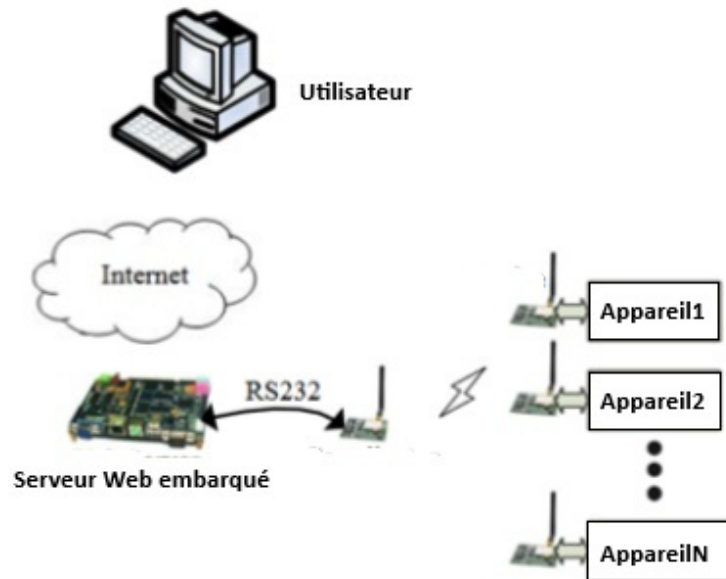
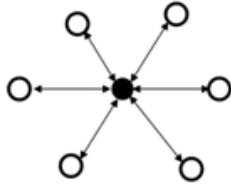


FIGURE 3.4 Architecture de communication Zigbee

Il y a trois configurations de base pour ZigBee. La topologie en étoile, la topologie maillée et la topologie réseau (arbre de cluster). Les auteurs ont utilisé la topologie en étoile en raison des contraintes d'intégration qu'elle allège.

Le logiciel applicatif utilisé pour la communication ZigBee est le Z-Stack de TI. Il permet de configurer le coordinateur et les équipements terminaux (end devices). Le travail a la particularité d'accéder



*En rond noir : Coordonateur*

*En rond blanc : End device (équipement terminal)*

FIGURE 3.5 Topologie en étoile, ZigBee

à un réseau d'équipements ZigBee au moyen de l'internet. Il offre un éventail de cas applicables à la maison connectée, au contrôle industriel à distance et à la télémédecine. D'autre part, le ZigBee a la particularité de consommer moins d'énergie lors des échanges.

### 3.5 Bilan comparatif des protocoles de communication

Dans le domaine courant des transmissions sans fil, il est souvent difficile de délimiter la frontière applicative entre le protocole ZigBee et le protocole Bluetooth. En effet, cette section met en lumière le protocole de communication sans fil qui, parmi le WiFi, le Bluetooth et le ZigBee, est le mieux adapté à la gestion ponctuelle des appareils d'éclairage de sécurité sur différents sites, y compris industriels.

Le tableau 3.1 représente un comparatif des communications; voir le titre de la section 3.5. Le tableau comparatif 3.1 a été tiré de l'article (Tjensvold, 2007).

Comparatif IoT <sup>a</sup>				
Standard	Fréquence	Débit <sup>b</sup>	Portée	Type
802.11a (Wi-Fi base)	5 GHz	54 Mbps	120m	WLAN/LAN
802.11b (Wi-Fi 1)	2.4 GHz	11 Mbps	140m	WLAN/LAN
802.11g (Wi-Fi 3)	2.4 GHz	54 Mbps	140m	WLAN/LAN
802.11n (Wi-Fi 4)	2.4/5 GHz	248 Mbps <sup>c</sup>	250m	WLAN/LAN
802.11ac (Wi-Fi 5)	2.4/5 GHz	6.9Gb/s	100m	WLAN/LAN
802.11ax (Wi-Fi 6)	2.4/5 GHz	9.6Gb/s	100m	WLAN/LAN
802.15.1	2.4 GHz	3 Mbps <sup>d</sup>	140m <sup>e</sup>	WPAN/PAN
802.15.4 <sup>f</sup>	868/915 MHz - 2.4GHz	40 Kbps - 250Kbps	75m	WPAN/PAN
802.15.6 <sup>g</sup>	1THz	> 1Gbps	10m	WPAN/PAN

TABLEAU 3.1 : Tableau comparatif des réseaux WiFi-Bluetooth-Zigbee.

*a.* Les valeurs de portée et de débit indiquées sont des valeurs théoriques ou typiques issues des spécifications générales des technologies et peuvent varier selon l'environnement, la puissance d'émission, les obstacles physiques, les interférences et les équipements utilisés.

*b.* Spécifie le débit pour les environnements extérieurs

*c.* Module WiFi ayant deux flux (4 antennes)

*d.* Débit ZigBee

*e.* Bluetooth class 1

*f.* Zigbee/base radio IoT

*g.* Mis pour le Body Area Network

Le tableau 3.1 précise le type de réseau, la portée et le débit des communications Wi-Fi (802.11), Bluetooth (802.15.1) et Zigbee (802.15.4).

### 3.5.1 Particularité du protocole ZigBee

Bien compartimenté dans ses échanges afin d'éviter les problèmes d'interopérabilité, le protocole ZigBee consomme moins d'énergie, est facile à installer et sa mise en réseau et son routage sont utilisés pour améliorer les performances de l'application. La vitesse de transmission est de 250 Kbps pour une portée comprise entre 10 et 100 mètres sur 868 MHz, 915 MHz et 2,4 GHz. De par son

algorithme, le protocole ZigBee peut construire automatiquement un réseau Ad hoc à faible vitesse (Tjensvold, 2007) et (Kumar *et al.*, 2017).

Les principales caractéristiques du ZigBee sont les suivantes :

- Faible consommation énergétique, faible débit, facile d'installation, flexible et sécuritaire ;
- Vitesse de transmission 250 Kbps pour une distance de transmission allant de 10 à 70 mètres ;
- Réseau ad-hoc à faible débit et intègre l'algorithme CSMA/CA ;
- Adapté pour le réseau de capteur ;
- Les équipements embarqués ZigBee intègrent : ZigBee Coordinator (ZC) (C'est la racine du réseau et coordonne jusqu'à 8 points de connexions) ; ZigBee Router (ZR)(point consécutif permettant le passage d'un nœud vers un autre. Utilise le principe Mesh et Tree) ; ZigBee End Device (ZED) (C'est le dernier équipement de la chaîne dont la fonction principale est de parler au nœud parent)
- Fréquence variable d'un pays à un autre (US/UK-915 Mhz et 868 Mhz ; Chine 784 Mhz) ;
- ZigBee peut connecter jusqu'à 65 000 nœuds ;
- Portée du réseau ZigBee de 10 à 75 mètres ;

### 3.5.2 Particularité du protocole Bluetooth

Utilisé pour des réseaux personnels pour la transmission point à point des données entre 1 et 80 mètres, pour un débit de 1 Mbps sur 2,4 Ghz, et dont la technologie de transfert est maintenue sur une puce radio (Tjensvold, 2007) et (Kumar *et al.*, 2017).

- Le Bluetooth fournit le service d'authentification :

Les principales caractéristiques du Bluetooth sont décrites comme suit :

- Il sert à la transmission de données d'un équipement à un autre et est classé comme un réseau de communication personnel (PAN, Personal Area Network) ;
- Sa partie matérielle repose sur les techniques de transmission radio, tandis que le contrôle principal et les protocoles de sécurité sont implémentés dans le logiciel : Authentification(identification de la communication basée sur l'adresse) ; Confidentialité(seul l'équipement apparié communique) ; Autorisation(les équipements autorisés transmettent les données)
- Sa transmission haut débit pour la vidéo et l'audio ;

- Bluetooth peut connecter jusqu'à 8 nœuds ;
- Sa portée est de 1 à 80 mètres, dépendant de la classe de la radio ;

### 3.5.3 Particularité du protocole WiFi

Le LAN sans fil (WiFi) représente un protocole de communication utilisé pour les transmissions terrestres de bas niveau, opérant sur des bandes de fréquences industrielles, scientifiques et médicales (ISM) de 2,4 GHz et 5 GHz, pour des portées allant jusqu'à 250 mètres (Tjensvold, 2007). On note l'apport du WiFi sur des distances moyennes ; le Bluetooth et le ZigBee fonctionnent sur des distances inférieures à celles du WiFi. Le ZigBee a l'avantage de consommer moins d'énergie pour des débits faibles. Le Bluetooth est utile pour de grands débits (Tjensvold, 2007).

Le Wi-Fi a les avantages ci-dessous :

- Transmission haut débit pour vidéo et audio sur une moyenne portée ;
- La trame WiFi est identique à la trame Ethernet. Le Wi-Fi est la version sans fil d'une transmission Ethernet ;
- Large gamme de possibilités de commande à distance de n'importe où dans le globe ;
- Compatible avec la plupart des routeurs sur le marché ;

## 3.6 Cas applicatifs des communications IoT

Au regard des sections 3.5.1, 3.5.2 et 3.5.3, nous disposons de suffisamment d'éléments pour choisir le WiFi comme solution suffisante pour piloter un système d'éclairage. Par ailleurs, il y a plusieurs travaux qui ont été réalisés sur l'intégration de la communication WiFi pour la gestion de l'éclairage et la supervision à distance. Notre travail, n'étant pas isolé, s'appuie sur des travaux antérieurs concernant la communication WiFi, dans le cadre de la gestion des systèmes d'éclairage pour les maisons connectées.

Nous allons présenter quelques cas applicables d'articles traitant de la communication WiFi au sein des kits embarqués.

### 3.6.1 Collecte des données dans une maison intelligente via l’IoT

Les auteurs de l’article (Jabbar *et al.*, 2019) collectent des données issues de divers équipements d’une maison connectée via l’Internet des Objets. Dans des espaces libres de tout encombrement au sein des maisons, la collecte d’informations en provenance de diverses unités motorisées (fenêtres, portes, verrous), de supervision (énergie, niveau, éclairage) ou de prédiction (capteurs de température, gaz, pression) entraîne des coûts financiers pour la transmission filaire. L’utilisation d’un microcontrôleur (NodeMCU), intégrant la communication sans fil WiFi et stockant ces données dans un serveur, permet, au moyen d’une application Android de supervision, de faciliter l’échange des informations de différents équipements installés dans la maison. Les métriques de mesure sont effectuées sur la température en degrés Celsius, le niveau en centimètres, l’humidité en pourcentage et le gaz en ppm (Parts Per Million).

### 3.6.2 Déploiement d’une architecture pilotant des lumières d’urgences pour maison connecté.

Les auteurs de l’article (Xu *et al.*, 2019) mettent en relief une architecture de communication réseau sans fil combinant la technologie LORAWAN et le Wifi pour la gestion des lumières d’urgence (considérées comme « end device »). Les modules de communication sans fil sont intégrés et câblés directement sur les unités de lumière d’urgence existantes, et les passerelles (gateways) assurent le transit de l’information vers le serveur distant qui assure la collecte des données de toutes les passerelles. Cependant, nous notons deux problèmes majeurs, à savoir le phénomène de collisions et d’évanouissement susceptibles d’être perceptibles dans l’article (Xu *et al.*, 2019). Le problème d’évanouissement du signal est traité dans l’article en utilisant le protocole de routage IPv6. Cependant, les essais et tests d’évanouissement n’ont pas été réalisés dans un environnement industriel. En effet, dans des structures en béton et des murs blindés avec des barres métalliques de coulage rencontrés dans l’industrie, le phénomène d’évanouissement du signal est un phénomène présent. L’article (Xu *et al.*, 2019) en fait mention.

Nous proposons, dans le cadre de la gestion des appareils d’éclairage de sécurité, une solution pouvant s’adapter à la fois au secteur industriel et au secteur tertiaire. De ce fait, nous partons du principe que nous pouvons desservir des zones de haute obstruction en implémentant une liaison filaire au moyen du protocole de communication Modbus, d’une part, et, pour des

raisons de maintenance et de contrôle à distance (pour chaque appareil d'éclairage), nous implémenterons la communication WiFi afin d'interagir avec chacune des unités d'éclairage de sécurité, munies d'une interface Web embarquée.

### 3.7 Conclusion partielle sur la communication sans fil (Wi-Fi, ZigBee et BlueTooth)

Nous avons relevé certains aspects fondamentaux de la communication ZigBee, Bluetooth et WiFi, notamment la bonne connaissance des applications, ainsi que les aspects de plage de fréquence, de débit et de distance de communication, qui sont autant de paramètres à prendre en compte. Nous avons noté, dans le cadre de l'implémentation sur carte électronique, la présence d'interférences lors de l'association du WiFi et du Bluetooth (Biran, 2011). Dans le même ordre d'idées, pour des connexions multiples dans un environnement extérieur mettant en jeu le WiFi, ZigBee et Bluetooth, il y a présence de congestion (Burciu *et al.*, 2022).

Dans ce travail, la carte Arduino Uno WiFi Rev2 a été retenue comme plateforme de développement embarqué, notamment en raison de sa simplicité d'intégration, de sa disponibilité, de sa compatibilité avec les environnements de prototypage électronique et de sa connectivité sans fil native. Cette carte intègre le module u-blox NINA-W102, utilisé pour assurer la communication sans fil du système. Le module NINA-W102 prend en charge les communications Wi-Fi conformes aux standards IEEE 802.11 b/g/n, principalement dans la bande de fréquence 2,4 GHz. Cette compatibilité permet d'établir une liaison sans fil entre le système embarqué et un appareil mobile, tel qu'un téléphone Android ou une tablette, dans le but de réaliser des opérations de supervision, de diagnostic et de commande locale des unités d'éclairage de sécurité.

L'utilisation de cette plateforme présente plusieurs avantages dans le cadre du présent travail. D'une part, elle facilite l'intégration des fonctions de communication dans une architecture embarquée de prototypage. D'autre part, elle permet une mise en œuvre relativement simple d'un environnement de communication Wi-Fi compatible avec les équipements mobiles couramment utilisés sur le terrain. Cette caractéristique est particulièrement pertinente dans un contexte de maintenance, où le technicien doit pouvoir interagir rapidement avec les modules d'éclairage de sécurité sans recourir à une infrastructure de communication complexe.

Dans le cadre du présent travail, la communication Wi-Fi a été mise en œuvre selon une architecture en mode point d'accès (Access Point). Dans cette configuration, le module embarqué génère son propre réseau Wi-Fi local, auquel un appareil mobile, tel qu'un téléphone Android ou une tablette, peut se connecter directement. Cette approche présente l'avantage de ne nécessiter aucun routeur ni infrastructure réseau externe, ce qui simplifie considérablement le déploiement du système sur site. Elle permet au technicien de maintenance d'accéder directement au système pour consulter les états de fonctionnement des modules d'éclairage de sécurité, relever les informations utiles et envoyer des commandes de contrôle. Le choix de cette architecture se justifie par sa simplicité de mise en œuvre, son autonomie et sa pertinence dans un contexte de maintenance locale. Il permet d'assurer une communication directe entre le système embarqué.

Le tableau 3.2 montre une synthèse des réseaux sans fils Wi-Fi, Bluetooth et Zigbee.

Le tableau comparatif met en évidence les différences majeures entre les principales technologies de communication sans fil susceptibles d'être utilisées dans un système embarqué de supervision. Les standards de la famille IEEE 802.11 (Wi-Fi) se distinguent par leurs débits élevés et leur compatibilité native avec les équipements mobiles et les réseaux IP, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications nécessitant une supervision locale, un échange de données en temps réel et une interaction directe avec des terminaux de maintenance. À l'inverse, les technologies IEEE 802.15.1 (Bluetooth) et IEEE 802.15.4 (base de Zigbee) appartiennent davantage à la catégorie des réseaux personnels sans fil (WPAN). Elles présentent généralement une consommation énergétique plus faible, mais offrent des débits plus réduits et, selon les cas, nécessitent des architectures ou passerelles supplémentaires pour leur intégration dans des environnements de supervision mobile ou industrielle.

Cependant, nous savons que le protocole de communication Zigbee, par rapport au protocole de communication Bluetooth, présente un avantage pour les applications à faible débit, avec une large bande de transmission pouvant être utilisée pour plusieurs capteurs. À l'inverse, le Bluetooth domine le Zigbee pour les applications à débit élevé (vidéo et audio) à des distances de transmission courtes par appareil (Kumar *et al.*, 2017).

Nous pouvons écarter le protocole de communication Bluetooth comme moyen de commu-

Comparatif IoT <sup>a</sup>				
Standard	Fréquence	Débit <sup>b</sup>	Portée	Type
802.11 b/g/n <sup>c</sup>	2.4/5 GHz	248 Mbps <sup>d</sup>	35m(int.)-140-250m(ext.)	WLAN/LAN
802.15.1 <sup>e</sup>	2.4 GHz	3 Mbps <sup>f</sup>	10-100m	WPAN/PAN
802.15.4 <sup>g</sup>	868/915 MHz - 2.4GHz	40 Kbps - 250Kbps <sup>h</sup>	10-100m	WPAN/PAN

TABLEAU 3.2 : Tableau synthèse des réseaux WiFi-Bluetooth-Zigbee.

*a.* Les valeurs de portée et de débit indiquées sont des valeurs théoriques ou typiques issues des spécifications générales des technologies et peuvent varier selon l'environnement, la puissance d'émission, les obstacles physiques, les interférences et les équipements utilisés.

*b.* Spécifie le débit pour les environnements extérieurs

*c.* Version du Wi-Fi utilisée dans notre travail

*d.* Module WiFi ayant deux flux (4 antennes)

*e.* Bluetooth classique

*f.* Débit Bluetooth

*g.* Zigbee/radio IoT. IEEE 802.15.4 définit principalement les couches physique et liaison de données, et sert de base à des protocoles comme Zigbee. La carte Arduino Uno WiFi rev2 embarque le Bluetooth Nina W102 uBlox module (voir tableau 4.2), qui supporte : Bluetooth 4.2 en double mode (Bluetooth Classic (BR/EDR) et Bluetooth Low Energy (BLE)). BR = Basic Rate et EDR = Enhanced Data Rate

*h.* Débit ZigBee

nication sans fil dans le cadre applicatif des lumières de sécurité. Par ailleurs, la portée du protocole WiFi étant supérieure à celle du protocole Zigbee (Tjensvold, 2007), nous pouvons également ne pas considérer le protocole de communication Zigbee comme un moyen de communication sans fil pour le contrôle des appareils d'éclairage d'urgence. Pour des raisons applicatives de notre étude, nous avons opté pour une communication WiFi à cause de sa grande portée par rapport au Bluetooth et au Zigbee. De plus, le WiFi permettant de supporter le réseau TCP est compatible avec une communication Modbus TCP. Le tableau 3.2 précise en effet l'avantage du Wi-Fi sur le Bluetooth et le Zigbee en termes de débit, de distance et de portée.

Dans le cadre de ce travail, l'architecture de communication retenue ne repose pas sur une

seule technologie, mais sur une approche hybride combinant à la fois une communication sans fil Wi-Fi et une communication filaire Modbus TCP. Ce choix vise à répondre simultanément aux besoins de maintenance locale, de supervision mobile et d'intégration industrielle des modules autonomes d'éclairage de sécurité.

La communication Wi-Fi a été intégrée afin de permettre une interaction directe entre le système embarqué et un appareil mobile, tel qu'un téléphone Android ou une tablette. Cette liaison sans fil facilite les opérations de diagnostic, de contrôle, d'inspection et de maintenance sur site, sans nécessiter une infrastructure filaire supplémentaire. Elle s'inscrit dans une logique de connectivité locale et d'Internet des objets (IoT), où l'opérateur peut accéder rapidement aux données des modules d'éclairage de sécurité.

En parallèle, la communication Modbus TCP a été intégrée afin de permettre la connexion du système à un poste local de supervision ou à un environnement industriel de contrôle-commande. Contrairement au Wi-Fi, principalement utilisé ici dans une logique de maintenance mobile et de communication locale, le protocole Modbus TCP permet une intégration structurée et standardisée dans des architectures industrielles existantes, notamment celles faisant appel à des automates programmables, des interfaces homme-machine (IHM) ou des systèmes de supervision. Cette double approche de communication permet ainsi de répondre à deux niveaux fonctionnels complémentaires :

- un niveau local mobile, assuré par le Wi-Fi ;
- un niveau industriel de supervision et d'intégration, assuré par Modbus TCP.

L'intégration simultanée de ces deux technologies constitue un élément central de l'originalité du système proposé. Elle permet de dépasser les limites des approches conventionnelles en offrant à la fois une souplesse d'accès local et une compatibilité avec les infrastructures techniques modernes. Cette architecture hybride renforce ainsi la pertinence du système dans des contextes réels d'exploitation, de maintenance et de gestion technique des équipements d'éclairage de sécurité.

Par ailleurs, une communication Modbus sans une communication Wi-Fi ne permettra pas une connexion locale directe au pied d'un module par le technicien. Également, une communication Wi-Fi sans une communication Modbus ne permettra pas l'intégration des modules dans les architectures de contrôle du secteur tertiaire et industriel. De plus, la capacité de transmission du Wi-Fi est faible lorsque des poutres, des élévations métalliques et des murs

en béton armé obstruent le signal d'un module. Il est important de préciser que bien que la solution proposée soit hybride (Modbus et Wi-Fi), l'une ou l'autre technologie peut fonctionner seule. Notre système peut fonctionner avec du Wi-Fi ou du Modbus indépendamment. Cependant, des contraintes de terrain seront à prendre en compte. Ces contraintes sont les limites éventuelles de chacun des protocoles de communications Wi-Fi et Modbus évoquées aux chapitres 3 et 2.

En définitive pour ce chapitre 3, nous pouvons énoncer ce qui suit : Dans les environnements industriels et tertiaires contraints, tels que les supermarchés et les usines, la coexistence de structures en béton armé, d'équipements métalliques et de sources d'interférences électromagnétiques entraîne une dégradation notable des communications sans fil, en particulier pour les technologies opérant dans les bandes de fréquence encombrées comme le Wi-Fi (2,4 GHz et 5 GHz).

Dans ce contexte, une approche hybride combinant une communication filaire robuste et une communication sans fil flexible apparaît particulièrement pertinente. En effet, l'association du protocole Modbus TCP, utilisé sur une infrastructure Ethernet filaire, avec une communication Wi-Fi permet de tirer profit des avantages complémentaires de ces deux technologies.

D'une part, la liaison filaire Modbus TCP assure une communication stable, fiable et peu sensible aux interférences électromagnétiques. Elle constitue ainsi un support privilégié pour les échanges critiques entre les équipements industriels (automates, modules d'acquisition, systèmes de supervision), notamment dans des zones fortement perturbées ou cloisonnées par des structures en béton armé.

D'autre part, la communication Wi-Fi offre une grande flexibilité d'accès, en particulier dans les zones ouvertes ou difficilement câblables. Elle permet aux opérateurs de se connecter directement aux équipements via des terminaux mobiles (téléphones intelligents, tablettes), facilitant ainsi les opérations de maintenance, de diagnostic et de supervision locale.

Ainsi, l'utilisation combinée de Modbus TCP et du Wi-Fi permet de segmenter les fonctions de communication :

— le Modbus TCP assure la transmission des données critiques au sein de l'infrastructure

- industrielle, avec un haut niveau de fiabilité ;
- le Wi-Fi est utilisé comme interface d'accès local, permettant une interaction directe et flexible avec les équipements.

Cette architecture hybride permet non seulement de réduire l'impact des interférences sur les communications critiques, mais également d'améliorer l'accessibilité aux systèmes dans des environnements étendus ou complexes. Elle constitue ainsi une solution adaptée pour les applications de supervision des modules d'éclairage de sécurité, où la fiabilité des données et la facilité d'intervention sont des exigences majeures.

## CHAPITRE 4

### CONCEPTION DU SYSTÈME

Ce chapitre apporte des détails sur les modules fonctionnels du système électronique de gestion de l'éclairage de sécurité, en vue de la conception d'un système électronique hybride<sup>1</sup> de l'éclairage de sécurité à DEL, communiquant par Modbus et Wi-Fi. On mettra en lumière la conception du prototype du système électronique de gestion de l'éclairage de sécurité à DEL (diode électroluminescente), communiquant par Modbus, et les fonctions de communication sans fil accessibles via un téléphone Android. Cette partie présentera également le schéma fonctionnel du système électronique d'acquisition des états logiques et des commandes d'unités d'urgence tel qu'il a été conçu.

#### 4.1 Typologie de l'architecture

L'utilisation d'une architecture IoT de type maillé (mesh), dans laquelle plusieurs nœuds communiquent entre eux avant de converger vers une unique passerelle Modbus TCP centrale, présente certains inconvénients dans un environnement industriel.

Tout d'abord, cette architecture introduit un *point unique de défaillance*. En effet, la passerelle centrale constitue un élément critique du système. En cas de panne ou de dysfonctionnement de cette passerelle, l'ensemble des communications entre le réseau IoT et le système de supervision (SNCC ou SCADA) est interrompu, compromettant ainsi la continuité de service.

Ensuite, les réseaux mesh reposent sur des mécanismes de routage dynamique entre les nœuds. Cette caractéristique, bien que flexible, peut engendrer une *augmentation de la latence* et une *variabilité des temps de transmission*, notamment lorsque les données transitent par plusieurs sauts (multi-hop). Dans des applications industrielles nécessitant des échanges déterministes, cette non-prédictibilité constitue une limitation majeure.

---

1. Tout au long de notre travail, nous utiliserons le mot 'hybride' pour désigner l'utilisation du protocole de communication filaire Modbus et du protocole Wi-Fi au sein du même kit embarqué. D'autres contextes d'utilisation du mot 'hybride' seront précisés.

Par ailleurs, la fiabilité des communications dépend fortement de la densité et de la disponibilité des nœuds intermédiaires. Dans un environnement contraint (présence de béton armé, structures métalliques), la perte ou l'indisponibilité de certains nœuds peut entraîner une *dégradation de la qualité du réseau*, voire une rupture de communication pour certaines zones.

De plus, la gestion et la maintenance d'un réseau mesh peuvent s'avérer complexes. Les mécanismes d'auto-organisation, de routage et de gestion de l'énergie nécessitent des algorithmes avancés, rendant le système plus difficile à diagnostiquer et à maintenir par rapport à une architecture filaire classique basée sur Modbus TCP.

Enfin, l'intégration d'un réseau IoT mesh avec une architecture industrielle existante peut poser des défis d'interopérabilité. Les systèmes industriels reposent généralement sur des protocoles standardisés et déterministes, tels que Modbus TCP, tandis que les réseaux mesh utilisent des protocoles spécifiques, nécessitant des couches d'adaptation supplémentaires au niveau de la passerelle.

Ainsi, bien que les architectures mesh offrent une flexibilité et une couverture étendue, leur utilisation avec une passerelle centrale unique peut limiter la robustesse globale du système. Dans ce contexte, une architecture hybride combinant une communication filaire fiable (Modbus TCP) et une communication sans fil ciblée (Wi-Fi) apparaît comme une alternative plus adaptée aux exigences industrielles.

## 4.2 Modules fonctionnels

Fort de l'analyse des articles sur le protocole de communication Modbus du chapitre 2, puis de la communication IoT au chapitre 3, nous avons décomposé la solution de conception du système électronique de gestion d'éclairage de sécurité à LED, en sous-systèmes (la carte électronique d'interface de contrôle, le kit embarqué, la batterie et les lampes) clairement identifiables à travers l'architecture proposée.

#### 4.2.1 Architecture du système

L'architecture du système de gestion proposée est présentée par la figure 4.1.

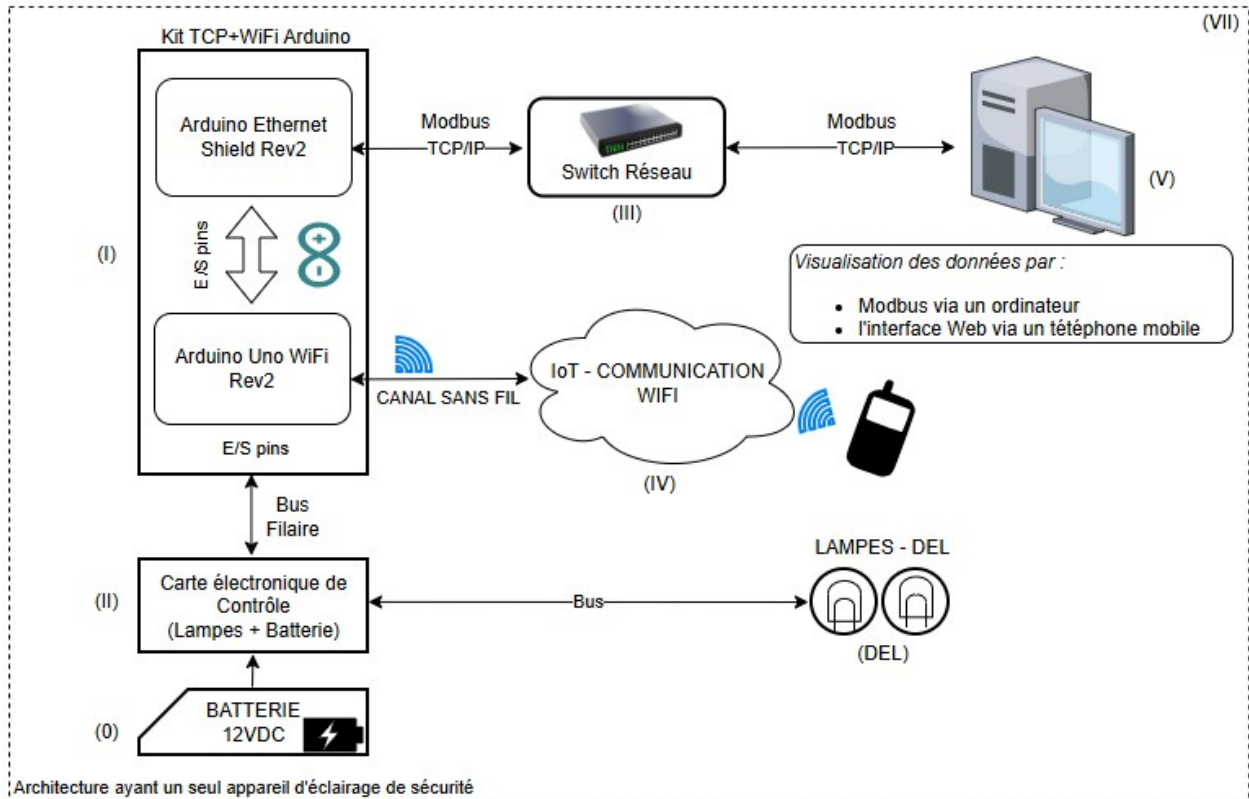


FIGURE 4.1 Architecture du nouveau système de gestion d'éclairage de sécurité

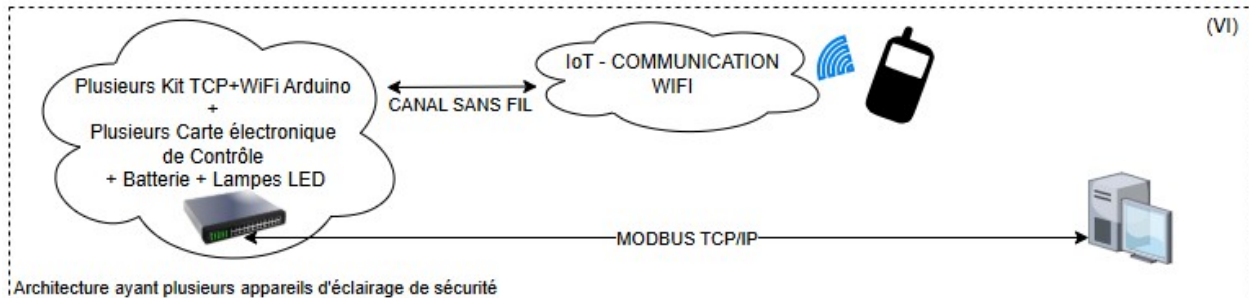


FIGURE 4.2 Architecture ayant plusieurs appareils d'éclairage de sécurité

Il est important de préciser que l'architecture proposée utilise les kits embarqués Arduino. Cependant, tout autre système embarqué possédant une carte TCP et une carte de traitement à microcontrôleur peut être utilisé. Ainsi, le terme "Kit Arduino TCP + Wi-Fi" sera remplacé par "kit embarqué".

Par ailleurs, il est nécessaire de préciser que d'après le Code National du Bâtiment (CNB)

article 3.2.7.4, les systèmes d'éclairage d'urgence doivent, en plus d'intégrer une batterie d'alimentation autonome, être alimentés non seulement par une source normale du réseau d'électricité mais aussi par une source d'alimentation de secours issue des groupes électrogènes ou d'un système onduleur. Dans notre travail, nous ne nous sommes pas attardé sur le circuit d'alimentation normale 120V ac de l'appareil d'éclairage d'urgence car cette portion est résolue par le CNB, qui prévoit trois sources d'énergie pour un appareil d'éclairage d'urgence : La batterie, qui assure l'alimentation autonome. Le réseau normal, qui permet d'alimenter en 120 ac l'appareil. La source de secours, provenant d'une génératrice (groupe électrogène) ou onduleur de système d'urgence. Bien que l'optimisation énergétique est une composante essentielle dans les systèmes embarqués, elle n'est cependant pas une contrainte majeure dans le cadre de notre travail.

Le système proposé se compose des composants fonctionnels suivants :

#### 4.2.1.1 Kit embarqué

Le Kit embarqué (voir (I) de la figure 4.1) combine une carte Arduino Uno WiFi Rev2 et une carte Ethernet Shield, dont les caractéristiques sont présentées au tableau 4.1. Cette carte permet d'établir le transfert du programme d'application depuis un ordinateur. De plus, elle permet d'établir la connexion WiFi avec un téléphone Android, qui sera un client Web, tandis que le serveur Web sera le module Wi-Fi.

La carte Arduino Ethernet Shield Rev2 facilite la communication Modbus à travers le port TCP embarqué. Elle assure la communication Modbus vers le poste de contrôle. Ce dernier peut être situé dans un site industriel afin d'assurer la supervision de toutes les unités d'éclairage de sécurité. Par ailleurs, le kit embarqué peut s'intégrer aisément dans un réseau d'automates et communiquer avec un SCADA Schneider, Siemens ou autre, grâce au protocole de communication Modbus TCP.

Le système d'éclairage d'urgence proposé pour une unité fonctionnelle est constitué d'un kit TCP+Wi-Fi Arduino (I), d'une carte électronique de contrôle (II), d'une batterie (0) et de deux lampes DEL. Cette architecture offre à la fois pour un module d'éclairage d'urgence, la possibilité de la communication Wi-Fi et de la communication Modbus.

#### 4.2.1.2 Le prototype de la carte électronique principale

Le prototype de la carte électronique principale de contrôle (voir (II) de la figure 4.1) a été conçu afin de collecter les données de tension de la batterie, l'état des lampes et d'assurer la commande de ces lampes. Il communique à travers une liaison câblée avec les broches d'entrée-sortie de la carte Arduino Uno WiFi Rev2. Cette carte électronique de contrôle permet de :

- Contrôler le niveau de tension des batteries de 12 Vdc. La batterie sert à alimenter à la fois le système embarqué (kit embarqué et lampes) et à assurer l'allumage des LED. Le contrôle de la tension de la batterie se fera via le module principal, par l'utilisation de comparateurs à seuil afin de suivre la tension de la batterie. Nous utiliserons les broches d'entrée analogiques du kit Arduino WiFi pour analyser la tension de la batterie. La valeur de la tension sera, à la fois, à l'ordinateur du poste de contrôle via la liaison Modbus et affichée aussi sur un téléphone Android à travers la connexion sans fil.
- La carte électronique assure aussi la commande des lampes LED, permet de valider l'effectivité de l'allumage des lampes, et de rapporter les informations sur le bon état des lampes (lampe allumée/éteinte, lampe en circuit ouvert et lampe en circuit fermé). Nous utiliserons pour ce faire les broches d'entrée logiques de la carte Arduino Uno WiFi.

#### 4.2.1.3 Le commutateur réseau

Le commutateur réseau (voir (III) de la figure 4.1) permet de connecter le kit embarqué situé sur le site. Il permet aussi de connecter un réseau de kits embarqués Arduino, dans le cas où plusieurs appareils d'éclairage de sécurité existent sur le site. Ceci représente un avantage majeur en raison de la possibilité d'un branchement direct de plusieurs appareils d'éclairage de sécurité sur le même commutateur.

La figure 4.1 ne comporte pas de routeur Wi-Fi. Car nous avons adopté une architecture en mode point d'accès (Access Point). Dans cette configuration, le système embarqué génère son propre réseau Wi-Fi local, auquel un appareil mobile, tel qu'un téléphone Android ou une tablette, peut se connecter directement.

#### 4.2.1.4 Le réseau de communication Wi-Fi

Le réseau de communication WiFi (voir (IV) de la figure 4.1), intégré de base dans la carte Arduino Uno (tout autre module Wi-Fi peut-être utilisé), permet, grâce à un téléphone (Android ou tablette), de dialoguer avec le kit embarqué afin d'obtenir le niveau de tension de la batterie, l'état des lampes (allumées, éteintes, en circuit ouvert ou en court circuit) et d'assurer les commandes des lampes (allumer/éteindre).

#### 4.2.1.5 Le poste de contrôle

Le poste de contrôle (voir (V) de la figure 4.1) permettra de superviser les appareils d'éclairage de sécurité du site, d'afficher l'interface Modbus, qui renseignera sur l'état des lampes (allumées ou éteintes, en court circuit ou en circuit ouvert), la commande des lampes et la tension de la batterie.

#### 4.2.1.6 Le réseau d'appareils d'éclairage de sécurité

Plusieurs Kits embarqués (voir (VI) de la figure 4.2) illustrent un nuage de réseau d'appareils d'éclairage de sécurité connectés à un commutateur réseau TCP, incluant un réseau (nuage) de cartes d'acquisition et un réseau (nuage) de communication sans fil. La figure 4.2 (voir VI) indique tout simplement qu'il est possible de combiner dans un site plusieurs kits embarqués combinant la communication Modbus et Wi-Fi. Cependant, une seule station distante est requise.

#### 4.2.1.7 Architecture de communication

La figure 4.1, voir (VII), illustre l'architecture d'un système communication Modbus et Wi-Fi, de gestion et de maintenance à distance de l'éclairage de sécurité à DEL, basé sur la communication Modbus et Wi-Fi.

#### 4.2.1.8 Bilan de puissance moyen

Le bilan de puissance ci-dessous est limité à la batterie et aux cartes électroniques qu'elle alimente, à savoir : la carte Arduino Uno Wi-Fi Rev2, la carte Ethernet, la carte d'interface et

les lampes. Nous avons exclu la tension d'alimentation normale et la tension d'alimentation de secours. Les caractéristiques ci-dessous ont été prises dans la fiche technique du fournisseur Arduino.

- Batterie : 12 V 7 Ah / 20 h - 12 W / 7 Ah
- Carte Arduino Uno Wi-Fi : 12V/30mA - 0.36 W / 300 mAh
- Broches d'entrées-sorties : 5V/10mA (14 + 25)pins - 1.95 W / 390 mAh
- Carte Arduino TCP : 5V/10mA - 0.05 W / 10 mAh
- Carte interface : 12V 0.7 A - 8.4 W / 0.7 Ah
- Dissipation de puissance des résistances : 5v/10mA (14+2)pins - 0.8 W / 160 mAh
- Dissipation de puissance des lampes : 6V/0.4A - 4.8 W / 0.8 Ah
- Total des charges en Ah hors batterie : 2.36 Ah

Il va rester (7 Ah - 2.36 Ah), soit 4.64 Ah. Soit environ 4 h d'autonomie en pleine consommation. Cette durée est largement au-dessus de la recommandation du CNB 3.2.7.4.b), qui préconise un temps de fonctionnement des appareils d'urgence sous batterie d'environ deux heures. En effet, nous avons expérimenté le fonctionnement de la maquette pour environ 04 h 30 mn d'autonomie exclusivement sur batterie.

## 4.2.2 Système de communication

Deux types de communications sont mis en œuvre, à savoir une communication filaire basée sur le protocole industriel Modbus et une communication sans fil Wi-Fi. Dans le cadre de ce travail, l'architecture de communication retenue ne repose pas sur une seule technologie, mais sur une approche hybride combinant à la fois une communication sans fil Wi-Fi et une communication filaire Modbus TCP. Ce choix vise à répondre simultanément aux besoins de maintenance locale, de supervision mobile et d'intégration industrielle des modules autonomes d'éclairage de sécurité.

### 4.2.2.1 Filaire Modbus

La communication Modbus permet le contrôle sur de longues distances. Elle peut atteindre jusqu'à 1200 mètres pour le Modbus RTU, 100 m pour le Modbus TCP (pour une liaison

entre un nœud Arduino TCP et un commutateur) et jusqu'à 15 km si le support de communication est une fibre optique monomode, et 2 km pour une fibre optique multimode.

En parallèle à la communication Wi-Fi, la communication Modbus TCP a été intégrée afin de permettre la connexion du système à un poste local de supervision ou à un environnement industriel de contrôle-commande. Contrairement au Wi-Fi, principalement utilisé ici dans une logique de maintenance mobile et de communication locale, le protocole Modbus TCP permet une intégration structurée et standardisée dans des architectures industrielles existantes, notamment celles faisant appel à des automates programmables, des interfaces homme-machine (IHM), des systèmes de gestion technique du bâtiment ou des systèmes de supervision.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons utilisé un commutateur à 10/100 Mbit/s, muni d'un câble d'une distance maximale de 100 m (câble Cat 5/6) imposée par le protocole Ethernet. La communication Modbus est assurée par la carte Arduino Ethernet Shield Rev2, dont les caractéristiques sont présentées par le tableau 4.1 :

Nom	Arduino® Ethernet Shield Rev 2
SKU	A000024
Compatibility	UNO, MEGA
Connector	RJ45
Controller	W5500
Speed	10/100 Mbps
Communication	SPI
Internal memory	32KB
Maximum sockets	8 individual
Supported protocols	IPv4, ICMP, TCP, UDP, ARP, IGMP, PPPoE, MQTT
Storage	Micro SD card slot
Operating voltage	5V

TABLEAU 4.1 Caractéristique Arduino Ethernet Shield Rev2

#### 4.2.2.2 Réseau sans fil WiFi

Chaque Kit Arduino Uno WiFi constitue un nœud qui communique avec un routeur sans fil. Le routeur attribue une adresse IP locale au module WiFi de l'Arduino. À travers cette adresse locale, on peut se connecter afin de visualiser les données disponibles dans le kit Arduino Uno. Ainsi, il sera possible de connaître : Les différents nœuds ainsi que l'ensemble résumé des données collectées (état des lampes et tension de la batterie). La figure 4.3 montre le déploiement du réseau sans fil, la communication Wi-Fi établie entre le kit Wi-Fi et le téléphone Android facilitée par la présence d'un point d'accès Wi-Fi programmé dans le kit Arduino Uno Wi-Fi Rev2.

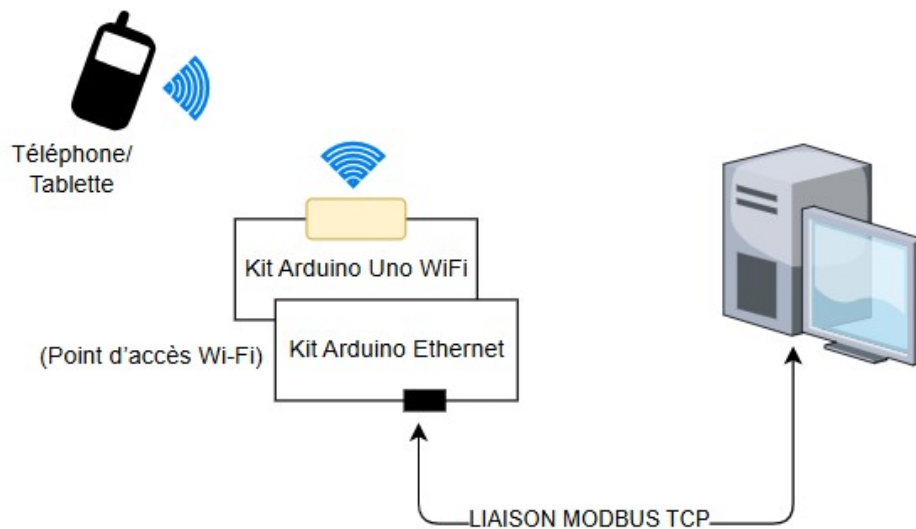


FIGURE 4.3 Réseau Sans Fil WiFi

Le module embarqué lui-même crée son propre réseau Wi-Fi local et un téléphone Android (ou tablette, PC) se connecte directement au module. Le système conçu n'a pas besoin d'un accès filaire à internet pour fonctionner. La liaison filaire de communication Modbus TCP entre le kit Arduino Ethernet et le poste de supervision permet de contrôler le système indépendamment de la liaison Wi-Fi. Cette combinaison de communication sans fil (Wi-Fi) et filaire (Modbus-TCP) garantit la robustesse et la fiabilité du système, permettant l'association des avantages du Wi-Fi et du Modbus.

Au sein du kit WiFi, nous allons écrire un programme de communication WiFi (point d'accès Wi-Fi) qui permet au kit de dialoguer avec le téléphone ou tout autre équipement équipé d'une carte Wi-Fi.

Le module de communication Wi-Fi utilisé est issu du fabricant Arduino (nous précisons que tout autre fabricant de carte Wi-Fi peut-être utilisé, comme Microchip, TI, etc), dont les caractéristiques sont fournies au tableau 4.2.

Nom	Arduino® UNO WiFi Rev 2
SKU	ABX00021
Microcontroller	ATmega4809
USB connector	USB-B
Built-in LED Pin	25
Digital I/O Pins	14
Analog input pins	6
PWM pins	5
Bluetooth®	Nina W102 uBlox module
Wi-Fi	Nina Nina W102 uBlox module
Secure element	ATECC608A
IMU	LSM6DS3TR
UART	Yes
I2C	Yes
SPI	Yes
IO voltage	5V
Input voltage	6-20V
Processor	ATmega4809 16 MHz
Memory	6KB SRAM, 48KB flash, 256 bytes EEPROM

TABLEAU 4.2 Caractéristique Arduino Uno WiFi Rev2

### 4.3 Conception de la carte électronique de contrôle

Le prototype électronique de contrôle proposé est le module clé pour la gestion de l'éclairage de sécurité que nous proposons. De ce fait, notre travail est une solution industrielle soutenue

par ce prototype du test, qui est la dite carte électronique en tant que plateforme de validation.

#### 4.3.1 Liste des entrées-sorties de la carte électronique de contrôle

Le prototype proposé est muni de deux lampes LED (lampe LED gauche et lampe LED droite) dont nous allons collecter l'état fonctionnel comme montrée sur la figure 4.2. Le module électronique proposé permet la collecte et le traitement des états des lampes de sécurité. De plus, le module assure la lecture de la tension de la batterie ainsi que la commande des lampes de sécurité.

La liste des entrées-sorties conçue pour le module électronique est présentée dans le tableau 4.3.

<b>Entrée digitale</b>	<b>Description</b>
Entrée DI00	Entrée de commande d'allumage par BP
Entrée DI01	lampe droite allumée
Entrée DI02	lampe droite en circuit ouvert
Entrée DI03	lampe droite en court-circuit
Entrée DI04	lampe gauche allumée
Entrée DI05	lampe gauche en circuit ouvert
Entrée DI06	lampe droite en court-circuit
<b>Entrée analogique</b>	<b>Description</b>
Entrée ANA01	Tension batterie
<b>Sortie digitale</b>	<b>Description</b>
Sortie DO01	commande allumage/extinction des lampes
<b>Sortie analogique</b>	<b>Description</b>
Aucune	-

TABLEAU 4.3 Tableau des entrées-sorties

Les différentes entrées-sorties du tableau 4.3 sont collectées par la carte électronique de contrôle, provenant des deux lampes et de la batterie. Ces données sont traitées grâce à des amplificateurs opérationnels fonctionnant à seuil de basculement et des circuits intégrés à portes logiques ET (AND) et NON-ET (NAND), puis transmises aux entrées-sorties du kit

embarqué.

Les données collectées par la carte électronique de contrôle nous ont permis de créer et d'enrichir, dans le programme écrit en langage C, les variables suivantes (visibles via l'interface web et les échanges via le protocole Modbus TCP) :

- Numéro de module d'urgence ;
- Tension de la batterie basse ;
- Lampe droite correcte et Lampe gauche correcte ;

À la suite de la liste IO, nous allons présenter le schéma électronique conçu.

Cette carte électronique est modulaire et peut s'intégrer ou être remplacée dans n'importe quel appareil d'éclairage d'urgence de notre étude. Par ailleurs, nous avons remarqué en phase d'analyse que les entrées et sorties des portes logiques constituaient inévitablement des entrées sorties supplémentaires s'il fallait utiliser un système embarqué ayant un grand nombre d'entrées sorties plus grand que celui que nous avons choisi. La contrainte de coût, de modularité et de maintenance nous a conduits à un choix raisonnable et techniquement viable, c'est-à-dire concevoir une carte autonome dont la fonction première est de superviser les états de base d'une lampe.

#### 4.3.2 Schéma électronique

Grâce au logiciel ISIS 7 Professionnel de Labcenter (Dražen et Darko, 2010), nous avons conçu le prototype de test présentée par la figure 4.4 :

Le circuit de la figure 4.4 a été conçu pour le contrôle d'une lampe de sécurité. Il sera donc à dupliquer pour piloter deux lampes de sécurité à titre de test et de validation du système.

Le scénario de test et le fonctionnement du prototype sont présentés comme suit :

- Au départ, le bouton poussoir n'est pas actionné. Le relais RL2, dont la bobine d'excitation est de 5v isolé, via son contact NF (normalement fermé) à la lampe D1 de la masse. De plus, la diode D5 provoque une chute de potentiel à la cathode de la lampe D1, et la résistance R11 permet, par sa valeur, d'isoler ce potentiel, empêchant ainsi la lampe D1 de s'allumer.
- L'étage constitué du bouton poussoir et du résistor R6 permet d'exciter le relais RL2 afin

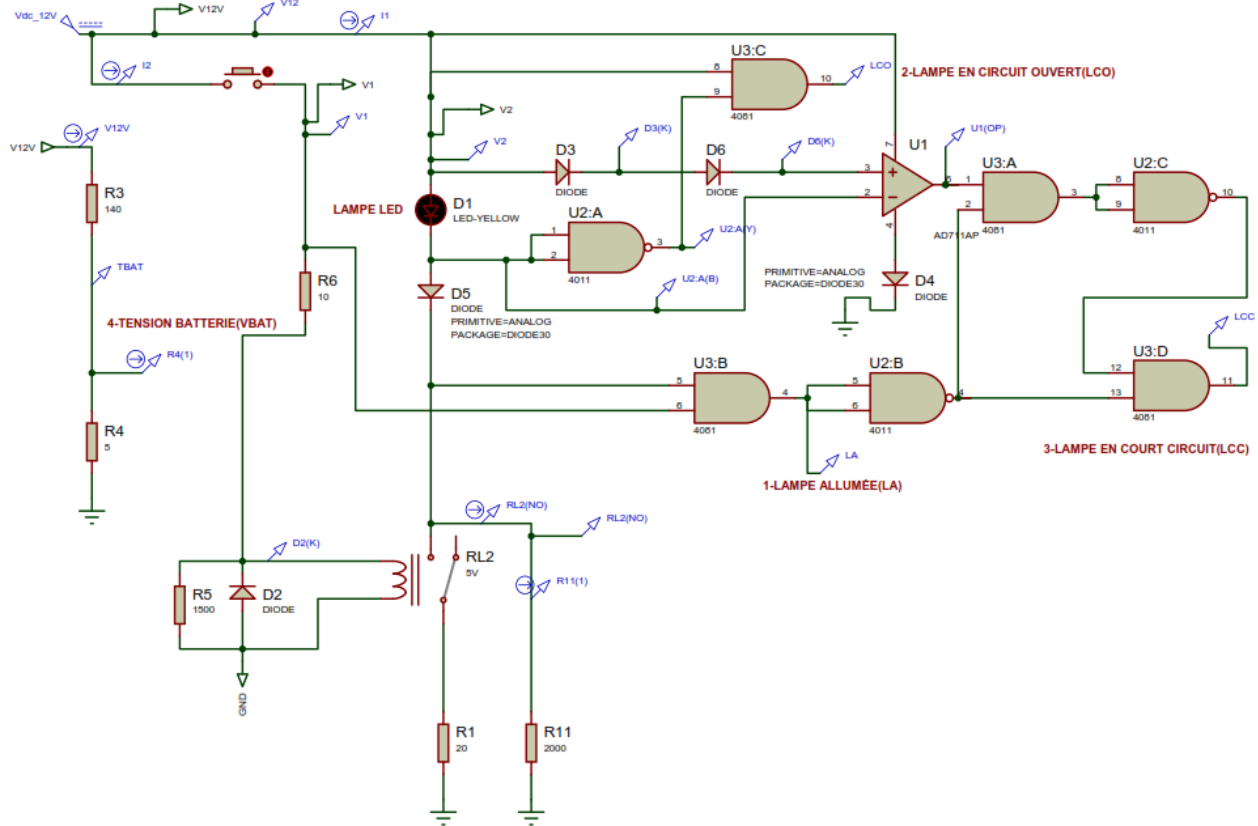


FIGURE 4.4 Circuit de contrôle d'une lampe d'urgence

d'allumer la lampe D2. La broche de sortie LA (LAMPE ALLUMÉE) obtient le niveau logique haut (5V DC). Lorsque la lampe est éteinte, la broche LA reçoit un niveau logique bas (0V DC).

- La sortie LCO (LAMPE EN CIRCUIT OUVERT) et la sortie LCC (LAMPE EN COURT-CIRCUIT) sont contrôlées par l'amplificateur opérationnel U1.
- Lorsque la lampe D1 est en court-circuit, le potentiel 3(+) de l'amplificateur est inférieur au potentiel 3(-), ce qui met la sortie de l'amplificateur opérationnel (câblé en comparateur) à 0V. De ce fait, la sortie 10 de l'opérateur NON ET U2 :C est 5V DC. Aussi, la sortie de l'opérateur ET U3 :B est 0V DC entraînant la mise à 5V DC de la porte NON ET U2 :B. Les entrées de la porte ET U3 :D étant à 5V DC, la sortie de cette porte passe à 5V DC et met la broche LCC (LAMPE EN COURT-CIRCUIT) à 5V DC.
- Lorsque la lampe D1 est en circuit ouvert, le potentiel 3(+) équivaut à  $12V - 2x(0.6)$ , soit 10.8V DC. Tant-dis que le potentiel 3(-) est proche de 0V DC. De ce fait, le potentiel 3(-) inférieur au potentiel 3(+), la sortie de l'amplificateur opérationnel passe à 5V DC

mettant la sortie LCC (LAMPE EN COURT-CIRCUIT) à 0VDC.

La lampe D1 étant en circuit ouvert, la sortie de la porte NON ET U2 :A passe à 0V DC. Les entrées de l'opérateur ET U3 :C étant toutes à 5V DC, la sortie de la porte U3 :C passe à 5V DC et, donc, la broche LCO (LAMPE EN CIRCUIT OUVERT) passe à 5V DC.

- Le pont diviseur de tension formé par les résistors R3 et R4 permet de ramener la tension de la batterie au niveau de la broche TBAT (TENSION BATTERIE) à 5V DC, admissible par l'entrée analogique de la carte Arduino.

Afin que la carte Arduino Uno WiFi puisse recueillir les données de tension de la batterie, de la lampe allumée, de la lampe en circuit ouvert et de la lampe en court-circuit, nous avons réalisé l'adaptation en Pull-Down pour le circuit de la figure 4.4. Sans cette adaptation, il n'y aurait pas eu de transfert des données de la carte électronique vers la carte Arduino. Car la carte Arduino à 5V pour tension seuil.

La figure 4.5 illustre le principe de l'adaptation "Pull Down". En effet, le potentiel Vin est connecté à l'entrée digitale de l'Arduino Uno Wi-Fi Rev2, qui est en permanence au potentiel 3.5 V DC (ce potentiel est détecté par le programme comme signal haut, en l'absence du potentiel VCC). La résistance R2 crée l'effet 'Pull Down' en ramenant le potentiel Vin de l'entrée Arduino à 0 VDC. Le potentiel VCC provient de la carte électronique d'interface, qui établit ou interrompt ce potentiel.

Lorsque la tension VCC est présente, le pont diviseur formé par R1 et R2 porte une tension Vin inférieure ou égale à 5v. Le dimensionnement de R1 et R2 est donc fait en conséquence. Lorsque la tension VCC est absente, le potentiel Vin est immédiatement ramené à 0V. Une fois le montage Pull-Down réalisé, nous avons mis en place un ensemble de broches permettant la connexion des liaisons câblées entre la carte électronique et la carte Arduino. Tout ceci afin de rendre les tests du prototype plus aisés.

### 4.3.3 Broches de connexions lampe droite vers la carte Arduino

La figure 4.6 présente les broches de la lampe de droite vers les entrées de la carte Arduino.

Les sorties LDA (Lampe Droite Allumée), LDCO (Lampe Droite en Circuit Ouvert), LDCC

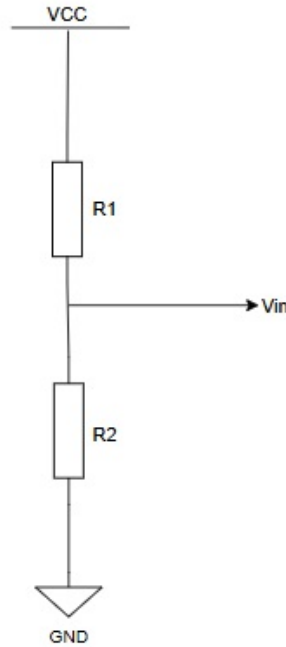


FIGURE 4.5 Principe du schéma Pull-Down

(Lampe Droite en Court Circuits) et la mesure de niveau de batterie sont transmises respectivement au kit embarqué via les tensions Pull-Down, IN2, IN3, A2 et A1.

#### 4.3.3.1 Broches de connexions lampe gauche vers la carte Arduino

La figure 4.7 présente les broches de la lampe de gauche vers les entrées de la carte Arduino.

Les sorties LGA (Lampe Gauche Allumée), LGCO (Lampe Gauche en Circuit Ouvert) et LGCC (Lampe Gauche en Court Circuit) sont transmises respectivement au kit embarqué via les tensions Pull-Down, IN5, IN6 et IN7.

Dans le même ordre d'idées, la programmation de la communication Modbus et WiFi a été réalisée sur la base de l'acquisition des états renvoyés par la carte électronique de contrôle. La plate-forme logicielle Arduino ou EDI (Environnement de Développement Intégré) nous a permis d'élaborer un programme structuré en C et C++.

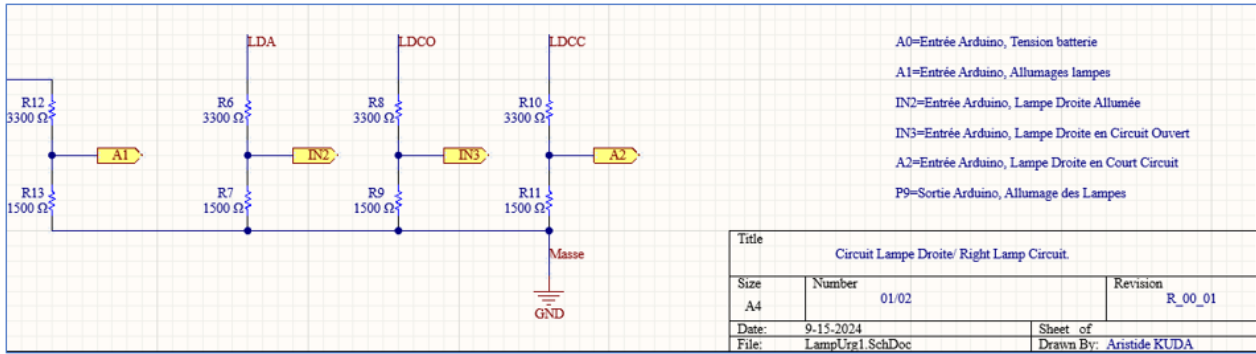


FIGURE 4.6 Pull-Down transmission des états de la lampe droite à la carte Arduino

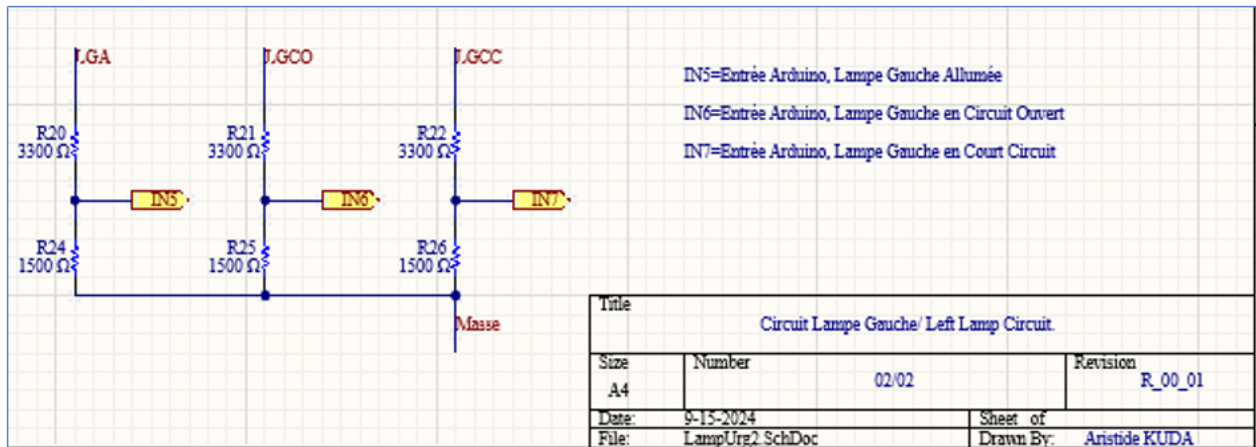


FIGURE 4.7 Pull-Down transmission des états de la lampe gauche à la carte Arduino

#### 4.4 Prototypage et environnement de test

##### 4.4.1 Présentation de la maquette

La figure 4.8 est l'image de la maquette du prototype conçu.

La figure 4.8 a quatre composantes à savoir :

- 1- Les lampes DEL : assurent l'éclairage.
- 2- La carte Arduino Wi-Fi Rev2 et la carte Arduino Ethernet Shield : système pilote basé sur le processeur ATmega4809 16 MHz. Il héberge le programme de contrôle et de communication.
- 3- La carte électronique de contrôle : assure la collecte des données des lampes et de la batterie et renseigne sur leur état de fonctionnement.
- 4- La batterie : assure l'alimentation en tension continue de 12 V de l'installation.

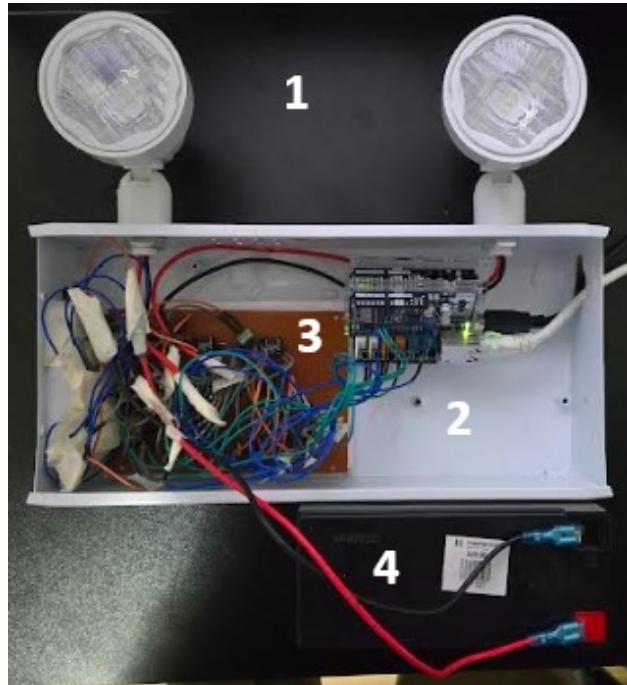


FIGURE 4.8 Prototype

#### 4.4.2 Validation fonctionnelle de la maquette

Nous avons créé et classifié les adresses Modbus ainsi que leurs désignations valables pour le diagnostic et la maintenance comme dans le tableau 4.4 ci-dessous :

Le tableau 4.4 précise les adresses Modbus et la désignation des variables que ces adresses véhiculent vers le poste de supervision.

Nous avons réalisé les essais de commande des lampes depuis l'interface web, grâce à la communication Wi-Fi, et visualisé les données reçues depuis un ordinateur moyennant la communication Modbus. Nous avons appuyé ces essais par des images y afférentes.

#### 4.5 Configuration de la communication entre le poste de contrôle et kit embarqué

Afin d'établir la communication entre le kit embarqué et le poste de contrôle, la figure 4.9 confirme la communication Modbus TCP/IP.

Variable Modbus	Adresse	Désignation
MbNum0_Batt_Low_ir	100	Tension Batterie Basse. Batterie à Remplacer (Batt_Low)
MbNum1_LDA_ir	101	Lampe Droite Allumée (LDA)
MbNum2_LDCCO_ir	102	Lampe Droite Circuit Ouvert (LDCCO)
MbNum3_LDCC_ir	103	Lampe Droite en Court Circuit (LDCC)
MbNum4_LGA_ir	104	Lampe Gauche Allumée (LGA)
MbNum5_LGCO_ir	105	Lampe Gauche Circuit Ouvert (LGCO)
MbNum6_LGCC_ir	106	Lampe Gauche en Court Circuit (LGCC)
MbNum7_CAEL_ir	107	Commande Allumage/Extinction Lampe (CAEL)
MbNum8_TB_ir	108	Tension Batterie (TB)
MbNum9_LD_Ok_ir	109	Lampe Droite Okay (LD_Ok)
MbNum10_LG_Ok_ir	110	Lampe Gauche Okay (LG_Ok)
MbNum11_NMU_ir	111	Numéro Module d'Urgence (NMU)

TABLEAU 4.4 Adresse Modbus et désignation des variables de maintenance

```
Pinging 192.168.1.132 with 32 bytes of data:
Reply from 192.168.1.132: bytes=32 time<1ms TTL=128
Reply from 192.168.1.132: bytes=32 time=1ms TTL=128
Reply from 192.168.1.132: bytes=32 time=1ms TTL=128
Reply from 192.168.1.132: bytes=32 time=1ms TTL=128
Reply from 192.168.1.132: bytes=32 time=1ms TTL=128
Reply from 192.168.1.132: bytes=32 time<1ms TTL=128
Reply from 192.168.1.132: bytes=32 time=1ms TTL=128
Reply from 192.168.1.132: bytes=32 time=1ms TTL=128
Reply from 192.168.1.132: bytes=32 time<1ms TTL=128
```

FIGURE 4.9 Test communication Modbus TCP/IP

#### 4.6 Lampe d'appareil d'éclairage d'urgence éteinte

La figure 4.10 présente l'appareil d'éclairage d'urgence équipé d'un système de communication hybride (Modbus et Wi-Fi), dont les lampes sont éteintes.

La figure 4.11 présente les lampes éteintes de l'interface Wi-Fi de commande depuis un appareil mobile (Android, Apple ou tablette, etc.)

Dans la figure 4.11, on note qu'il n'y a aucune faute ni panne sur les lampes, ainsi que sur la batterie. La tension de la batterie lue est de 12 V.



FIGURE 4.10 Appareil d'éclairage d'urgence conventionnel équipé du système de communication Modbus et WiFi, lampe éteinte

La figure 4.12 présente les lampes éteintes de l'interface Modbus du poste de contrôle.



FIGURE 4.11 Wi-Fi, lampe éteinte

#### 4.7 Lampe d'appareil d'éclairage d'urgence allumée

La figure 4.13 présente l'appareil d'éclairage d'urgence équipé d'un système de communication hybride (Modbus et Wi-Fi), dont les lampes sont allumées.

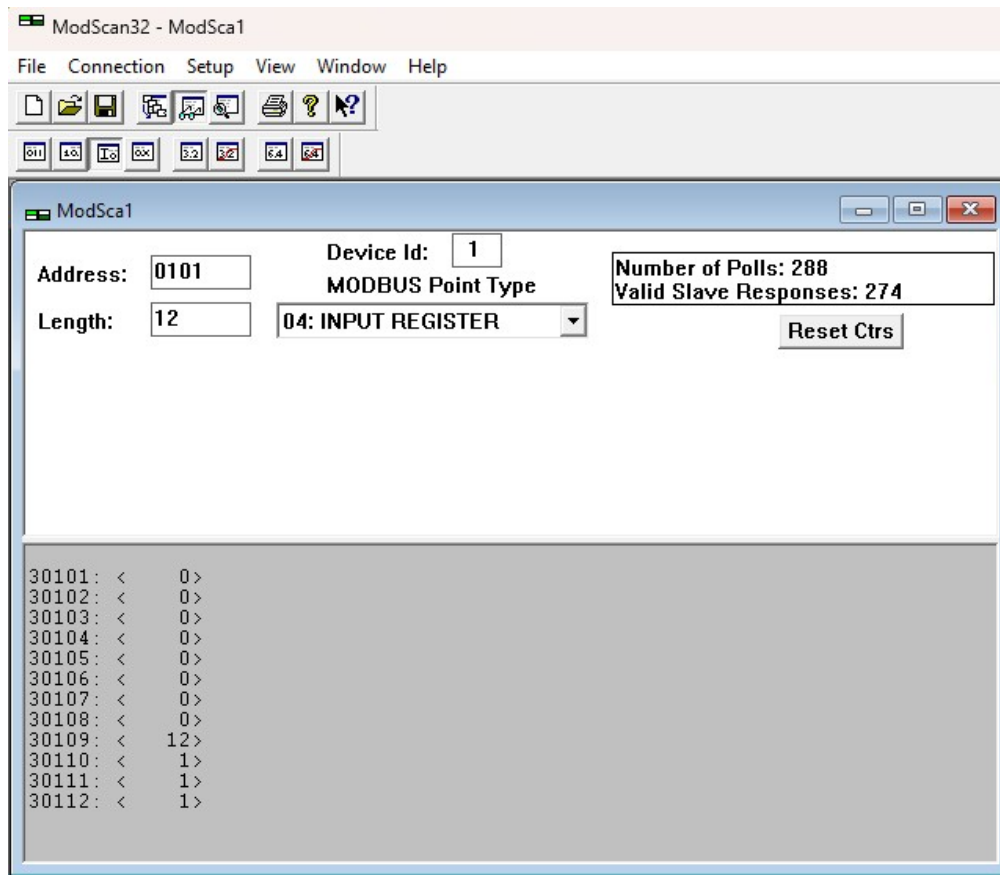


FIGURE 4.12 Modbus, lampe éteinte

La figure 4.14 présente les lampes allumées de l'interface Wi-Fi de commande depuis un appareil mobile (Android, Apple ou tablette, etc.)

Dans la figure 4.14, on note qu'il n'y a aucune faute ni panne sur les lampes, ainsi que sur la batterie. La tension de la batterie lue est de 12 V.



FIGURE 4.13 Appareil d'éclairage d'urgence conventionnel équipé du système de communication Modbus et Wi-Fi, lampe éteinte

La figure 4.15 présente les lampes allumées de l'interface Modbus du poste de contrôle.

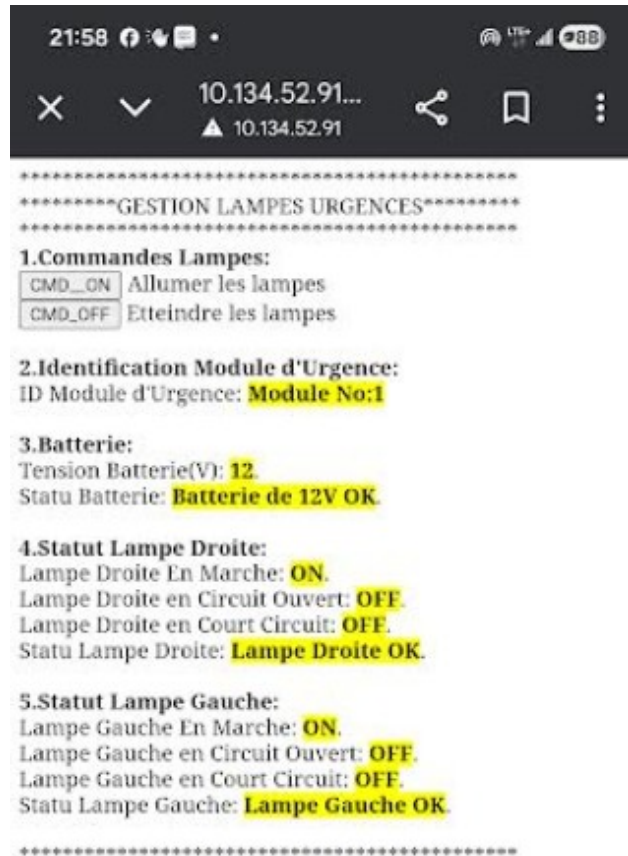


FIGURE 4.14 Wi-Fi, lampe allumée

#### 4.8 Batterie défectueuse

La figure 4.16, depuis l'interface Wi-Fi de l'appareil mobile, renseigne sur l'état de la batterie d'alimentation. Dans ce cas, elle est défectueuse.

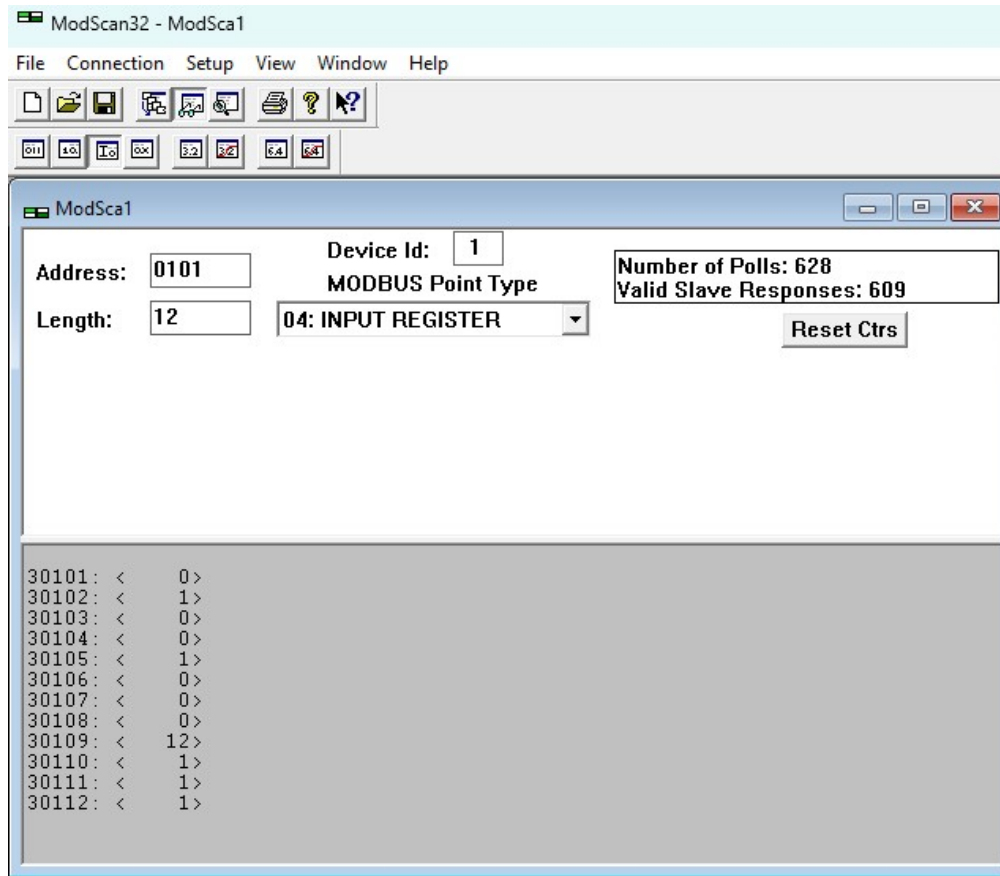


FIGURE 4.15 Modbus, lampe allumée

La figure 4.17, depuis l'interface Modbus du poste de contrôle, renseigne sur l'état de la batterie d'alimentation. Dans ce cas, elle est défectueuse.



FIGURE 4.16 Wi-Fi, remplacer la batterie

#### 4.8.1 Programmation via la plateforme Arduino

Les broches de connexion des lampes gauches et droites sont directement reliées aux entrées de la carte Arduino Uno WiFi Rev2, dont nous avons programmé l'acquisition conformément aux sections ci-dessous :

- Programmation de l'acquisition des connexions via la carte Arduino
- Programmation de la communication Modbus
- Programmation des routines

Après l'implémentation de la communication Modbus, il est impératif de valider les paramètres clés de communication, à savoir la vitesse des échanges et le temps de réponse.

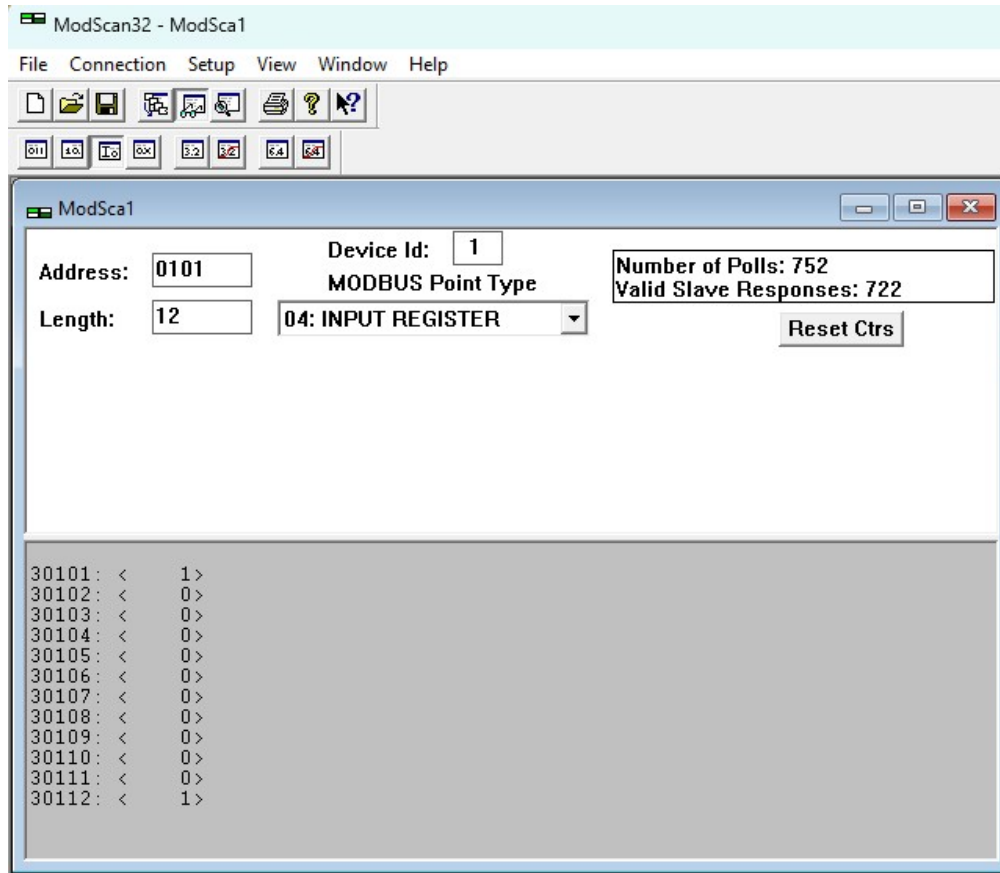


FIGURE 4.17 Modbus, remplacer la batterie

#### 4.8.2 Diagnostic de la communication Modbus

Une des phases importantes de l'application est de pouvoir diagnostiquer les informations renvoyées par la carte Ethernet. En général, la première phase du diagnostic professionnel est l'utilisation de l'application Modbus Scanner. L'outil Modbus Scanner, installé sur l'ordinateur de supervision, permet de s'assurer que les échanges Modbus sont correctement effectués entre la carte Arduino Ethernet Shield Rev2 et l'ordinateur distant.

Une fois la maquette réalisée, telle que définie dans la figure 4.1, nous avons validé l'échange des registres du module afin de confirmer la communication réseau Modbus TCP.

— L'allumage et l'extinction des lampes (droite et gauche) passent par l'action sur le bouton poussoir, lequel est associé au registre 107 (identifiable au registre 300 108 du Modbus scanner).

En général, les registres programmés en langage C sont décalés de +1 par rapport à l'adresse initiale fournie par l'outil Modbus scanner.

- La tension de la batterie est contenue dans le registre 300 109. Le contenu de ce registre est de 12, soit 12 Volts en courant continu.
- Lampe droite allumée, telle que présentée dans la figure 4.18

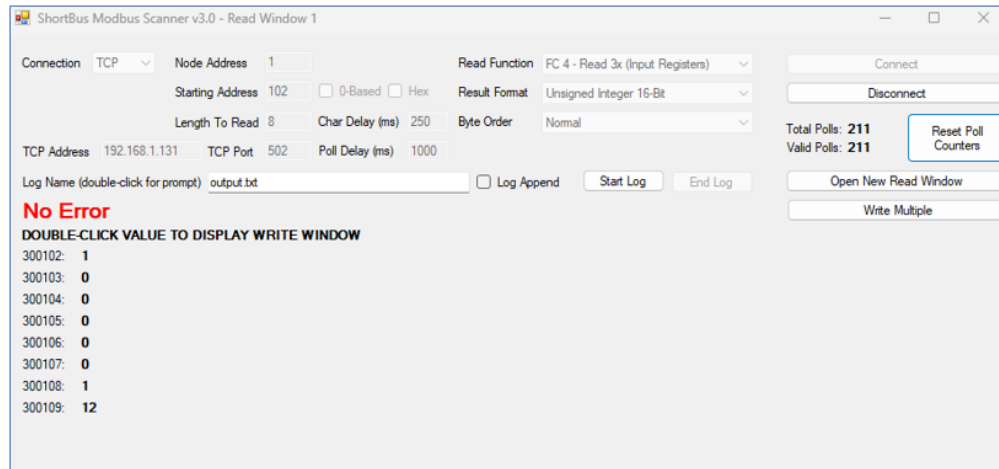


FIGURE 4.18 Lampe Droite allumée, registre 300 102 = 1

- L’extinction des lampes se fait en relâchant le bouton poussoir.
- Lampe droite éteinte, telle que définie dans la figure 4.19 :

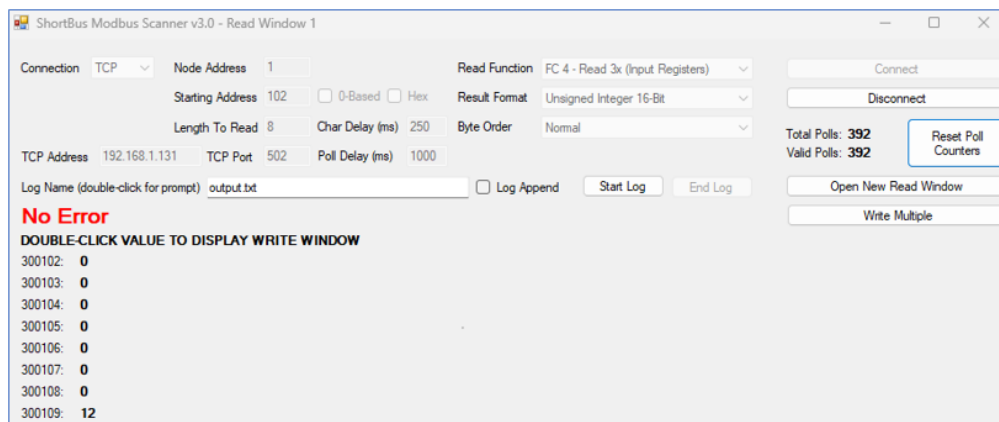


FIGURE 4.19 Lampe Droite éteinte, registre 300 102 = 0

- Lampe droite circuit ouvert, tel que défini dans la figure 4.20 :

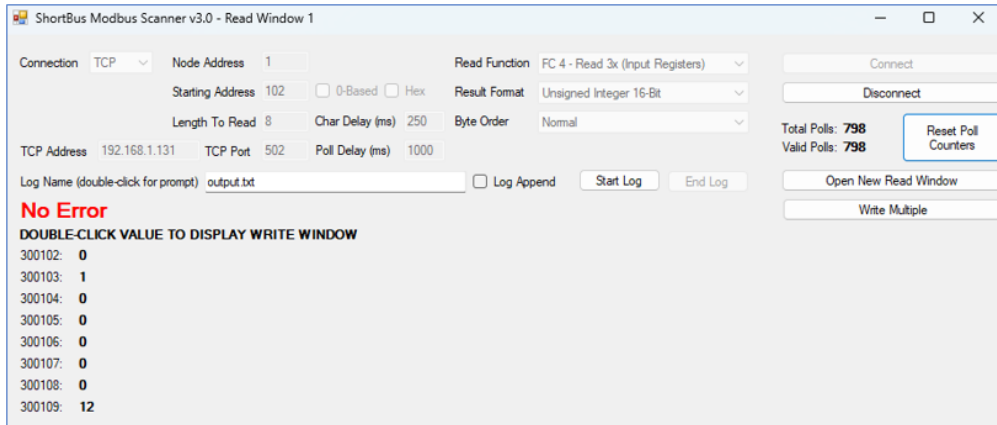


FIGURE 4.20 Lampe Droite circuit ouvert, registre 300 103 = 1

— Lampe droite en court-circuit, tel que défini dans la figure 4.21 :

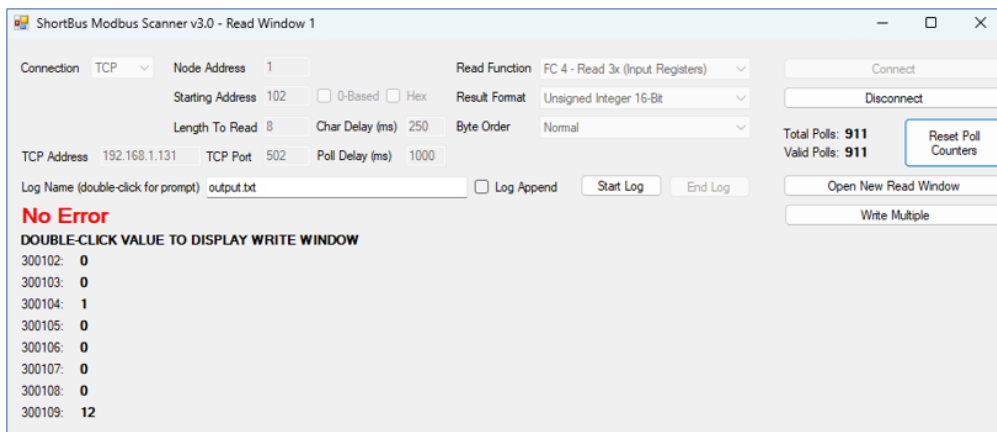


FIGURE 4.21 Lampe Droite court-circuit, registre 300 104 = 1

— De la même manière, nous avons obtenu les états de la lampe gauche contenus dans les registres Modbus 300 105 / 300 106 / 300 107 respectivement pour lampe gauche allumée / lampe gauche en circuit ouvert / lampe gauche en court-circuit.

#### 4.8.2.1 Amélioration des paramètres clés de communication Modbus

La carte Arduino règle la vitesse de communication Modbus via son port série. Deux plages de vitesses sont répandues, à savoir 9600 bauds et 19200 bauds. Une des améliorations de notre travail consistera à optimiser la vitesse de transmission, qui est une métrique importante. Dans l'article (Mao *et al.*, 2022), la vitesse de transmission considérée est de 9600 bauds. Nous allons dans cette section explorer les différences de transmission de notre projet pour des vitesses de transmission de 9600 bauds et 19200 bauds.

(1) : Nous avons relevé des temps théoriques approximatifs dans le cas de la lampe en circuit ouvert, puis de la lampe en état correct sous une vitesse de transmission de 9600 bauds et avons observé :

— Temps de réponse Modbus de la lampe en circuit ouvert : 4,5 sec ;

— Temps de réponse Modbus de la lampe en état correct : 4,2 sec ;

(2) : Nous avons relevé des temps théoriques approximatifs dans le cas de la lampe en circuit ouvert, puis de la lampe en état correct sous une vitesse de transmission de 19200 bauds, et avons observé :

— Temps de réponse Modbus lampe en circuit ouvert : 4,5 sec ;

— Temps de réponse Modbus lampe en état correct : 4,2 sec ;

(3) : Nous avons, pour des raisons d'ouverture, essayé également les temps de réponse Modbus avec les vitesses 312500 et 38400 bauds. Les temps de réponse Modbus sont restés identiques à ceux des points (1) et (2) ci-dessus. Au-delà de 38400 bauds, les réponses via l'interface série 'Serial Monitor', de l'IDE Arduino ne transcrivent plus de chiffres et de lettres lisibles.

Nous pouvons conclure que les transmissions à 9600 ou 19200 bauds sont correctes et ont sensiblement les mêmes temps de réponse. Par contre, les transmissions à 312500 et 38400 ne sont pas fonctionnelles.

#### 4.8.3 Programmation et structure de la communication WiFi

L'intégration de la communication se fait d'une part au sein du Kit Arduino Uno WiFi, programmé via l'IDE. D'autre part, au travers d'un téléphone Android, il sera possible de visualiser les données renvoyées par la carte Arduino Uno WiFi.

Afin de rester sobre dans les données à échanger (utilisation restreinte de la mémoire), nous n'utiliserons pas de carte mémoire pour soutenir la communication WiFi. Ainsi, nous avons programmé certaines instructions HTML (HyperText Markup Language) directement dans l'application principale de la carte Arduino.

Afin que la communication Wi-Fi puisse fonctionner, le kit Arduino Uno Wi-Fi Rev2 a été programmé en tant que point d'accès Wi-Fi, générant un point d'accès (AP) via une adresse IP émise par l'outil 'Serial Monitor' de l'Arduino. De ce fait, l'adresse IP est saisie dans un client du point d'accès (téléphone mobile ou une tablette) qui permet de superviser les

états des lampes et d'envoyer les commandes afin d'allumer ou d'éteindre les lampes tel que présenté dans la figure 4.22. Ce fonctionnement n'exige obligatoirement pas que le kit Arduino Wi-Fi et le téléphone Android aient accès à un routeur WiFi provenant d'un FAI (Fournisseur d'Accès Internet) tiers.

Les sections ci-dessous encadrent la communication Wi-Fi que nous avons programmée en C/C++ :

- Interface de communication Wi-Fi et point d'accès
- Interface de communication Web et client du point d'accès
- Programmation des routines

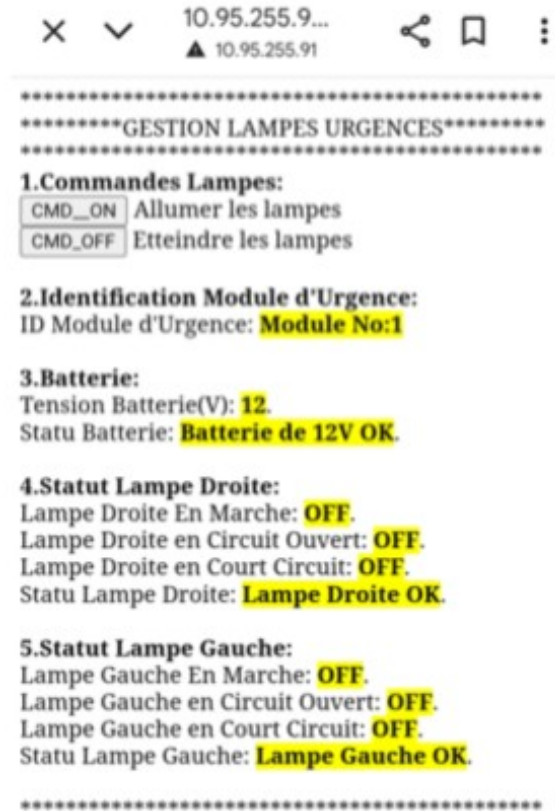


FIGURE 4.22 Interface Web des données lues via un téléphone Android

#### 4.9 Évaluation du coût matériel du système conçu

Le coût estimatif du matériel nécessaire à la conception des nouveaux modules d'éclairage d'urgence est illustré dans le tableau 4.5. Le prix.unitaire (Prix.U) et le prix.total (Prix.T) est exprimé en dollars canadiens.

Référence	Qté	Prix.U	Prix.T	Description
C4370356-AD711JN	2	1	2	Amplificateur opérationnel
C5205-CD4081BE	2	0.66	1.33	4 AND
C507170-CD4011BE	2	0.15	0.30	4 AND
C84643-1N4007-E3/54	8	0.05	0.47	Diode
C471587-RY5W-K	2	1	2	Relais 5V
C513690	50	0.01	0.715	Resistor 3.3K
C1364428	25	0.07	1.77	Resistor 1.5K
C1364384	10	0.06	0.61	Resistor 4.7K
C306171	10	0.05	0.57	Resistor 0.01K, 2W
C5176033	5	0.09	0.47	Connecteur 2 pôles
C3306776	2	0.18	0.36	Interrupteur
C2883629	5	0.21	1.08	Support CI 8 pins
C2874010	5	0.31	1.57	Support CI 16 pins
C5708492	2	82	0	Potentiometers +/-20% 6W 470Ohm
C5848666	1	0.43	0.43	LED-20mA-3.1V-White
Arduino Uno Wifi Rev2	1	57.5	57.5	Arduino Uno WiFi Rev2
Arduino Ethernet Shield	1	32	32	Arduino Ethernet Shield Rev2
PCB design	1	10	10	Arduino Ethernet Shield Rev2
Box Lighting	1	25	25	PCB board
Main d'oeuvre	1	30	30	Main d'oeuvre
Total Prix	-	-	168.175	

TABLEAU 4.5 Coût estimatif du prototype du système d'éclairage d'urgence proposé

#### 4.10 Présentation du circuit imprimé du prototype

Grâce aux logiciels Proteus et Isis, nous avons dessiné le circuit imprimé pour une production industrielle de masse.

La carte électronique conçue du côté des composants en 3D est présentée par la figure 4.23 :

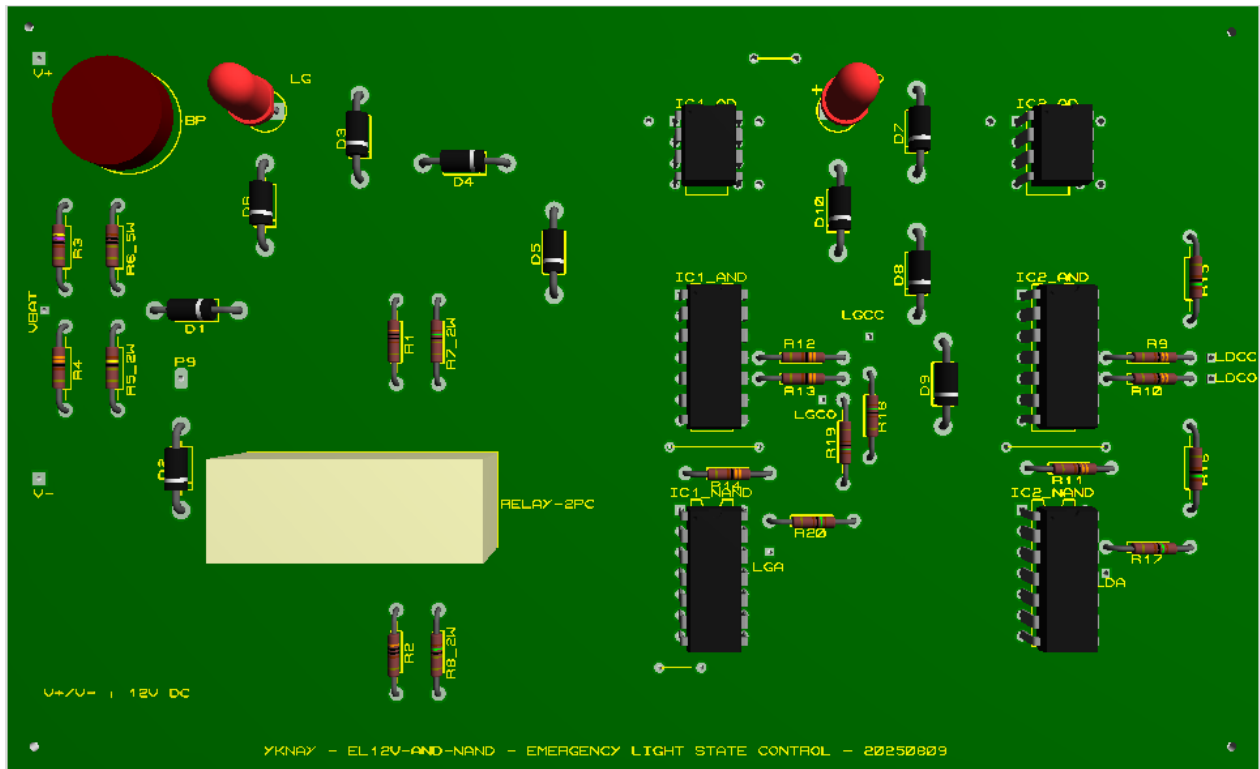


FIGURE 4.23 PCB - Circuit électronique, vue composants

La vue 2D du circuit montrant les points de connexions entre les nœuds principaux de la carte est présentée dans la figure 4.24.

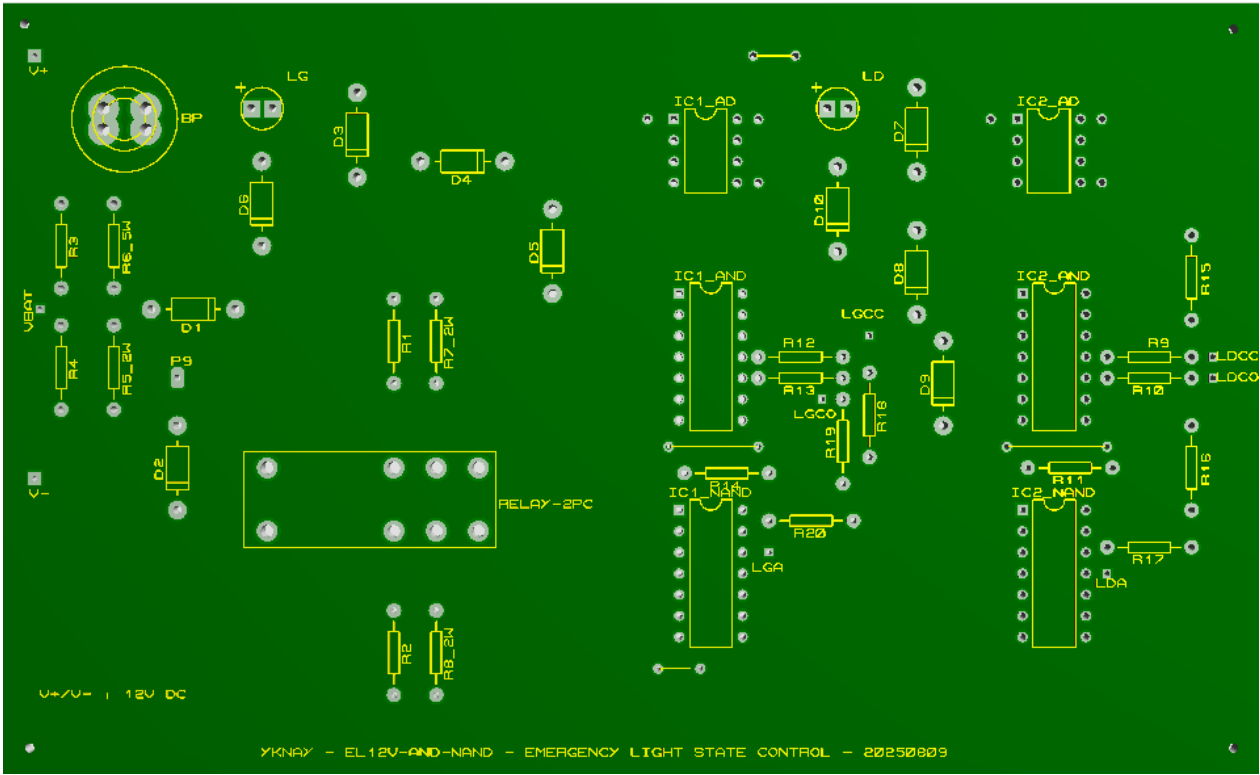


FIGURE 4.24 PCB - Circuit électronique, vue arrière des composants et points de connexions

Le côté des pistes de connexions électriques se présente comme suit :

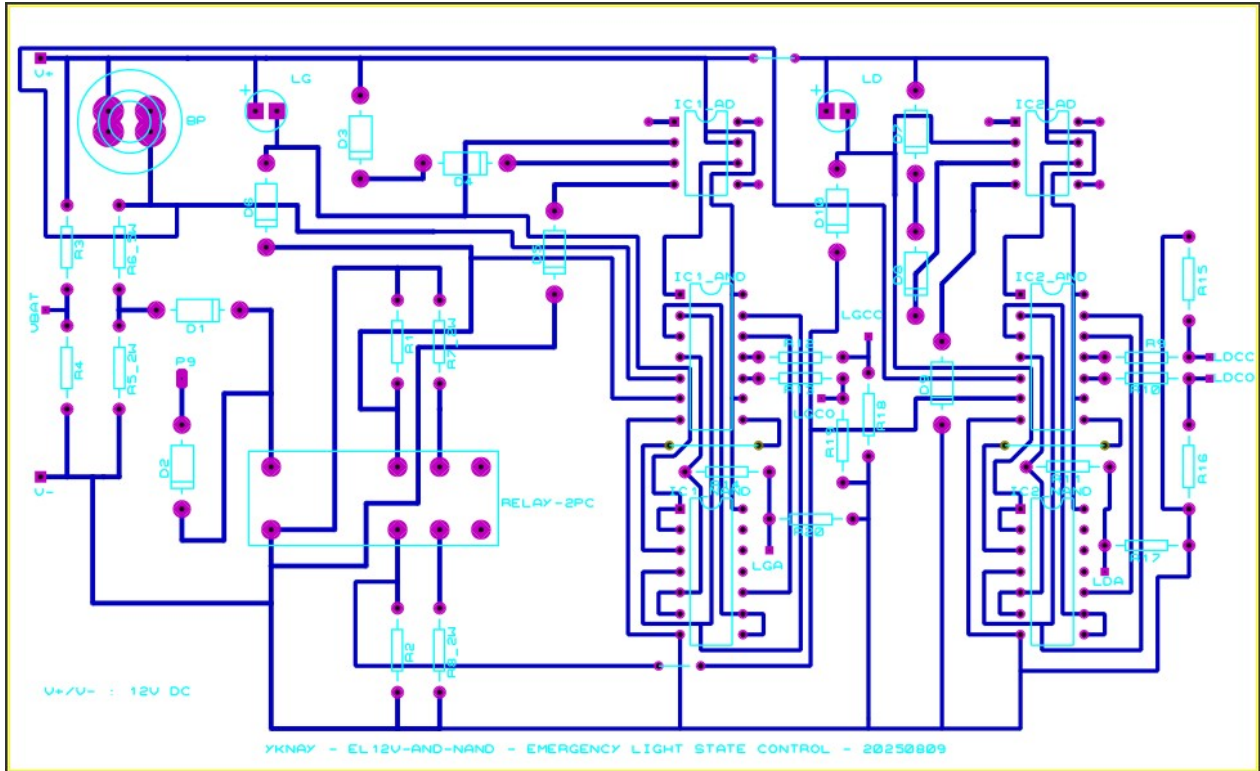


FIGURE 4.25 Schéma du circuit de la carte électronique - vue connexion et composants

Dans la figure 4.23, les lampes DEL sont des composants qui utilisent des courants faibles. Notre dimensionnement du prototype a tenu compte des réalités du marché de l'industrie de l'éclairage de sécurité. Nous avons choisi des lampes DEL de 2 W sous 6 V pour un courant consommé de 0.33 A et une tension d'alimentation de 12 V. Pour une tension d'alimentation différente de 12 V, le dimensionnement du circuit composé de la DEL, de la diode D5 et des résistors R1 et R11 doit être refait. Nous avons établi de façon générale que le courant de repos de la DEL (lorsqu'aucun bouton poussoir n'est actionné) est obtenu pour une résistance R11 de 2000 ohms (minimum). À ce titre, l'équation de R1, permettant d'obtenir n'importe quel courant de la DEL, est donnée comme suit :

$$R1 = [V_{cc} - V_{DEL} - 1] * R11 / [I_{DEL} * R11 - (V_{cc} - V_{DEL} - 1)]. \text{ Avec :}$$

$V_{cc}$  = tension d'alimentation du circuit ;  $V_{DEL}$  = tension de la DEL (prise dans la fiche technique) ;  $I_{DEL}$  = courant nominal de la DEL (pris dans la fiche technique) ; R1 = résistance d'appel du courant de la DEL ; R11 = résistance du courant de repos.

#### 4.11 Rentabilité et portée du travail proposé

Cette section récapitule un comparatif entre les appareils d'éclairage de sécurité actuels et le bien-fondé des travaux menés sur la nouvelle topologie des appareils d'éclairage de sécurité, à savoir "la conception d'un système hybride de gestion et de maintenance à distance de l'éclairage de sécurité à DEL, basé sur Modbus/Wi-Fi". L'objectif est de résumer les limites des systèmes d'éclairage de sécurité actuels. Il s'agit de relever l'apport de nos travaux permettant de repousser ces limites.

##### 4.11.1 Systèmes d'éclairage d'urgence existants

Dans la revue de l'état de l'art au chapitre 1, nous avons évoqué quelques problématiques liées à la maintenance des modules d'éclairage d'urgence actuellement installés dans les entreprises québécoises. Nous avons effectué des investigations dans quatre entreprises (voir chapitre 1, Tableau : Choix des compagnies utilisées pour les relevés des unités d'éclairage d'urgence) à forte prédominance d'installation de modules d'éclairage d'urgence. En introduction, nous avons relevé les problématiques rencontrées sur les sites où sont installés les modules d'éclairage d'urgence.

Ces problématiques augmentent considérablement le coût global de maintenance pour chacun des sites.

##### 4.11.2 Contributions aux limites des systèmes d'éclairage d'urgence existants

Nous avons proposé une nouvelle solution de type d'appareils d'éclairage de sécurité permettant de réduire les coûts de maintenance et de faciliter leur opérabilité par la mise en place d'un système de gestion à distance. Les caractéristiques principales de la solution proposée sont les suivantes :

- Carte électronique de contrôle permettant de renseigner sur l'état des lampes, la tension de la batterie et la commande des lampes
- La mise en place d'une communication Modbus industrielle qui permet d'exploiter ces appareils d'éclairage de sécurité depuis un poste de contrôle (distant du lieu où sont situés les appareils d'éclairage), tant dans le secteur industriel que dans le secteur tertiaire

- La mise en place d’une communication Wi-Fi permettant de dialoguer à proximité d’un appareil d’éclairage de sécurité avec son téléphone portable. De plus, un opérateur en salle de contrôle pourra visualiser l’état d’un appareil.

#### 4.11.3 Condensé de relevé des compagnies

Dans le tableau 4.6 ci-dessous, nous avons condensé la quantité, le prix unitaire, le coût de location, le coût d’entretien et les exigences en cas de maintenance des sites Walmart, Ikea, Cascade et Versacold. Ces résultats proviennent des tableaux 1.2, 1.3, 1.4 et 1.5 du chapitre 1.

Établissement commercial							
Compagnies	Qté-M.	Batterie	PrixU. (\$)	Coût Location (\$)	Coût Entretien (\$)	Maintenance sur site	
<b>Total-Walmart</b>	74	-	12136	4000	2400	Exige moyen de levage	
<b>Total-Ikea</b>	92	-	15088	4250	2400	Exige moyen de levage	
<b>Total-Cascade</b>	19	-	3116	4000	2400	Exige moyen de levage	
<b>Total-Versacold</b>	14	-	2296	2500	2400	Exige moyen de levage	

TABLEAU 4.6 : Condensé relevé Walmart, Ikea, Cascade et Versacold.

Le tableau 4.6 indique les coûts associés à chacune des compagnies lors de chaque période de maintenance.

Il est important d’observer dans le tableau 4.6 le coût de location des machines de levage par période de maintenance. Ce coût est fixe, même si :

- sur le site, aucun appareil d’éclairage de sécurité n’est en défaut : On paiera tout de même le montant global des coûts de location.
- sur le site, un petit nombre (inférieur à 10) d’appareils d’éclairage de sécurité sont en défaut : On paiera tout de même le montant global des coûts de location.

Le tableau 4.7 montre un apport considérable à la réduction des coûts de location lors de la maintenance.

Établissement commercial							
Compagnie		Qté	Batterie	PrixU. (\$)	Coût Location (\$)	Coût Entretien (\$)	Maintenance sur site
<b>Total-Walmart</b>		74	-	12136	0 (proportionnel)	2400	Exige moyen de levage
<b>Total-Ikea</b>		92	-	15088	0 (proportionnel)	2400	Exige moyen de levage
<b>Total-Cascade</b>		19	-	3116	0 (proportionnel)	2400	Exige moyen de levage
<b>Total-Versacold</b>		14	-	2296	0 (proportionnel)	2400	Exige moyen de levage

TABLEAU 4.7 : Réduction des coûts de maintenance Walmart, Ikea, Cascade et Versacold.

Dans la colonne 'Coût Location' du tableau 4.7, nous avons mentionné '0 (proportionnel)', soit :

- '0\$' dans le cas 1 et,
- 'proportionnel' dans le cas 2.

Nous avons identifié deux cas où s'appliquerait la réduction des coûts de maintenance suite à nos travaux :

Cas 1 : En effet, il n'est plus nécessaire d'utiliser les moyens de levage dans la mesure où le contrôle à distance des unités montre qu'elles sont fonctionnelles et ne présentent pas de défauts. Ainsi, le coût de la location des moyens de levage et le temps matériel seront nuls dans ce cas.

Exemple illustratif du cas 1 : Deux techniciens sont en charge de la maintenance des appareils d'éclairage de sécurité dans la compagnie Walmart. Il s'avère que Walmart a équipé son site d'appareils d'éclairage de sécurité issus de notre conception. Les techniciens sur site, dans la salle de contrôle, se rendent compte, après vérification, que les appareils d'éclairage sont tous fonctionnels. Ils demandent à la direction de ne plus facturer les coûts relatifs à la location de machines de levage.

On note dans cet exemple les bénéfices suivants :

- Gains de temps : Réduction du temps de maintenance pour la compagnie prestataire.
- Réduction des moyens de logistique : Réduction du stress dû à la logistique et du risque d'accident pour la compagnie prestataire.

- Gain en argent : Réduction des coûts de location de la machine de levage pour la compagnie cliente.
- Gain en efficacité : Possibilité de validation des appareils d'éclairage de sécurité en défaut directement par la compagnie cliente et d'appeler la compagnie. Prestataire seulement pour les appareils d'éclairage de sécurité en défaut.

Cas 2 : De plus, dans le cas où le diagnostic à distance montrerait des défauts pour certains appareils d'éclairage de sécurité, l'apport des moyens de levage sera alors efficace et peu coûteux, car ciblé uniquement sur les unités défectueuses. De ce fait, le montant de la location sera proportionnel au nombre de modules défectueux. Nous rappelons que les coûts des moyens de levage sont généralement fixés sur l'ensemble des unités présentes sur un site et au prorata du nombre de jours de maintenance, ce qui rend ce coût fixe par site.

Exemple illustratif du cas 2 : Deux techniciens sont en charge de la maintenance des appareils d'éclairage de sécurité dans la compagnie IKEA. Il s'avère qu'IKEA a équipé son site d'appareils d'éclairage de sécurité issus de notre conception. Les techniciens sur site, dans la salle de contrôle, se rendent compte, après vérification, que seuls dix appareils d'éclairage de sécurité ne sont pas fonctionnels et que ceux-ci sont situés en hauteur et, donc, nécessitent une machine de levage.

D'après le tableau 4.6, il y a quatre-vingt-douze (92) appareils d'éclairage de sécurité pour un coût de location de 4250 dollars. Or, nous avons vu au chapitre 1, section 1.1.1.2, que le taux journalier de location d'une nacelle était de 750 dollars. Soit un nombre d'appareils d'éclairage de sécurité de location par jour de  $((92*750)/4250)$  égal à 16,235 appareils, arrondi à 17 appareils d'éclairage de sécurité pour chaque journée de maintenance. Donc, il faudra un montant de location de 750 dollars pour assurer la maintenance de ces dix appareils d'éclairage de sécurité, au lieu de payer le montant de 4250 dollars.

On note dans cet exemple les bénéfices suivants :

- Maintenance efficace : La compagnie prestataire travaille de façon ciblée sur les appareils d'éclairage de sécurité présentant un défaut particulier.
- Gains de temps : La compagnie prestataire ne doit pas nécessairement parcourir tous les dispositifs d'éclairage de sécurité situés en hauteur afin de trouver celui qui est défectueux.

- Gains en argent : Réduction des coûts de location de la machine de levage pour la compagnie cliente.
- Réduction des moyens de logistique : Réduction du stress du à la logistique et du risque d'accident pour la compagnie prestataire (car moins de jours d'opération des moyens de levage).

La bonne nouvelle est qu'il est impossible pour un site d'avoir tous les appareils d'éclairage de sécurité en défaut. Ainsi, il y a toujours une portion d'appareils d'éclairage de sécurité en défaut. Ce sera donc le cas 2 qui sera applicable dans la majorité des cas.

#### 4.11.4 Discussion sur la rentabilité économique

En économie de l'ingénierie, la rentabilité ou le profit se matérialise en amont de la conception (initiation), pendant la conception et tout au long du cycle de vie du système déployé. Nous avons conçu un nouveau type d'appareil d'éclairage d'urgence intégrant des fonctions de communications industrielles (à l'instar du Modbus TCP) et sans fil (à l'instar du Wi-Fi) et dont le prix unitaire à l'achat est inférieur à celui des appareils d'éclairage d'urgence conventionnels, ceci grâce au choix d'une plateforme embarquée peu coûteuse (Arduino) contrairement à d'autres fabricants de système embarqué qui n'offrent pas le même coût à fonctionnalité égale. En phase d'initiation, nous avons donc optimisé le coût unitaire d'une unité d'urgence. Pendant la conception, nous avons apporté une innovation majeure : Le système conçu peut fonctionner en mode Wi-Fi seul tout comme il peut fonctionner en mode Modbus seul ou les deux (Modbus TCP et Wi-Fi) en même temps. En effet, sur des sites ayant des zones dont le signal Wi-Fi est atténué, l'implémentation de la communication Modbus TCP sera une solution de contournement. De même, en présence d'un obstacle de structure pouvant empêcher le passage de câble, l'option Wi-Fi intégrée à l'appareil d'urgence sera une solution. C'est dans ce sens que la solution a été pensée offrant un mode hybride de communication (Modbus TCP / Wi-Fi au sein du même appareil).

Dans le cadre des travaux neufs, les câbles réseau (pas chers aujourd'hui) peuvent être passés au même titre que les câbles d'alimentation normaux 120 V CA des appareils d'éclairage d'urgence. La section d'un câble réseau ne saurait être une contrainte de dimensionnement ni

de passage ni de coût excédentaire dans un chemin de câble du réseau. Dans les sites évoqués (Walmart, Ikea, Cascade et Versacold), non seulement le réseau informatique est présent, mais aussi les commutateurs réseau sont toujours excédentaires et le coût d'un ou de deux commutateurs ne peut affecter sur le court terme la rentabilité observée sur la maintenance telle que présentée dans la section 4.11.2. En effet, au bout de trois maintenances, les coûts d'installations mineures (commutateurs ou câble réseau) seront récupérés.

Dans le cadre des travaux d'améliorations (sur des sites déjà construits et opérationnels), le nouveau type d'éclairage d'urgence que nous proposons peut bien s'installer en respectant les contraintes physiques de déploiement : Pour les zones susceptibles d'atténuer le signal Wi-Fi, la communication Modbus sera priorisée. Pour les zones cloisonnées où le câble réseau ne peut pas traverser, la communication Wi-Fi sera privilégiée.

#### 4.11.5 Conclusion partielle

Il est possible d'associer la communication Modbus TCP et la communication WiFi au sein d'un même écosystème embarqué. Nous avons concrétisé la communication Modbus TCP en implémentant les fonctions requises pour l'opérabilité et l'efficacité de la communication. Nous avons présenté un circuit de détection, de diagnostic et de contrôle des lampes d'un appareil d'éclairage de sécurité. L'aide à la décision est assurée par une interface Web ou par un ordinateur, permettant ainsi à un opérateur ou un utilisateur d'interagir avec le système. L'introduction de la notion de diagnostic illustrée montre à suffisance la nécessité d'intégrer, au sein des modules d'éclairage de sécurité, des outils de l'internet des objets afin de faciliter leur maintenance et de réduire leurs coûts d'intervention dans les sites industriels ou commerciaux où ces modules sont installés.

#### 4.11.6 Restriction de notre solution

Nous nous sommes limités exclusivement aux appareils d'éclairage de sécurité au sens du CNB 3.2.7.3.1(Régie du Bâtiment, 2022), et nous n'avons pas inclus de pictogrammes d'évacuation immédiate, d'entrées ou de sorties de secours.

Notre mémoire ne traite pas de la partie alimentation en puissance. En effet, le CNB 3.2.7.4.1(Régie du Bâtiment, 2022) établit les exigences de l'alimentation de secours indispensable pour

les modules d'éclairage de sécurité, tout en mentionnant les sources d'énergie suivantes : les génératrices, les batteries d'accumulateurs et le secteur normal. Les aspects de cyber-sécurité n'ont pas été étudiés dans le cadre de nos travaux. Son implémentation serait basée sur les solutions existantes en adéquation avec les appareils d'éclairage de sécurité.

#### 4.11.7 Domaines d'application

Le contexte principal de nos recherches était de proposer un nouveau système permettant à la fois d'opérer le contrôle à distance des unités d'éclairage de sécurité et d'assurer leur diagnostic en cas de maintenance, tout en les associant dans un réseau Modbus TCP, créant ainsi une passerelle de supervision vers le milieu industriel. Tout ceci dans l'optique de faciliter l'ergonomie et de réduire le temps de maintenance.

Par ailleurs, notre étude peut être exploitée dans le cadre de la supervision d'équipements dans le milieu industriel, à savoir :

- La gestion des entrées-sorties distantes ;
- La supervision des systèmes industriels ;
- La gestion des accès ;
- La transmission des données.

## CONCLUSION

Notre contribution est principalement axée sur la gestion des appareils d'éclairage de sécurité, dont les motivations consistent à améliorer leur maintenance en proposant un nouveau type d'appareil d'éclairage de sécurité capable de prendre en charge l'état des différents signaux d'un appareil d'éclairage de sécurité. Ces signaux sont : la tension de la batterie, son statut d'alimentation et le statut des lampes DEL (LED), à savoir la lampe allumée, la lampe éteinte, la lampe en circuit ouvert et la lampe en court-circuit. Puis, facilite la commande à distance de ces lampes DEL. Nous avons conçu une nouvelle carte électronique (prototype) qui permet d'intégrer toutes les fonctions d'état et de commande d'un appareil d'éclairage d'urgence.

Par la suite, nous avons sélectionné des cartes embarquées permettant d'assurer le traitement de l'information, la programmation et la gestion des communications. Une carte embarquée de base, supportant les programmes C/C++ et intégrant la communication Wi-Fi. Sur cette carte de base, nous avons intégré une carte Ethernet TCP afin de pouvoir mettre en œuvre la communication Modbus TCP. Afin de rendre le tout opérationnel, nous avons associé aux cartes du système embarqué du fabricant Arduino la carte électronique d'interface, dans le but de réaliser un système hybride de gestion et de maintenance à distance de l'éclairage de sécurité à DEL basé sur Modbus / Wi-Fi.

Nous avons effectué des tests sur le prototype conçu et validé le fonctionnement de la communication Modbus depuis un poste distant. Nous avons pu envoyer la commande pour allumer et éteindre les lampes DEL, ainsi que pour lire l'état des lampes DEL et de la batterie. De même, nous avons, à travers un téléphone portable, communiqué via le Wi-Fi avec un appareil d'éclairage de sécurité afin de lire les états des lampes DEL, de passer les commandes des lampes DEL et de lire la valeur de la tension de la batterie. Le prototypage nous a permis de mettre en place le circuit imprimé permettant la production industrielle de ces nouveaux appareils d'éclairage de sécurité.

Le système ainsi conçu est déployable dans le secteur industriel et le secteur tertiaire. Notre souhait est qu'il soit intégré dans le Code National du Bâtiment (CNB) afin de faciliter la maintenance dans le domaine de l'alarme incendie et la gestion du bâtiment. Ce travail préliminaire pourra plus tard ouvrir à la surveillance à distance des entrées logiques libres de

potentiel ou à l'acquisition de données logiques à faible coût, très utilisées dans les systèmes industriels.

Toutefois, malgré les résultats obtenus, certaines limites techniques doivent être relevées.

d'une part, les tests de communication sans fil ont été réalisés dans des conditions contrôlées. Dans des environnements réels tels que les usines ou les supermarchés, la présence de structures en béton armé, d'obstacles métalliques et de sources d'interférences électromagnétiques pourrait entraîner une atténuation significative du signal Wi-Fi, limitant ainsi la portée et la fiabilité des communications. Des campagnes de tests en conditions réelles seraient nécessaires pour caractériser précisément les performances du système et envisager des solutions d'optimisation (répéteurs, architecture distribuée ou technologies alternatives).

D'autre part, l'intégration d'une communication Wi-Fi introduit des enjeux de sécurité non négligeables. En effet, l'exposition du système à un réseau sans fil peut le rendre vulnérable à des attaques telles que l'accès non autorisé, l'interception de données ou les intrusions réseau. La mise en œuvre de mécanismes de sécurisation (authentification forte, chiffrement des communications, gestion des accès) constitue une étape indispensable pour une utilisation en environnement industriel.

Par la suite, la consommation énergétique du système embarqué représente un facteur critique, en particulier pour les applications reposant sur des modules alimentés par batterie sur des périodes de plus de quatre heures (4 h). L'ajout de fonctionnalités de communication (Wi-Fi, Ethernet) et de traitement peut augmenter la consommation globale du système, impactant ainsi l'autonomie des équipements. Une optimisation énergétique, notamment par des stratégies de mise en veille ou de gestion intelligente des communications, devrait être envisagée dans les travaux futurs.

Enfin, bien que le prototype démontre la faisabilité technique du concept, son intégration à grande échelle dans les infrastructures existantes nécessitera une validation normative et une adaptation aux exigences réglementaires en vigueur, notamment celles du Code National du Bâtiment.

En perspective, ce travail ouvre la voie à des développements futurs, tels que l'intégration de fonctions avancées de diagnostic prédictif, l'exploitation de l'Internet des objets pour une gestion centralisée des équipements, ou encore l'extension du système à d'autres applications industrielles, notamment la surveillance d'entrées logiques ou l'acquisition de données à faible coût.

Tout bien considéré, ce projet constitue une première étape vers la modernisation des systèmes d'éclairage de sécurité, en introduisant des capacités de communication et de supervision adaptées aux exigences des environnements industriels de notre époque.

## BIBLIOGRAPHIE

- Agrawal, M. et Mukherjee, A. (2025). Predicting Stock Market Trends Using Machine Learning and Sentiment Analysis. Dans *SoutheastCon 2025*, 1001–1006., Concord, NC, USA.
- Al-Gumaei, K., Muller, A., Weskamp, J. N., Longo, C. S., Pethig, F. et Windmann, S. (2019). Scalable Analytics Platform for Machine Learning in Smart Production Systems. Dans *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1155–1162., Zaragoza, Spain.
- Bhandari, M. et Silwal, B. (2022). Development of Machine Learning Model Applied to Industrial Motors for Predictive Maintenance. Dans *2022 International Interdisciplinary Humanitarian Conference for Sustainability (IIHC)*, 1632–1635., Bengaluru, India.
- Biran, A. (2011). WiFi OFDM and Bluetooth signal collision analysis. Dans *2011 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2011)*, 1–4., Tel Aviv, Israel.
- Burciu, L.-M., Fotescu, R.-P., Constantinescu, R.-C., Svasta, P. et Moise, M. (2022). Analysis of the Degree of Congestion of WiFi, Bluetooth and ZigBee Communication Media. Dans *2022 IEEE 9th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC)*, 614–617., Sibiu, Romania. IEEE.
- Chen, W., Jeong, S. et Jung, H. (2020). WiFi-Based Home IoT Communication System. *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, 18(1), 8–15.
- Chengyi, C., Guannan, Z. et Minglu, J. (2010). A ZigBee based embedded remote control system. Dans *2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems*, V3-373–V3-376., Dalian, China.
- Dražen et Darko (2010). Proteus Virtual System Modelling used for microcontroller education. *MIPRO 2010, May 24-28, 2010, Opatija, Croatia - Conference*. Récupéré de <http://www.mipro.hr/>
- Dudak, J., Gaspar, G., Sedivy, S., Fabo, P., Pepucha, L. et Tanuska, P. (2019). Serial Communication Protocol With Enhanced Properties—Securing Communication Layer for Smart Sensors Applications. *IEEE Sensors Journal*, 19(1), 378–390.
- Eder, F. et Winter, S. (2024). Efficient Detection of Test Interference in C Projects. Dans *Proceedings of the 39th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering*, 166–178., Sacramento CA USA. ACM.
- Eid, M. M. et Fath Allah, M. I. (2019). Automated Railway Security System. Dans *2019 6th International Conference on Advanced Control Circuits and Systems (ACCS) & 2019 5th International Conference on New Paradigms in Electronics & information Technology (PEIT)*, 54–64., Hurgada, Egypt.

- Fang, W. et Guan, X. (2022). Research on iOS Remote Security Access Technology Based on Zero Trust. Dans *2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, 238–241., Chongqing, China. IEEE.
- Haque, M. E., Islam, M. R., Fazle Rabbi, M. T. et Rafiq, J. I. (2019). IoT Based Home Automation System with Customizable GUI and Low Cost Embedded System. Dans *2019 International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI)*, 1–5., Dhaka, Bangladesh.
- Hongjun, S., Xuange, P. et Fengling, H. (2009). Bluetooth Data Acquisition System Based on ARM. Dans *2009 First International Workshop on Education Technology and Computer Science*, 872–875., Wuhan, Hubei, China. IEEE.
- Jabbar, W. A., Kian, T. K., Ramli, R. M., Zubir, S. N., Zamrizaman, N. S. M., Balfaqih, M., Shepelev, V. et Alharbi, S. (2019). Design and Fabrication of Smart Home With Internet of Things Enabled Automation System. *IEEE Access*, 7, 144059–144074.
- Jiang, L.-Y. (2020). Design of Wireless Smart Home System Based on Modbus TCP/SMS. Dans *Proceedings of the 2020 the 7th International Conference on Automation and Logistics (ICAL)*, 34–39., Beijing China. ACM.
- Kamm, S., Suthandhira, P. R., Jazdi, N. et Weyrich, M. (2023). A Novel Architecture for Robust and Adaptive Machine Learning Using Heterogeneous Data in Condition Monitoring of Automation Systems. Dans *2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1–8., Sinaia, Romania.
- Kireeva, N. et Pozdnyak, I. (2021). Organization of an Access Control System for Unattended Premises. Dans *2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, 223–226., Kharkiv, Ukraine.
- Kuang, Y. (2014). Communication between PLC and Arduino Based on Modbus Protocol. Dans *2014 Fourth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control*, 370–373., Harbin, China. IEEE.
- Kumar, N. V. R., Bhuvana, C. et Anushya, S. (2017). Comparison of ZigBee and Bluetooth wireless technologies-survey. Dans *2017 International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES)*, 1–4., Chennai, India. IEEE.
- Legrand (2025a). CONTROL DEVICE WITH INTEGRATED WEBSERVER FOR LEGRAND ADDRESSABLE EL UNITS. Récupéré de <chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/https://assets.legrand.com/pim/DOCUMENT/LGRP-02154-V01.01-EN.pdf>
- Legrand (2025b). Éclairage de sécurité et BAES : ce qu'il faut savoir en 2026. Récupéré de <https://www.legrand.fr/pro/normes-et-reglementations/eclairage-de-securite/normes-et-eclairage-de-securite-et-baes-ce-quil-faut-savoir>

- Mao, X., Li, X., Huang, Y., Shi, J. et Zhang, Y. (2022). Programmable Logic Controllers Past Linear Temporal Logic for Monitoring Applications in Industrial Control Systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(7), 4393–4405.
- Martsenyuk, V., Babinets, L., Dronyak, Y., Paslay, O., Veselska, O., Warwas, K., Andrushchak, I. et Klos-Witkowska, A. (2019). On Development of Machine Learning Models with Aim of Medical Differential Diagnostics of the Comorbid States. Dans *2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems : Technology and Applications (IDAACS)*, 313–318., Metz, France.
- Modbus (2020). Modbus Organization Replaces Master-Slave with Client-Server. Récupéré de [www.modbus.org](http://www.modbus.org)
- Modbus, M. (2006). MODBUS over serial line specification and implementation guide V1.02. *Modbus.org*, 1–44. Récupéré de <http://www.modbus.org/>
- Modbus.org (2006). MODBUS MESSAGING ON TCP-IP.pdf. Récupéré de <http://www.Modbus.org>
- Modbus.org (2021). MODBUS/TCP Security. *Modbus.org*, 1–20. Récupéré de <http://www.modbus.org/>
- Nikolov, N. et Gotseva, D. (2021). Design and Research of Iot Room Monitoring System. Dans *2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET)*, 1–4., Sozopol, Bulgaria.
- Nyasore, O. N., Zavarsky, P., Swar, B., Naiyeju, R. et Dabra, S. (2020). Deep Packet Inspection in Industrial Automation Control System to Mitigate Attacks Exploiting Modbus/TCP Vulnerabilities. Dans *2020 IEEE 6th Intl Conference on Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), IEEE Intl Conference on High Performance and Smart Computing, (HPSC) and IEEE Intl Conference on Intelligent Data and Security (IDS)*, 241–245., Baltimore, MD, USA.
- Pandey, B., Farulla, G. A., Indaco, M., Iovino, L. et Prinetto, P. (2019). Design and Review of Water Management System Using Ethernet, Wi-Fi 802.11n, Modbus, and Other Communication Standards. *Wireless Personal Communications*, 106(4), 1677–1699.
- Pei-qiang Zhang, Xue-jie Liu et Lu Tao (2008). Design of Security Access Control System of Adaptive Wireless Gateway. Dans *2008 International Symposium on Information Science and Engineering*, 20–23., Shanghai.
- Régie du Bâtiment, Q. (2022). CNB-2010 - Code Nationale du Bâtiment modifié. 1–80. Récupéré de <https://www.rbq.gouv.qc.ca/domaines-dintervention/batiment/la-formation/code-national-du-batiment-2010-modifie-quebec.html>
- Salodkar, P., Nandanwar, S. et Sawarkar, S. (2023). Communication between Energy Meters and PLC Based on Modbus Protocol. Dans *2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*,

1–7., Delhi, India.

Salodkar, P., Nandanwar, S. et Sawarkar, S. (2025). Communication between Energy Meters and PLC Based on Modbus Protocol.

Santiago, D., Cordeiro, A. et Almeida, G. (2021). Integration of remote interfaces for industrial automation applications. Dans *2021 International Young Engineers Forum (YEF-ECE)*, 69–74., Caparica / Lisboa, Portugal.

Schneider, E. (2025). Schneider Electric Web site. Récupéré de <https://www.se.com/ca/en/>

Tjensvold, J. M. (2007). Comparison of the IEEE 802.11, 802.15.1, 802.15.4 and 802.15.6 wireless standards.

Wang, H. (2006). An Access Control Scheme for Web-Based E-Learning Systems. Dans *2006 7th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training*, 447–453., Ultimo, Australia.

Xu, W., Zhang, J., Kim, J. Y., Huang, W., Kanhere, S. S., Jha, S. K. et Hu, W. (2019). The Design, Implementation, and Deployment of a Smart Lighting System for Smart Buildings. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(4), 7266–7281.

You, W. et Ge, H. (2019). Design and Implementation of Modbus Protocol for Intelligent Building Security. Dans *2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, 420–423., Xi'an, China.

Zhao, L., Wu, W. et Li, S. (2019). Design and Implementation of an IoT-Based Indoor Air Quality Detector With Multiple Communication Interfaces. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(6), 9621–9632.

Zheng Wenzheng (2010). Design and implementation on wireless power meter system based on GSM network. Dans *2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering*, Changchun, China.

Zhiguo, M. et Haiyan, W. (2017). Design of LED light parameters controlled based on WiFi. Dans *2017 14th China International Forum on Solid State Lighting : International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina : IFWS)*, 48–51., Beijing. IEEE.