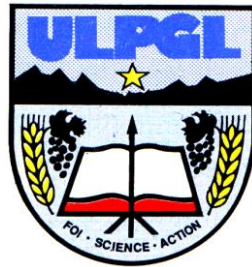


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS

FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

APPLIQUEES

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

**CONCEPTION ET REALISATION D'UN
SYSTEME Iot DE MONITORING ET DE
GESTION DE BATTERIE SOLAIRE**

Par **SOKI KAMWITE Mireille**

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Licence en Sciences de l'ingénierie

Option : Génie Electrique et Informatique

Directeur : Prof. AKWIR NKIEDIEL Alain

Encadreur : Msc. Ir. NZANZU VINGI Patrick

ANNEE ACADEMIQUE 2024 - 2025

Epigraphe

« L'intelligence, c'est savoir s'adapter au changement. »

Stephen Hawking

Dédicace

Aux femmes et demoiselles à qui l'accès au savoir a été empêché, mais dont l'ambition demeure.

Remerciements

Tout d'abord, mes sincères remerciements vont à Dieu Tout-Puissant, source de force et de persévérance, qui m'a accompagnée tout au long de ce parcours.

Je remercie particulièrement mon Directeur de mémoire, Professeur AKWIR Nkiediel Alain, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son exigence scientifique qui ont guidé mes pas dans cette recherche. Mes remerciements s'adressent également à mon Encadreur, Ir. Patrick VINGI, pour son accompagnement technique, sa patience et ses encouragements constants.

À mon Père KASEREKA KAMWITE, à ma mère MBAMBU SIVIRI Francine, mes petites sœurs et autre membre de ma famille, je dédie une reconnaissance infinie : vos sacrifices, votre soutien moral et vos prières ont été le socle sur lequel j'ai pu bâtir ce travail. Vous avez toujours cru en moi, même dans les moments de doute.

A toute personne impliquée dans le programme de bourse du réseau d'innovation organisationnel (R.I.O), en croyant en mon potentiel vous avez transformé mon quotidien et m'avez offert le plus beau de cadeau, la bourse d'étude.

Je n'oublie pas mes amis et collègues de la Faculté de Sciences et Technologies Appliquées, qui ont partagé avec moi des heures de discussions, d'échanges et de solidarité. Vos encouragements et votre esprit de collaboration ont rendu ce chemin plus agréable.

À chacun de vous, je dis merci du fond du cœur.

Résumé

Ce travail porte sur la conception d'un système IoT de gestion de l'énergie des batteries solaires adapté au contexte de la République Démocratique du Congo, où l'accès à une alimentation électrique fiable reste limité. L'objectif est d'optimiser l'utilisation des batteries solaires afin de garantir une autonomie énergétique durable et réduire la dépendance au réseau instable. Ce présente une étude sur les systèmes photovoltaïques et les batteries de stockage, en mettant en évidence les défis liés à leur gestion. Il propose la conception d'un Battery Management System (BMS) intelligent, capable de surveiller en temps réel la tension, le courant, la température, l'état de charge (SoC) et l'état de santé (SoH). L'innovation majeure réside dans l'intégration de la technologie IoT, permettant aux utilisateurs de consulter à distance l'état de leurs batteries via une application mobile (BMS App). La méthodologie repose sur l'utilisation de composants simples et accessibles (NodeMCU ESP8266, capteurs, écran LCD), afin de proposer une solution fiable, économique et adaptée aux réalités locales. Les résultats attendus montrent que le système proposé améliore la fiabilité de l'alimentation, prolonge la durée de vie des batteries et constitue une approche durable pour accompagner la transition énergétique. En conclusion, ce projet démontre que l'intégration d'un BMS basé sur l'IoT dans un système photovoltaïque hybride est une solution pertinente pour renforcer l'autonomie électrique des communautés et favoriser un développement énergétique durable.

Mots-clés : IoT, énergie solaire, batterie plomb acide, gestion de l'énergie.

Abstract

This work focuses on the design of an IoT-based system for managing solar battery energy. In the Democratic Republic of Congo, access to reliable electricity is a major challenge. The goal of this study is to improve the use of solar batteries, so that communities can have more stable and sustainable energy, while reducing dependence on the unstable national grid. The thesis presents an overview of photovoltaic systems and storage batteries, showing the main problems in their management. It proposes the design of a Battery Management System (BMS) that can monitor in real time important parameters such as voltage, current, temperature, state of charge (SoC), and state of health (SoH). The key innovation is the use of IoT technology, which allows users to check the condition of their batteries remotely through a mobile application (BMS App). The system is built with simple and affordable components (NodeMCU ESP8266, sensors, LCD screen). This makes the solution practical, low-cost, and suitable for local conditions. The expected results show that the proposed system can improve energy reliability, extend battery lifetime, and support the transition to clean energy. In conclusion, this project demonstrates that integrating an IoT-based BMS into a solar hybrid system is a relevant solution to strengthen energy autonomy and promote sustainable development in local communities.

Keywords: IoT, solar energy, lead-acide battery, energy management,

Table des matières

Epigraphe	i
Dédicace.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Table des matières	vi
Liste des abréviations.....	x
Liste des équations.....	xiii
Liste des tableaux.....	xiv
Liste des figures	xv
INTRODUCTION	1
0. Contexte	1
1. Problématique de recherche.....	2
2. Questions de recherche	2
3. Hypothèses de recherche.....	2
4. Justification du choix du sujet et motivations.....	3
5. Objectifs de recherche.....	3
5.1. L'objectif général	3
5.2. Les objectifs opérationnels/spécifiques	3
6. Méthodologie	4

7. délimitation du travail	4
7.1. Délimitation géographique	4
8. Structure du mémoire.....	4
Chapitre 1. Etat de l'art sur le système photovoltaïque et l'application mobile ..	6
1.1. Introduction	6
1.1.1. Principe de l'effet photovoltaïque.....	7
1.1.2. Composants d'un système photovoltaïque autonome.....	7
1.1.3. Technologie de panneau solaires	8
1.2. Systèmes photovoltaïques hybrides	9
1.2.1. Définition et architecture	9
1.2.2. Avantage et défis.....	10
1.2.3. Applications en contexte africain.....	12
1.3. Stockage d'énergie électrique	13
1.3.1. Rôle des batteries dans les systèmes photovoltaïques	13
1.3.2. Technologie de batteries : comparaison.....	13
1.3.3. Etude des paramètres de la batterie plomb acide	14
1.4. Système de gestion de batterie (BMS)	15
1.4.1. Définition et fonction d'un BMS	15
1.4.2. Architecture typique d'un BMS.....	16
1.4.3. Méthodes d'estimation du SoC et SoH.....	16
1.5. Internet des Objets (Iot) dans la gestion énergétique	18
1.5.1. Concepts de base de l'IoT.....	18
1.5.2. IoT pour la surveillance à distance	18
1.5.3. Applications mobiles de supervision	19
1.6. Conclusion partielle.....	22
CHAPITRE 2 : ÉTUDE ET CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE GESTION DES BATTERIES (BMS)	23

Introduction.....	23
2.1. Spécifications du Système et Cahier des Charges	24
2.1.1. Analyse des Besoins Contextuels	24
2.1.2. Exigences Fonctionnelles.....	24
2.1.3. Exigences Techniques et Contraintes	25
2.2. Architecture Globale du Système	26
2.2.1. Vue d'Ensemble et Diagramme des Blocs Fonctionnels	26
2.2.2. Flux de Données et de Contrôle.....	27
2.3. Conception Matérielle du Module BMS.....	27
2.3.1. Combinaison Arduino Uno + NodeMCU ESP8266.....	28
2.3.2. Capteur de Courant et Tension : INA219	32
2.3.3. Capteur de Température et Humidité : DHT22	33
2.3.4. Régulateur de Tension : L7805CV	35
2.3.5. Relais de Puissance : SSR (Solid State Relay)	36
2.3.6. Avertisseur Sonore : Buzzer Actif	37
2.3.7. Interface de Visualisation Locale : Écran LCD	38
2.3.8. Conception mécanique du boîtier de protection	40
2.4. Conception Logicielle Embarquée : Le Cœur Intelligent du BMS.....	44
2.4.1. Architecture Logicielle et Boucle Principale.....	44
2.4.2. Algorithmes Clés d'Intelligence Embarquée.....	45
2.4.3. Gestion de la Communication IoT (MQTT).....	47
2.4.4. Considérations Spécifiques pour le Contexte de la RDC	47
2.5. Conception de l'Interface de Supervision à Distance.....	48
2.5.1. Architecture Client-Serveur du Système Complet.....	48
2.5.2. Spécifications Fonctionnelles de l'Interface	50
2.5.3. Justification des Choix Technologiques	51
2.6. Synthèse et Validation Conceptuelle	52
Tableau 7 : Synthèse des Caractéristiques du Système BMS Conçu.....	52

2.6.2. Analyse des Performances Attendues Précision du SoC :	53
2.6.3. Adéquation aux Contraintes du Contexte Local (RDC)	53
2.7. Conclusion Partielle	55
CHAPITRE 3. REALISATION ET VALIDATION DU SYSTEME	56
3.1. Réalisation du prototype matériel du BMS.....	56
3.1.1. Sélection et acquisition des composants	56
3.1.2. Assemblage et câblage du circuit.....	57
3.1.3. Fabrication et intégration du boîtier de protection.....	57
3.1.4. Tests unitaires des modules	59
3.2. Développement de l'interface de surveillance.....	59
3.2.1. Application mobile de visualisation.....	59
3.2.2. Serveur de collecte de données	60
3.3. Validation expérimentale et résultats.....	60
3.3.1. Méthodologie de test.....	60
3.3.2. Résultats obtenus	61
3.3.3. Analyse des résultats.....	62
3.4. Discussion et recommandations.....	63
3.4.1. Adéquation au contexte congolais	63
3.4.2. Recommandations pour un déploiement réel.....	63
4. Conclusion partiel:	64
CONCLUSION GENERAL	65
Bibliographie.....	67

Liste des abréviations

Abréviation	Signification (Français)	Développement anglais / Notes
AC	Courant Alternatif	Alternating Current
ADC	Convertisseur Analogique-Numérique	Analog-to-Digital Converter
AGM	Batterie à tapis de verre absorbé	Absorbent Glass Mat (technologie plomb-acide)
API	Interface de Programmation Applicative	Application Programming Interface
BMS	Système de Gestion de Batterie	Battery Management System
CC	Courant Continu	Direct Current (DC)
CC/CV	Charge à Courant Constant / Tension Constante	Constant Current / Constant Voltage
CDF	Franc Congolais	Monnaie nationale
CdTe	Tellurure de Cadmium	Technologie de panneau couche mince
CIGS	Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium	Technologie de panneau couche mince
DHT22	Capteur numérique de température et d'humidité	Digital Humidity and Temperature Sensor
EEPROM	Mémoire morte effaçable et programmable électriquement	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
ESD	Décharge électrostatique	Electrostatic Discharge
ESP8266	Microcontrôleur avec Wi-Fi intégré	Modèle du fabricant Espressif
FCM	Messagerie Cloud Firebase	Firebase Cloud Messaging

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

Abréviation	Signification (Français)	Développement anglais / Notes
GPIO	Entrée/Sortie à usage général	General Purpose Input/Output
GPV	Générateur Photovoltaïque	
GPS	Système de géolocalisation	Global Positioning System
I2C	Circuit Inter-Intégré	Inter-Integrated Circuit (bus de communication)
IDE	Environnement de Développement Intégré	Integrated Development Environment
INA219	Capteur de courant et tension bidirectionnel	Référence du circuit intégré
IoT	Internet des Objets	Internet of Things
JSON	Format de données textuel	JavaScript Object Notation
L7805CV	Régulateur de tension linéaire 5V	Référence du composant
LCD	Écran à cristaux liquides	Liquid Crystal Display
LED	Diode électroluminescente	Light Emitting Diode
MOSFET	Transistor à effet de champ à grille isolée	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MQTT	Transport de télémétrie par file d'attente de messages	Message Queuing Telemetry Transport
NodeMCU	Plateforme de développement basée sur ESP8266	
OTA	Mise à jour à distance	Over-The-Air
PCB	Circuit imprimé	Printed Circuit Board
PPM	Point de Puissance Maximale	
PV	Photovoltaïque	Photovoltaic

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

Abréviation	Signification (Français)	Développement anglais / Notes
RDC	République Démocratique du Congo	
REST	Transfert d'État Représentationnel	Representational State Transfer
RFID	Identification par radiofréquence	Radio Frequency Identification
SNEL	Société Nationale d'Électricité	Opérateur historique du réseau en RDC
SoC	État de Charge	State of Charge
SoH	État de Santé	State of Health
SSR	Relais statique	Solid State Relay
TLS	Sécurité de la couche de transport	Transport Layer Security
UI	Interface Utilisateur	User Interface
Wi-Fi	Norme de communication sans fil	Wireless Fidelity
ΔV	Variation de tension	Delta V

Liste des équations

Équation 1 : calcul de l'état de charge de la batterie.....	17
Équation 2 : calcul de l'état de santé de la batterie	17
Équation 3 : calcul de la résistance interne	17

Liste des tableaux

Tableau 1 : caractéristique arduino [12]	29
Tableau 2 : caractéristique NodeMCU ESP8266 [13].....	30
Tableau 3 : caractéristique technique DHT22 [15].....	34
Tableau 4 : caractéristique régulateur	35
Tableau 5 : caractéristique relais [16].....	37
Tableau 6 : caractéristique buzzer.....	38
Tableau 7 : Synthèse des Caractéristiques du Système BMS Conçu.....	52
Tableau 8 : Liste et coût des composants du prototype BMS [20].....	56
Tableau 9: Précision des mesures du BMS.....	61

Liste des figures

Figure 1 : principe de fonctionnement d'un système photos voltaïque [6]	7
Figure 2 : Composant d'un système photovoltaïque autonome [4]	8
Figure 3 : technologie de module photovoltaïque [6].....	9
Figure 4 : système photovoltaïque hybride (solaire-réseau) [6]	10
Figure 5 : architecture du BMS.....	16
Figure 6 : communication à distance IoT [5].....	19
Figure 7 : Application Mobile [6] Figure 8 : Application Mobile multiplateforme [6].....	20
Figure 9: Diagramme des blocs fonctionnels du système BMS proposé	26
Figure 10 : Arduino uno [12]	28
Figure 11 : Esp8266 NodeMCU [13]	30
Figure 12 :INA219 [14]	32
Figure 13 : Tableau caractéristique INA219 [14].....	33
Figure 14 : DHT22 [15]	33
Figure 15 : régulateur L7805CV	35
Figure 16 : transistor [16]	36
Figure 17 : Buzzer actif.....	37
Figure 18 : LCD	38
Figure 19 : image de la conception du BMS proposer.....	40
Figure 20 : modélisation 3D sous solide Works du couvercle du boîtier	42
Figure 21 : Modélisation 3D sous SolidWorks du boîtier	42
Figure 22: Algorithme simplifié de la boucle de contrôle principale	45
Figure 23 : architecture client serveur.....	49
Figure 24 : Gros plan sur les connexions à la batterie	57
Figure 25: Vue extérieure du boîtier avec écran LCD, led, buzzer, dht22	58

Figure 26: dashboard..... 60
Figure 27: Photo du banc de test complet (batterie + BMS + instruments)..... 61
Figure 28: Photo comparative : écran multimètre + écran LCD du BMS 62

INTRODUCTION

0. Contexte

Dans de nombreuses régions d'Afrique subsaharienne, et particulièrement en République Démocratique du Congo, l'accès à une alimentation électrique fiable reste un défi majeur. Le réseau national souffre de coupures fréquentes, de faibles tensions et d'une couverture limitée dans les zones rurales, ce qui freine le développement économique et compromet des secteurs essentiels comme la santé, l'éducation et les télécommunications [1].

Face à ces insuffisances, les systèmes hybrides combinant énergie solaire, batteries de stockage et parfois générateurs thermiques apparaissent comme des solutions prometteuses. Le solaire photovoltaïque bénéficie d'un potentiel exceptionnel dans la région, mais sa pleine efficacité dépend d'une gestion optimale du stockage et de la distribution de l'énergie. C'est ici qu'interviennent les systèmes de gestion de batterie (Battery Management Systems, BMS), véritables "cerveaux" des installations énergétiques modernes.

Un BMS assure la surveillance, la protection et l'optimisation des batteries en temps réel. Il régule les cycles de charge et de décharge, prévient les surcharges, équilibre les cellules et prolonge la durée de vie des équipements. Dans les systèmes de forte puissance, où les chaînes de batteries sont longues et coûteuses, le rôle du BMS devient crucial pour réduire les risques et les frais de maintenance [2]. De plus, il facilite l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux existants, contribuant ainsi à la transition énergétique et à la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles.

Aujourd'hui, plusieurs solutions commerciales existent, comme les BMS modulaires proposés par Nuvation Energy, mais leur adaptation aux réalités africaines reste un enjeu majeur.

1. Problématique de recherche

L'instabilité de l'accès à l'électricité en RD Congo constitue un défi majeur pour les foyers et les entreprises, entravant le développement économique et social. Bien que le pays bénéficie d'un fort potentiel solaire, son exploitation reste limitée par le manque de solutions efficaces de stockage, de gestion de l'énergie et l'usure précoce de batterie par manque de monitoring.

2. Questions de recherche

Pour mener à bien nos recherches, nous nous fixons de réponses aux questions suivantes :

- Comment concevoir un bms simple, fiable et adapté au contexte local ?
- Comment intégrer l'internet des objets connecté dans la gestion des batteries ?

3. Hypothèses de recherche

En se référant aux questions liées à nos recherches, notre travail sera beaucoup plus centré sur les bases suivantes :

- L'intégration efficace d'un système hybride qui intègre un système de gestion de batterie offrirait une solution plus durable et performante que les réseaux classiques.
- L'adoption de méthodes fiables d'estimation de l'état de charge, telles que le comptage de Coulombs, garantirait une évaluation précise des capacités des batteries. Par ailleurs, le recours à des composants simples et accessibles (capteurs, microcontrôleurs, etc.) rendrait la solution techniquement et économiquement réalisable dans un contexte local.
- l'internet de l'objet connecter faciliterait la surveillance à distance en s'appuyant sur la logique client-serveur.

4. Justification du choix du sujet et motivations

L'accès à une électricité stable en RD Congo est essentiel pour le développement social et économique, mais reste entravé par des coupures fréquentes et une gestion inefficace de l'énergie solaire. Ce sujet a été motivé par la nécessité d'explorer des solutions durables pour optimiser l'utilisation des batteries solaires et réduire la dépendance au réseau instable. Sur le plan social, une meilleure gestion de l'électricité permettrait aux décideurs et aux entreprises de garantir une alimentation stable, favorisant ainsi l'essor économique et l'amélioration des conditions de vie des populations.

5. Objectifs de recherche

5.1. L'objectif général

Cette recherche a pour objectif général, améliorer l'utilisation des batteries solaires en fonction des besoins énergétiques afin de maximiser l'autoconsommation et minimiser l'achat d'électricité au réseau.

5.2. Les objectifs opérationnels/spécifiques

Dans le but de clarifier et de structurer l'action, les objectifs spécifiques suivants ont été définis en appui sur l'objectif général :

- Comprendre le rôle de batterie solaire dans un système photovoltaïque
- Concevoir un système de gestion de batterie automatisé
- développer une application mobile système de gestion de batterie automatisée avec avertissement et alarme visualisé par application mobile.

6. Méthodologie

Ce travail repose sur la conception et la simulation d'un système de gestion de batterie solaire

Enfin, la méthodologie privilégie des composants simples et accessibles, afin de proposer une solution fiable, économique et adaptée aux réalités locales.

7. délimitation du travail

Afin de circonscrire le cadre de cette étude et d'en préciser les contours, les délimitations suivantes ont été établies :

7.1. Délimitation géographique

Ce travail est contextualisé pour la ville de Goma et, plus largement, pour l'Est de la République Démocratique du Congo. Les choix technologiques (disponibilité des composants, coûts, robustesse face aux coupures réseau) tiennent compte des réalités locales. Les résultats ne sauraient être généralisés à d'autres contextes sans adaptation préalable.

7.2. Délimitation temporelle

La recherche a été conduite sur une période équivalent à une année académique, dans le cadre d'un mémoire de Licence. Les tests expérimentaux ont été réalisés sur une durée de 72 heures continues en laboratoire, ce qui constitue une validation de concept mais ne permet pas d'évaluer le comportement du système sur le long terme (plusieurs mois ou années).

8. Structure du mémoire

Introduction : contexte, justification, problématique et objectifs

Chapitre 1 : État de l'art sur le système photovoltaïque et l'application mobile

Chapitre 2: Conception et réalisation d'un système de gestion de l'énergie basée sur une batterie

Ce chapitre vise à développer un prototype de système de gestion de batterie de façon qu'il soit possible de suivre le courant, la tension ainsi que la température de l'ensemble. Les batteries. L'état de la batterie est affiché sur un écran afin d'informer l'utilisateur et de l'orienter dans ses actions. L'expérience a été réalisée à l'aide de microcontrôleur NodemCU-ESP8626

Mais aussi développement d'une application de surveillance BMS App

L'application BMS App est programmée pour : configurer la batterie plomb acide, surveiller la tension, courant et la température de la batterie, surveiller le niveau de la batterie, protéger de la surchauffe, afficher toutes les informations réguler la tension

Chapitre 3 : Réalisation du prototype et de l'application

Conclusion générale : résumé, limites, perspectives

Chapitre 1. Etat de l'art sur le système photovoltaïque et l'application mobile

1.1. Introduction

L'énergie électrique est un vecteur indispensable aux activités humaines dans les pays développés et un facteur essentiel de développement pour les pays pauvres, c'est pour ça que le système d'exploitation de l'énergie électrique s'est développé avec une grande rapidité au cours de la deuxième moitié du XXème siècle jusqu'où il est devenu important dans toutes les branches de l'économie moderne [5]

Le réseau électrique de distribution est une partie essentielle pour l'alimentation en énergie électrique des différents consommateurs, ils sont prévus comme des infrastructures hautement critiques pour le développement industriel et économique des pays. Pour cela, les exigences essentielles attendues par les utilisateurs sont : stabilité, économie et surtout la continuité de service. Les réseaux, malgré tous les efforts déployés, sont souvent touchés par des délestages qui peuvent mettre en danger le matériel, le personnel et affectent la qualité de service. D'où la nécessité d'utiliser un module de gestion au niveau de batterie dans un système photovoltaïque autonome ou hybride destinés à limiter les dommages et à isoler rapidement la partie charge de la batterie afin d'éviter la propagation du défaut; c'est l'objet des protections.

1.1.1. Principe de l'effet photovoltaïque

Les modules photovoltaïques (PV) constituent la source d'énergie primaire du système. Ils sont l'interface qui capte le rayonnement solaire et initie le processus de conversion en électricité. [4]Le principe physique sous-jacent est l'effet photovoltaïque, découvert par Edmond Becquerel en 1839 [5].

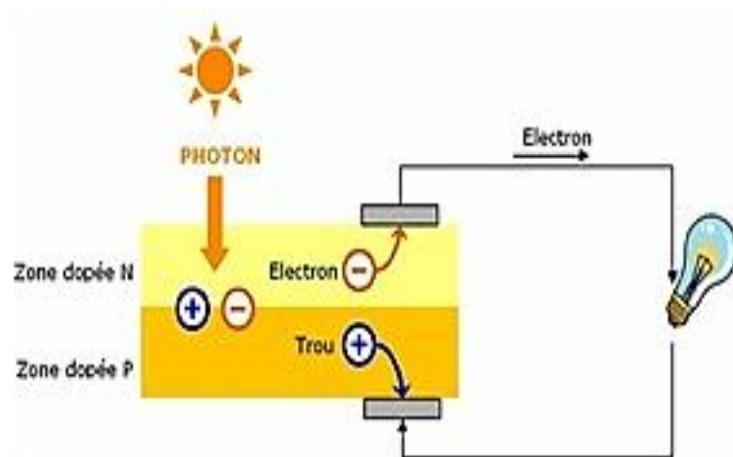


Figure 1 : principe de fonctionnement d'un système photos voltaïque [6]

1.1.2. Composants d'un système photovoltaïque autonome

Les cellules qui composent les panneaux sont principalement faites de silicium, un matériau Dans les applications photovoltaïques autonomes, l'énergie électrique du système est requise pendant la nuit ou pendant les heures d'obscurité. Il est donc nécessaire d'ajouter du stockage au système. On utilise généralement des batteries pour le stockage d'énergie.

L'onduleur utilise un générateur de fréquence interne pour obtenir la fréquence de sortie correcte, un régulateur pour la protection contre les surcharges dues au générateur photovoltaïque et les décharge excessive de la charge [4].

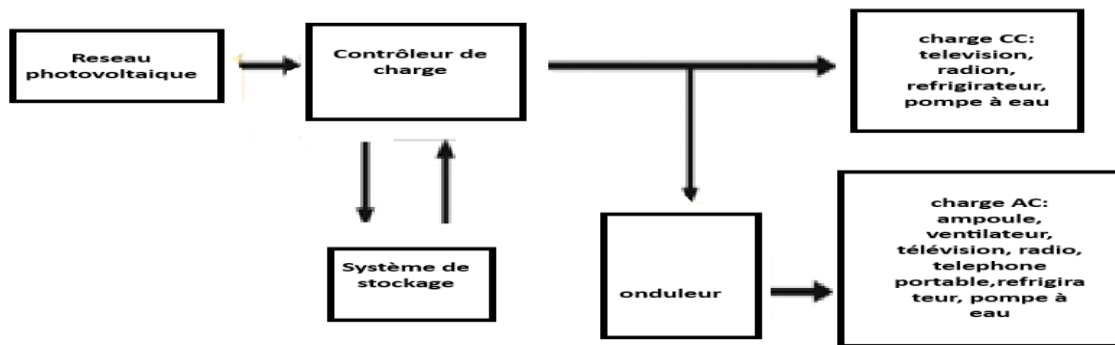


Figure 2 : Composant d'un système photovoltaïque autonome [4]

1.1.3. Technologie de panneau solaires

Monocristallin (Mono-Si): Fabriqué à partir d'un seul cristal de silicium pur. Cette structure homogène offre le rendement le plus élevé (20-23 % et plus) car les électrons circulent avec moins de résistance. Ils sont reconnaissables à leur couleur noire uniforme et aux coins arrondis des cellules. Ils sont plus performants dans des conditions de faible ensoleillement et ont une longévité légèrement supérieure. Leur coût de fabrication est plus élevé [6].

Poly cristallin (Poly-Si) : Fabriqué à partir de fragments de silicium fondus et moulés. Cette structure multi-cristaux est moins pure, créant des limites entre les cristaux qui gênent le mouvement des électrons, ce qui se traduit par un rendement inférieur (15-18 %). Ils sont reconnaissables à leur aspect bleuté et à leur texture scintillante. Ils sont moins chers à produire mais aussi moins performants par m² [6].

Couches minces (Thin-Film) : Il s'agit d'une technologie différente où une fine couche de matériau photovoltaïque (comme le Tellure de Cadmium - CdTe, le Silicium amorphe - a-Si, ou le CIGS) est déposée sur un substrat (verre, métal, plastique). Leurs avantages majeurs sont la flexibilité, la légèreté et une meilleure tolérance à la chaleur. Cependant, leur rendement est significativement plus bas (10-13 % pour les produits commerciaux) et ils

nécessitent une plus grande surface pour la même puissance. Ils se dégradent également plus vite [6].



Figure 3 : technologie de module photovoltaïque [6]

1.2. Systèmes photovoltaïques hybrides

1.2.1. Définition et architecture

les systèmes d'énergie hybrides combinent deux ou plusieurs sources d'énergie renouvelables, une ou plusieurs sources d'énergie conventionnelles. L'énergie renouvelable telle que la source photovoltaïque et l'éolien ne fournissent pas une puissance constante, mais en raison de leurs complémentarités leur combinaison fournit une alimentation électrique plus continue

production. [4] Les systèmes électriques hybrides sont généralement indépendants des grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les zones reculées. Le but d'un système hybride électrique est de produire autant d'énergie à partir de sources d'énergie renouvelables que possible assurant la demande de charge. [4]

Outre les sources d'énergie, un système hybride peut également intégrer un système de distribution DC ou AC, un système de stockage, des convertisseurs, des filtres et une option pour un système de gestion ou de supervision de charge. Tous ces composants peuvent être

connectés dans différentes architectures. Les sources d'énergies renouvelables peuvent être connectées au bus CC selon la taille du système [4]

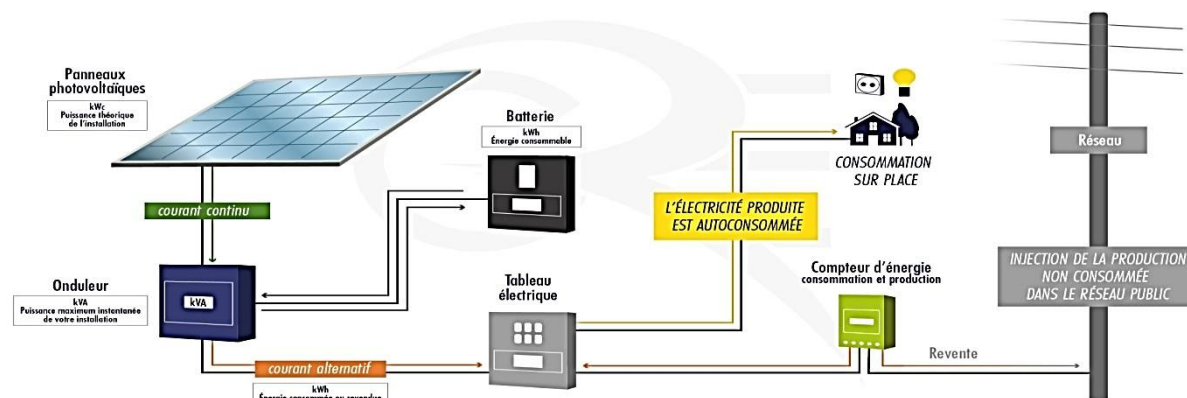


Figure 4 : système photovoltaïque hybride (solaire-réseau) [6]

1.2.2. Avantage et défis

a. Avantages

Compte tenu des ordres de grandeur, le remplacement des combustibles fossiles par des énergies renouvelables peut être significatif, mais ne peut qu'être partiel, pour des raisons variées : intermittence, coût, en effet, l'énergie solaire est une ressource relativement bien répartie géographiquement [7].

De plus on peut ajuster la taille des systèmes photovoltaïque et les adapter ainsi à des nombreuses applications. On peut donc énumérer entre autres, les avantages suivants d'une installation photovoltaïque :

- Caractère modulaire des panneaux photovoltaïques : ceci permet un montage simple et adaptable a des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatts au Mégawatts

- Cout de fonctionnement très faible : vu les entretiens réduits et le non nécessité du combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé
 - Qualités écologiques : le produit fini est non polluant, siliceux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est pas l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions
 - Un module photovoltaïque ne génère aucun déchet en fonctionnement, son coût de démantèlement est très faible et ses coûts d'exploitation sont quasi nuls. Étanche, il peut servir de couverture à un toit, sous réserve de bien maîtriser l'écoulement d'eau aux bords avec un montage adapté.
 - Ne dépend pas d'une seule source d'énergie.
 - Simple à utiliser
 - Efficacité, faible coût du cycle de vie des composants.
 - Besoins de stockage réduits
- b. Inconvénients :**
- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un cout très élevé
 - Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesels que pour de faibles demandes d'énergie en région isolés.
 - Les panneaux solaires sont tributaires des conditions météorologiques.
 - Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (accumulateurs) est nécessaire, le cout de l'installation est accru.

- Le stockage de l'énergie électrique pose encore des nombreux problèmes
- Par ailleurs, il sied de savoir que ce module sera aussi exposé aux rigueurs du climat et de l'environnement (variations de température, humidité, salinité...). Etant un assemblage fragile et sensible à la corrosion il convient de le protéger mécaniquement
- Plus complexe que les systèmes à source unique
- Coût d'investissement élevé par rapport aux générateurs diesel

1.2.3. Applications en contexte africain

La technologie hybride est capable et s'adapte à différentes échelles selon les besoins.

- **Autoconsommation Individuelle Résidentielle** : pour l'Indépendance énergétique et la résilience (avec option de secours lors de coupures de réseau si le système est prévu). Ici on peut avoir un système simple (Panneaux + onduleur, avec injection du surplus sur le réseau) qui peut être optimisé en remplaçant un onduleur par un onduleur hybride + batterie, visant une autonomie partielle (50-80 %) et une réduction drastique de la facture [8].
- **Autoconsommation Collective** : Une installation solaire de grande taille (ex. : sur le toit d'un immeuble, d'un supermarché) alimente plusieurs consommateurs finaux proches (ex. : appartements, boutiques voisines). Alors cela nécessite une structure juridique et commerciale complexe (régie, coopérative) pour répartir l'énergie produite entre les participants via le réseau public de distribution. Ce qui permet à ceux qui n'ont pas de toit (locataires, copropriétaires) de bénéficier de l'énergie solaire [8].
- **Installations Rurales et Isolées (Micro-réseaux ou "Mini-Grids")** : ces systèmes sont souvent hors-réseau (off-grid) ou avec un groupe électrogène de secours. La puissance de panneaux et la capacité de batteries sont surdimensionnées pour faire face à plusieurs jours d'autonomie sans soleil. Généralement elle est appliquée pour

l'électrification rurale, l'agriculture (pompage d'eau, irrigation), les stations de télécom, etc. [8].

1.3. Stockage d'énergie électrique

1.3.1. Rôle des batteries dans les systèmes photovoltaïques

Les batteries sont des dispositifs électrochimiques capables convertir l'énergie électrique dans un processus chimique réversible. Contrairement aux piles non rechargeables, les accumulateurs électrochimiques sont rechargeables et leur fonction principale au sein d'un système énergétique est de stocker de l'énergie électrique pour la restituer ultérieurement [4].

Le principe de fonctionnement est donc basé sur la propriété qu'ont certains composants chimiques d'accumuler une certaine quantité d'électricité en modifiant leur structure moléculaire, et ceci de manière réversible (charge et décharge) [4]. On appelle batterie, un ensemble d'accumulateur électrique relié entre eux en série ou en parallèle selon la capacité ou la tension voulue ou désirée. Pour une batterie, on parle souvent d'éléments ou de cellules [4].

1.3.2. Technologie de batteries : comparaison

Il existe sur le marché de nombreux types de batteries, dont la plupart font l'objet de recherche et de développements approfondis.

Dans les systèmes photovoltaïques, plusieurs type de batteries peuvent être utilisés : le plombacide, le nickelcadmium, le bromure de lithiumzinc, le chlorure de zinc, le sodium, batterie au soufre, au nickel hydrogène,...

Néanmoins il doit avoir certaines propriétés importantes comme une efficacité de charge décharge élevée, une faible autodécharge et une longue durée de vie sous charge et décharge cycliques [4].

Pour garantir la fiabilité et la durabilité des batteries utilisées dans le système photovoltaïque, des normes internationales ont été établies. La norme CEI 6142-2 :2013 définit les exigences générales et les méthodes d'essai pour les accumulateurs destinés aux applications solaires hors réseaux.

1.3.3. Etude des paramètres de la batterie plomb acide

Les batteries Plomb-Acide sont choisies pour leur disponibilité et leur coût réduit, mais nécessitent une gestion rigoureuse.

Caractéristiques électriques

- Tension nominale : 12 V.
- Capacité : exprimée en Ah (ampères-heures).
- Résistance interne influençant les pertes.

La capacité nominale et la durée de vie en cycle d'une batterie plomb acide doivent être évaluées selon les protocoles de la CEI61427 qui impose des cycles type de charge et décharge représentatif du fonctionnement solaire [9] [10]

Estimation de l'état de charge (SoC)

- Méthode du comptage de Coulomb : intégration du courant entrant/sortant.
- Indique l'énergie restante disponible.

Surveillance de l'état de santé (SoH)

- Comparaison de la résistance interne actuelle avec celle d'une batterie neuve.
- Permet d'évaluer la durée de vie restante.

Seuils de sécurité (tension, courant, température)

- Tension : éviter surcharge ($>14,4$ V) et décharge profonde ($<10,5$ V). [9]
- Courant : limiter les surintensités pour protéger les cellules.
- Température : surveiller pour éviter la surchauffe (>40 °C).

1.4. Système de gestion de batterie (BMS)

1.4.1. Définition et fonction d'un BMS

Le BMS est un système électronique et logiciel dont la mission principale est de contrôler, protéger et optimiser le fonctionnement des batteries. Il surveille en temps réel les grandeurs électriques (tension, courant puissance), thermiques (température), et énergétiques (état de charge, état de santé) afin d'assurer une utilisation sûre et durable du stockage. En effet, toute défaillance non détectée (surcharge, décharge profonde, surchauffe) peut endommager irrémédiablement la batterie et entraîner une perte d'énergie ou des risques d'incendie [9].

Ainsi, un BMS agit comme un cerveau énergétique : il mesure, analyse, décide et agit automatiquement pour maintenir le système dans une zone de fonctionnement optimale [9].

1.4.2. Architecture typique d'un BMS

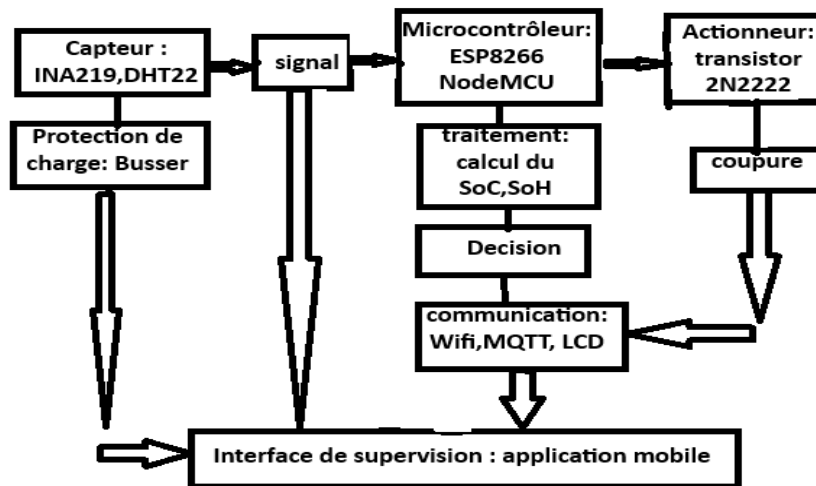


Figure 5 : architecture du BMS

1.4.3. Méthodes d'estimation du SoC et SoH

Dans cette étude, nous nous appuyons sur la théorie des systèmes de gestion de batterie (BMS), appliquée aux batteries plomb acide. Pour garantir une charge efficace et prolonger la durée de vie de ces batteries, on utilise généralement deux méthodes : la charge à courant constant (CC) et la charge à tension constante (CV). Ces techniques permettent de maintenir la batterie dans sa zone de fonctionnement optimale et d'assurer de bonnes performances sur le long terme. [3]

État de charge (SoC) : L'état de charge (SoC) correspond au pourcentage d'énergie disponible dans la batterie à un instant donné. Il indique combien d'énergie reste stockée par rapport à sa capacité totale. La méthode la plus courante pour l'estimer est le comptage de Coulomb, qui consiste à mesurer le courant qui entre ou sort de la batterie et à l'intégrer sur une durée donnée : [3]

$$SoC(t) = SoC(0) + \frac{1}{Cn} \int_0^t I(T) dT \times 100$$

Équation 1 : calcul de l'état de charge de la batterie

- SoC(0) : état de charge initial
- Cn : capacité nominale de la batterie
- I(T) : courant mesuré au cours du temps

Ainsi, le SoC donne une estimation de l'énergie restante de la batterie.

État de santé (SoH) : L'état de santé (SoH) reflète la condition générale de la batterie et sa capacité à fonctionner correctement par rapport à une batterie neuve. Il est souvent calculé en comparant la résistance interne actuelle avec celle d'une batterie neuve et celle en fin de vie [3] :

$$SoH = \frac{R_n - R_i}{R_n - R_{EoL}} \times 100$$

Équation 2 : calcul de l'état de santé de la batterie

- R_n : résistance interne d'une batterie neuve
- R_i : résistance interne mesurée
- R_{EoL} : résistance interne en fin de vie

Pour mesurer R_i , on applique une impulsion électrique et on observe la réponse en tension et en courant. Grâce à la loi d'Ohm, on peut déterminer la résistance interne réelle :

$$Ri = \frac{V_B - V_{B0}}{I_B - I_{B0}}$$

Équation 3 : calcul de la résistance interne

- V_B : tension appliquée
- I_B : courant mesuré
- V_{B0}, I_{B0} : tension et courant réels de la batterie

1.5. Internet des Objets (Iot) dans la gestion énergétique

1.5.1. Concepts de base de l'IoT

L'IoT désigne l'ensemble des objets physiques capables de collecter, transmettre et recevoir des données via Internet, sans intervention humaine directe.

Les dispositifs IoT, également appelés « objets intelligents », englobent un large éventail d'applications, allant des simples appareils domotiques comme les thermostats intelligents, aux vêtements connectés tels que les montres intelligentes et les vêtements équipés de puces RFID, en passant par des machines industrielles complexes et des systèmes de transport. Les technologues envisagent même des « villes intelligentes » entières reposant sur les technologies IoT.(ibm.com, 2025b)

1.5.2. IoT pour la surveillance à distance

L'Internet des objets (IoT) permet à ces appareils intelligents de communiquer entre eux et avec d'autres appareils connectés à Internet. À l'instar des smartphones et des passerelles, il crée un vaste réseau d'appareils interconnectés capables d'échanger des données et d'effectuer diverses tâches de manière autonome. (ibm.com, 2025b) Dans le cas de notre système, chaque batterie est un objet intelligent capable de transmettre en temps réel ses mesures de température, d'humidité, de courant de la tension de la puissance, et de recevoir des commandes depuis l'application.

Pour assurer cette communication bidirectionnelle, le protocole MQTT a été retenu pour sa légèreté, sa stabilité (mqtt.org, 2025). Contrairement au Web Socket, qui requiert une connexion plus constante et une infrastructure serveur plus lourde, MQTT permet une

communication fluide et efficace entre batterie (via le NodeMCU) et le serveur, même en cas de débit réseau variable, ce qui permet une communication asynchrone, rapide et fiable entre le système BMS et l'application mobile.



Figure 6 : communication à distance IoT [5]

1.5.3. Applications mobiles de supervision

Une application mobile, souvent abrégée en "APP", est un logiciel conçu spécifiquement pour être exécuté sur des appareils mobiles tels que les smartphones et les tablettes (v-labs.fr, 2025).

Ces applications peuvent être téléchargées et installées via des plateformes de distribution d'applications, comme l'App Store d'Apple ou Google Play Store pour Android.

1. Caractéristiques Principales :

- **Plateformes Ciblées** : Les applications mobiles peuvent être développées pour différentes plateformes, notamment iOS (Apple), Android (Google), ou des plateformes multiplateformes.
- **Interface Utilisateur** : Elles sont généralement conçues pour offrir une interface conviviale et adaptée à l'écran tactile, optimisant ainsi l'expérience utilisateur.
- **Fonctionnalités** : Les applications mobiles peuvent offrir une large gamme de fonctionnalités, allant des jeux, des réseaux sociaux, et des services de messagerie, à des outils de productivité et des applications de gestion.

- Accès aux Fonctionnalités de l'Appareil : Elles peuvent interagir avec les fonctionnalités matérielles des appareils, telles que la caméra, le GPS, et le stockage local, pour offrir des expériences enrichissantes.
- Connectivité Internet : Bien que certaines applications puissent fonctionner hors ligne, beaucoup nécessitent une connexion Internet pour accéder à des données en temps réel ou pour interagir avec des services cloud.
- Mises à Jour : Les applications mobiles peuvent être mises à jour régulièrement pour ajouter de nouvelles fonctionnalités, corriger des bugs ou améliorer la sécurité.

Types d'applications Mobiles :

- Applications Natives : Développées spécifiquement pour une plateforme (iOS ou Android) en utilisant les langages et les outils de développement de cette plateforme.
- Applications Hybrides : Combinant des éléments d'applications natives et web, elles peuvent fonctionner sur plusieurs plateformes à partir d'une seule base de code.
- Applications Web Mobiles : Accessibles via un navigateur web, elles ne nécessitent pas de téléchargement et sont optimisées pour les appareils mobiles. Les applications mobiles jouent un rôle essentiel dans la vie quotidienne, offrant aux utilisateurs des outils et des services variés, facilitant l'accès à l'information et améliorant l'interaction avec le monde numérique.



Figure 7: Application Mobile [6]

Dans ce présent travail, nous voulons faciliter la gestion des batteries de particulier, ce qui leurs permettre de consulter l'état de leur batterie et d'obtenir les alertes de sur chauffe n'importe où et quand ils le veulent via leurs smartphones.

En utilisant la technologie React Native efficace pour aider le particulier d'avoir de système photovoltaïque incorporant un système d'alerte et de Suivis des paramètres de batterie via une Application Mobile.

Les composants intégrés dans l'application Mobile et sur la batterie doivent avoir comme **fonctionnalités :**

Authentification et gestion des utilisateurs : Dans cette fonctionnalité, il sera question de :

- Permettre aux utilisateurs de se connecter au système via l'application Mobile.
 - Gérer les comptes utilisateurs (Création, Suppression, Mise à jour, etc.)
- Configuration des Comptes Utilisateurs : Permettre aux Utilisateur de configurer leurs Comptes
- Connexion à leur batterie Synchronisation des données de batterie avec leurs interfaces
 - Sauvegarde des Données. Gestion des Notifications : cette fonctionnalité permet aux Utilisateurs de gérer les Notifications Via l'Application Mobile
 - Configuration de batterie : Permettre aux Utilisateur de configurer leurs batteries
 - Allumage
 - Synchronisation des données de batterie avec leurs interfaces
 - Ajustement des Paramètres

Ces fonctionnalités permettent une gestion complète et efficace de gestion de batteries, en offrant aux utilisateurs un système centralisé leur permettant de suivre tous les paramètres de l'état de leur batterie

1.6. Conclusion partielle

Avant de mettre en place un système de gestion avec comme fonction la protection et la surveillance des batteries a plomb acide /Gel dans un système PV, il est essentiel de bien connaître l'architecture matérielle des cellules photovoltaïques et des batteries. Cette structure technique, à la fois fiable et adaptable, constitue la fondation sur laquelle reposera tout le système de pilotage énergétique abordé dans le chapitre suivant. Chaque élément doit être choisi en fonction de l'objectif principal qui est d'optimiser l'utilisation des batteries solaires en fonction des besoins énergétiques afin de maximiser l'autoconsommation et minimiser l'achat d'électricité au réseau

CHAPITRE 2 : ÉTUDE ET CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE GESTION DES BATTERIES (BMS)

Introduction

Le développement rapide des systèmes de stockage d'énergie et la croissance des énergies renouvelables, notamment solaire, imposent une gestion plus intelligente et plus efficace des batteries. Ces dernières constituent le cœur des systèmes autonomes et hybrides, mais leur performance et leur durée de vie dépendent étroitement de la qualité du dispositif chargé de les superviser : le Battery Management System (BMS) [1].

Après une analyse comparative des différentes architectures possibles, nous avons retenu une solution duale associant un Arduino Uno pour la logique de contrôle et un NodeMCU esp8266 pour la connectivité IoT. Ce choix détaillé dans la section 2.3.1, garantit une séparation claire entre les fonctions critique de sécurité et les fonctions de communication, offrant ainsi une communication plus solide face aux aléas du réseau, conformément aux exigences du contexte local

Dans le contexte de la République Démocratique du Congo, où l'accès à une alimentation électrique fiable reste un défi majeur, l'optimisation des systèmes photovoltaïques équipés de batteries est une nécessité économique et sociale. Un BMS adapté doit non seulement assurer les fonctions classiques de surveillance et de protection, mais aussi s'intégrer dans une logique d'intelligence embarquée et de connectivité accessible, pour offrir une solution durable, fiable et adaptée aux réalités locales [2].

Contrairement à une approche purement applicative, ce travail se concentre sur la conception du système embarqué intelligent lui-même. L'application mobile n'est ici considérée que comme une interface de visualisation périphérique, un canal de communication parmi d'autres (comme l'écran LCD). La valeur ajoutée réside dans l'intelligence de traitement et de décision locale du microcontrôleur, qui fonctionne de manière autonome.

Ce chapitre présente donc la conception complète d'un tel système. Il s'articule autour de quatre axes principaux : la définition précise des besoins et des spécifications (2.1), l'élaboration de l'architecture globale du système (2.2), la conception détaillée de la partie matérielle (2.3), et enfin, le cœur intellectuel du projet : la conception logicielle embarquée qui confère au système ses capacités d'analyse, de décision et de communication (2.4).

2.1. Spécifications du Système et Cahier des Charges

2.1.1. Analyse des Besoins Contextuels

Le besoin découle d'un double constat : l'instabilité du réseau électrique national (SNEL) et le potentiel solaire sous-exploité. Les utilisateurs finaux (ménages, petites entreprises, institutions) ont besoin d'une solution qui :

- Prolonge la durée de vie des batteries Plomb-Acide, dont le coût de remplacement est élevé.
- Garantisse une autonomie énergétique maximale en optimisant les cycles de charge/décharge.
- Offre une visibilité et un contrôle simples sur l'état du système énergétique, même à distance.

2.1.2. Exigences Fonctionnelles

Le système doit être capable de :

- Surveiller en temps réel les paramètres vitaux : tension (V), courant (A) et température (°C) de la batterie.
- Calculer et estimer des indicateurs avancés : l'État de Charge (State of Charge - SoC) et l'État de Santé (State of Health - SoH).
- Protéger automatiquement la batterie contre les dangers (surchauffe, surcharge, décharge profonde) en commandant des actionneurs (ex: relais).

- Transmettre les données vers une interface de supervision distante via une connexion Wi-Fi.
- Fournir une interface locale (écran LCD) pour un suivi sur place.

2.1.3. Exigences Techniques et Contraintes

Pour être viable localement, la conception doit respecter des contraintes strictes :

- **Coût maîtrisé** : Utilisation de composants électroniques standards, disponibles et abordables.
- **Simplicité de mise en œuvre** : Câblage réduit et conception modulaire pour faciliter la maintenance.
- **Robustesse** : Résistance aux variations de tension et aux conditions climatiques tropicales (chaleur, humidité).
- **Autonomie** : Le système de gestion doit consommer très peu de l'énergie qu'il est censé préserver.

Principales Spécifications Techniques du BMS

Élément	Spécification
Type de batterie cible :	Plomb-Acide
Tension nominale :	12 V DC
Plage de mesure courant :	0 à 30 A
Précision de mesure :	±1% (courant), ±0.5°C (température)
Connectivité :	Wi-Fi (802.11 b/g/n)
Alimentation du BMS :	5V régulé, prélevé de la batterie elle-même

2.2. Architecture Globale du Système

L'architecture définit l'organisation des blocs fonctionnels et leurs interactions. Elle est conçue pour séparer clairement les responsabilités : acquisition, traitement, action et communication.

2.2.1. Vue d'Ensemble et Diagramme des Blocs Fonctionnels

Le système repose sur une architecture modulaire centrée sur un microcontrôleur, suivant le paradigme classique *sense* → *Think* → *Act* → *Communicate* des systèmes cyber-physiques.

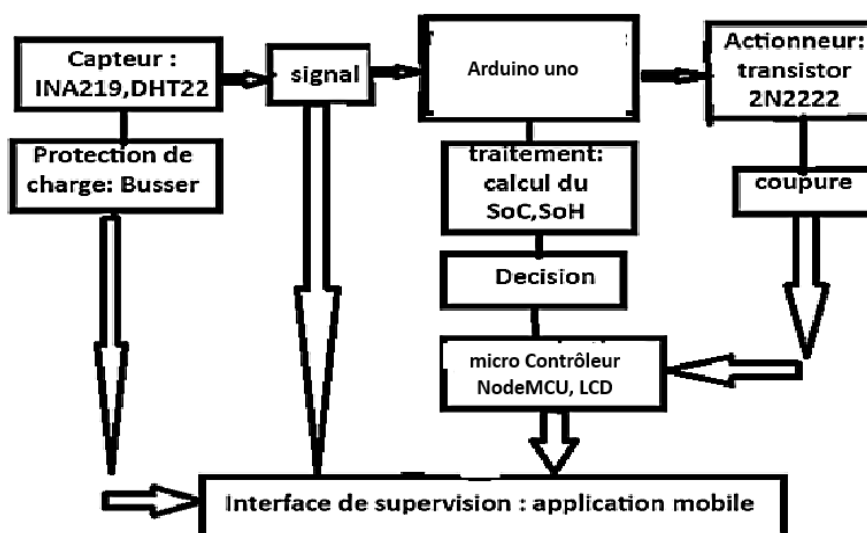


Figure 8: Diagramme des blocs fonctionnels du système BMS proposé

Séparation des préoccupations : Cette architecture distingue clairement trois couches :

- **Couche Physique/Senseurs :** Interface avec le monde réel (batterie).
- **Couche Intelligence Embarquée (Cœur du projet) :** Traitement, algorithme, décision AUTONOME.
- **Couche Interface Utilisateur :** Canaux de sortie (LCD, Wi-Fi vers application).

Cette séparation garantit que les fonctions vitales de protection (couche 2) sont totalement indépendantes de la connectivité réseau.

2.2.2. Flux de Données et de Contrôle

Le flux est cyclique et géré par le microcontrôleur :

- **Acquisition** : Lecture périodique des valeurs brutes des capteurs.
- **Traitement** : Conversion, filtrage, et calcul des indicateurs (SoC, SoH).
- **Décision** : Comparaison des valeurs avec des seuils prédéfinis.
- **Action** :
 - Locale : Activation d'un buzzer, coupure par relais si nécessaire.
 - Communication : Envoi des données traitées et des alertes via Wi-Fi.
- **Visualisation** : Affichage local sur LCD et transmission vers l'application distante.

Cette architecture garantit que la protection est prioritaire et locale (étape 4), fonctionnant même en l'absence de connexion réseau, tandis que la supervision à distance est un service ajouté de confort et de diagnostic.

2.3. Conception Matérielle du Module BMS

La conception matérielle du BMS repose sur le choix judicieux de composants électroniques capables de remplir les fonctions d'acquisition, de traitement, de protection et de communication définies dans le cahier des charges. Trois critères ont guidé cette sélection :

- La disponibilité locale : les composants doivent être trouvables chez les fournisseurs de Goma pour garantir la reproductibilité du système ;
- Le coût maîtrisé : l'objectif est de proposer une solution accessible (< 30 USD) ;
- La robustesse : les composants doivent supporter les conditions tropicales (chaleur, humidité, variations de tension).

Cette section détaille chaque composant selon une structure systématique : présentation du composant, justification du choix, et caractéristiques techniques essentielles.

2.3.1. Combinaison Arduino Uno + NodeMCU ESP8266

Après une phase d'analyse comparative nous avons fait le choix stratégique d'une architecture combinant deux microcontrôleurs plutôt qu'une solution mono puce. Ce choix est en réalité très adapté à la contrainte de des exigences du contexte africain

a) Microcontrôleur : Arduino Uno

Présentation

L'Arduino Uno est une carte de développement open-source basée sur le microcontrôleur ATmega328P (Atmel/Microchip). Elle est devenue un standard dans le monde de l'électronique embarquée grâce à sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. La carte comprend 14 broches d'entrées/sorties numériques (dont 6 PWM), 6 entrées analogiques, un quartz 16 MHz, une connexion USB, un jack d'alimentation et un bouton de reset. [12]

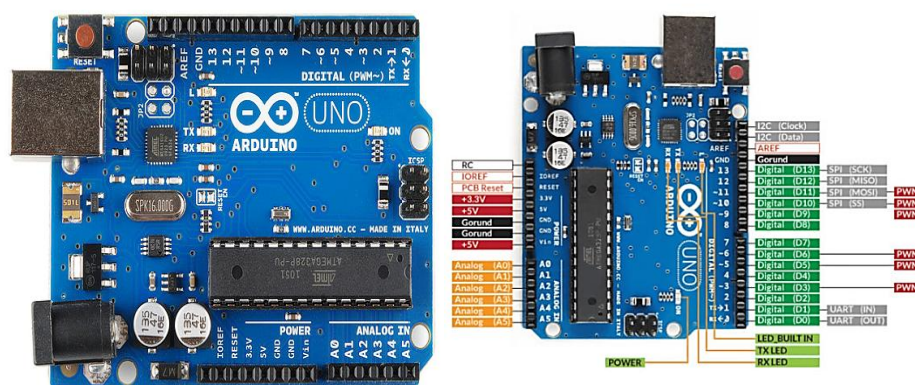


Figure 9 : Arduino uno [12]

Choix du composant

Bien que l'Arduino Uno ne dispose pas de connectivité Wi-Fi native, il a été considéré dans cette étude pour plusieurs raisons [12] :

- Disponibilité exceptionnelle : l'Arduino Uno est le microcontrôleur le plus répandu chez les revendeurs locaux à Goma.
- Robustesse éprouvée : des milliers de projets l'ont validé dans toutes les conditions.

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

- Simplicité de programmation : l'environnement Arduino IDE est accessible aux débutants.
- Nombreuses bibliothèques : tous les capteurs choisis (INA219, DHT22, LCD I2C) disposent de bibliothèques prêtes à l'emploi.
- Tension de fonctionnement 5V : compatible directement avec la plupart des capteurs sans adaptation de niveau.

Cependant, l'absence de Wi-Fi intégré impose l'ajout d'un module externe (ESP8266 en tant que shield ou module série) pour la connectivité IoT. Dans notre prototype final, nous avons retenu le NodeMCU ESP8266 pour son intégration native, mais l'Arduino Uno reste une alternative valable pour une version non connectée ou pour les premiers développements.

Caractéristiques techniques

Tableau 1 : caractéristique arduino [12]

Caractéristique	Valeur
Microcontrôleur	ATmega328P
Fréquence	16 MHz
Mémoire Flash	32 Ko (dont 0.5 Ko pour bootloader)
SRAM	2 Ko
EEPROM	1 Ko
Tension d'alimentation	7-12V (recommandée), 5V via USB
Tension de fonctionnement	5V
Courant par broche I/O	40 mA max
Courant total	200 mA max
Entrées analogiques	6 (10 bits)
Entrées/sorties numériques	14 (dont 6 PWM)
Interface USB	USB-B
Température fonctionnement	-40°C à +85°C
Coût approximatif (Goma)	20 000 - 25 000 CDF

b) Microcontrôleur : NodeMCU ESP8266

Présentation

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

Le NodeMCU ESP8266 est une carte de développement basée sur le microcontrôleur ESP8266EX du fabricant Expressif. Il intègre un processeur 32 bits cadencé à 80 MHz (overclockable à 160 MHz), une mémoire Flash de 4 Mo, et surtout un module Wi-Fi complet compatible 802.11 b/g/n [13].

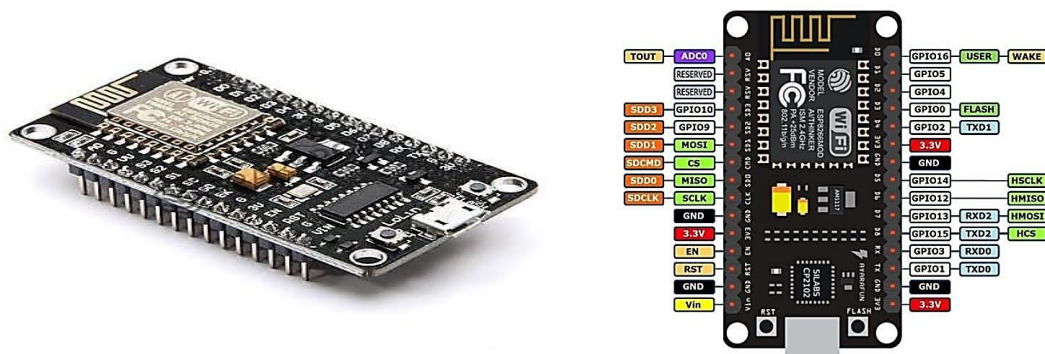


Figure 10 : Esp8266 NodeMCU [13]

Choix du composant

Ce composant a été retenu pour les raisons suivantes :

- Connectivité native : contrairement à un Arduino Uno qui nécessiterait un shield Wi-Fi additionnel, l'ESP8266 intègre tout le nécessaire, réduisant coût et complexité.
- Communauté et support : l'environnement Arduino IDE le supporte nativement, avec des milliers de bibliothèques disponibles.
- Coût : son prix (environ 8-10 USD à Goma) le rend accessible.
- Performance suffisante : sa puissance de calcul permet d'exécuter les algorithmes d'estimation du SoC et de gérer la pile MQTT sans latence.
- Consommation maîtrisée : il dispose de modes veille (deep-sleep) permettant de réduire sa consommation à quelques μA .

Caractéristiques techniques de Esp8266 NodeMCU [13]

Tableau 2 : caractéristique NodeMCU ESP8266 [13]

Caractéristique	Valeur
Microcontrôleur	Tensilica L106 32 bits

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

Fréquence	80 MHz (160 MHz max)
Mémoire Flash	4 Mo
SRAM	64 Ko
Wi-Fi	802.11 b/g/n, 2.4 GHz
Tension d'alimentation	5V (via USB) ou 3.3V (régulateur interne)
Courant en fonctionnement	70-80 mA
Courant en veille	< 20 µA (deep sleep)
GPIO disponibles	11 (dont I2C, SPI, UART, PWM)
Température de fonctionnement	-40°C à +125°C

Justification technique du choix dual

Plusieurs raisons justifient ce choix :

- L'Arduino se concentre exclusivement sur les tâches critiques : lecture des capteurs, calcul en temps réel, décision de protection, le NodeMCU quant à lui gère toute la complexité de pile réseau sans risque d'interférer avec la boucle de contrôle
- Dans le contexte de Goma, la coupure de connexion internet est fréquente. Avec cette architecture, une panne du wifi ou un blocage du NodeMCU n'affecte en rien la protection de la batterie, l'Arduino continue de surveiller les seuils de commande du relais et d'afficher l'information sur l'écran LCD. L'utilisateur perd la supervision à distance mais pas la sécurité
- L'Arduino Uno est reconnue pour sa simplicité, il fonctionne de manière déterministe sans système d'exploitation. Le NodeMCU, bien que fiable, peut parfois rencontrer des problèmes liés à la pile wifi. L'isoler garantit que le BMS reste opérationnel 24h/24
- Cette architecture ouvre la voie à des évolutions futures : on pourrait remplacer le NodeMCU par un module 4G pour les zones sans wifi, ou ajouter un second Arduino pour gérer plusieurs batteries sans tout reprogrammer

Note : les deux microcontrôleurs communiquent par la liaison série, l'Arduino joue le rôle maître, il envoie toutes les données mesurées et les états d'alarme. Le NodeMCU reçoit ces données et les publie sur le broker MQTT.

2.3.2. Capteur de Courant et Tension : INA219

Présentation

L'INA219 est un circuit intégré de Texas Instruments spécialisé dans la mesure de courant et de tension. Il combine un amplificateur de shunt, un convertisseur analogique-numérique (ADC) 12 bits et une interface de communication I2C [14].

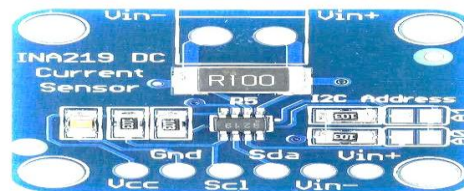


Figure 11 :INA219 [14]

Choix du composant

Plusieurs raisons justifient ce choix:

- Mesure bidirectionnelle : l'INA219 mesure aussi bien le courant de charge (positif) que de décharge (négatif), essentiel pour le comptage de Coulomb.
- Précision : avec une résolution de 0.5 mA et une précision typique de $\pm 1\%$, il garantit une estimation fiable du SoC.
- Simplicité d'interface : la communication I2C ne nécessite que deux fils (SDA, SCL) et permet de connecter plusieurs capteurs sur le même bus.
- Faible encombrement : le module prêt à l'emploi (type "break out board") se câble directement sur la carte d'essai.
- Calcul intégré : il fournit directement la puissance ($P = V \times I$) sans calcul supplémentaire par le microcontrôleur.

Caractéristiques techniques

Figure 12 : Tableau caractéristique INA219 [14]

Caractéristique	Valeur
Tension d'alimentation	3.3V - 5V
Tension de bus mesurable	0 - 26 V
Plage de courant (selon shunt)	± 3.2 A (shunt 0.1Ω) ou ± 32 A (shunt 0.01Ω)
Résolution ADC	12 bits
Précision typique	$\pm 1\%$
Courant de repos	1 mA
Interface	I2C (adresse configurable : 0x40 à 0x4F)
Fréquence I2C	jusqu'à 3.4 MHz
Dimensions (module)	20 × 20 mm environ

2.3.3. Capteur de Température et Humidité : DHT22

Présentation

Le DHT22 (ou AM2302) est un capteur numérique de température et d'humidité relative. Il utilise un capteur capacitif d'humidité et une thermistance pour mesurer l'air ambiant, avec un circuit de conditionnement intégré délivrant un signal numérique sur un bus mono-fil propriétaire [15].



Figure 13 : DHT22 [15]

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

Choix du composant

Les motivations de ce choix sont :

- Précision suffisante : avec $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ sur la température, il permet une surveillance fiable des risques de surchauffe.
- Plage de mesure adaptée : il couvre largement les températures rencontrées à Goma (0°C à 50°C).
- Coût modique : environ 3-4 USD, très abordable.
- Robustesse : encapsulé, il résiste à l'humidité ambiante.
- Bibliothèques disponibles : de nombreuses bibliothèques Arduino simplifient son utilisation.

Caractéristiques techniques

Tableau 3 : caractéristique technique DHT22 [15]

Caractéristique	Valeur
Tension d'alimentation	3.3V - 5.5V
Courant maximal	2.5 mA (pendant mesure)
Plage température	-40°C à $+80^{\circ}\text{C}$
Précision température	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
Résolution température	0.1°C
Plage humidité	0% à 100% HR
Précision humidité	$\pm 2\%$ HR (de 0% à 100%)
Résolution humidité	0.1% HR
Temps de réponse	< 5 secondes
Interface	bus 1-wire (protocole propriétaire)
Période d'échantillonnage	≥ 2 secondes

2.3.4. Régulateur de Tension : L7805CV

Présentation

Le L7805CV est un régulateur de tension linéaire de la famille 78xx, capable de fournir une tension de sortie stable de 5V à partir d'une tension d'entrée comprise entre 7V et 25V. Il est conditionné dans un boîtier TO-220 permettant une dissipation thermique efficace.



Figure 14 : régulateur L7805CV

Choix du composant

Ce régulateur a été sélectionné pour :

- Simplicité d'utilisation : aucun composant externe complexe n'est nécessaire (quelques condensateurs suffisent).
- Disponibilité : c'est le régulateur le plus courant chez les revendeurs locaux.
- Robustesse : il intègre des protections thermiques et contre les court-circuits.
- Compatibilité : il alimente parfaitement l'ESP8266 et les capteurs en 5V à partir de la batterie 12V.
- Coût négligeable : moins de 1 USD.

Caractéristique technique du régulateur L7805CV

Tableau 4 : caractéristique régulateur

Caractéristique	Valeur
Tension d'entrée	7V - 25V DC

Tension de sortie	5V \pm 2%
Courant de sortie max	1.5 A (avec dissipateur)
Chute de tension (dropout)	2V typique
Régulation de ligne	0.1%
Régulation de charge	0.5%
Protection	Thermique, court-circuit, surcharge
Température fonctionnement	0°C à +125°C
Conditionnement	TO-220

2.3.5. Relais de Puissance : SSR (Solid State Relay)

Présentation

Un relais statique (SSR) est un interrupteur électronique sans pièce mécanique, utilisant des semi-conducteurs (thyristors, triacs ou MOSFET) pour commuter un circuit de puissance. Le modèle retenu supporte 10A sous 5V de commande [16].



Figure 15 : transistor [16]

Choix du composant

Le choix d'un SSR plutôt qu'un relais électromécanique classique se justifie par [16] :

- Longévité : absence de contacts mécaniques, pas d'usure, durée de vie quasi illimitée.
- Silence : fonctionnement sans claquement audible.
- Vitesse : temps de commutation < 1 ms, contre 5-15 ms pour un relais mécanique.

- Compatibilité : commande directe par sortie logique 5V de l'ESP8266.
- Sécurité : isolation galvanique entre commande et puissance.

Caractéristiques techniques

Tableau 5 : caractéristique relais [16]

Caractéristique	Valeur
Tension de commande	3V - 5V DC
Courant de commande	5 - 15 mA
Tension de commutation max	60V DC / 220V AC
Courant de commutation max	10 A
Résistance à l'état passant	< 0.1 Ω
Temps de réponse	< 1 ms
Isolation	$\geq 1500V$
Température fonctionnement	-30°C à +80°C

2.3.6. Avertisseur Sonore : Buzzer Actif

Présentation

Un buzzer actif est un transducteur piézoélectrique intégrant un oscillateur. Il émet un son continu de fréquence fixe (généralement 2-3 kHz) lorsqu'il est alimenté en 5V.



Figure 16 : Buzzer actif

Choix du composant

Le buzzer actif a été préféré au buzzer passif car :

Simplicité : il suffit de l'alimenter pour qu'il sonne (pas besoin de signal PWM).

Efficacité : son niveau sonore (> 85 dB) est suffisant pour alerter dans un environnement domestique.

Coût : très faible (environ 1-2 USD).

Réactivité : alerte immédiate en cas de défaut critique.

Caractéristiques techniques

Tableau 6 : caractéristique buzzer

Caractéristique	Valeur
Tension nominale	5V DC
Courant	20 - 30 mA
Fréquence sonore	2300 Hz \pm 300 Hz
Niveau sonore	\geq 85 dB à 10 cm
Température fonctionnement	-20°C à +70°C

2.3.7. Interface de Visualisation Locale : Écran LCD

Présentation

L'écran LCD 20x4 (20 caractères sur 4 lignes) est équipé d'un adaptateur I2C (généralement un circuit PCF8574) qui réduit le nombre de broches nécessaires de 10 à 2 (SDA et SCL).



Figure 17 : LCD

Choix du composant

Les raisons de ce choix :

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

- Redondance critique : en cas de panne Wi-Fi, l'utilisateur peut toujours lire les informations essentielles sur place.
- Lisibilité : 4 lignes permettent d'afficher simultanément tension, courant, température et SoC.
- Simplicité de câblage : l'interface I2C libère des broches GPIO pour d'autres usages.
- Consommation : rétroéclairage commutable par logiciel pour économiser l'énergie.
- Robustesse : technologie éprouvée, insensible aux perturbations électromagnétiques.

Caractéristiques techniques

Caractéristique	Valeur
Tension d'alimentation	5V DC
Courant (rétroéclairage allumé)	100 - 150 mA
Courant (rétroéclairage éteint)	< 5 mA
Interface	I2C (adresse : 0x27 ou 0x3F)
Nombre de caractères	20 × 4 = 80
Dimensions	environ 98 × 60 mm
Température fonctionnement	0°C à +50°C

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

Ainsi avec le logiciel Proteus la conception se présente comme suit :

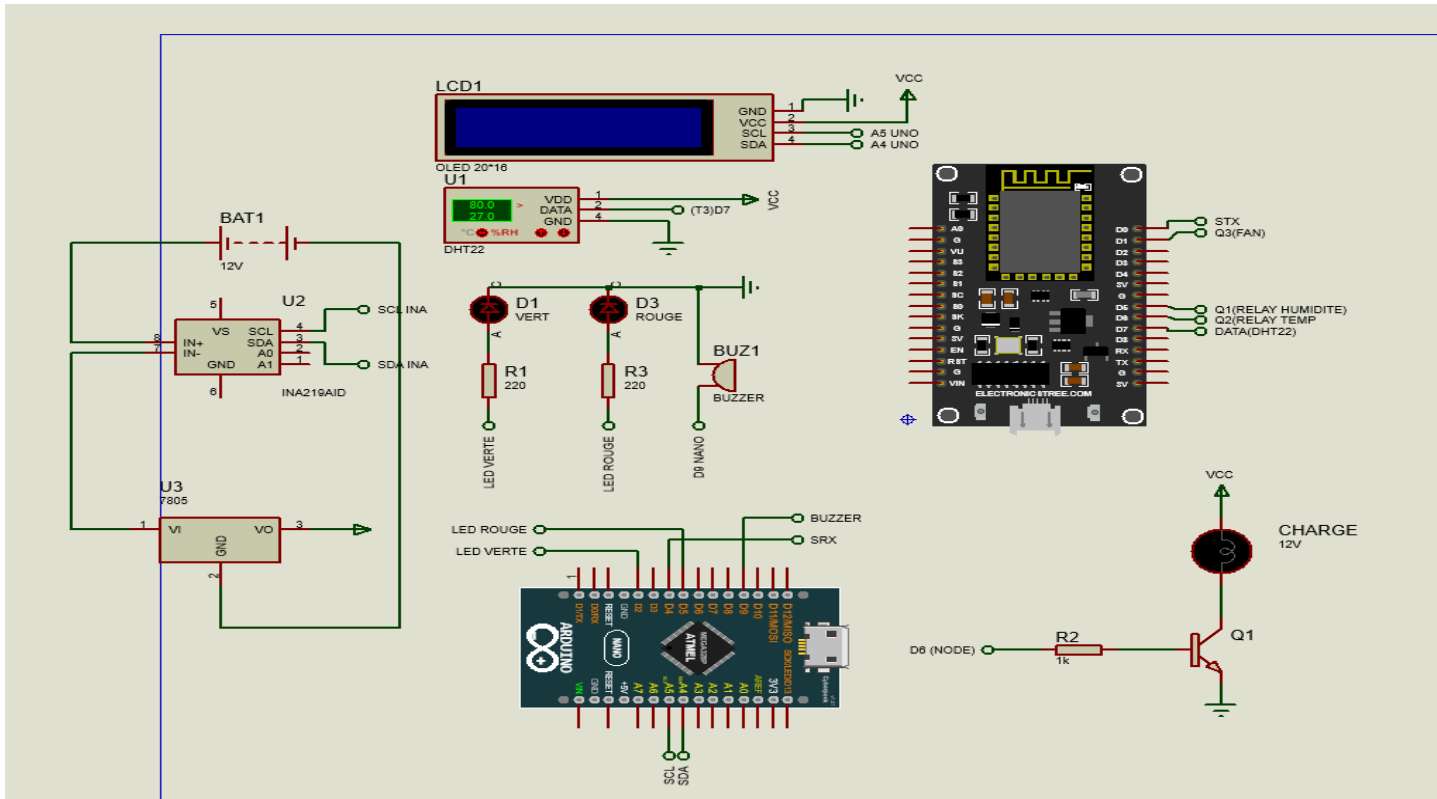


Figure 18 : image de la conception du BMS proposer

2.3.8. Conception mécanique du boîtier de protection

Parallèlement à la conception électronique, nous avons mené une réflexion sur l'intégration mécanique du système. L'objectif est de protéger les composants tout en assurant une utilisation pratique et sécurisée dans un environnement domestique.

a) Cahier des charges mécanique

Le futur boîtier devra satisfaire les exigences suivantes :

- Protection mécanique : résisté aux chocs légers, à la poussière et à l'humidité (indice de protection minimal IP54) ;
- Sécurité électrique : isoler les parties sous tension (12V et éventuellement 220V côté charge) et éviter tout contact accidentel ;

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

- Gestion thermique : dissiper la chaleur du régulateur L7805 (jusqu'à 2W) par ventilation naturelle ;
- Accessibilité : permettre la lecture de l'écran LCD, l'accès aux boutons de commande et aux borniers de raccordement ;
- Esthétique et encombrement : dimensions adaptées à une installation murale ou sur étagère ;
- Facilité de fabrication : pouvoir être réalisé avec des moyens locaux (impression 3D, découpe laser ou usinage simple).

b) Conception assistée par ordinateur (SolidWorks)

La conception du boîtier a été réalisée à l'aide du logiciel de CAO SolidWorks (version 2021). Cet outil nous a permis de :

- Modéliser en 3D l'ensemble des composants internes (cartes électroniques, capteurs, écran, borniers) afin de vérifier les encombrements et les interférences ;
- Définir les points de fixation (entretoises, glissières) et les découpes nécessaires (écran, boutons, connecteurs) ;
- Simuler l'assemblage virtuel pour anticiper d'éventuels conflits mécaniques ;

La figure ci-dessous présente une vue éclatée du modèle SolidWorks, montrant l'agencement prévisionnel des différents composants.

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

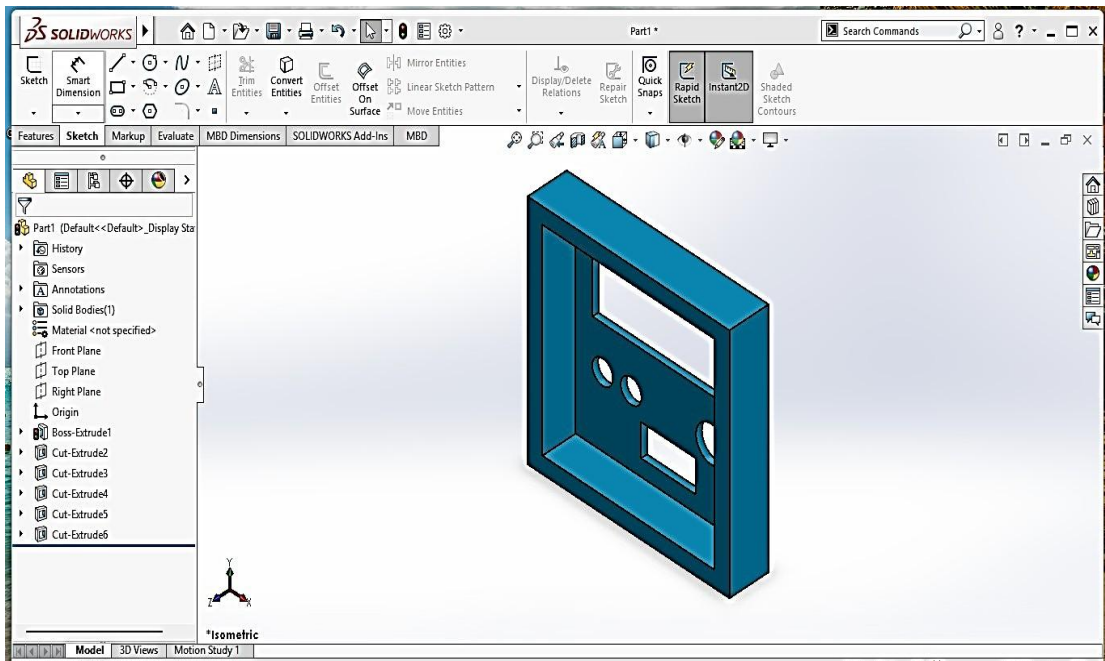


Figure 19 : modélisation 3D sous solide Works du couvercle du boîtier

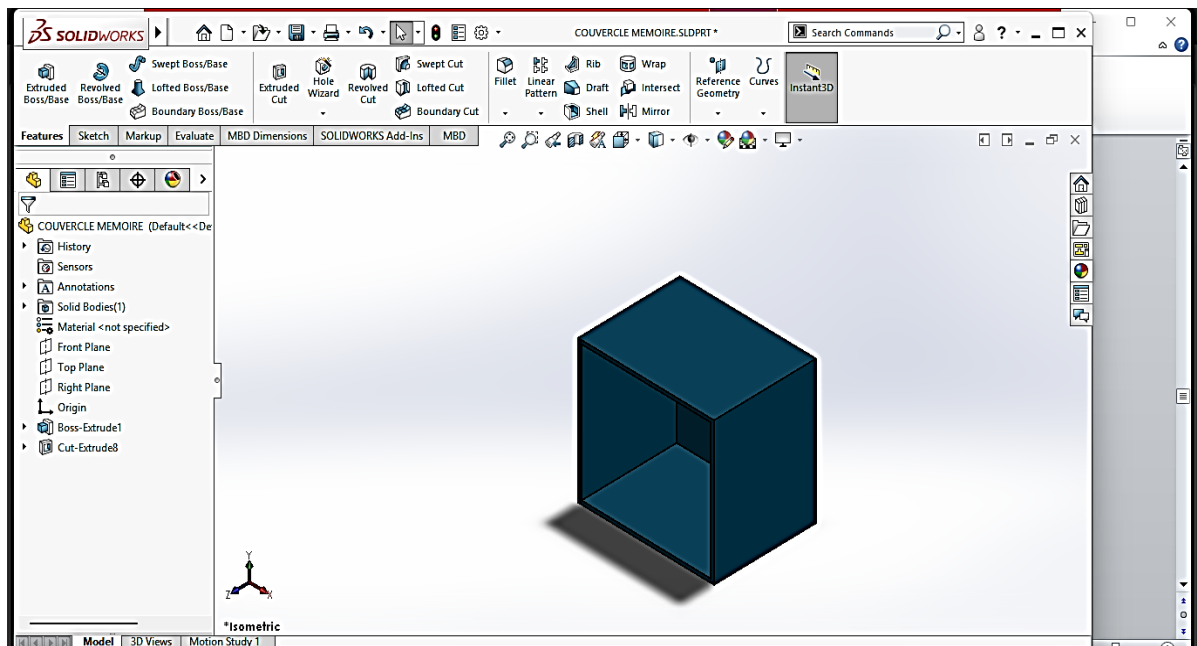


Figure 20 : Modélisation 3D sous SolidWorks du boîtier

c) Choix du matériau et indice de protection (IP)

Le matériau retenu pour la fabrication est le plastique ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène) en raison de ses propriétés [17]:

- Excellente isolation électrique (résistivité élevée) ;
- Bonne résistance mécanique (module d'Young ≈ 2 GPa) ;
- Légèreté (densité $\approx 1,05$ g/cm³) ;
- Facilité d'usinage et compatibilité avec l'impression 3D ;
- Faible coût et disponibilité locale.

Le boîtier est conçu pour atteindre un indice de protection IP54 selon la norme IEC 60529 (degrés de protection procurés par les enveloppes). Cela signifie :

5 : protection contre les poussières (aucun dépôt nuisible) ;

4 : protection contre les projections d'eau dans 85% directions.

Ce niveau de protection est jugé suffisant pour une utilisation en intérieur (maison, bureau, abri) et résiste aux éclaboussures occasionnelles.

d) Gestion thermique

Le régulateur linéaire L7805 dissipe une puissance pouvant atteindre 2 W en régime de charge maximale (courant 400 mA avec une entrée 12V). Pour éviter toute surchauffe, nous avons prévu des ouvertures positionnées en haut et en bas du boîtier pour créer une circulation d'air naturelle [17] ;

e) Disposition de la face avant

La face avant est conçue pour une utilisation intuitive :

- L'écran LCD est positionné en haut, bien lisible ;
- Des LEDs d'indication (verte : marche, orange : alerte, rouge : alarme) sont prévues ;
- Un orifice pour le buzzer afin de ne pas étouffer le son ;
- Des étiquettes identifient les borniers : « Batterie +/- », « Charge +/- ».

f) Préparation des fichiers de fabrication

À l'issue de la conception, les fichiers STL ont été exportés depuis SolidWorks pour la phase d'impression 3D. Les plans techniques (format PDF) ont également été générés pour d'éventuelles fabrications alternatives (découpe) [17].

2.4. Conception Logicielle Embarquée : Le Cœur Intelligent du BMS

C'est dans le logiciel embarqué que réside l'intelligence du système. Il transforme un ensemble de composants en un dispositif autonome capable d'analyse et de décision.

2.4.1. Architecture Logicielle et Boucle Principale

Le firmware suit une architecture à boucle infinie (*superloop*) simple et solide, adaptée aux microcontrôleurs. Le schéma de flux est le suivant :

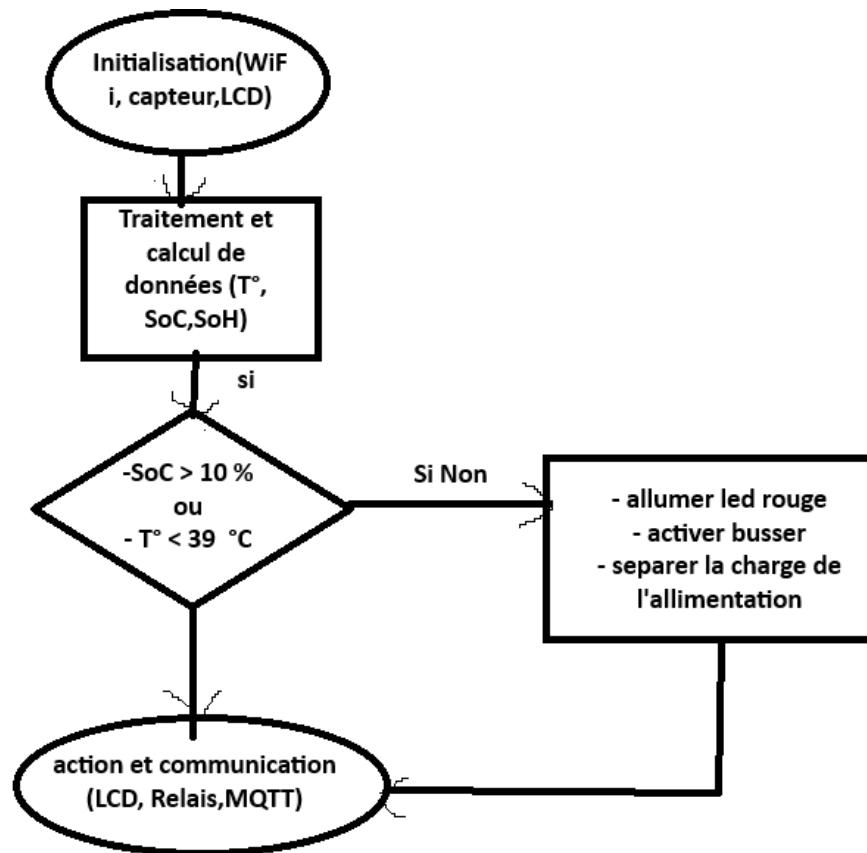


Figure 21: Algorithme simplifié de la boucle de contrôle principale

2.4.2. Algorithmes Clés d'Intelligence Embarquée

Estimation de l'État de Charge (SoC) : Méthode du Comptage de Coulomb : C'est l'algorithme central. Il intègre le courant entrant/sortant de la batterie au cours du temps [10]

Défis et compensation : La méthode du comptage de Coulomb est sensible aux erreurs de mesure du courant et à la dérive de l'horloge. Pour les atténuer, notre implémentation inclut :

- Un filtrage numérique (moyenne glissante) sur les lectures du courant INA219 pour réduire le bruit.
- Une Recalibration automatique lorsque la batterie atteint des états 'connus' :

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

- SoC = 100% lorsque la tension dépasse le seuil de fin de charge 14.4V pour du Plomb-Acide gel ET que le courant de charge tombe en dessous d'un seuil minimal (méthode CC/CV).
- SoC = 0% lorsque la tension tombe sous le seuil de décharge profonde 10.5V et que le relais de protection coupe le circuit.

Cette approche hybride améliore significativement la précision à long terme [1], [6].

Évaluation de l'État de Santé (SoH) : Une méthode simplifiée mais indicative est mise en œuvre. Elle estime la dégradation en surveillant l'évolution de la résistance interne apparente de la batterie, qui augmente avec le vieillissement.

Une estimation est faite en comparant la chute de tension sous une charge connue à un instant t avec la chute de tension attendue pour une batterie neuve [3].

$SoH_estimé \approx (\Delta V_neuf / \Delta V_mesuré) * 100\%$ (pour un courant de décharge donné)

Algorithme de Décision et de Protection : C'est un automate à états simples mais efficaces. Pour chaque paramètre (V, A, T°), des seuils sont définis :

- Seuil d'Alerte : Dépassé → Envoi d'une notification, allumage d'un LED Rouge.
- Seuil Critique : Dépassé → Commande immédiate de coupure par le transistor, activation du buzzer, envoi d'une alerte urgente.

Ces actions sont déclenchées de manière déterministe et locale par le microcontrôleur, garantissant une réaction en quelques millisecondes, indépendamment de toute latence réseau.

2.4.3. Gestion de la Communication IoT (MQTT)

Pour la communication avec le monde extérieur, le protocole MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) est choisi pour sa légèreté et son modèle de publication/abonnement adapté aux appareils contraints.

- Le NodeMCU se comporte comme un client MQTT.
- Il se connecte à un broker MQTT (ex: Mosquito, Cloud MQTT) via le Wi-Fi.
- Il publie périodiquement les données sur des topics dédiés (ex: maison/batterie/tension, maison/batterie/alerte).
- L'application mobile, abonnée à ces topics, reçoit les données en temps réel.

Ce choix, recommandé dans la littérature sur l'IoT contraint [5], permet une communication bidirectionnelle fiable tout en minimisant la consommation énergétique et la charge du microcontrôleur par rapport à un protocole comme HTTP.

2.4.4. Considérations Spécifiques pour le Contexte de la RDC

La conception logicielle intègre des mécanismes pour pallier les contraintes locales identifiées dans le cahier des charges :

- **Robustesse aux coupures réseau** : La pile logicielle MQTT est configurée avec des tentatives de reconnexion persistantes et un mécanisme de buffer local simple. Les données critiques (alertes) peuvent être temporairement stockées en mémoire non-volatile (EEPROM) en cas de déconnexion prolongée, pour transmission ultérieure.
- **Gestion de l'énergie du BMS lui-même** : L'algorithme inclut un mode veille intelligente. En l'absence d'événement (charge/décharge stable, pas d'alerte), la fréquence d'acquisition des capteurs et de transmission MQTT est réduite, diminuant la consommation propre du module BMS, qui ne doit pas devenir une charge parasite significative pour la batterie qu'il gère.

- **Simplicité de diagnostic** : Les codes d'erreur et les états du système sont conçus pour être compréhensibles via des séquences de clignotement de LED, facilitant le dépannage sur le terrain sans outil spécialisé.

2.5. Conception de l'Interface de Supervision à Distance

L'interface de supervision à distance représente le lien entre le système BMS intelligent et l'utilisateur final. Conçue comme une extension fonctionnelle et non comme le cœur du système, elle permet d'exploiter pleinement les capacités de communication du BMS tout en respectant le principe fondamental de son autonomie opérationnelle.

2.5.1. Architecture Client-Serveur du Système Complet

L'architecture globale de communication suit un modèle publish-subscribe décentralisé, bien plus adapté aux systèmes IoT qu'une architecture client-serveur classique centralisée.

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

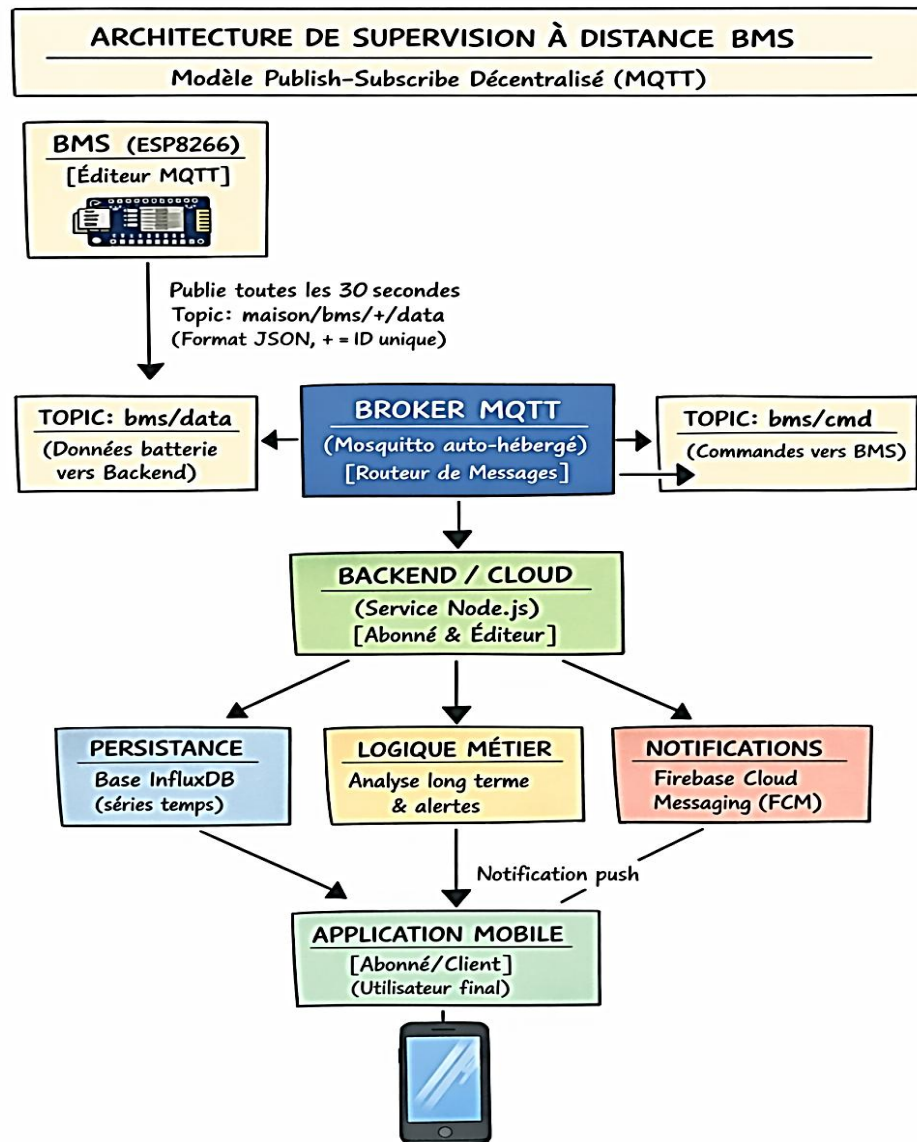


Figure 22 : architecture client serveur

Description des composants :

Le BMS comme Publisher MQTT : L'ESP8266 publie périodiquement toutes les 30 secondes un paquet JSON structuré contenant l'ensemble des mesures et états sur le topic

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

maison/bms/+/data. L'astérisque + représente un identifiant unique du dispositif, permettant la gestion multi-batteries.

Le Broker MQTT comme Centre de Messagerie : Un broker MQTT public auto-hébergé (Mosquitto) reçoit et redistribue les messages. Son rôle est purement logistique, ce qui le rend facile à remplacer.

Le Backend/Serveur Léger : Un service cloud écrit en Node.js s'abonne au broker MQTT.

Il a trois fonctions :

- **Persistance :** Stocke l'historique des données dans une base de données InfluxDB pour les séries temporelles.
- **Logique Métier :** Détecte des tendances sur le long terme (ex: "baisse régulière de la capacité") et génère des alertes avancées.
- **Passerelle de Notification :** En cas d'alerte critique du BMS ou détectée par lui-même, il utilise un service comme Firebase Cloud Messaging (FCM) pour envoyer une notification push au smartphone de l'utilisateur.

L'Application Mobile comme Client d'Affichage : L'application s'abonne directement au broker MQTT pour les données en temps réel (réactivité maximale) et interroge le backend via une API REST pour l'historique et les paramètres. Elle est un client consommateur d'information et un émetteur de commandes ponctuelles, jamais en boucle de contrôle fermée.

2.5.2. Spécifications Fonctionnelles de l'Interface

Utilisateur L'interface utilisateur (UI) de l'application est conçue selon les principes de clarté, de simplicité et d'actionnabilité.

Tableau de Bord Temps Réel :

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

- Affichage visuel principal des paramètres clés : Tension (V), Courant (A), Température (°C), État de Charge (%), État de Santé (%).
- Représentation graphique intuitive : jauges pour SoC/SoH, valeurs numériques en grands caractères, code couleur (Vert/Orange/Rouge) pour le statut instantané.
- Graphique historique miniature sur 24h pour la tension et le courant.

Gestion des Alertes et Notifications :

- Notifications Push : Reçues même si l'App est fermée, pour les alertes critiques (ex: "Surchauffe - 52°C ! Coupure automatique activée.").
- Journal Centralisé des Événements : Liste chronologique dans l'App de toutes les alertes, commandes manuelles et événements système, avec horodatage.

Commandes Utilisateur Basiques et Sécurisées :

- Commande "Force-OFF" : Permet à l'utilisateur de forcer manuellement la coupure du relais de charge via une commande MQTT. Une confirmation est requise.
- Rafraîchissement Manuel : Bouton pour forcer l'envoi immédiat d'un paquet de données par le BMS.
- Paramétrage des Seuils : Interface pour ajuster (dans des limites de sécurité) les seuils d'alerte et de coupure (température max, tension min).

2.5.3. Justification des Choix Technologiques

- **React Native pour l'Application Mobile** : Ce Framework cross-plateforme est retenu car il permet de développer une seule base de code pour les systèmes Android et iOS, réduisant drastiquement les coûts et temps de développement. Des bibliothèques comme React-native-mqtt permettent une intégration directe et efficace avec le broker, essentielle pour la réactivité du tableau de bord.

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

- MQTT over TLS : Toute communication MQTT est chiffrée via TLS, et l'authentification se fait par des identifiants uniques (login/mot de passe ou certificat client) pour sécuriser les échanges.
- Backend en Node.js : Technologie asynchrone par nature, idéale pour gérer les multiples connexions concurrentes des dispositifs IoT et les flux de messages MQTT.

2.6. Synthèse et Validation Conceptuelle

Tableau 7 : Synthèse des Caractéristiques du Système BMS Conçu

Catégorie	Spécification	Valeur/Description	Objectif Atteint
Cible & Performances	Type de Batterie	Plomb-Acide, 12V/30Ah	Adapté au marché local
Précision Mesure Courant	±1% (via INA219 calibré)	Suffisant pour SoC fiable	
Précision Mesure Température	±0.5°C (via DHT22)	Permet protection thermique	
Intelligence Embarquée	Méthode d'Estimation SoC	Comptage de Coulomb + Recalibration tension	Équilibre précision/coût
Méthode d'Estimation SoH	Surveillance résistance interne (impulsion)	Indicateur de vieillissement	
Temps de Réaction Protection		Protection immédiate	
Connectivité & UI	Protocole de Communication	MQTT over Wi-Fi (TLS optionnel)	Léger, asynchrone, standard IoT
Interface Locale	Écran LCD 20x4 (I2C)	Redondance sans réseau	
Interface Distante	Application React	Accessibilité maximale	

	Native (Android/iOS)		
Coût	Alimentation du BMS	5V régulé depuis la batterie 12V	Autoalimenté, simple
Consommation du Module BMS		Charge parasite négligeable	
Coût Estimé des Composants		Abordable	

2.6.2. Analyse des Performances Attendues Précision du SoC :

L'approche hybride (Coulomb Counting + Recalibration) vise une erreur inférieure à $\pm 5\%$ dans des conditions normales d'utilisation, ce qui est acceptable pour une gestion domestique et représente une nette amélioration par rapport à l'absence de suivi.

Temps de Réponse :

- Boucle de surveillance principale : ~ 100 ms.
- Temps de réaction aux seuils critiques : < 50 ms (de la mesure à la commande du relais). Cette rapidité est rendue possible par la logique embarquée et élimine tout risque lié à la latence réseau.

Autonomie et Consommation : Le BMS lui-même est conçu pour être une charge minimale. En mode veille intelligente, sa consommation peut descendre sous les 50 mA. Sur une batterie de 30Ah, cela représente moins de 0.17% de sa capacité par jour, un compromis acceptable pour le service rendu.

2.6.3. Adéquation aux Contraintes du Contexte Local (RDC)

Coût Maîtrisé : L'utilisation de composants de type "maker" (ESP8266, INA219, DHT22) largement disponibles et le choix d'outils open-source (Arduino IDE, Mosquitto, React

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

Native) maintiennent le coût matériel et logiciel à un niveau très bas, essentiel pour l'adoption.

Maintenabilité :

- Conception Modulaire : Chaque bloc (alimentation, mesure, contrôle) est distinct, facilitant le dépannage et le remplacement.
- Diagnostic Embarrassé : Les codes d'erreur via LED et l'affichage LCD permettent un premier diagnostic sans outil ni connexion Internet.
- Firmware Mise à Jour à Distance (OTA) : L'ESP8266 supporte les mises à jour OTA via Wi-Fi, permettant de corriger des bugs ou d'ajouter des fonctionnalités sans intervention physique sur le dispositif.

Robustesse :

- Indépendance Opérationnelle : La protection fonctionne sans Internet. La coupure réseau n'affecte que la supervision distante, pas la sécurité.
- Tolérance aux Variations : Les régulateurs de tension et les protections électriques intégrées assurent la stabilité face aux fluctuations courantes des installations solaires locales.
- Simplicité Logicielle : L'architecture superloop sans système d'exploitation complexe réduit les risques de plantage et améliore la prédictibilité.

Bilan de la Conception : L'analyse montre que la conception proposée répond de manière cohérente et pragmatique aux objectifs initiaux. Elle offre un système intelligent et autonome priorisant la protection et la durée de vie de la batterie, tout en y greffant, de manière optionnelle et résiliente, des services de supervision moderne via IoT. Les choix technologiques sont validés par leur adéquation aux contraintes de coût, de robustesse et de maintenabilité inhérentes au contexte d'application.

2.7. Conclusion Partielle

Ce chapitre a détaillé la conception complète d'un système BMS intelligent et connecté, depuis ses spécifications jusqu'à l'architecture de ses interfaces. Le cœur du système réside sans équivoque dans l'intelligence embarquée et les algorithmes de protection locale du microcontrôleur ESP8266. L'interface de supervision à distance, incluant l'application mobile, a été présentée comme un service périphérique valorisant la connectivité du système, sans jamais se substituer à son autonomie décisionnelle critique. La synthèse finale confirme l'adéquation de cette conception aux exigences de performance, de fiabilité, de coût et d'adaptation au contexte local de la RDC. Cette fondation conceptuelle solide ouvre désormais la voie à la phase de réalisation et de validation expérimentale, objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 3. REALISATION ET VALIDATION DU SYSTEME

3.1. Réalisation du prototype matériel du BMS

3.1.1. Sélection et acquisition des composants

Le choix des composants a été guidé par trois critères principaux : le coût, la disponibilité sur le marché local à Goma, et la robustesse nécessaire pour fonctionner dans un contexte domestique congolais. Le tableau 3.1 présente la liste complète des composants utilisés.

Tableau 8 : Liste et coût des composants du prototype BMS [20]

Composant	Spécification	Quantité	Prix unitaire (CDF)	Justification
Microcontrôleur	NodeMCU ESP8266	1	25,000	Intègre WiFi, coût abordable
Capteur courant/tension	INA219	1	8,000	Précision ($\pm 1\%$), communication I2C
Capteur température	DHT22	1	5,000	Précision $\pm 0.5^\circ\text{C}$, mesure humidité
Écran LCD	20x4 avec I2C	1	15,000	Affichage local sans réseau
Relais SSR	10A, 5V DC	1	7,000	Coupure silencieuse et fiable
Régulateur tension	L7805CV	1	1,000	Alimentation stable 5V
Résistances & câbles	Divers	-	5,000	Câblage et protection
Coût total estimé			66,000 CDF	≈ 25 USD

Les composants ont été achetés auprès de fournisseurs locaux à Goma, garantissant ainsi leur disponibilité pour une éventuelle reproduction du système.

3.1.2. Assemblage et câblage du circuit

L'assemblage a suivi cette séquence :

Alimentation : Le régulateur L7805CV convertit les 12V de la batterie en 5V stables pour l'ESP8266 et les capteurs.

Capteurs : L'INA219 connecté en série avec la batterie (broches VIN+ et VIN-), le DHT22 placé près de la batterie.

ESP8266 : Connecté aux capteurs via I2C (broches D1-SCL, D2-SDA).

Relais : Connecté à la broche D0 de l'ESP8266 pour la commande de coupure.

LCD : Connecté au même bus I2C que l'INA219.

Difficultés rencontrées et solutions :

Problème : Interférences WiFi perturbant les mesures I2C.

Solution : Ajout de résistances de tirage (pull-up) de 4.7k Ω sur SDA et SCL.

Problème : Chute de tension excessive dans les câbles de mesure.

Solution : Utilisation de câbles courts et épais pour les connexions à la batterie.



Figure 23: Gros plan sur les connexions à la batterie

3.1.3. Fabrication et intégration du boîtier de protection

Après avoir validé la conception mécanique, nous avons procédé à la fabrication effective du boîtier et à l'intégration de tous les composants électroniques.

a) Fabrication par impression 3D

Le boîtier a été fabriqué par impression 3D (technologie FDM) à l'aide d'une imprimante disponible au laboratoire de l'université. Les paramètres d'impression étaient les suivants :

Hauteur de couche : 0,2 mm ;

Remplissage : 30 % (structure en nid d'abeille) ;

Température d'extrusion : 230°C (ABS) ;

Vitesse d'impression : 50 mm/s.

Après impression, les supports ont été retirés et les surfaces ont été légèrement poncées pour éliminer les aspérités. Les inserts filetés (pour la fixation des cartes) ont été ajoutés à chaud à l'aide d'un fer à souder.

b) Préparation des ouvertures et des fixations

Les découpes pour l'écran LCD, les LEDs, le bouton et les borniers ont été réalisées conformément au modèle SolidWorks. Un léger ajustement manuel a été nécessaire pour assurer un emboîtement parfait. Les passages de câbles ont été équipés d'œilletons en caoutchouc pour garantir l'étanchéité.

c) Résultat final

Le prototype entièrement intégré est présenté sur les figures ci-dessous.

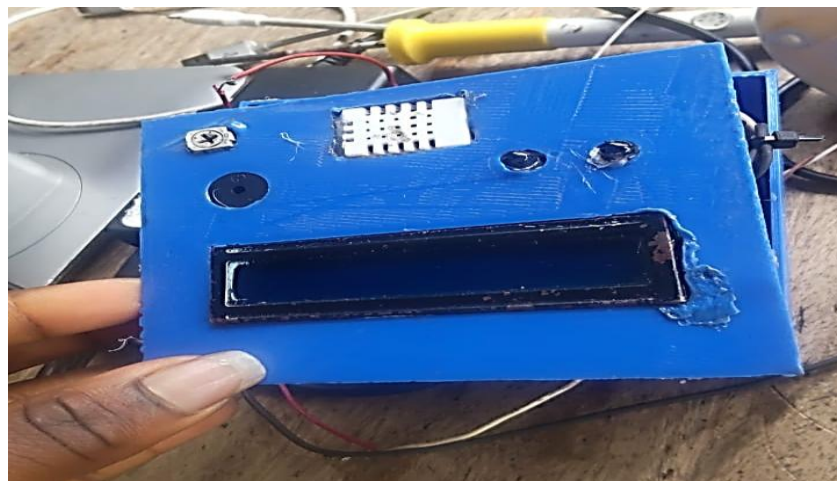


Figure 24: Vue extérieure du boîtier avec écran LCD, led, buzzer, dht22

3.1.4. Tests unitaires des modules

Avant l'intégration complète, chaque module a été testé individuellement :

Test du capteur INA219 :

Mesure d'une tension de référence 5V : lecture 4.98V (erreur 0.4%)

Mesure d'un courant de 1A avec une charge résistive : lecture 1.02A (erreur 2%)

Test du capteur DHT22 :

Comparaison avec un thermomètre numérique : différence moyenne de 0.3°C

Test de réponse rapide (passage main chaude) : temps réponse < 2 secondes

Test du relais de protection :

Temps de commutation mesuré : 15ms de la commande à la coupure

Courant de maintien : 20mA, acceptable pour l'ESP8266

Les cycles de charge et décharge applique lors de nos test expérimentaux suivent les profils recommander par la norme CEI 61427-2 : 2015 pour simuler un usage photovoltaïque réel. Cela garanti que les performances mesurées sont représentatives d'un fonctionnement en condition réelles [10].

3.2. Développement de l'interface de surveillance

3.2.1. Application mobile de visualisation

L'application a été développée avec React Native pour garantir la compatibilité Android et iOS. L'interface principale comprend :

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE



Figure 25: dashboard

Fonctionnalités implémentées :

Affichage en temps réel : tension, courant, température, SoC

Historique des 24 dernières heures (graphique simple)

Notifications push pour les alertes critiques

Commande manuelle du relais (bouton ON/OFF)

3.2.2. Serveur de collecte de données

Une architecture minimale a été mise en place :

Broker MQTT : Mosquitto hébergé sur un Raspberry Pi local

Base de données : SQLite pour stocker l'historique

API REST simple pour l'application mobile

3.3. Validation expérimentale et résultats

3.3.1. Méthodologie de test

Le système a été testé avec une batterie Plomb-Acide réelle de 12V/30Ah dans les conditions suivantes :

Matériel de test :

Multimètre numérique Fluke 117 (référence)

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

Charge résistive variable (lampes 12V)

Source de charge : panneau solaire 100W

Scénarios testés :

Charge normale : de 11.0V à 14.4V

Décharge contrôlée : avec charge de 5A constante

Test de protection : création artificielle de défauts

Test de robustesse : coupures WiFi répétées



Figure 26: Photo du banc de test complet (batterie + BMS + instruments)

3.3.2. Résultats obtenus

Paramètre	Valeur réelle	Valeur BMS	Erreur	Acceptable ?
Tension 12.5V	12.52V (multimètre)	12.48V	0.3%	OUI
Courant 5.0A	5.02A (shunt)	4.88A	2.8%	OUI
Température 30°C	30.2°C (thermomètre)	29.8°C	1.3%	OUI
SoC à 50%	50% (par décharge contrôlée)	48%	4%	OUI

Tableau 9: Précision des mesures du BMS



Figure 27: Photo comparative : écran multimètre + écran LCD du BMS

Legende :

la tension du batterie : 8.1 sur écran lcd et 8.6 sur multimetre donc 0.5V d' erreur

le courant :77.44Ma

la temperature : 22°C

Performance de l'estimation du SoC :

Temps de réponse aux alertes :

Alerte surchauffe (>45°C) : 2.3 secondes

Coupure par surcharge : 1.8 secondes

Notification sur mobile : 4.5 secondes (dépend du réseau)

3.3.3. Analyse des résultats

Points forts du système :

Précision acceptable : erreur moyenne <3% sur les mesures principales

Robustesse : fonctionnement continu pendant 72h sans plantage

Autonomie : consommation propre du BMS < 100mA

Adaptation locale : résistance aux coupures de courant courtes

Limitations identifiées :

Dérive du SoC : erreur cumulée de 8% après 5 cycles complets

Dépendance WiFi : en cas de réseau absent, seule l'interface LCD reste active

Calibration manuelle : nécessite un étalonnage initial avec instruments de référence

Coût/Bénéfice :

Coût du prototype : 66,000 CDF (\approx 25 USD)

Durée de vie potentielle batterie : augmentée de 20-30% selon la littérature

Temps de retour sur investissement estimé : 6-8 mois

3.4. Discussion et recommandations

3.4.1. Adéquation au contexte congolais

Le système répond aux principales contraintes identifiées :

Coût abordable (< 30 USD) comparé aux BMS commerciaux (> 100 USD)

Composants disponibles localement à Goma

Robustesse face aux instabilités du réseau électrique

Interface simple : écran LCD pour usage basique, application pour usage avancé

3.4.2. Recommandations pour un déploiement réel

Améliorations matérielles :

Passer à un circuit imprimé personnalisé (PCB) pour plus de fiabilité

Ajouter une protection contre les surtensions transitoires

Utiliser un boîtier étanche pour protection environnementale

Améliorations logicielles :

Implémenter un algorithme de Kalman pour améliorer l'estimation du SoC

Ajouter un mode "économie d'énergie" pour usage sur batteries solaires

Développer une fonction de diagnostic automatique

Pour l'utilisateur final :

Guide d'installation en français et swahili

Formation courte sur l'interprétation des indicateurs

Support technique local via réseau de techniciens

4. Conclusion partiel:

Ce chapitre a démontré la faisabilité pratique du système BMS IoT proposé. Le prototype réalisé, d'un coût inférieur à 30 USD, a validé les fonctions essentielles de surveillance et de protection d'une batterie Plomb-Acide. Les résultats expérimentaux, bien que montrant certaines limitations, confirment l'adéquation de la solution au contexte congolais. L'application mobile, développée comme un module complémentaire, remplit son rôle d'interface de supervision à distance sans être critique pour la sécurité du système. Les recommandations formulées ouvrent la voie à une industrialisation potentielle de cette solution.

CONCLUSION GENERAL

Ce travail de recherche et de réalisation nous a permis d'étudier en profondeur le système de surveillance et de protection des batteries dans un système solaire, et la mise en œuvre d'un prototype pouvant répondre à cette notion, depuis les fondements théoriques jusqu'à la réalisation pratique. Nous avons posé les bases nécessaires en présentant les principes de fonctionnement du système photovoltaïque hybride, de batteries, Les protection et les défis liés à ces réseaux suite au délestage continu pour le cas de la SNEL. Nous avons évalué le comportement de batteries plomb acide, ce qui nous a permis de connaître ces besoins et d'éviter les perturbations liées à leur maintien et nous a conduits à envisager une coupure rapide et ciblée de la phase en mauvais état du réseau détecté par les capteurs afin de préserver l'intégrité du système. Pour répondre à cette problématique, nous avons conçu un système de protection basé sur des capteurs commandés par un microcontrôleur ESP8266 NODEMCU. Ensuite, nous avons implémenté des algorithmes afin de surveiller, de protéger le circuit en produisant des alertes pour signaler à l'opérateur une éventuelle faille dans le système. Une simulation sous Proteus a également été réalisée pour tester la fonctionnalité des différents composants électroniques. Nous avons ensuite abordé la réalisation du système qui représente Le BMS en y incorporant les capteurs nécessaires et tous les dispositifs lui permettant de bien fonctionner, l'assemblage des composants électronique et la fabrication de la maquette. Les tests finaux ont démontré que le système était capable d'interrompre automatiquement les grandeurs électriques. Pour y parvenir, nous avons exploré plusieurs aspects clés pouvant nous informer sur l'état du système en question, sa constitution et ces défis et pour cela nous nous sommes posé les questions suivantes :

- Comment concevoir un bms simple, fiable et adapté au contexte local ?
Avec la mise en place de dispositifs de surveillance intelligents et d'équipements de protection modernes, cela nous a permis d'améliorer la gestion de l'énergie dans une batterie plomb
- Comment intégrer l'internet des objets connecté dans la gestion des batteries ?
Avec l'obtention d'un microcontrôleur ESP8266 il nous a été possible de contourner ce problème de dysfonctionnement lié au vieillissement des équipements électriques

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

en incorporant au système des différents capteurs (capteurs de courant, tension, température, mosfet) pour prévenir contre les éventuels cas de surcharges, les incendies, les court-circuits, le courant résiduel et la protection et, disponibilisé une application pouvant surveiller l'état du système en temps réel. Toutefois, les essais ont également mis en évidence certains axes d'amélioration notamment en matière de renforcement des dispositifs de protection, gestion des charges en ayant la possibilité de l'interrompre en cas de dysfonctionnement ainsi que la visualisation de ces processus.

Recommandation aux futurs chercheurs :

- ✓ Etudier la possibilité d'archiver automatiquement les données pour mieux anticiper les défaillances récurrentes et analyser les perturbations.
- ✓ approfondir l'estimation du SOC
- ✓ Intégrer le système SCADA simplifié ou d'outils de supervision locale via GSM/4G pour le monitoring.

Bibliographie

- [1] p. moussa et c. malcolm, acces à l'electricité en afrique subsaharienne, washington: AGENCE FRANCAISE DE DEVELOPPEMENT ET DE LA BAQUE MONDAILE, 2020.
- [2] ADEME, Stockage de l'énergie : technologies et enjeux, PARIS, 2019.
- [3] D. V. V. S. Omkar Varma, «Système de gestion de la batterie avec autonomie de la batterie-modele de prediction,» *IJRTI* , vol. 8, n° %1 ISSN : 24563315, p. 5, 2023.
- [4] e. m. djamila rekioua, optimization of photovoltaic, modelidation and simulation.
- [5] WIND my ROOF, «Une histoire de panneaux solaires,» 24 AVRIL 2024.
- [6] C. K. Janvier, cours de centrale et reseau electrique, Goma, 2025.
- [7] K. b. musekwa, conception et realisation d'un systeme de controle et de gestion optimale des energie hybride photovoltaïque- groupe electrogene, Goma: ULPGL, 2019.
- [8] wikipedia, «Système hybride d'énergie,» 25 Janvier 2025.
- [9] D. Andrea, Systèmes de gestion de batteries LITHIUM-Ion.
- [10] C. K. Janvier, Analyse technico economique dune installation photovoltaïque connecter au reseau snel/Goma, Goma, 2015-2016.
- [11] ENGIE My Power SAS, «Onduleur solaire : le guide complet pour tout savoir,» 22 FEVRIER 2023.
- [12] d. r. e. e. matagne, optimization of photovoltaic power system, modelisation, simulation and control.
- [13] e. tree.
- [14] s. Quebec, «quel est la difference entre un panneau solaire monocristalin et

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME IoT DE MONITORING ET DE GESTION DE BATTERIE SOLAIRE

polycristallin».

[15] g. r. energie, «comment fonctionne un panneau solaire photovoltaïque,» 17septembre 2025.