

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE
LABORATOIRE DES ENERGIES RENOUVELABLES

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :
Énergies Renouvelables
Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

REALISATION D'UN SYSTÈME D'IRRIGATION PHOTOVOLTAIQUE INTELLIGENT BASE SUR L'INTERNET DES OBJETS POUR DES EXPLOITATIONS AGRICOLES

Présenté par :

- BAKOU Farouk
- MEDJDOUBI Habib
- LAALA Abdelhamid

Soutenu le : 25/06/2023 devant le Jury :

Mr. HABCHI YACINE

Centre Universitaire Naâma

Président

Mme. REKKAL KAHINA

Centre Universitaire Naâma

Examineur

Mr. BENMHAMMED Fayssal El Yamani

Centre Universitaire Naâma

Encadreur

Remerciement

Ce travail a été effectué au sein du Département de sciences et technologies de centre universitaire Salhi Ahmed Naama.

En premier lieu nous remercions DIEU tout puissant de nous avoir donné la patience, la santé et la volonté pour achever ce travail.

Nous remercions nos parents pour leurs sacrifices et l'aide pour que nous réussissions, de nous avoir donné l'importance, de prendre toujours soin de nous, de nous faire confiance et de toujours nous démontrer l'amour que vous nous portez.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreur Mr Benmhammed Fayçal pour avoir consacré son temps précieux et avoir accepté de nous encadrer, pour tous les efforts et l'importance qu'il nous a donnée.

Des remerciements spéciaux et chaleureux à nos professeurs du promo ETT 2023 au ingénieurs du laboratoire des énergies renouvelables de nous avoir offrir un environnement de travail adapté ainsi que ses aides et ses conseils. Nous remercions les membres de jury pour avoir accepté d'examiner notre modeste travail.

Dédicaces

À mes chers parents, frères et sœurs,

Je tiens à vous exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance pour votre soutien inconditionnel tout au long de mon parcours académique. Aujourd'hui, alors que je franchis une étape importante de ma vie avec l'achèvement de ma thèse de master en électrotechnique en énergies renouvelables, je souhaite vous dédier ce succès qui est le fruit de notre amour, de notre encouragement et de notre unité en tant que famille.

Vous avez toujours été là pour moi, m'encourageant à poursuivre mes rêves et à donner le meilleur de moi-même. Vos encouragements constants, votre soutien moral et votre amour inconditionnel ont été les piliers qui m'ont permis de surmonter les défis et les moments difficiles.

Mes chers parents, vous m'avez inculqué des valeurs fortes, la persévérance et l'importance du travail acharné. Votre exemple de dévouement et de sacrifice a été une source d'inspiration tout au long de mes études. C'est grâce à vous que j'ai pu acquérir les compétences et les connaissances nécessaires pour réussir dans ce domaine.

À mes frères et sœurs bien-aimés, vous avez toujours été mes compagnons de route, mes alliés et mes meilleurs amis. Votre présence et votre soutien constants ont été un moteur de motivation et de confiance en moi-même. Je suis fier de partager ce succès avec vous et je vous remercie d'avoir été là à chaque étape de mon parcours.

Cette dédicace est un témoignage de mon amour et de ma reconnaissance éternelle envers vous. Votre soutien indéfectible a été la force qui m'a poussé à me dépasser et à atteindre mes objectifs. Que cette réussite soit également la vôtre, car vous en êtes les artisans.

Avec tout mon amour et ma gratitude,

Farouk

À mes chers parents, mes sœurs, mes frères,

Je tiens à vous dédier cette thèse de Master en Électrotechnique en Énergie Renouvelable avec une profonde gratitude et un amour infini. Votre soutien inconditionnel et votre encouragement constant ont été les piliers de ma réussite, et je ne pourrais jamais vous remercier assez.

À mes chers parents, vous avez été mes plus grands modèles de dévouement et de persévérance. Votre amour inébranlable, vos sacrifices et votre foi en moi m'ont inspiré à donner le meilleur de moi-même. Cette réussite est également la vôtre, et je suis honoré de vous avoir comme mes guides les plus précieux.

À mes sœurs et mes frères, vous êtes ma source de joie et d'inspiration. Vos encouragements constants et votre confiance en moi m'ont donné la force de surmonter les obstacles et d'atteindre mes objectifs. Vous avez été mes plus grands supporters, et je suis fier de pouvoir partager cette réussite avec vous.

Cette thèse de Master est le résultat d'années de travail acharné, de passion et de dévouement. Je la dédie à chacun de vous, car vous êtes ma source d'inspiration et ma force motrice. Que cette réalisation renforce notre lien familial et nous pousse à poursuivre nos rêves avec audace et détermination.

Avec tout mon amour et ma reconnaissance éternelle,

Habib

Je dédie cette thèse de master dans le domaine de l'électrotechnique en énergie renouvelable à vous tous, qui avez été ma source d'inspiration, de soutien et de motivation tout au long de ce parcours académique.

Ma mère, tu as été mon premier modèle de persévérance et de détermination. Ta force et ton amour inconditionnel m'ont poussé à repousser mes limites et à atteindre mes objectifs.

Mes frères et sœurs, vous êtes ma source de joie et d'encouragement constant. Votre soutien infaillible et vos encouragements m'ont donné la confiance nécessaire pour poursuivre mes rêves.

Ma femme, tu es ma compagne de vie et ma meilleure amie. Ton amour, ta patience et ton soutien inébranlable ont été les piliers qui m'ont permis de me concentrer sur mes études et de me surpasser.

Mes enfants, vous êtes ma fierté et ma plus grande motivation. Votre présence dans ma vie a renforcé mon désir de construire un avenir meilleur, en exploitant les énergies renouvelables pour préserver notre planète pour vous et les générations futures.

Cette thèse de master est le fruit de notre engagement collectif envers un avenir durable. Votre amour, vos encouragements et votre compréhension ont été essentiels pour que j'accomplisse ce travail. Chaque étape de ce parcours a été marquée par votre soutien indéfectible.

Que cette dédicace témoigne de ma gratitude éternelle envers vous tous, ma famille aimante, pour votre présence et votre amour inconditionnels.

Avec tout mon amour et ma reconnaissance,

Abdelhamid

Résumé

Le problème d'optimisation de l'irrigation n'est pas un problème récent mais tend à être amélioré. Les événements récents de sécheresse ou de restrictions de tours d'eau pour l'irrigation, ainsi que l'utilisation des moyens anciens pour l'irrigation ont soulignés l'importance d'un tel problème surtout pour les régions qui se trouvent aux zones arides. Différents domaines de recherche se sont penchés sur ce problème. Il existe dans la littérature, différentes solutions de modélisations pour évaluer une irrigation optimale. En générale, ces méthodes font appel à des techniques de formalisation mathématique telles que la programmation dynamique, la théorie du contrôle, et les techniques numériques. Le but de ce travail est de proposer un modèle d'optimisation pour l'irrigation des exploitations agricoles, en tenant en compte l'aspect économique de l'utilisation des sources énergétique (les énergies renouvelables : énergie photovoltaïques).

Mots clés : énergie renouvelables, pompage photovoltaïque, irrigation, IOT, automatisation.

Abstract

The irrigation optimization problem is not a recent problem but tends to be improved. Recent events of drought or restrictions of water towers for irrigation, as well as the use of old means for irrigation have highlighted the importance of such a problem especially for regions that are in arid zones. Different areas of research have looked at this problem. There are various modeling solutions in the literature to evaluate optimal irrigation. In general, these methods use mathematical formalization techniques such as dynamic programming, control theory, and numerical techniques. The aim of this work is to propose an optimization model for the irrigation of agricultural farms, taking into account the economic aspect of the use of energy sources (renewable energies: photovoltaic energy).

Keywords: renewable energy, photovoltaic pumping, irrigation, IOT, automation.

ملخص

لحل مشكلة السقي التقليدي، يمكن استخدام نظام الري الأوتوماتيكي، والذي يعتبر تطورًا حديثًا في تقنيات السقي. هذا النظام يعتمد على استخدام التكنولوجيا لتحقيق ري فعال ومحسن للمحاصيل. وفيما يلي بعض العناصر الرئيسية لنظام الري الأوتوماتيكي:

نظام الرصد والتحكم: يتم تثبيت أجهزة الاستشعار في الحقول لقياس حالة التربة والنباتات والبيئة المحيطة. يتم استخدام هذه الأجهزة لقياس مستوى الرطوبة في التربة ومعدل التبخر، وتقديم معلومات دقيقة حول حاجة المحصول للماء.

نظام الري التلقائي: بناءً على المعلومات المستلمة من أجهزة الاستشعار، يتم برمجة نظام الري لتوفير الماء بشكل تلقائي ومحسن وفقًا لاحتياجات المحصول. يتم استخدام الرشاشات أو نظام الري بالتنقيط لتوفير الماء بكفاءة وتوزيعه بالتساوي على المحاصيل.

استخدام التكنولوجيا الذكية: يمكن استخدام تقنيات الاتصالات وتطبيقات الهواتف الذكية لربط النظام بشبكة الإنترنت. هذا يتيح للمزارعين التحكم في نظام الري عن بُعد ومراقبته، وضبط إعدادات الري وتلقي الإشعارات والتقارير حول حالة الري واستهلاك الماء.

توفير الماء وتقليل الهدر: يمكن برمجة النظام لتوفير كمية محددة من الماء وفقاً لاحتياجات النباتات والتربة. يتم ضبط النظام لتقليل التبخر وتسرب الماء، وتوفيره بشكل متوازن ومناسب.

كلمات مفتاحية: الطاقة المتجددة، الضخ الكهروضوئي، الري، إنترنت الأشياء، التحكم الآلي.

Table des matières

| | |
|---|----|
| Remerciement | 2 |
| Dédicaces | 3 |
| Table des matières..... | 8 |
| Liste des figures | 10 |
| Liste des tableaux..... | 12 |
| Liste des abréviations..... | 13 |
| Introduction Générale | 14 |
| Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables, pompage photovoltaïque et les systèmes d'irrigations..... | 15 |
| I.1 Introduction | 15 |
| I.2 Les énergies renouvelables..... | 15 |
| I.3 Sources des énergies renouvelables | 16 |
| I.3.1 Énergie solaire (photovoltaïque et thermique)..... | 16 |
| I.3.2 Énergie éolienne..... | 17 |
| I.3.3 Énergie hydraulique | 18 |
| I.3.4 Énergie géothermique | 19 |
| I.3.5 La biomasse..... | 19 |
| I.3.6 Énergie marémotrice | 20 |
| I.4 L'énergie photovoltaïque | 21 |
| I.4.1 Avantages et inconvénients..... | 21 |
| I.5 Pompage photovoltaïque | 22 |
| I.5.1 Avantages et inconvénients | 23 |
| I.5.2 Les différents types de pompes..... | 23 |
| I.6 Les systèmes d'irrigation..... | 25 |
| I.6.1 Irrigation de surface : | 25 |
| I.6.2 Irrigation par aspersion : | 25 |
| I.6.3 Irrigation au goutte à goutte ou micro irrigation :..... | 26 |
| I.7 Conclusion..... | 27 |
| Chapitre II : Modélisation de système de pompage photovoltaïque..... | 28 |
| II.1 Introduction | 28 |
| II.2 Modélisation d'un panneau photovoltaïque | 28 |
| II.2.1 Cas d'une cellule réelle | 28 |
| II.3 Modélisation du moteur à courant continu..... | 32 |
| II.3.1 Définition du moteur à courant continu | 32 |
| II.3.2 Symboles :..... | 32 |
| II.3.3 Principe de fonctionnement | 32 |
| II.3.4 Constitution du moteur à courant continu..... | 32 |

| | | |
|--------------|---|----|
| II.3.5 | Modélisation de l'induit..... | 36 |
| II.4 | Modélisation d'un hacheur DC/DC..... | 38 |
| II.4.1 | Différents types d'hacheurs | 38 |
| II.5 | La commande MPPT..... | 44 |
| II.5.1 | Définition | 44 |
| II.5.2 | Principe de fonctionnement | 44 |
| II.5.3 | Méthode de perturbation et d'observation (P&O) | 45 |
| II.5.4 | Algorithme perturbation et observation (P&O) | 46 |
| II.5.5 | Conclusion | 47 |
| Chapitre III | : conception réalisation du système d'irrigation intelligente | 48 |
| III.1 | Introduction | 48 |
| III.2 | Problématique..... | 48 |
| III.3 | Solution proposée..... | 48 |
| III.4 | L'intérêt de l'irrigation intelligente..... | 49 |
| III.5 | Représentation du système propose | 50 |
| III.6 | Internet des objets IOT | 51 |
| III.7 | Fonctionnement de l'IOT | 51 |
| III.7.1 | Domaine d'application..... | 52 |
| III.7.2 | Objets connectés | 56 |
| III.8 | Le cloud computing..... | 57 |
| III.8.1 | Principe de fonctionnement | 58 |
| III.8.2 | Les formes de déploiement du cloud computing | 59 |
| III.8.3 | La plateforme IOT Cloud arduino | 60 |
| III.9 | Principe de fonctionnement du système..... | 61 |
| III.9.1 | Schéma bloc du système | 61 |
| III.10 | Réalisations du montage..... | 62 |
| III.10.1 | Matériels utilisés..... | 62 |
| III.10.2 | Logiciels utilisés..... | 74 |
| III.10.3 | Schéma du montage..... | 77 |
| III.10.4 | Réalisation de la maquette..... | 77 |
| III.10.5 | Programme (code en C++) téléversé sur l'ESP 32..... | 78 |
| III.10.6 | Interface de IOT Arduino Cloud sur PC | 78 |
| III.10.7 | Interface de l'application IoT Remote sur mobile..... | 79 |
| III.11 | Conclusion | 82 |
| IV. | Conclusion Générale..... | 83 |
| | Bibliographie..... | 85 |
| | Annexe I..... | 88 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I-1 Évolution de la production mondiale du pétrole et du gaz | 15 |
| Figure I-2 Énergie solaire photovoltaïque | 16 |
| Figure I-3 Énergie solaire thermique | 17 |
| Figure I-4 Énergie éolienne..... | 18 |
| Figure I-5 Énergie hydraulique | 19 |
| Figure I-6 Énergie géothermique [5] | 19 |
| Figure I-7 Énergie de la Biomasse..... | 20 |
| Figure I-8 Énergie marémotrice | 21 |
| Figure I-9 Pompes photovoltaïque..... | 22 |
| Figure I-10 Pompes centrifuges | 23 |
| Figure I-11 Pompes volumétriques | 24 |
| Figure I-12 Organigramme des systèmes d'irrigation..... | 25 |
| Figure I-13 Irrigation de surface | 25 |
| Figure I-14 Irrigation par aspersion | 26 |
| Figure I-15 Irrigation au goutte à goutte | 27 |
| | |
| Figure II-1 Cellule photovoltaïque..... | 28 |
| Figure II-2 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque..... | 29 |
| Figure II-3 Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles | 30 |
| Figure II-4 Symboles normalisé du moteur à courant..... | 32 |
| Figure II-5 Stator (à droite) et rotor (à gauche) du moteur à courant continu | 32 |
| Figure II- 6 Le stator du moteur à courant continu..... | 33 |
| Figure II-7 Rotor du moteur à courant continu | 33 |
| Figure II-8 balai et collecteur..... | 34 |
| Figure II- 9 Force de Laplace s'exerçant sur un conducteur puis Force de Laplace pour un conducteur ayant traversé la ligne neutre | 35 |
| Figure II-10 Fonctionnement de l'ensemble collecteur-balais [1]..... | 35 |
| Figure II- 11 Schéma équivalent de l'induit..... | 36 |
| Figure II-12 Schéma équivalent de l'induit | 36 |
| Figure II-13 symbole de le hacheur | 38 |
| Figure II-14 schéma du convertisseur DC/DC Buck | 39 |
| Figure II-15 Formes d'ondes du convertisseur Buck | 40 |
| Figure II-16 schéma du convertisseur DC/DC Boost..... | 41 |
| Figure II- 17 Formes d'ondes du convertisseur Boost | 42 |
| Figure II-18 Schéma du convertisseur DC/DC Buck-Boost..... | 43 |
| Figure II- 19 Schéma bloc d'une chaine photovoltaïque..... | 45 |
| Figure II- 20 Fonctionnement de la méthode perturbation et observation..... | 45 |
| | |
| Figure III-1 Système d'irrigation intelligente [33] | 50 |
| Figure III-2 Schéma de définition d'internet des objets [35]..... | 51 |
| Figure III-3 Diagramme de l'IOT..... | 52 |
| Figure III-4 Les applications de l'IOT | 54 |
| Figure III-5 Une approche par le cycle de vie pour la sécurité d'IOT..... | 55 |
| Figure III-6 Les étapes de fabrication d'un Object connecté..... | 57 |
| Figure III-7 Principe de cloud computing..... | 58 |
| Figure III-8 Différent types de cloud | 60 |
| Figure III-9 Interface de l'IOT Arduino Cloud | 61 |

| | |
|---|----|
| Figure III-10 Schéma bloc du système | 61 |
| Figure III-11 Carte ESP32 Dev..... | 62 |
| Figure III-12 Architecture interne de la carte ESP 32[25]..... | 64 |
| Figure III-13 Brochage de la carte ESP 32[26]..... | 64 |
| Figure III-14 Panneau photovoltaïque | 65 |
| Figure III- 15 Caractéristique I(v),P(v) $G=1000\text{w/m}^2$, $t=9^\circ\text{c}$ | 66 |
| Figure III- 16 Caractéristique I(v),P(v) $G=900\text{w/m}^2$, $t=30^\circ\text{c}$ | 66 |
| Figure III- 17 Caractéristique I(v),P(v) $G=670\text{w/m}^2$, $t=4^\circ\text{c}$ | 67 |
| Figure III- 18 Caractéristique I(v),P(v) $G=400\text{w/m}^2$, $t=6^\circ\text{c}$ | 67 |
| Figure III-19 Capteur d'humidité du sol FC 28..... | 68 |
| Figure III-20 Capteur de température DS18B20..... | 68 |
| Figure III-21 Schéma bloc du capteur DS18B20..... | 69 |
| Figure III-22 Capteur d'éclairement BH1750..... | 70 |
| Figure III-23 Schéma bloc du capteur..... | 70 |
| Figure III-24 Les bornes de relai..... | 71 |
| Figure III- 25 station de pompage SOLPUIT | 72 |
| Figure III-26 Module SIM800 L..... | 73 |
| Figure III-27 L'interface de visual studio code | 75 |
| Figure III-28 L'interface de Platfomio..... | 75 |
| Figure III-29 L'interface de EASYEDA..... | 76 |
| Figure III- 30 Schéma de Montage | 77 |
| Figure III- 31 Montage de système D'irrigation intelligente | 77 |
| Figure III- 32 Interface de IOT Arduino Cloud sur PC | 78 |
| Figure III- 33 (A) Interface de l'application IoT Remote sur mobile | 79 |
| Figure III- 34 (B) Interface de l'application IoT Remote sur mobile | 80 |
| Figure III- 35 (C) Interface de l'application IoT Remote sur mobile | 81 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau II- 1 Rendement de quelques convertisseurs connus | 44 |
| Tableau III- 1 Caractéristiques du module JW-G1950/JW5672..... | 65 |
| Tableau III- 2 Caractéristiques du capteur DS18B20 | 68 |
| Tableau III- 3 Caractéristiques du capteur d'éclairément BH1750 | 70 |

Liste des abréviations

| Abréviations | Définition |
|--------------|---|
| DC | direct current (courant continu) |
| MPPT | Maximum power point tracker |
| IOT | Internet of Things |
| ASPO | Association for the Study of Peak Oil and Gas |
| MW | Méga Watt |
| AC | ALTERNATIF CURRENT (courant alternatif) |
| CC | Courant Continu |
| CA | Courant Alternatif |
| PV | Photovoltaïque |
| CIS | Cuivre Indium Sélénium |
| PPM | Point de Puissance Maximum |
| RFID | Radio Fréquence Identification |
| WSN | Wireless Sensor Network |
| DVD | Digital Video Disc |
| API | Application Programming Interface |
| IDE | Integrated Development Environment |
| USB | Universal Serial Bus |
| SRAM | Static random access memory |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| DAC | convertisseur numérique-analogique |
| ADC | Analog-to-digital converter |
| SPI | Serial Peripheral Interface |
| UART | Universal Asynchronous Receiver/Transmitter |
| LWIP | lightweight IP |
| STA | Stationary |
| MIN | Minimal |
| MAX | Maximal |
| VDD | Virtual Device Driver |
| VPU | vision processing unit |
| GSM | Global System Mobile |
| GPRS | General Packet Radio Services |
| SMS | Short Message Service |
| AT | Attention |
| GPS | Global Positioning System |
| FM | Frequency Modulation |
| CAO | conception assistée par ordinateur |
| PCB | Printed Circuit Board |

Introduction Générale

L'irrigation intelligente est une application de l'Internet des objets (IoT) qui révolutionne l'agriculture en optimisant l'utilisation de l'eau pour l'irrigation des cultures. Ce système utilise des capteurs et des dispositifs connectés pour surveiller et contrôler les besoins en eau des plantes de manière précise et efficace.

L'objectif principal de l'irrigation intelligente est de fournir la quantité d'eau nécessaire au bon moment et au bon endroit, en fonction des besoins réels des cultures. Cela permet d'économiser l'eau, de réduire les coûts d'irrigation et d'améliorer la productivité agricole tout en préservant les ressources naturelles.

En utilisant un système IoT pour l'irrigation intelligente, les agriculteurs peuvent optimiser l'utilisation de l'eau et améliorer la gestion de l'irrigation. Ils peuvent surveiller et contrôler à distance leur système d'irrigation, recevoir des alertes en cas de conditions anormales et ajuster les paramètres en fonction des changements climatiques ou des besoins des cultures.

Ce mémoire se présente en trois chapitres principaux :

Le premier chapitre offre une vue d'ensemble sur les énergies renouvelables, en mettant l'accent sur le pompage photovoltaïque et les systèmes d'irrigation. Les énergies renouvelables sont devenues des alternatives cruciales pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles et minimiser l'impact environnemental. Le pompage photovoltaïque, qui utilise l'énergie solaire pour alimenter les pompes, offre une solution durable et efficace pour l'approvisionnement en eau. De plus, les systèmes d'irrigation sont essentiels pour optimiser l'utilisation de l'eau dans l'agriculture et garantir une production agricole efficace et durable.

Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation d'un système de pompage photovoltaïque. Cette section explore les principes de base et les concepts clés liés à la modélisation de ces systèmes. Il présentera les différentes variables et paramètres pris en compte lors de la modélisation, ainsi que les méthodes utilisées pour évaluer les performances du système. La modélisation permettra d'analyser le fonctionnement du système, d'optimiser sa conception et de prédire son rendement en fonction des différentes conditions environnementales et des caractéristiques techniques.

Le troisième chapitre aborde la conception et la réalisation d'un système d'irrigation intelligente. Cette section se penchera sur les différentes technologies et méthodes utilisées pour développer un système d'irrigation efficace et automatisé. La conception du système prendra en compte les besoins en eau des cultures, les données météorologiques, les capteurs d'humidité du sol, ainsi que les algorithmes de contrôle pour optimiser la consommation d'eau. La réalisation du système inclura la sélection et l'intégration des composants matériels, le développement du logiciel de contrôle et les tests de validation du système.

Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables, pompage photovoltaïque et les systèmes d'irrigations.

I.1 Introduction

Les énergies renouvelables comprennent une variété de sources telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et biomasse. Elles tirent leur pouvoir de flux naturels tels que le soleil, le vent, l'eau et la chaleur de la Terre, qui sont continuellement renouvelés dans le temps.

I.2 Les énergies renouvelables

Le dédoublement approximatif de la population mondiale en ce XXI^e siècle conduit inexorablement à une augmentation des besoins énergétiques. Or, l'appel aux combustibles fossiles, qui pour le moment constituent la base de notre fourniture énergétique, doit être limité, autant à cause des risques de pénurie d'approvisionnement que pour les conséquences sur le climat de leur utilisation. Il faut donc agir sur la consommation globale d'énergie, ce qui est désigné par le vocable « efficacité énergétique » et développer des sources non carbonées dont font parties les renouvelables [1].

Dans la figure (I-1) s'illustre l'évolution des productions mondiales du pétrole et du gaz

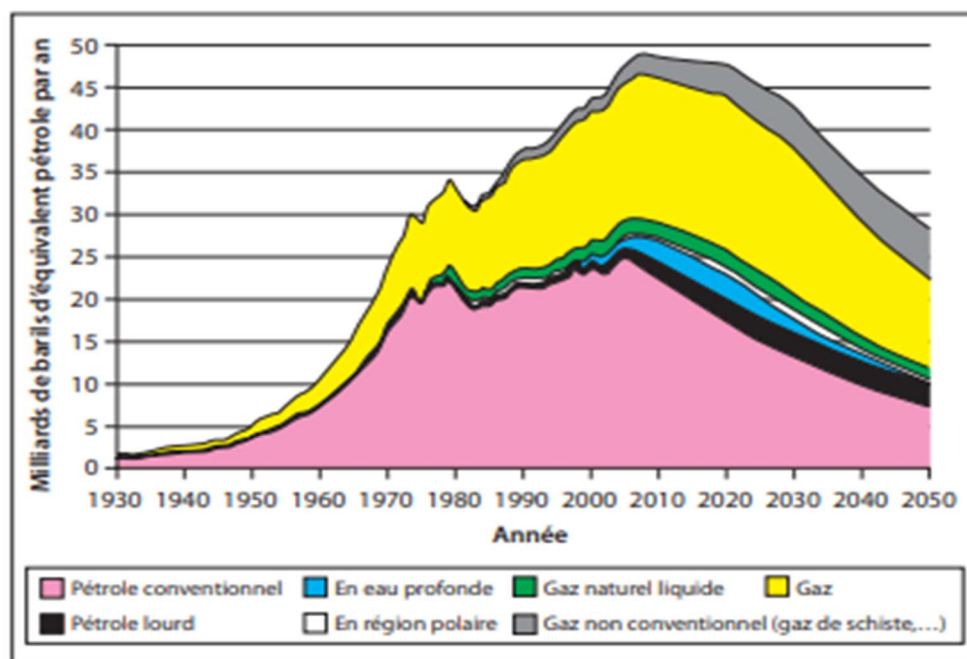


Figure I-1 Évolution de la production mondiale du pétrole et du gaz

Source: ASPO (Association for the Study of Peak Oil and Gas) Base Case, 2009

I.3 Sources des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables, comme leur nom l'indique, ne sont pas des énergies fossiles. Appelées aussi énergies propres car provenant des phénomènes naturels (vent, rayonnement solaire), leur exploitation est en plein essor : elles ne permettent pas encore de remplacer les autres sources d'énergie mais offrent la possibilité de réduire de façon significative l'utilisation des combustibles fossiles[2].

I.3.1 Énergie solaire (photovoltaïque et thermique)

L'énergie lumineuse du soleil est recueillie grâce à des capteurs sur des panneaux solaires et est convertie en énergie électrique (solaire photovoltaïque) ou thermique (solaire thermique, comme pour les chauffe-eaux solaires). L'installation des panneaux photovoltaïques peut permettre aux particuliers de subvenir à plus de la moitié de leurs besoins en chauffage (eau et habitation)[2].

I.3.1.1 Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des formes les plus répandues et populaires d'énergie renouvelable. Elle utilise des cellules photovoltaïques pour convertir la lumière du soleil en électricité.

Le processus de conversion de l'énergie solaire en électricité se fait grâce à l'effet photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont composées de matériaux semi-conducteurs, généralement du silicium, qui absorbent les photons de lumière et libèrent des électrons. Ces électrons sont ensuite capturés par des conducteurs métalliques, créant un courant électrique. voir figure (I-2).



Figure I-2 Énergie solaire photovoltaïque [3]

I.3.1.2 Énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie renouvelable qui utilise la chaleur du soleil pour produire de la chaleur ou de l'eau chaude. Contrairement à l'énergie solaire photovoltaïque, qui convertit la lumière du soleil en électricité, l'énergie solaire thermique se concentre sur l'utilisation directe de la chaleur solaire. Voir figure(I-3).

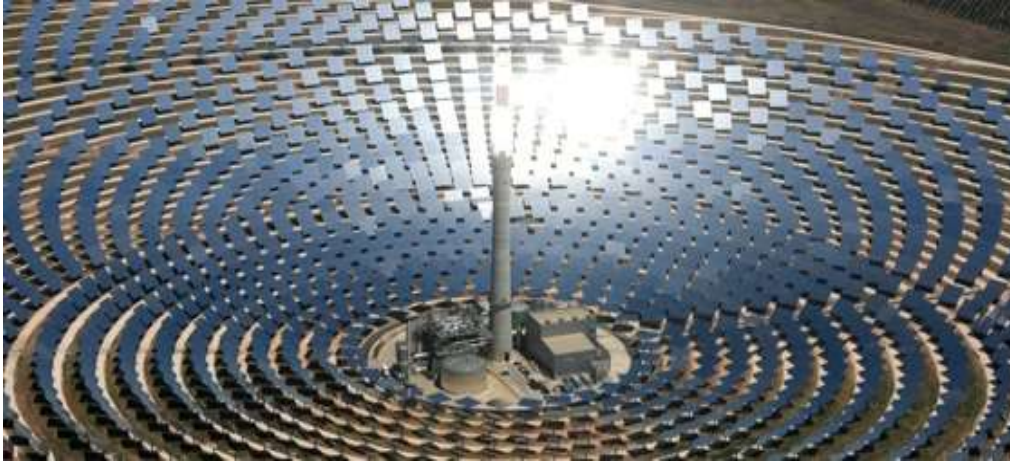


Figure I-3 Énergie solaire thermique [4]

I.3.2 Énergie éolienne

L'énergie du vent ou énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des vents.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique[5].



Figure I-4 Énergie éolienne [6]

I.3.3 Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable très faiblement émettrice de gaz à effet de serre. Cette source d'énergie renouvelable exploite les mouvements de l'eau actionnés par le Soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées et les courants marins.

Qu'elles utilisent les chutes d'eau naturelles (cascades) ou artificielles (barrages hydroélectriques), le débit des cours d'eau ou les courants marins (marée, circulation thermohaline, etc.), les centrales hydrauliques produisent de l'énergie mécanique convertie la plupart du temps en électricité (hydroélectricité).

Attestés dès l'Antiquité, les moulins à eau ont exploité cette énergie pour pomper l'eau, moulin le grain ou encore actionner des marteaux pilons. Leurs héritières modernes, les centrales hydroélectriques, fournissent une électricité renouvelable en produisant peu de gaz à effet de serre (sauf dans le cas des régions tropicales, où la dégradation de matière organique produirait du méthane).

L'exploitation de l'énergie hydraulique a toutefois certains inconvénients, notamment en matière de continuité des cours d'eau. En effet, la création d'un barrage représente un obstacle pour la navigation, la migration des espèces aquatiques et le transfert de sédiments[7] voir image (I-5).



Figure I-5 Énergie hydraulique [8]

I.3.4 Énergie géothermique

L'énergie géothermique est une forme d'énergie renouvelable qui provient de la chaleur naturelle de la Terre. Elle est issue de la chaleur emmagasinée dans le noyau terrestre, la croûte terrestre et les eaux souterraines. Cette chaleur peut être exploitée pour produire de l'électricité, du chauffage et du refroidissement, voir figure (I-6).

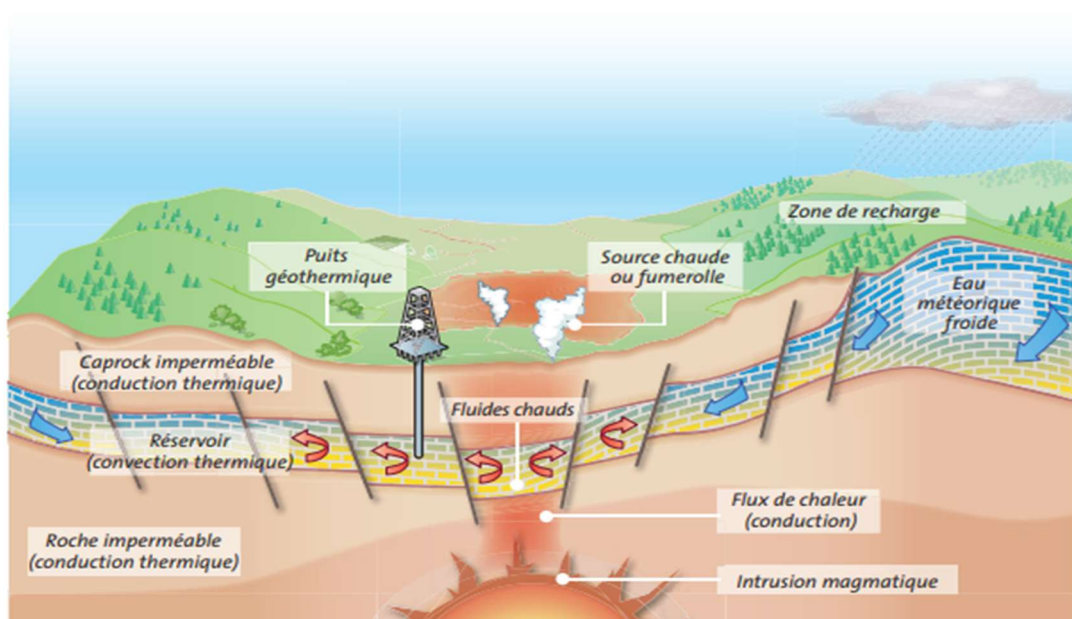


Figure I-6 Énergie géothermique [5]

I.3.5 La biomasse

La biomasse est un combustible varié. Au sens large, elle comprend « l'ensemble des êtres vivants, animaux ou végétaux, ainsi que leurs productions, sous-produits ou déchets (déjections, etc.) ». La biomasse forme les différents écosystèmes de la planète et participe à leurs équilibres naturels. Elle a d'abord été cultivée et élevée par l'homme pour son alimentation, mais elle fournit également des

matériaux de construction et est utilisée comme matière première pour certains procédés industriels et pour la production d'énergie, on parle alors de bioénergie[9] .

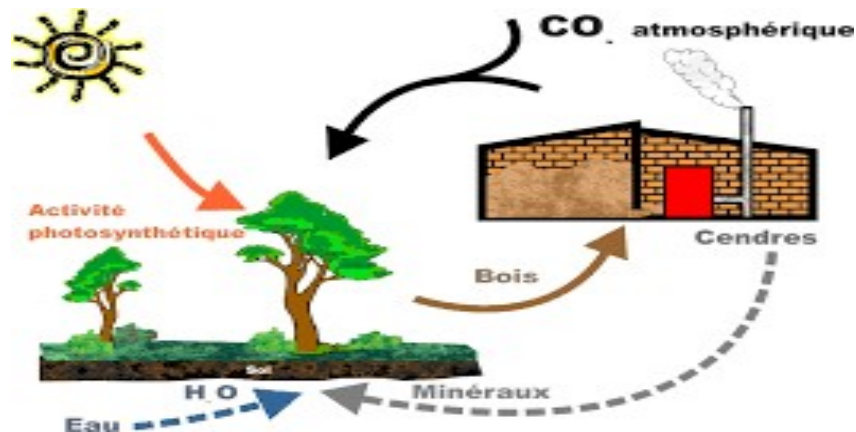


Figure I-7 Énergie de la Biomasse [10]

I.3.6 Énergie marémotrice

L'énergie marémotrice consiste à exploiter l'énergie issue des marées dans des zones littorales de fort marnage (différence de hauteur d'eau entre la marée haute et la marée basse se succédant). Le phénomène de marée est induit par l'effet gravitationnel sur l'océan de deux astres à proximité de notre planète : la Lune et le Soleil.

Contrairement aux hydroliennes qui captent l'énergie cinétique des courants de marée, le principe d'une centrale marémotrice s'appuie sur une énergie potentielle : cette source d'énergie utilise le marnage pour produire de l'électricité en exploitant la différence de hauteur entre deux bassins séparés par un barrage. La centrale de la Rance en Bretagne a été la première grande centrale marémotrice dans le monde et longtemps la plus puissante avec une capacité installée de 240 MW.

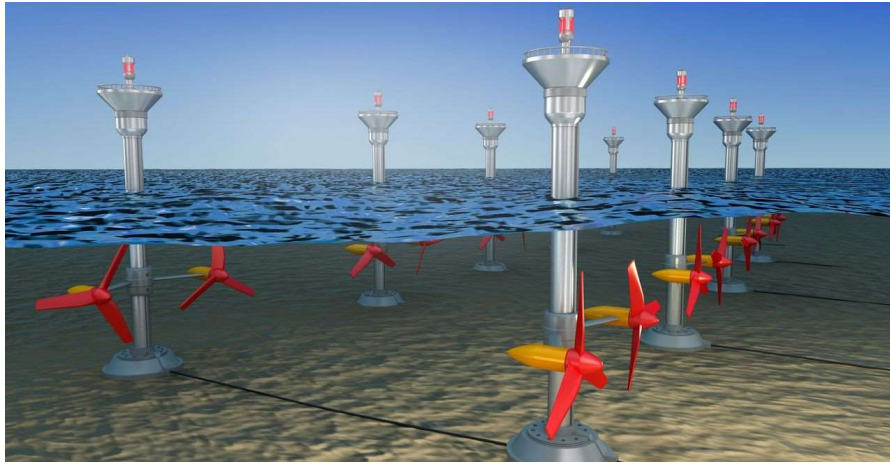


Figure I-8 Énergie marémotrice [11]

I.4 L'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable produite par le rayonnement du soleil. Découverte en 1839 par le physicien français Becquerel. En 1954, trois chercheurs américains (Chapin, Pearson et Price) des laboratoires BELL mirent au point la première cellule photovoltaïque au silicium avec un rendement de 4%. Une première maison alimentée par des cellules photovoltaïques fut construite par l'université de Delaware aux États-Unis en 1973. En 1983, l'australien Hans Tholstrup construit le "Quiet Achiever", première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourant une distance de 4 000 km en Australie. L'étymologie du mot « photovoltaïque » provient du grec « photos » = lumière, et de Volta = inventeur de la pile électrique[12].

I.4.1 Avantages et inconvénients

I.4.1.1 Avantages

- Source d'énergie gratuite (le soleil).
- Pas de gaz polluant, ni de bruit.
- Entretien minimal pour un bon fonctionnement.
- Pas de parties mobiles, peu d'usure dans le temps.
- Systèmes modulaires fonction du besoin, faciles à monter.
- Autonomie[12].

I.4.1.2 Inconvénients

- Technologie à ces débuts, encore peu diffusée, donc chère.
- Énergivore à la fabrication.

- Production non continue d'énergie (jour/nuit, été/hiver), énergie Intermittente[12].

I.5 Pompage photovoltaïque

Le pompage photovoltaïque permet l'approvisionnement en eau à partir d'une source d'eau (puit, forage, cours d'eau, rivière...) sur des endroits ni raccordé au réseau électrique ni raccordables.

Une installation photovoltaïque pour le pompage doit être constituée de :

Panneaux photovoltaïques.

- Convertisseurs DC/AC pour les pompes à courant alternatif.
- Pompes (CC ou CA).
- Tuyauteries.
- Réservoirs pour stocker l'eau pompé.
- Batteries de stockage de l'énergie.

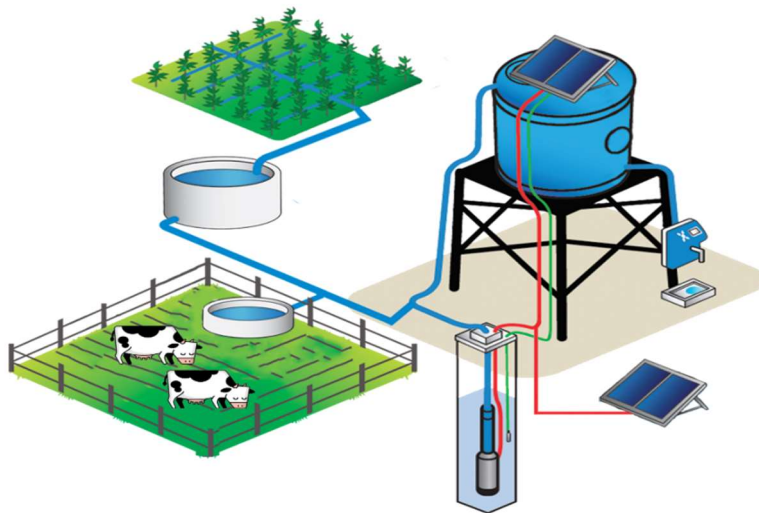


Figure I-9 Pompage photovoltaïque [13]

I.5.1 Avantages et inconvénients

Le pompage photovoltaïque présente de nombreux avantages à savoir :

- Fonctionne à l'énergie solaire qui est une énergie gratuite, renouvelable et inépuisable.
- Frais d'entretien quasi nuls cause de l'absence des pièces d'usure.
- Duré de vie des panneaux photovoltaïques relativement longue (peut excéder vingt ans).
- Il est respectueux à l'environnement.

Après avoir cité les avantages du pompage photovoltaïque, nous penchons maintenant à ces inconvénients :

- Cout d'investissement très élevé.
- Nécessite des études préalables par des spécialistes encore un peu nombreux.

I.5.2 Les différents types de pompes

Il existe deux principaux types de pompes à savoir :

I.5.2.1 Les pompes centrifuges :

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Afin d'augmenter la pression, donc la hauteur de refoulement, plusieurs étages d'aubages peuvent être juxtaposés. Chaque étage fait passer l'eau à l'étage suivant en relevant la pression jusqu'à l'étage final, délivrant un volume d'eau à pression élevée. Ces pompes incluent les pompes submersibles avec moteur de surface ou submergé, les pompes flottantes et les pompes rotatives à aspiration[14] voir figure (I-10).

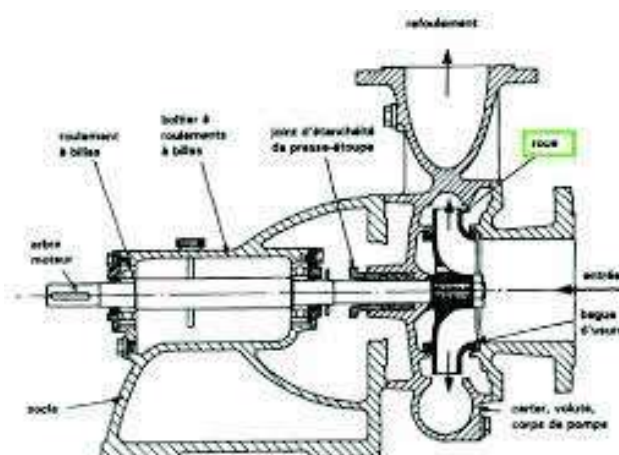


Figure I-10 Pompes centrifuges [15]

I.5.2.2 Les pompes volumétriques :

La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement. Les pompes volumétriques incluent les pompes à vis, les pompes à palettes, les pompes à piston et les pompes à diaphragme. Les deux derniers types sont utilisés dans les puits ou les forages profonds (plus de 100 mètres). L'entraînement est habituellement assuré par un arbre de transmission très long, à partir d'un moteur électrique monté en surface[14] voir figure (I-11)

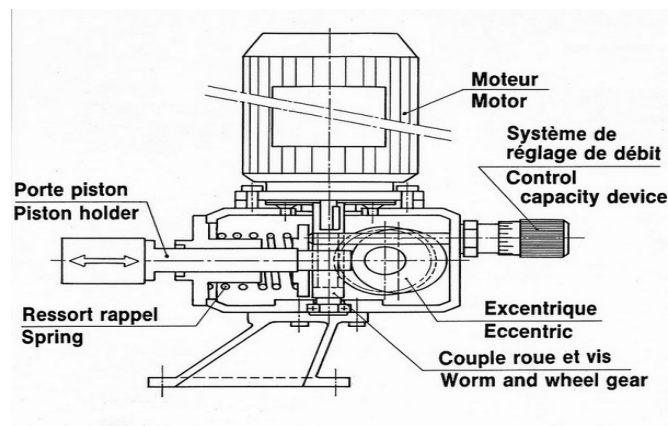


Figure I-11 Pompes volumétriques [16]

I.6 Les systèmes d'irrigation

Les principaux types d'irrigation sont :

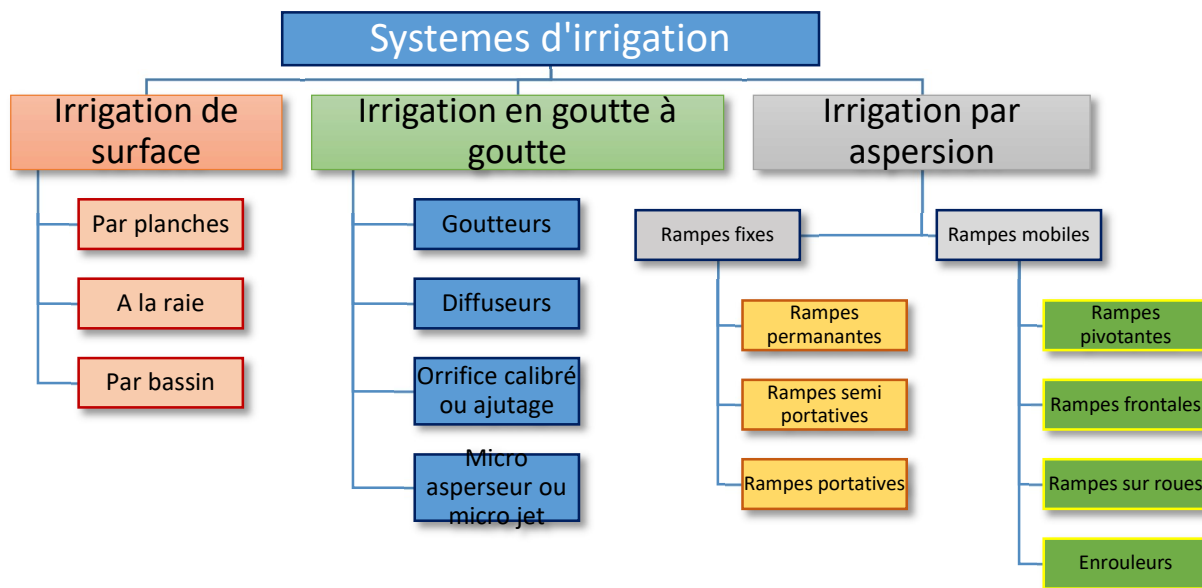


Figure I-12 Organigramme des systèmes d'irrigation

I.6.1 Irrigation de surface :

Peu coûteux en investissement et nécessitant peu d'énergie, l'irrigation de surface est le mode d'irrigation le plus ancien et le plus répandu dans le monde.

Sous la forme traditionnelle, l'eau est distribuée sur la parcelle par des canaux en terre, dans les berges desquelles sont ouvertes des brèches qui alimentent des bassins, des planches ou des raies[17]voir figure (I-13).



Figure I-13 Irrigation de surface [18]

I.6.2 Irrigation par aspersion :

L'irrigation par aspersion consiste à fournir l'eau nécessaire aux cultures sous une forme analogue à la pluie naturelle. L'eau est mise sous pression, généralement par pompage, pour être ensuite

distribuée au moyen d'un réseau de canalisations. La distribution d'eau est faite au moyen de rampes d'arrosage équipées d'asperseurs. L'eau sort sous la forme d'un jet et se répartit en gouttelettes d'eau qui tombent sur le sol. Le choix du dispositif de pompage, des asperseurs et la bonne gestion de l'eau doivent garantir la distribution uniforme de l'eau d'irrigation[19] voir figure(I-14).



Figure I-14 Irrigation par aspersion [20]

I.6.3 Irrigation au goutte à goutte ou micro irrigation :

L'irrigation au goutte à goutte, appelée aussi micro-irrigation, consiste à délivrer l'eau en gouttes à la surface du sol avec une faible dose (2-20 litres par heure). L'eau est canalisée dans des tuyaux en plastique munis d'orifices appelés goutteurs (émetteurs, distributeurs, jets d'eau, etc.). L'eau est délivrée au voisinage immédiat de la plante de sorte que l'humidification soit limitée à la zone racinaire du sol. Ceci correspond à une utilisation plus efficace de l'eau qu'avec l'irrigation de surface ou par aspersion, où l'humidification concerne la totalité du sous-sol des plantations. En irrigation au goutte à goutte, la fréquence des arrosages est supérieure à celle des autres méthodes (d'habitude tous les 1 à 3 jours), ce qui maintient une forte humidité du sol, favorable à la croissance des cultures[19] voir figure (I-15).



Figure I-15 Irrigation au goutte à goutte [21]

I.7 Conclusion

Les énergies renouvelables, le pompage photovoltaïque et les systèmes d'irrigation offrent des solutions durables et efficaces pour répondre aux besoins énergétiques et alimentaires de manière respectueuse de l'environnement.

Le pompage photovoltaïque combine l'énergie solaire photovoltaïque avec des pompes pour fournir de l'eau de manière efficace et durable aux systèmes d'irrigation. Cela permet une utilisation optimisée de l'eau, en évitant les gaspillages et en préservant les ressources hydriques précieuses.

Les systèmes d'irrigation intelligents, qui utilisent des capteurs, des technologies de traitement des données et des algorithmes avancés, permettent une gestion précise de l'eau dans les cultures. Ils fournissent la quantité adéquate d'eau au bon moment, en fonction des besoins spécifiques des plantes, favorisant ainsi une croissance optimale et une utilisation efficace des ressources.

Chapitre II : Modélisation de système de pompage photovoltaïque

II.1 Introduction

Les systèmes d'irrigation utilisant l'énergie photovoltaïque reposent sur l'utilisation de panneaux solaires pour convertir la lumière du soleil en électricité. Cette électricité est ensuite utilisée pour alimenter les différents composants du système d'irrigation, y compris les pompes qui sont essentielles pour l'élévation et la distribution de l'eau.

II.2 Modélisation d'un panneau photovoltaïque

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque. [2]

II.2.1 Cas d'une cellule réelle

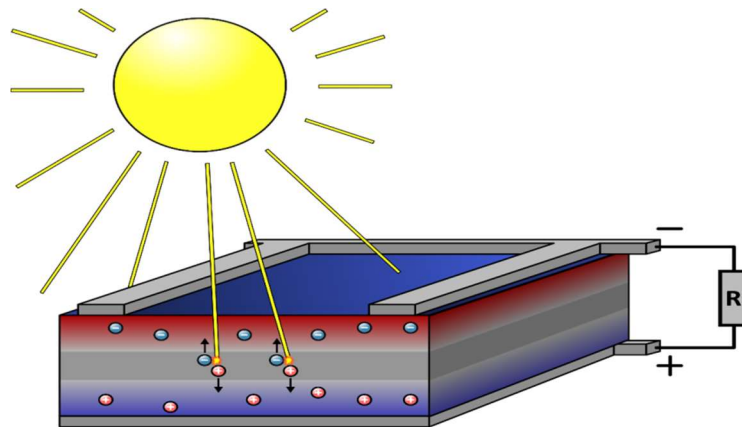


Figure II-1 Cellule photovoltaïque [22]

II.2.1.1 Modèle à une seule diode

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (II-2). Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (IP) caractérisant le photo-courant, une résistance série (Rs) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunt (Rp) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (Rs)

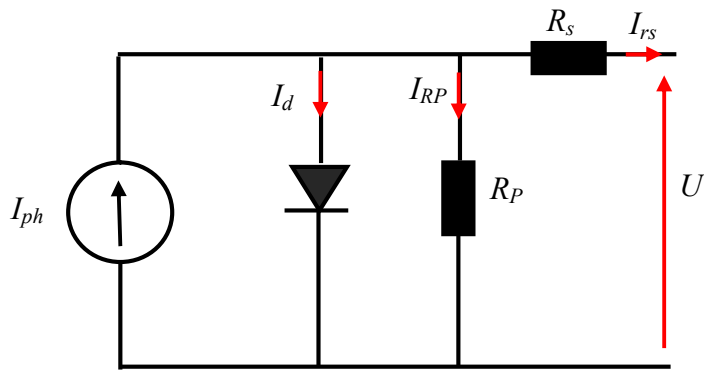


Figure II-2 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [22]

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV une seule diode est donné par :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{U + I_{rs} \cdot R_s}{V_t}\right) - 1 \right) - \frac{U + R_s \cdot I_{rs}}{R_p} \quad (II.1)$$

Où :

- $V_t = \frac{KT}{q}$,
- I_0 est le courant de saturation,
- K est la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K),
- T est la température effective des cellules en Kelvin(K),
- q est la charge de l'électron ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ C),
- n est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$),
- I est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur,
- U est la tension aux bornes de cette même cellule, I_{ph} est le photo-courant de la cellule
- R_p est la résistance parallèle caractérisant les courants de fuite de la jonction,
- R_s est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

II.2.1.2 Modèle à deux diodes

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent. Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation

I_{s1} et I_{s2} , les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} , qui dépend de l'éclairement solaire.

La résistance série R_s rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact semi-conducteur-Métal Sa valeur est déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique $I(V)$ pour une tension V égale à V_{co} Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule Ceci peut être réalisé en

optimisant le contact métal/semi-conducteur et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs. La résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit R_{sh} réduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haut température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un Court-circuit sur les bords de la cellule Cette valeur devra être la plus élevée possible. Le modèle à deux-diodes est représenté par une équation implicite du courant qui ne peut être résolue qu'à l'aide de méthodes itératives.

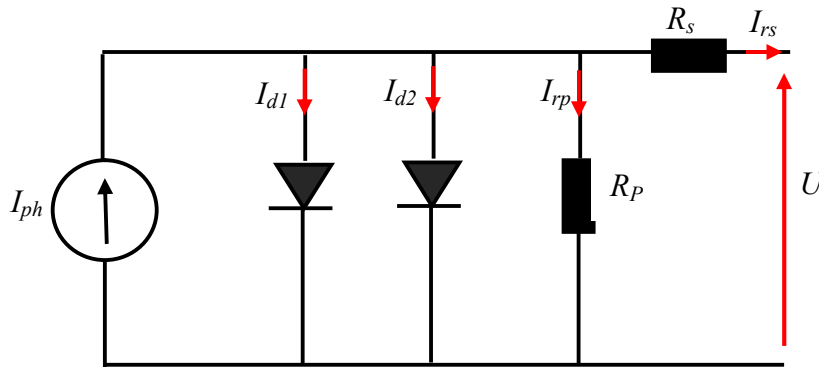


Figure II-3 Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{rp} \quad (II.2)$$

Avec :

I_{ph} : courant photonique

I_{d1} : courant de diode1

I_{d2} : courant de diode2

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation [:

$$I_{d1} = I_{s1} \left(\exp\left(\frac{vd}{n1}\right) - 1 \right) \quad (II.3)$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left(\exp\left(\frac{vd}{n2}\right) - 1 \right) \quad (II.4)$$

$$I_{rp} = \frac{U + I_{rs} R_s}{R_p} \quad (II.5)$$

Avec :

$V_T = \frac{kT}{q}$: représentant le potentiel thermodynamique

q

T_c : est la température absolue

q : la constante de charge d'électron, $1.602.10^{-23}C$

K : la constante de Boltzmann, $1.38.10^{-23}J/k$

I_{rp} : est le courant de la résistance de shunt

Le courant photonique lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence est :

$$I_{ph} = G_{ef} (I_{ph_{ref}} - U_{cc}(T_c - T_{c_{ref}})) \quad (II.6)$$

Avec :

$I_{ph_{ref}}$: le courant photonique sous a condition de référence[A]

μ_{cc} : coefficient de sensibilité de l'intensité à la température[A/K]

G, G_{ref} : l'éclairement réel et la condition de référence[W/m²]

$T_c, T_{c_{ref}}$: la température de cellule, réelle et à la condition de référence

Les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} sont donnés par les relations suivantes :

$$I_{s1} = C_{s1} \cdot T_c^3 \cdot e^{-\frac{E_{gap} \cdot q}{n1 \cdot T \cdot K}} \quad (II.7)$$

$$I_{s2} = C_{s2} \cdot T_c^{3/2} \cdot e^{-\frac{E_{gap} \cdot q}{n2 \cdot T \cdot K}} \quad (II.8)$$

Les constantes C_{s1} et C_{s2} sont généralement comprises respectivement entre 150 - 180A.K⁻³ et 1,3 - 1,7 x10⁻²A.K^{-5/2} pour une cellule de 100 cm².

Une valeur du facteur d'idéalité n différent de l'unité est associée à un mécanisme de recombinaison prédominant e telle dépend de la nature et de la position des niveaux pièges.

- $n=1$:La zone de charge d'espace est dépeuplée (cas idéal).
- $1 < n < 2$:Le niveau piège est peu profond dans la zone de charge d'espace et n dépend de la polarisation [39].
- $n=2$:Les centres de recombinaison sont distribués uniformément dans la zone de charge d'espace et sur un seul niveau au milieu de la bande interdite.
- $2 < n < 4$: Les centres de recombinaison sont distribués de façon non uniforme avec une densité réduite au centre de la zone de charge d'espace par rapport à la surface

E_{gap} : Énergie de gap (Silicium cristallin=1 2Ev Silicium amorphe=1 7Ev CIS=1 03Ev Cdt=1 5eV).

II.3 Modélisation du moteur à courant continu

II.3.1 Définition du moteur à courant continu

Le moteur à courant continu est un convertisseur électromécanique d'énergie. Il permet de transformer une énergie électrique continue en une énergie mécanique pour entraîner une charge en mouvement.

II.3.2 Symboles :

Le moteur à courant continu est représenté par son symbole normalisé :

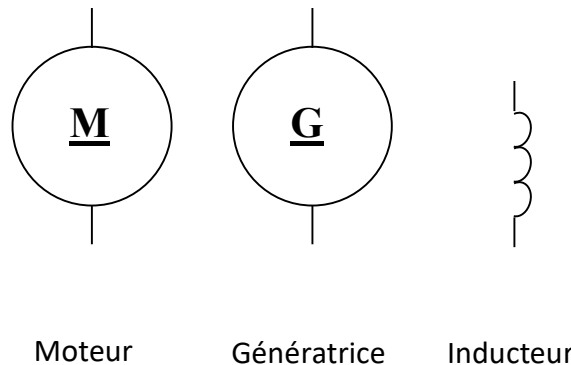


Figure II-4 Symboles normalisé du moteur à courant

II.3.3 Principe de fonctionnement

Le moteur à courant continu fonctionne selon la loi de Laplace : « Tout conducteur de longueur L parcouru par un courant I et placé dans un champ magnétique B est soumis à une force F ».

Le principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu repose sur la création d'un couple électromagnétique sur un rotor porteur de conducteurs parcourus par un courant continu, et qui se déplacent dans un champ magnétique.

II.3.4 Constitution du moteur à courant continu

Le moteur à courant continu est constitué de deux parties principales :

- **Partie fixe** : stator (inducteur).
- **Partie mobile** : rotor (induit).

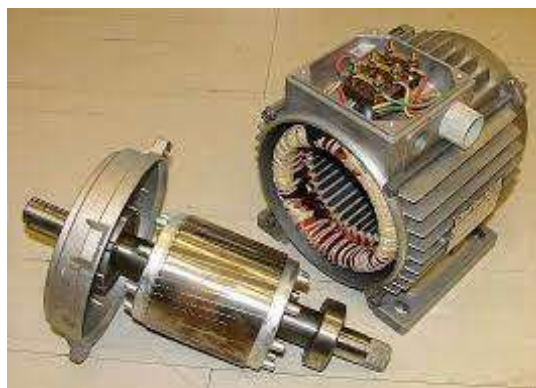


Figure II- 5 Stator (à droite) et rotor (à gauche) du moteur à courant continu [23]

II.3.4.1 Stator

Le stator produit le champ magnétique (champ d'excitation) à partir de l'enroulement alimenté par un courant continu ou par des aimants permanents collés à l'intérieur du stator. Le flux est orienté du pôle nord au pôle sud.

Les bobines excitatrices multipolaire sont connectées de façon que les pôles adjacents ayant des polarités magnétiques contraires.

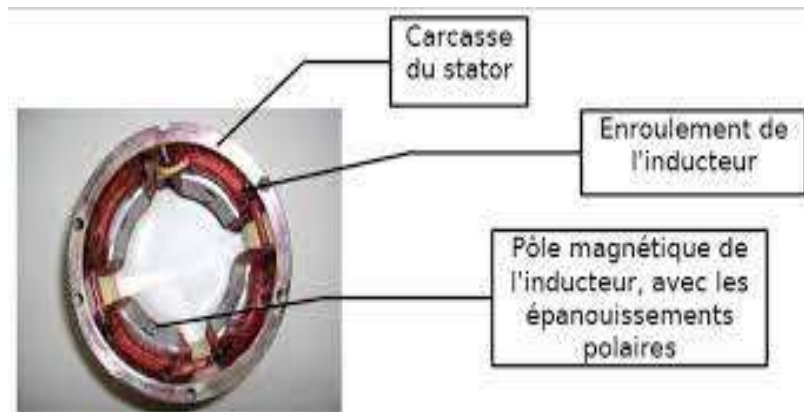


Figure II- 6 Le stator du moteur à courant continu [24].

II.3.4.2 Rotor

Il est formé d'un empilage de tôles magnétiques et il est soumis à un couple et entraîné en rotation dans le champ inducteur.



Figure II-7 Rotor du moteur à courant continu [24]

II.3.4.3 Collecteur et balais

Le collecteur est un ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres par des feuilles de mica. Le collecteur est monté sur l'arbre de machine, mais isolé de celui-ci. Les deux fils sortant de chaque bobine de l'induit sont successivement symétriquement soudés aux lames du collecteur

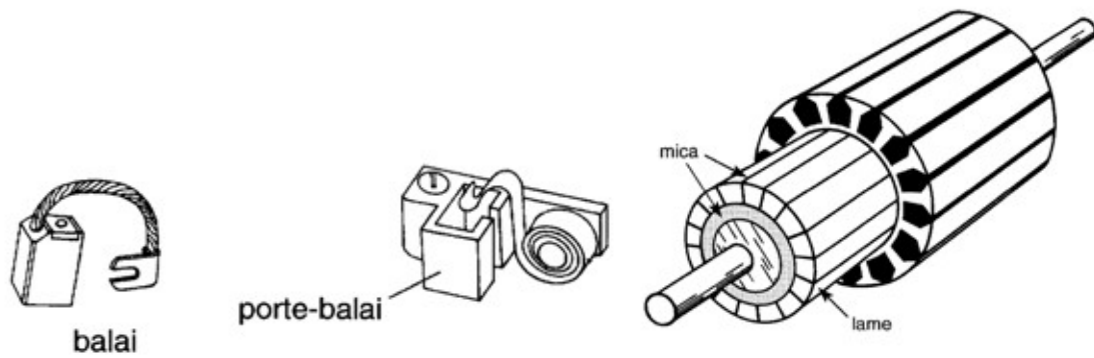


Figure II-8 balai et collecteur

Les connections avec le générateur qui alimente la machine (cas d'un moteur) se font par l'intermédiaire de contacts mobiles : les balais, solidaires du stator, frottent sur le collecteur lié au rotor. L'enroulement d'induit est relié au collecteur formé de lames conductrices isolées entre elles.

II.3.4.4 Rôle du circuit inducteur :

C'est le stator, il est constitué d'enroulement parcouru par un courant (I_{ex}), il crée donc dans l'entrefer un champ magnétique \vec{B} constant.

L'inducteur peut être :

- Un bobinage créant un flux magnétique $\Phi = f(I_{ex})$.
- Un aimant permettant pour les moteurs de faible puissance (pour les petites machines), dans ce cas Φ est constant.

II.3.4.5 Rôle du circuit l'induit :

C'est le rotor, il est constitué de plusieurs enroulements répartis pour former un cylindre, il peut être alimenté (cas d'un moteur) et il se mettra à tourner. À l'inverse, si on le fait tourner, il apparaît à ses bornes une tension (cas d'une génératrice).

II.3.4.6 Rôle du collecteur :

Considérons un conducteur placé au périphérique du rotor. Un générateur fait circuler un courant dans le sens indiqué sur la figure.

Une force de Laplace s'exerce sur le conducteur qui est soumis au champ magnétique créé par l'inducteur. Cette force a pour direction la tangente au rotor et comme sens celui qui est indiqué sur la figure (II-9). Le moteur se met à tourner. Cependant, lorsque le conducteur traverse la ligne neutre, la force change de sens (Fig. II-10). Il est donc impossible d'obtenir ainsi une rotation continue du moteur [1]

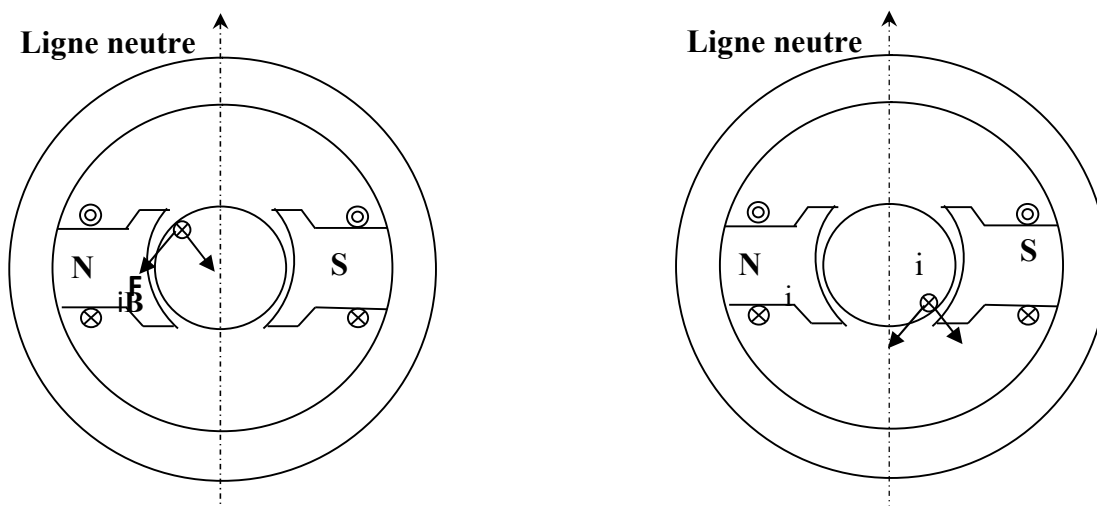


Figure II- 9 Force de Laplace s'exerçant sur un conducteur puis Force de Laplace pour un conducteur ayant traversé la ligne neutre

Pour résoudre le problème, il faut inverser le sens du courant lorsque le conducteur arrive sur la ligne neutre. Pour cela, on associe deux conducteurs diamétralement opposés pour former une spire. Du fait de l'orientation contraire des courants, les deux forces de Laplace tendent à faire tourner le rotor dans le même sens .

Ensuite, on soude les extrémités de la spire à deux lames conductrices séparées par un isolant : c'est le collecteur. Deux balais sont disposés dans l'axe des pôles et frottent sur le collecteur. Le générateur qui alimente le moteur est relié à ces deux balais (FigI-8) [1]. Lorsque les conducteurs passent par la ligne neutre, les connexions du générateur sont inversées ce qui permet aux forces de Laplace d'entraîner le rotor toujours dans le même sens. Les deux forces F_1 et F_2 forment un couple. Si i est le courant dans la spire, L la longueur des conducteurs utiles et R le rayon du rotor, le moment de couple s'exprime par la formule: $C = 2RiL|B|$ (I. 1)

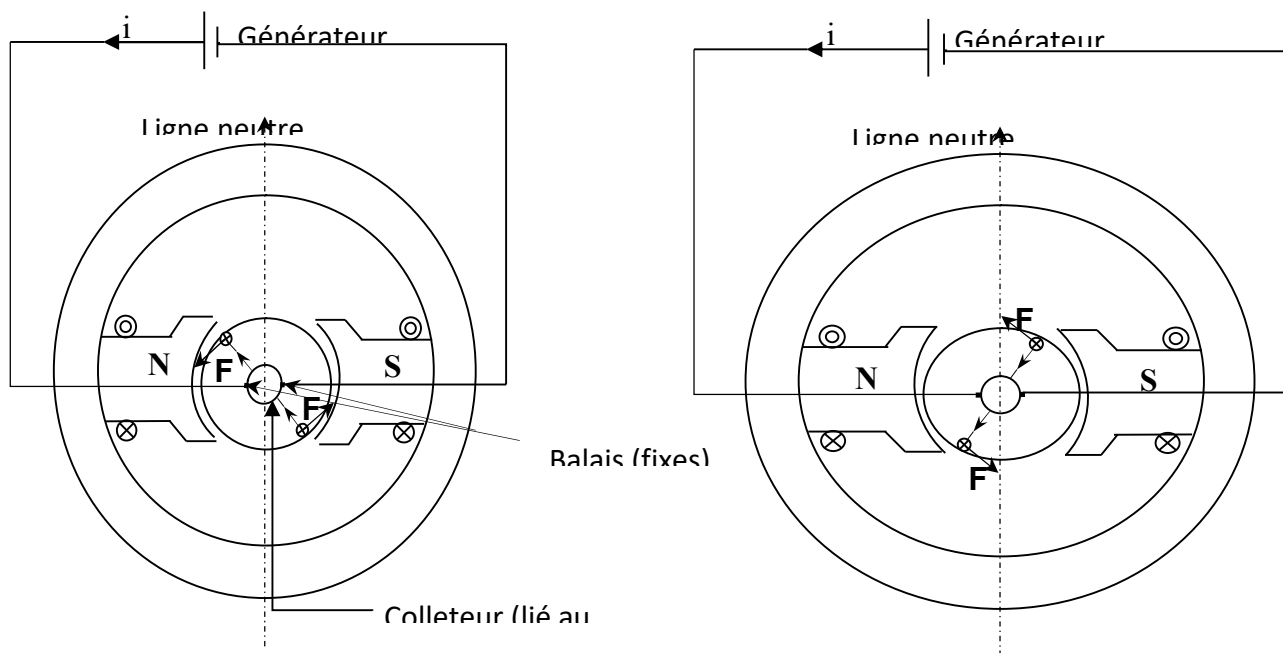


Figure II-10 Fonctionnement de l'ensemble collecteur-balais [1]

II.3.5 Modélisation de l'induit

On peut représenter l'induit par un schéma électrique équivalent :

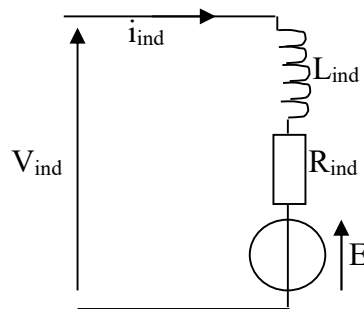


Figure II- 11 Schéma équivalent de l'induit.

$$V_{ind} = E + i_{ind}R_{ind} + L_{ind} \frac{di_{ind}}{dt} \quad (II. 9)$$

$$\frac{di_{ind}}{dt} = -\frac{E}{L_{ind}} - i_{ind} \frac{R_{ind}}{L_{ind}} + \frac{V_{ind}}{L_{ind}} \quad (II. 10)$$

On remplace (II.8) et (II.9) dans (II.10) on obtient :

$$\frac{di_{ind}}{dt} = -\frac{K_e \cdot k i_{ex} \omega}{L_{ind}} - i_{ind} \frac{R_{ind}}{L_{ind}} + \frac{V_{ind}}{L_{ind}} \quad (II. 11)$$

Avec :

$$L_{index} = K_e \cdot k \quad (II. 12)$$

II.3.5.1 Modélisation de l'inducteur

On peut représenter l'inducteur par un schéma électrique équivalent :

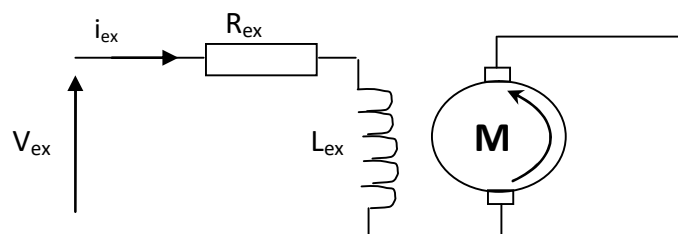


Figure II-12 Schéma équivalent de l'induit

D'après le schéma on obtient :

$$V_{ex} = R_{ex} i_{ex} + L_{ex} \frac{di_{ex}}{dt} \quad (II. 13)$$

Donc :

$$\frac{di_{ex}}{dt} = -\frac{R_{ex}}{L_{ex}} i_{ex} + \frac{V_{ex}}{L_{ex}} \quad (II.14)$$

Équation mécanique

L'équation mécanique est donnée par la formule suivant :

On a :

$$C_m - C_r = j \frac{d\omega}{dt} \quad (II.15)$$

$$C_{em} = C_m + \omega f_c \quad (II.16)$$

Avec :

C_m : Le couple mécanique.

f_c : Coefficient de frottement.

Alors : $C_m = C_{em} - \omega f_c \quad (II.17)$

On remplace (III. 11) dans l'équation mécanique on obtient :

$$C_{em} - \omega f_c - C_r = j \frac{d\omega}{dt} \quad (II.18)$$

On a :

$$C_{em} = K_e \phi i_{ind} \quad (II.19)$$

$$\phi = f(i_{ex}) = k i_{ex} \quad (II.18)$$

On remplace C_{em} et ϕ dans l'équation (III. 10) on obtient :

$$\begin{aligned} k_e k i_{ex} i_{ind} - \omega f_c - C_r \\ = j \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \quad (II.20)$$

Avec :

$$L_{index} = K_e \cdot k \quad (II.21)$$

II.3.5.2 Force électromotrice

Nous savons qu'une bobine en mouvement dans un champ magnétique voit apparaître à ses bornes une force électromotrice (f.é.m.) donnée par la loi de Faraday :

Sur ce principe, la machine à courant continu est le siège d'une f.é.m. E :

$$E = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot n \cdot \phi \cdot \Omega \quad (II.22)$$

Avec :

p : Le nombre de paires de pôles

a : Le nombre de paires de voies d'enroulement

n : Le nombre de conducteurs (ou de brins - deux par spires)

Φ : Flux maximum à travers les spires (en Webers - Wb)

Ω : Vitesse de rotation (en rad. s-1)

Finalement :

$$E = k. \phi. \Omega \quad (II.23)$$

Avec :

$$k = \frac{P}{2.\pi.a} . n \quad (II.24)$$

II.4 Modélisation d'un hacheur DC/DC

Le présent paragraphe traite la conversion DC/DC, qui a pour but d'assurer la fluence d'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu. Pour ce type de convertisseur statique, la gamme de puissance que l'on peut « traiter » s'étend de quelques watts, à une trentaine de kilowatts environ. Cependant, l'apparition de composants de puissance sans cesse plus performants, tout comme la définition de nouvelles structures (multi niveau en particulier), permettent d'envisager le traitement de puissances plus élevées. Nous distinguons deux types de convertisseurs continus/continus : les convertisseurs appelés ((hacheurs)), qu'ils soient abaisseurs, élévateurs ou bien dévolteurs {survolteurs, qui correspondent aux applications moyennes et fortes puissances, } les alimentations à découpages, qui correspondent aux applications petites puissances de la conversion DC/DC[25].

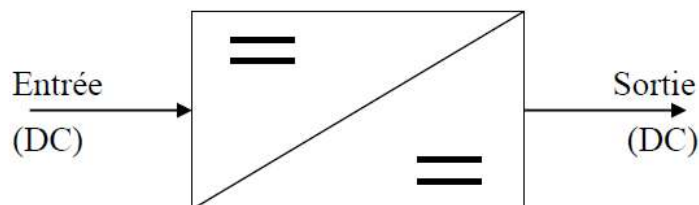


Figure II-13 Symbole de l'hacheur

II.4.1 Différents types d'hacheurs

Selon la position du commutateur et de l'hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés :

- Abaisseur de tension « Buck ».
- Élévateur de tension « Boost ».
- Abaisseur élévateur de tension « Buck-Boost ».

II.4.1.1 Abaisseur de tension « Buck »

L'hacheur abaisseur, sous sa forme de base est présenté par la figure (II-14). Les composants clés sont l'inductance (L), le commutateur (Transistor) (S), la diode (D,) et le condensateur (C). Celui-ci se charge par le commutateur (S) qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture, Ce qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge pour un cycle de période de fonctionnement[26].

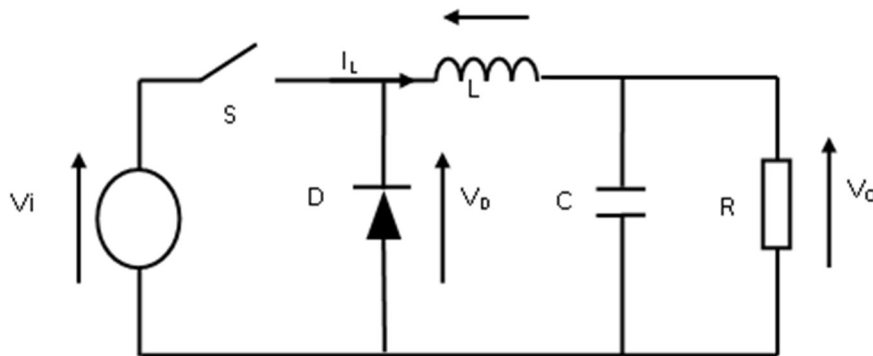


Figure II-14 schéma du convertisseur DC/DC Buck

II.4.1.1.1 Principe de fonctionnement

L'interrupteur S est fermé pendant la fraction du temps dT de la période de découpage T . La source d'entrée fournit l'énergie à la charge R à travers l'inductance L . Lors du blocage du S , la diode D assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance sera déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. Les formes d'ondes en conduction continue sont représentées.

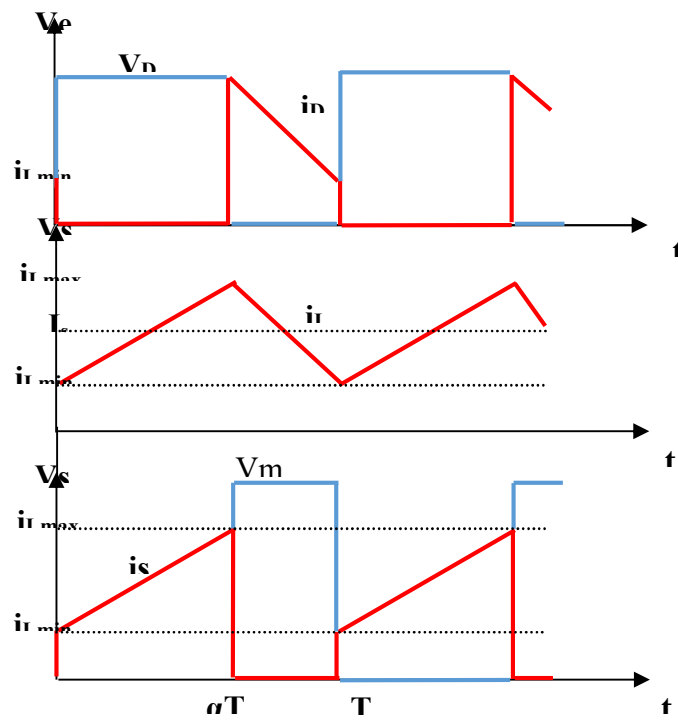


Figure II-15 Formes d'ondes du convertisseur Buck

II.4.1.1.2 Analyse du circuit pendant les positions ON et OFF de l'interrupteur

Les équations régissant le fonctionnement de l'interrupteur S à l'état fermé sont données ci-dessous :

$$V_L = V_1 - V_2 = L \frac{di_L}{dt} \quad (II.25)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V^1 - V^2}{L} \quad (II.26)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{dt} = \frac{V^1 - V^2}{L} \quad (II.27)$$

Δi_L Pour le commutateur

fermé

$$\Delta i_{L_{on}} = \frac{(V^1 - V^2)dT}{L} \quad (II.28)$$

Les équations régissant le fonctionnement de l'interrupteur S à l'état ouvert sont données Ci-dessous :

$$V_L - V_2 = L \frac{di_L}{dt} \quad (II.29)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V}{L} \quad (II.30)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-d)T} = \frac{-V}{L} \quad (II.31)$$

Δi_L Pour le commutateur ouvert :

$$\Delta i = -\left(\frac{V}{L}\right)(1-d)t \quad (II.32)$$

Si on considère que le convertisseur est en régime permanent, l'énergie stockée dans chaque composant est la même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Par conséquent, le courant i_L traversant l'inductance sera le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta i_{L_{off}} + \Delta i_{L_{on}} = 0 \quad (II.33)$$

II.4.1.2 Élévateur de tension « Boost »

Le convertisseur Boosta est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure(II-6), représente le circuit électrique du Boosta. Au premier temps (αT), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (i_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D)[26].

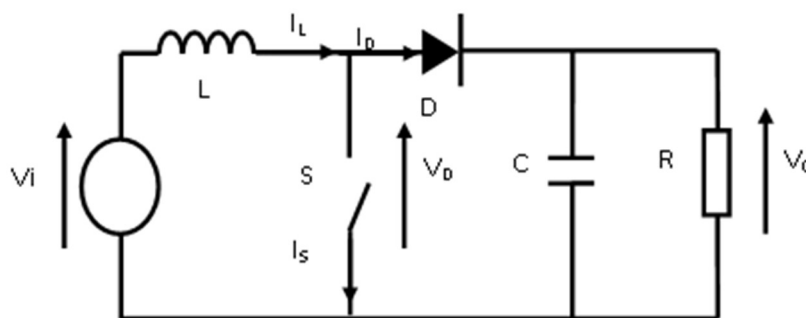


Figure II-16 schéma du convertisseur DC/DC Boost

II.4.1.2.1 Principe de fonctionnement

L'interrupteur est fermé pendant la fraction du temps dT de la période de découpage T . Le courant dans l'inductance croît progressivement, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Lors du blocage du transistor, la diode assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. Les formes d'ondes en CCM (mode de conduction continu)

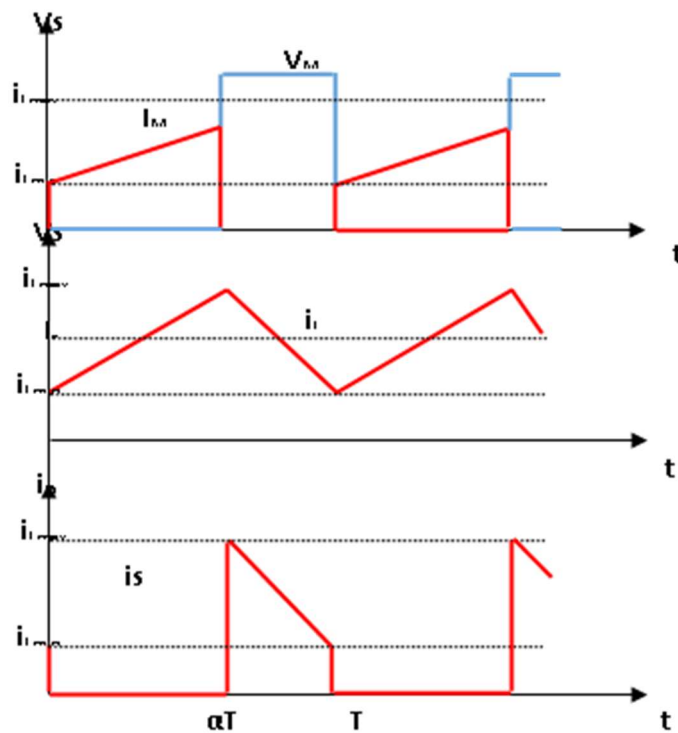


Figure II- 17 Formes d'ondes du convertisseur Boost

II.4.1.2.2 Analyse du circuit pendant les positions ON et OFF de l'interrupteur

Les équations régissant le fonctionnement de l'interrupteur S à l'état fermé sont données ci-dessous :

$$V_L = V_1 - V_2 = L \frac{di_L}{dt} \quad (II. 34)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V^1}{L} \quad (II. 35)$$

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{dT} = \frac{V^1}{L} \quad (II. 36)$$

Δi_L Pour le commutateur fermé :

$$\Delta i = \frac{\Delta i_L}{dT} = \frac{V^1 dT}{L} \quad (II. 37)$$

Pour le commutateur ouvert :

$$\Delta i L_{\text{off}} + \Delta i L_{\text{on}} = 0 \quad (\text{II. 38})$$

$$\frac{\Delta^1 dT}{L} + \frac{((V_1 - V_2) (1 - d)T)}{L} = 0 \quad (\text{II. 39})$$

Il résulte que :

$$V_2 = \frac{V_1}{1 - d} \quad (\text{II. 40})$$

On constate que la tension de sortie du convertisseur ne dépend que de la tension d'entrée et du rapport cyclique d . et comme ce dernier étant toujours compris entre 0 et 1, le convertisseur est toujours élévateur de tension. On notera que la tension de sortie est théoriquement indépendante de la charge. Dans la pratique, la boucle de régulation ne devra donc compenser que les variations de la tension d'entrée et les imperfections des composants réels[27].

II.4.1.3 Abaisseur élévateur de tension « Buck-Boost »

La topologie de base de ce convertisseur est donnée par la figure (II-18). Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, la tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur se met sur la position (off). La tension à travers l'inductance est inversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode[26].

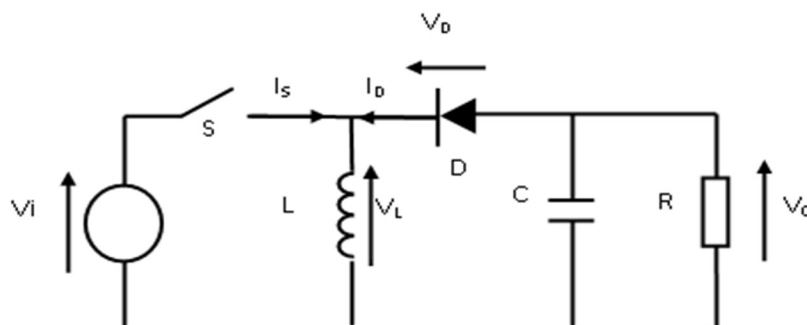


Figure II-18 Schéma du convertisseur DC/DC Buck-Boost

II.4.1.3.1 Principe de fonctionnement

L'interrupteur K_1 est fermé pendant la fraction DT de la période de découpage T . La source d'entrée fournit l'énergie à l'inductance L . La charge est déconnectée du montage (diode K_2 bloquée). Lors du blocage du transistor, la diode K_2 assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge.

Les formes d'ondes en conduction continue sont représentées. En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, ce qui impose la relation suivante :

$$U_e = U_e \frac{D}{1-D} \quad (II.41)$$

Par définition, $0 \leq D \leq 1$, ce qui induit que le montage est abaisseur et élévateur de tension (négative) .

La tension de sortie est inférieure à la tension d'entrée lorsque $D < 0,5$ et elle est supérieure dans le cas contraire (abaisseur/élévateur)[28].

II.4.1.4 Rendement du convertisseur statique

Dans ce qui a précédé, nous avons décrit le fonctionnement des convertisseurs Buck, ce convertisseur présente un meilleur rendement. En effet, il existe d'autres configurations de convertisseur, mais dont le rendement est plus faible. Le tableau (II-1) donne une idée sur le rendement de quelques convertisseurs connus. L'expression du rendement du convertisseur est donné part :

Tableau II- 1 Rendement de quelques convertisseurs connus

| Structure | Rendement de conversion | Batterie |
|------------|-------------------------|----------|
| BUCK | 93 % | 12 V |
| BOOST | 92% | 24 V |
| BUCK-BOOST | 92% | 12-24 V |

II.5 La commande MPPT

II.5.1 Définition

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT).

II.5.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un régulateur de charge solaire MPPT est assez simple : en raison de la variation du degré d'ensoleillement (irradiance) sur un panneau solaire tout au long de la journée, la tension et le courant du panneau changent continuellement. Afin de générer la plus grande puissance, le tracker de point de puissance maximale balaie la tension du panneau pour trouver le « point idéal » ou la meilleure combinaison de tension et de courant. Le MPPT est conçu pour suivre et ajuster

continuellement la tension afin de générer le maximum de puissance, quelle que soit l'heure de la journée ou les conditions météorologiques[29].

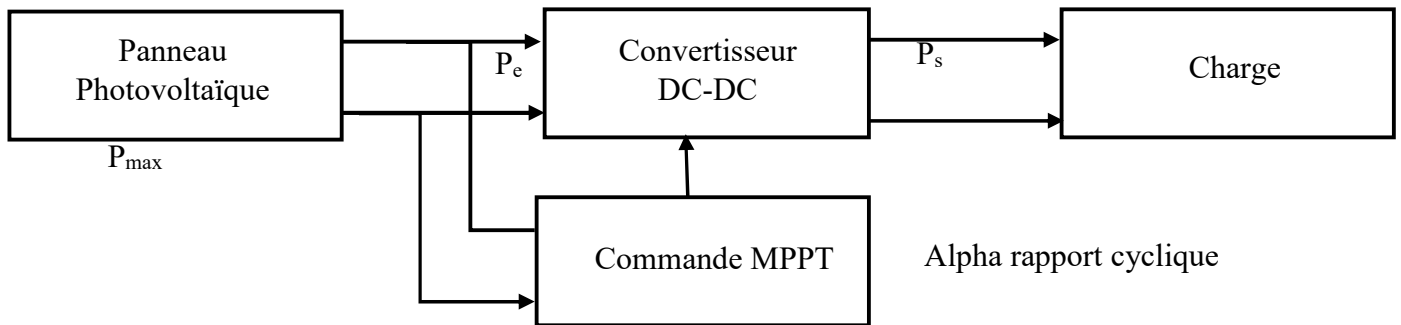


Figure II- 19 Schéma bloc d'une chaîne photovoltaïque

II.5.3 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité. Une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (II-20) on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM .

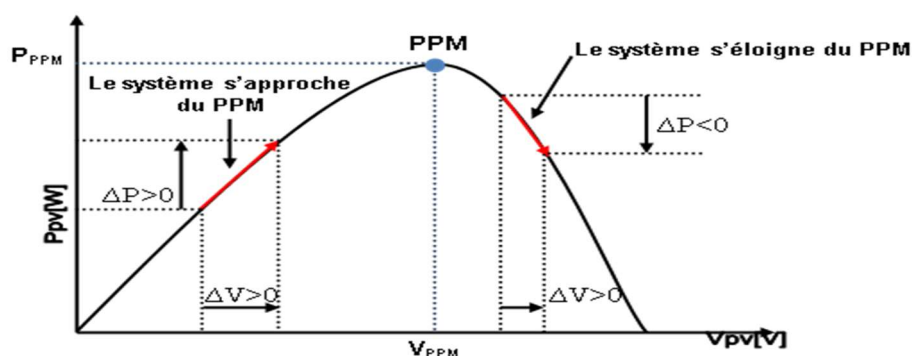
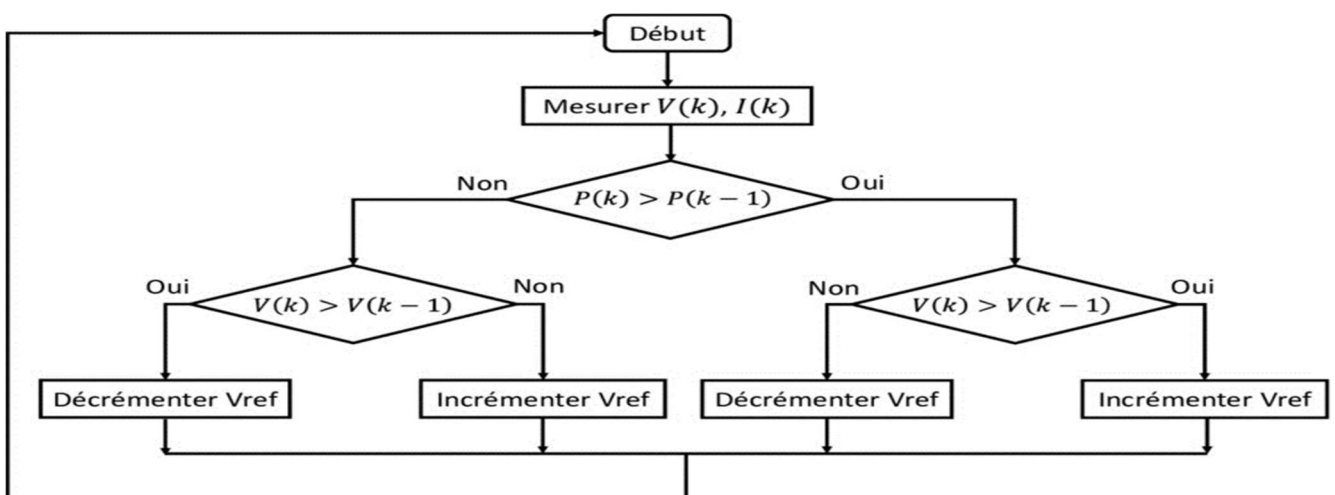


Figure II- 20 Fonctionnement de la méthode perturbation et observation [30]

II.5.4 Algorithme perturbation et observation (P&O)

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé. [20] Comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système à travers l'augmentation ou la diminution de V_{ref} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis par l'observation des effets de ces perturbations sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale V_{mp} de fonctionnement Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple. Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues relativement aux conditions stables ou lentement changeantes.

Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les conditions de stabilité ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. La valeur pour la largeur idéale du pas ΔD dépend du système, elle doit être déterminée expérimentalement. Un inconvénient de la méthode de P&O est décrit par Hussein et al. [20]. Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continue jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement, moment où il revient vers le vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance. Ces changements atmosphériques sont souvent produits dans les véhicules solaires lors de leurs passages dans une zone d'ombre tels que végétation ou bâtiments ainsi que le changement de l'angle d'incidence pour des véhicules en mouvement[31].



II.5.5 Conclusion

En conclusion, la modélisation d'un système photovoltaïque est un outil précieux pour évaluer, optimiser et prédire les performances d'un tel système. Grâce à la modélisation, il est possible de simuler le fonctionnement du système dans différentes conditions et de prendre des décisions éclairées quant à sa conception et son dimensionnement.

Chapitre III : conception réalisation du système d'irrigation intelligente

III.1 Introduction

La conception et la réalisation d'un système d'irrigation intelligente représente une approche novatrice pour relever ce défi. Ces systèmes intègrent des technologies avancées telles que les capteurs, les réseaux de communication, l'intelligence artificielle et l'automatisation pour optimiser l'utilisation de l'eau et améliorer les performances de l'irrigation.

III.2 Problématique

Notre projet s'inscrit dans le cadre des systèmes d'IoT (Internet of Things), il s'intéresse particulièrement au domaine d'irrigation intelligente. L'irrigation est l'opération consistant à apporter artificiellement de l'eau à des végétaux cultivés pour augmenter la production et permettre leur développement normal, en cas de déficit d'eau induit par un déficit pluviométrique, un drainage excessif ou une baisse de nappe, en particulier dans les zones arides. Parmi les problèmes de base rencontrés par les propriétaires terriens et agricoles, on cite :

- Manque des ressources hydrauliques et les coûts élevés pour garantir les eaux d'irrigation, surtout, avec la régression dans le niveau des eaux souterraines dans le monde, spécialement dans les zones d désertiques, arides et semi arides.
- L'irrigation manuelle (traditionnelle) qui exige de gros efforts journaliers surtout dans les espaces larges et vastes.
- D'erreur humaine (par exemple, oublier de fermer une vanne après l'arrosage du terrain).
- Manque de niveau d'eau dans le réservoir, ce qui conduit à la rotation de la pompe en vain et donc brulé C'est pour cela, qu'aujourd'hui il est indispensable et nécessaire pour les agriculteurs d'adopter et de recourir aux nouvelles technologies et exploiter ce que la science a atteint dans ce domaine.

III.3 Solution proposée

Le terme gestion des ressources de l'eau dans les utilisations agricoles est considéré comme une solution complète qui contrôle l'ensemble de tous les processus dans lequel nous avons besoin de solutions spécifiques pour augmenter l'efficacité énergétique et améliorer l'utilisation de l'eau. Plusieurs produits et solutions sont maintenant disponibles pour soutenir cette gestion. Ce qui aidera les consommateurs à augmenter l'efficacité énergétique et rationaliser l'utilisation de l'eau et augmenter l'efficacité de l'irrigation. Certaines de ces technologies se sont récemment fait connaître par irrigation intelligente, ce système prend en compte les valeurs transmises par les différents dispositifs situés dans l'environnement cible pour l'irrigation (capteur d'humidité du sol, capteur

d'humidité de l'air, pluviomètre,) et à l'aide d'un smartphone ou un ordinateur l'agriculteur peut obtenir les dernières informations en matière de sol et prendre la décision adéquate qui influencera le pilotage d'arrosage et empêchera un sur-arrosage par saison agricole et par type de culture, par exemple, lorsqu'une zone donnée est trop sèche et commencer une routine d'irrigation ou pour arrêter l'irrigation lorsqu'un point de saturation particulier est atteint. La solution à proposer est basée sur des systèmes d'IoT.

La solution Smart Irrigation permet à :

- Gérer efficacement les ressources naturelles notamment l'eau.
- Disposer en temps réel des données climatiques d'une zone.
- Déterminer avec précision le taux d'humidité du sol, permettant ainsi de déterminer les besoins en irrigation à n'importe quel endroit.
- Accroissement du taux de pénétration de la téléphonie en zone rurale.
- Préservation de la santé humaine.
- Économiser de l'argent : Les systèmes intelligents peuvent réduire votre facture annuelle d'eau de 30% en évitant le gaspillage d'eau. De plus, de nombreux fournisseurs d'eau locaux offrent des rabais pour l'achat de contrôleurs intelligents spécifiques.
- Améliore la productivité de l'eau dans la culture des légumes et fait augmenter le rendement au mètre carré de la production.
- Réduire considérablement les pertes dues à l'irrigation, d'où une économie de plusieurs millions de mètres cube d'eau chaque année dans le pays.
- Le remplacement de l'irrigation manuelle par des vannes et systèmes automatiques supprime également l'élément d'erreur humaine (par exemple, oublier de fermer une vanne après l'arrosage du terrain).
- Irriguer indépendamment du temps et de l'espace avec son téléphone portable.
- Optimiser le temps de travail.
- Libérer l'exploitant afin de s'adonner à d'autres activités de la chaîne des valeurs agricoles (recherche d'intrants, commercialisation ...)
- Transformer le téléphone en un outil de production agricole.

III.4 L'intérêt de l'irrigation intelligente

L'eau est précieuse, particulièrement dans des régions arides. Pour les agriculteurs, une irrigation intelligente signifie de meilleures récoltes à un coût moindre[32].

L'objectif est donc de réaliser des économies d'eau, en conditionnant l'arrosage (l'action) à partir de l'humidité du sol (la mesure) et de donnée météo. Cette approche est similaire à celle du thermostat, la direction assistée ou le régulateur de vitesse. Dans chacune de ces applications une boucle

de rétroaction permet de maintenir un point d'équilibre et de résister au désordre. Dans cette vision une solution intelligente est un système qui permet de collecter [CAPTER] de l'information depuis des capteurs afin de construire une image du monde réel (dans notre cas le besoin en eau des plantes). Ces informations sont ensuite traitées et analysées [PROCESSER] dans le but d'agir avec une action [AGIR] dite « intelligente » qui pourra éventuellement modifier à son tour le monde réel. L'arrosage intelligent est la déclinaison de la boucle [CAPTER], [PROCESSER], [AGIR] dans le domaine de l'arrosage[32].

Les dispositifs d'arrosage intelligent combinent des technologies d'arrosage centralisé et des capteurs d'humidité du sol avec pour objectifs de réduire la consommation d'eau de manière significative et de préserver l'aspect des espaces verts par rapport à un attendu[32].

La performance d'un arrosage intelligent repose sur sa capacité à ajuster au plus juste régulièrement les quantités d'eau apportées. Cela nécessite d'avoir des sondes d'humidité connectées, mais également des contrôleurs d'électrovanne pilotés à distance[32].



Figure III-1 Système d'irrigation intelligente [33]

III.5 Représentation du système propose

Notre projet vise le contrôle à distance, d'une exploitation agricole par un Smartphone ou une tablette. Ou allons-nous utiliser **la carte ESP32 (38 pin)** pour faciliter la communication sans fils entre les composants utilise.

La carte de commande permettra de recevoir les commandes et de les exécuter puis envoyer les états des équipements.

Dans notre projet, cette carte assure :

- Le contrôle de l'arrosage.
- Le bon fonctionnement de la pompe.
- La lecture des données reçues à partir de capteur d'humidité de sol, capteur de température et capteur de l'éclairement.

III.6 Internet des objets IOT

L'Internet des choses, abrégé généralement IoT à cause de sa formulation anglaise (Internet of Things), est un néologisme utilisé pour la première fois en 1999 par Kevin Ashton, co-fondateur et directeur de l'Auto-ID Center qui référence tous ces appareils (en dehors des ordinateurs et des Smartphones) connectés à Internet. Qu'il s'agisse de voitures, de bracelets de fitness, de réfrigérateurs, de systèmes électriques ou d'autres choses encore, tous sont connectés à Internet et nous permettent d'échanger des données grâce aux capteurs[34].

En bref, l'Internet des objets est l'évolution naturelle de l'utilisation des réseaux : elle a pour objectif de rendre le monde réel plus intelligent grâce à la connexion des objets, ces derniers obtiennent des informations qu'elles transmettent par réseau. N'importe quel objet autonome qui peut être connecté à

Internet et qui peut être utilisé à distance peut être considéré comme un membre de la famille de l'Internet des objets. N'importe quel objet physique disposant d'une adresse IP2 et permettant de communiquer grâce à un réseau est donc l'un des objets de l'Internet des objets[34].

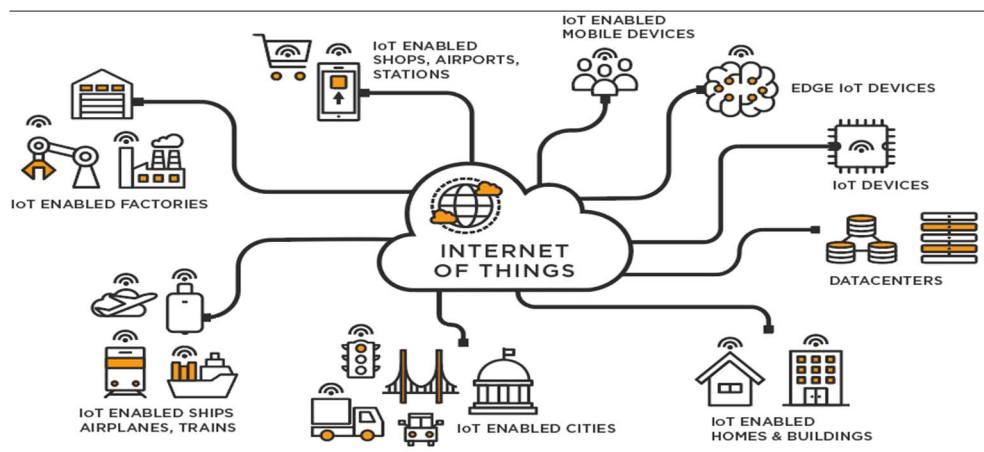


Figure III-2 Schéma de définition d'internet des objets [35]

III.7 Fonctionnement de l'IOT

Internet of Things (IoT) permet l'interconnexion des différents objets intelligents via internet. Il existe plusieurs technologies utilisées dans le fonctionnement de l'IoT qui sont leur clé tel que RFID (Radio Frequency Identification), WSN (Wireless Sensor Network) et M2M (Machine to Machine), et sont définies ci-dessous[36].

- **RFID (Radio Fréquence Identification)** : le terme RFID englobe toutes les technologies qui utilisent les ondes radio pour l'identification automatique des objets ou des personnes. Cette technologie contient une étiquette qui émet des ondes radio permettant de mémoriser et de récupérer des informations à distance. Il s'agit d'une méthode utilisée pour transférer les données des étiquettes à des objets, ou pour les identifier à distance. Elle contient des informations stockées électroniquement pouvant être lues à distance[37].
- **WSN (Wireless Sensor Network)** : c'est un ensemble de nœuds qui communiquent sans fil et qui sont organisés en un réseau coopératif. Chaque nœud possède une capacité de traitement et peut contenir différents types de mémoires, un émetteur-récepteur RF et une source d'alimentation, comme il peut aussi tenir compte des divers capteurs et des actionneurs. Le WSN constitue alors un réseau de capteurs sans fil qui peut être une technologie nécessaire au fonctionnement de l'IoT[37].
- **M2M (Machine to Machine)** : fait référence à des technologies permettant à des systèmes sans fil et câblé de communiquer avec d'autre périphérique de même capacité. C'est aussi l'association des technologies de l'information et de la communication avec des objets intelligents dans le but de donner à ces derniers les moyens d'interagir sans intervention humaine avec le système d'information d'une organisation ou d'une entreprise[37].

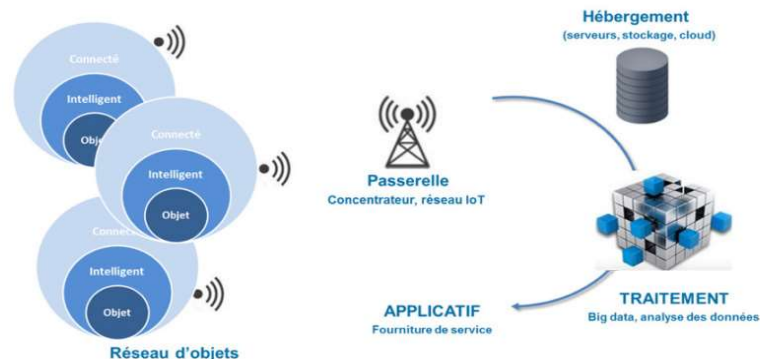


Figure III-3 Diagramme de l'IOT

III.7.1 Domaine d'application

L'internet des objets est utilisé dans divers secteurs tels que l'agriculture, soin de santé, la domotique...etc.

- **La domotique (home automation)** : c'est l'ensemble des techniques permettant de centraliser le contrôle des différents systèmes d'une habitation, son principe est de rendre une maison intelligente indépendante et qu'elle réfléchisse par elle-même et contrôle les différents

équipements depuis une même interface (une tablette, smartphone). Tous ces principes sont possibles grâce à l'IoT qui permet de connecter les dispositifs de la maison à un réseau et de les piloter à distance, le champ d'application IoT s'étale pour toucher les villes. La domotique a pour objectif d'améliorer le confort quotidien en automatisant ou en gérant à distance les tâches quotidiennes[38].

- L'agriculture (agriculture) : dans ce domaine, les réseaux de capteurs interconnectés à l'IOT peuvent être utilisés pour la supervision de l'environnement des cultures. Ceci permettra une meilleure aide à la décision en agriculture, notamment pour optimiser l'eau d'irrigation, l'usage des intrants et la planification de travaux agricoles. Ces réseaux peuvent être aussi utilisés pour lutter contre la pollution de l'air, du sol et des eaux et améliorer la qualité de l'environnement en général[38].
- Les villes intelligentes (Smart Cities) : le terme villes intelligentes (Smart Cities) est utilisé pour désigner l'écosystème cyber. Grâce à des services avancés, il est en effet possible d'optimiser l'utilisation des infrastructures physiques de la ville (les réseaux routiers, le réseau électrique, etc.) et par conséquent, améliorer la qualité de la vie des citoyens[38].
- La santé (Health) : dans le domaine de la santé l'IOT assurera le suivi des signes clinique des patients par la mise en place des réseaux personnels et capteurs médicaux qui surveillent les constantes biologiques, telles que la température corporelle, la pression artérielle et l'activité respiratoire. D'autres capteurs portables (accéléromètres, gyroscopes, etc.) ou fixes seront utilisés pour recueillir les données permettant de surveiller les activités des patients dans leur milieu de vie. Ceci permettra ainsi de faciliter la télésurveillance des patients à domiciles et apporter des solutions pour l'autonomie des personnes à mobilité réduite[38].
- L'environnement (environnement) : dans ce domaine, un rôle clé est joué par la capacité de détecter de manière répartie et autogérer les phénomènes naturels, vent, hauteur des rivières...etc. Ajoutant à cela l'intégration transparente de ces données hétérogènes[38].
- Sécurité de surveillance (Surveillance Security) : la sécurité de surveillance est devenue une nécessité pour les bâtiments d'entreprise, les centres commerciaux, les usines, les parkings et autres lieux publics. Tout en préservant la vie privée des utilisateurs. Il existe plusieurs capteurs utilisés pour la surveillance par exemple il y a des capteurs ambiants qui peuvent être utilisés pour surveiller la présence des produits chimiques dangereux, des captures de surveillance du comportement des personnes pour détecter la présence des personnes qui agissent de manières suspectes[38].

- L'industrie : dans le domaine de l'industrie IoT permettra un suivi total des produits, de la chaîne de production jusqu'à la chaîne logistique et de distribution en supervisant les conditions d'approvisionnement, la lutte contre la contrefaçon, la fraude et les crimes économiques transfrontaliers[37].

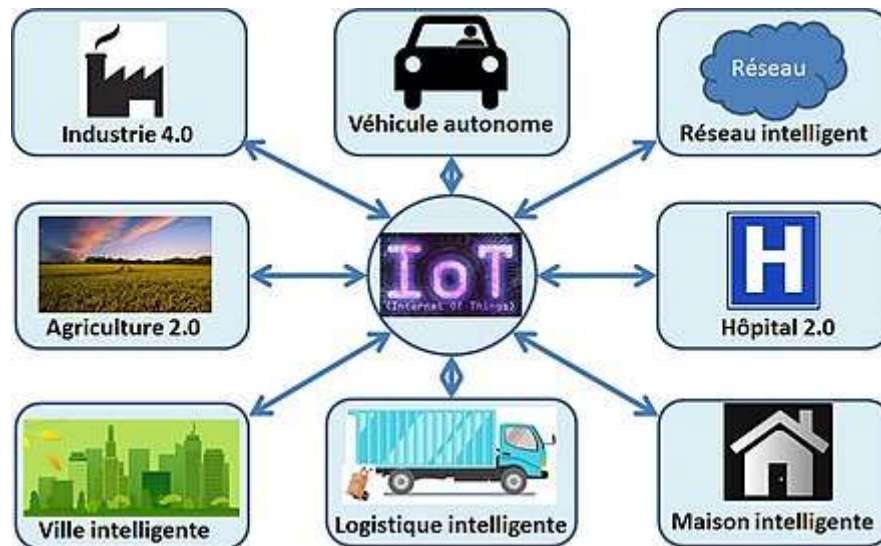


Figure III-4 Les applications de l'IOT

III.7.1.1 Sécurité de l'IOT

La sécurité de l'IoT est un sujet important car les objets connectés peuvent être vulnérables aux attaques. Voici quelques mesures de sécurité à prendre en compte pour protéger les dispositifs IoT :

- Chiffrement des données : Assurez-vous que toutes les données échangées entre les objets connectés et les serveurs sont cryptées pour éviter que des tiers malveillants ne puissent y accéder.
- Authentification forte : Utilisez une authentification forte pour empêcher les attaquants d'accéder aux systèmes en utilisant des identifiants volés ou falsifiés.
- Mises à jour régulières : Les fabricants d'appareils IoT publient souvent des mises à jour de sécurité pour corriger les vulnérabilités découvertes. Il est important de mettre à jour régulièrement les dispositifs IoT pour se protéger contre les attaques.
- Utilisation d'un pare-feu : Utilisez un pare-feu pour bloquer les connexions non autorisées vers les objets connectés.
- Supervision et surveillance : Surveillez les activités des dispositifs IoT en temps réel pour détecter les comportements anormaux qui pourraient indiquer une tentative d'intrusion.
- Sécurisation des connexions : Évitez d'utiliser des connexions sans fil non sécurisées, comme le Bluetooth non crypté, pour éviter que les pirates n'accèdent aux appareils IoT.

- Gestion des identités et des accès : Établissez une politique de gestion des identités et des accès pour contrôler l'accès aux appareils IoT et aux données qu'ils génèrent.

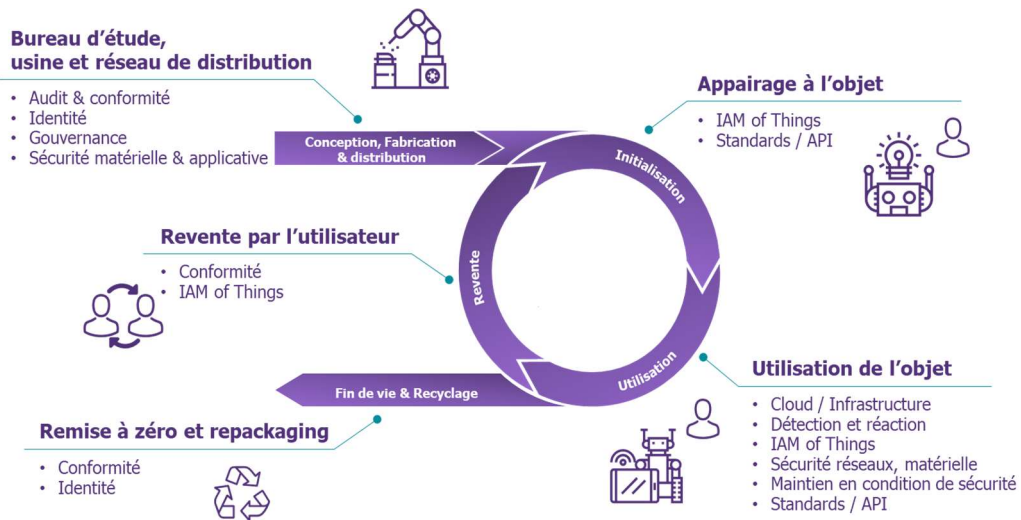


Figure III-5 Une approche par le cycle de vie pour la sécurité d'IOT

III.7.1.2 Les avantages et les inconvénients de l'IOT

III.7.1.3 Les avantages

- Automatisation : L'IoT permet d'automatiser des tâches, ce qui peut simplifier la vie des utilisateurs et améliorer leur efficacité.
- Optimisation : L'IoT permet d'optimiser les processus et les opérations, ce qui peut réduire les coûts et améliorer l'efficacité des entreprises.
- Surveillance : L'IoT permet de surveiller en temps réel des équipements, des systèmes et des processus, ce qui peut réduire les temps d'arrêt et améliorer la sécurité.
- Personnalisation : L'IoT permet de personnaliser les services et les expériences utilisateur en fonction des préférences et des besoins individuels.

III.7.1.4 Les inconvénients

- Sécurité : L'IoT peut présenter des vulnérabilités de sécurité, car les objets connectés peuvent être piratés et utilisés à des fins malveillantes.
- Vie privée : L'IoT peut impliquer la collecte et le traitement de données personnelles, ce qui soulève des préoccupations en matière de vie privée.
- Interopérabilité : L'IoT implique de nombreux fabricants et fournisseurs, ce qui peut entraîner une complexité et une interopérabilité insuffisante entre les différents systèmes et appareils.
- Dépendance technologique : L'IoT peut rendre les utilisateurs dépendants de la technologie, ce qui peut poser des problèmes en cas de panne ou de dysfonctionnement.

En résumé, l'IoT offre de nombreux avantages en termes d'automatisation, d'optimisation, de surveillance et de personnalisation, mais il présente également des risques en termes de

sécurité, de vie privée, d'interopérabilité et de dépendance technologique. Il est important de prendre en compte ces avantages et inconvénients lors de la mise en place d'un système IoT.

III.7.2 Objets connectés

Un objet connecté est un objet physique équipé de capteurs ou d'une puce qui lui permettent de transcender son usage initial pour proposer de nouveaux services. Il s'agit d'un matériel électronique capable de communiquer avec un ordinateur, un Smartphone ou une tablette via un réseau sans fil (Wifi Bluetooth, réseaux de téléphonie mobile, réseau radio à longue portée , etc.), qu'elle relie à Internet ou à un réseau local[39].

On distingue communément deux grands groupes d'objets connectés :

On a distingué dans le billet précédent deux types d'objet :

III.7.2.1 Les objets passifs

Ils utilisent généralement un tag (puce RFID, code barre 2D). Ils embarquent une faible capacité de stockage (de l'ordre de quelques kilooctets) leur permettant d'assurer un rôle d'identification. Ils peuvent parfois, dans le cas d'une puce RFID, embarquer un capteur (température, humidité) et être réinscriptibles[39].

III.7.2.2 Les objets actifs

ils peuvent être équipés de plusieurs capteurs, d'une plus grande capacité de stockage, être dotés d'une capacité de traitement ou encore être en mesure de communiquer sur un réseau[39].

Les capteurs installés sur ces objets connectés sont plus ou moins intelligents, selon qu'ils intègrent ou non eux-mêmes des algorithmes d'analyse de données, et qu'ils soient pour certains auto-adaptatifs[39].

III.7.2.3 Caractéristiques d'un objet connecté

Généralement, un objet connecté est caractérisé par :

Identité : pour que les objets soient gérables il est essentiel que chaque objet connecté

Possède une identité unique qui lui est propre et qui le distingue des autres objets du système.

Interactivité : les progrès technologiques ont permis de connecter une grande variété d'objets et de dispositifs. Un objet n'a pas besoin d'être connecté à un réseau à tout moment. Pour des objets dits passifs tels que des livres ou des DVD, des étiquettes RFID doivent seulement être en mesure de signaler leur présence, de temps en temps, comme le moment de quitter le magasin.

Programmable : l'objet connecté doit être programmé et piloté à distance via un ordinateur, une tablette ou un Smartphone.

Sensibilité : un objet a la capacité de percevoir son environnement et peut collecter ou transmettre des informations à celui-ci. Il peut ainsi avoir des capteurs signalant les niveaux de température, d'humidité, de vibrations, d'emplacement ou de bruit.

Autonomie : cette caractéristique est, peut-être, la caractéristique la plus importante pour l'objet connecté. On désigne par cette caractéristique la capacité de l'objet d'agir sans l'intervention d'un tiers. En d'autres termes, les objets doivent pouvoir être traités et surveillés individuellement, généralement depuis un point éloigné, et doivent fonctionner Indépendamment d'une télécommande, c.-à-d. que chaque objet devient responsable de lui-même[40].

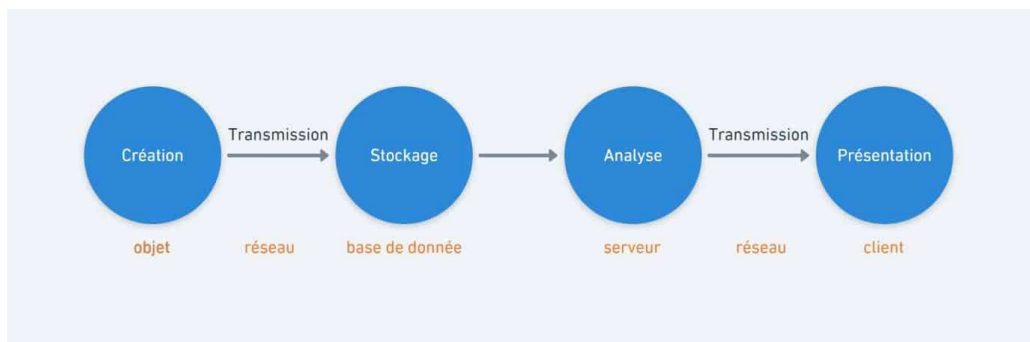


Figure III-6 Les étapes de fabrication d'un Object connecté

III.8 Le cloud computing

Le terme « cloud » désigne les serveurs accessibles sur Internet, ainsi que les logiciels et bases de données qui fonctionnent sur ces serveurs. Les serveurs situés dans le cloud sont hébergés au sein de Datacenter répartis dans le monde entier. L'utilisation du cloud computing (informatique cloud) permet aux utilisateurs et aux entreprises de s'affranchir de la nécessité de gérer des serveurs physiques eux-mêmes ou d'exécuter des applications logicielles sur leurs propres équipements. Le cloud permet aux utilisateurs d'accéder aux mêmes fichiers et aux mêmes applications à partir de presque n'importe quel appareil, car les processus informatiques et le stockage ont lieu sur des serveurs dans un Datacenter et non localement sur la machine utilisateur. C'est pourquoi un utilisateur dont le téléphone est défectueux peut se connecter à son compte Instagram à partir d'un nouveau téléphone et retrouver son compte actif en place, avec toutes ses photos, vidéos et l'historique de ses conversations. Il en va de même avec les fournisseurs de messagerie cloud comme Gmail ou Microsoft Office 365 et les fournisseurs de stockage cloud comme Dropbox ou Google Drive[41].

Pour les entreprises, le passage au cloud computing supprime certains coûts et frais informatiques : par exemple, les sociétés n'ont plus besoin de mettre à jour et d'entretenir leurs propres serveurs, c'est le fournisseur de cloud qui s'en charge. Cet aspect a surtout un impact sur les petites entreprises qui ne peuvent pas toujours se permettre de disposer d'avoir leur propre infrastructure interne, mais qui

peuvent externaliser leurs besoins en infrastructure à un coût abordable via le cloud. Le cloud peut également faciliter les opérations internationales des entreprises, car les employés et les clients peuvent accéder aux mêmes fichiers et applications à partir de n'importe quel emplacement[41].

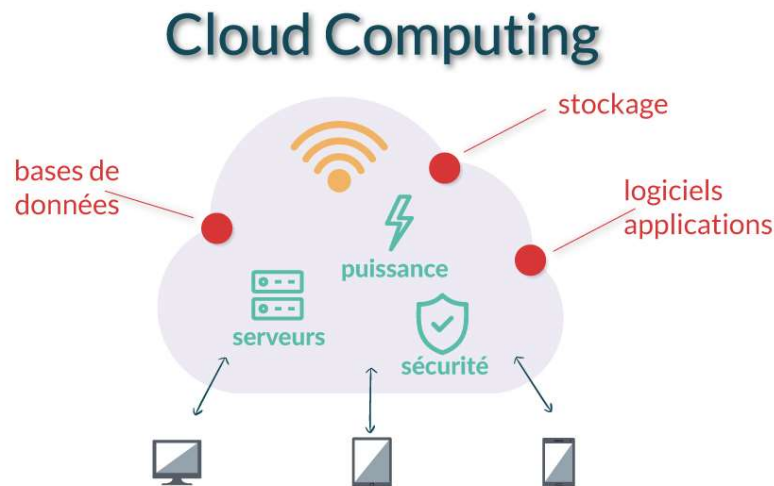


Figure III-7 Principe de cloud computing

III.8.1 Principe de fonctionnement

L'informatique dans le cloud est rendue possible grâce à une technologie dénommée virtualisation. La virtualisation permet la mise en place d'une simulation d'ordinateur « virtuel », uniquement numérique, qui se comporte en tout point comme un ordinateur physique doté de ses équipements matériels propres. En termes techniques, on désigne ce type d'ordinateur sous le nom de machine virtuelle. Lorsqu'elles sont correctement mises en œuvre, les machines virtuelles situées sur le même ordinateur hôte se voient mises en « sandbox » (c'est-à-dire isolées), de sorte qu'elles n'interagissent pas du tout les unes avec les autres. Les fichiers et les applications figurant sur une machine virtuelle donnée ne sont alors pas visibles par les autres machines, même si ces dernières se trouvent sur la même machine physique[41].

Les machines virtuelles utilisent également plus efficacement le matériel qui les héberge. En exécutant plusieurs machines virtuelles à la fois, un serveur devient plusieurs serveurs et un datacenter devient une multitude de datacenters, capables de servir de nombreuses organisations. Ainsi, les fournisseurs de cloud peuvent proposer l'utilisation de leurs serveurs à un nombre de clients bien plus importants qu'ils ne le pourraient autrement, et ce à un coût modéré[41].

Même si certains serveurs tombent en panne, les serveurs cloud en général doivent toujours être en ligne et toujours disponibles. Les fournisseurs de cloud sauvegardent généralement leurs services sur plusieurs machines et dans plusieurs régions[41].

Les utilisateurs accèdent aux services cloud par le biais d'un navigateur ou d'une application qui se connecte au cloud via Internet (c'est-à-dire, par l'intermédiaire de nombreux réseaux interconnectés), indépendamment des appareils qu'ils utilisent[41].

III.8.2 Les formes de déploiement du cloud computing

Nous distinguons trois formes de Cloud Computing : le Cloud publique, le Cloud privé et le Cloud hybride.

III.8.2.1 Le Cloud publique

Le principe consiste à héberger des applications, en général des applications Web, sur un environnement partagé avec un nombre illimité d'utilisateurs. La mise en place de ce type de Cloud est gérée par des entreprises tierces, (Amazon, Google, etc.) et il est accessible selon le modèle pay-as-you-go (payer selon la consommation). Les fournisseurs du Cloud publique les plus connus sont Google et Amazon. Les caractéristiques de ce modèle :

- Lourds investissements pour le fournisseur de services
- Flexibilité
- Sécurité faible[42].

III.8.2.2 Le cloud privé

C'est un environnement déployé au sein d'une entreprise. L'entreprise doit gérer toute seule son infrastructure (hébergée localement ou sur des serveurs dédiés / réservés). Dans ce cas, implémenter un Cloud privé signifie transformer l'infrastructure interne en utilisant des technologies telles que la virtualisation pour enfin délivrer, plus simplement et plus rapidement, des services à la demande. L'avantage de ce type de Cloud par rapport au Cloud publique réside dans l'aspect de la sécurité et la protection des données. En effet, l'ensemble du matériel est conservé au sein d'un propre emplacement. De ce fait, les ressources sont détenues et contrôlées par le département informatique. VMware, Microsoft, Open Stack, Open N'éboula sont des exemples de solution pour la mise en place du Cloud privé.

Ce modèle est :

- Couteux.
- Dédié et sécurisé.
- Moins flexible par comparaison au Cloud public[42].

III.8.2.3 Le cloud hybride

En général, on entend par Cloud hybride la cohabitation et la communication entre un Cloud privé et un Cloud public dans une organisation partageant des données et des applications (Par exemple, un Cloud dédié pour les données et un autre pour les applications). Ce modèle : Permet d'allier les avantages des deux modèles de déploiement. Permet la gestion de deux Cloud[42].

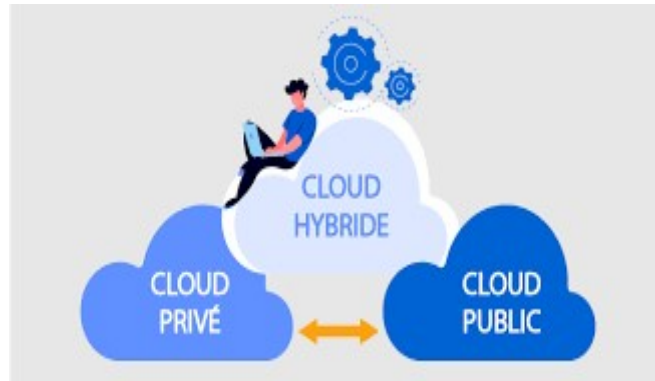


Figure III-8 Différent types de cloud

III.8.3 La plateforme IOT Cloud arduino

IoT (Internet of Things) Cloud Arduino est une plateforme en ligne proposée par Arduino pour aider les développeurs à créer des applications IoT. Cette plateforme permet aux utilisateurs de se connecter à différents types de capteurs et d'actionneurs pour collecter et transmettre des données à des appareils distants via Internet.

La plateforme IoT Cloud Arduino propose également une interface de programmation (API) pour interagir avec les données collectées et stockées dans le cloud. Cette API permet aux développeurs de créer des applications IoT en utilisant des langages de programmation tels que Python ou JavaScript.

Avec IoT Cloud Arduino, les développeurs peuvent concevoir des applications IoT pour une variété d'applications, notamment la surveillance environnementale, la surveillance de la santé, la surveillance industrielle et l'automatisation de la maison intelligente.

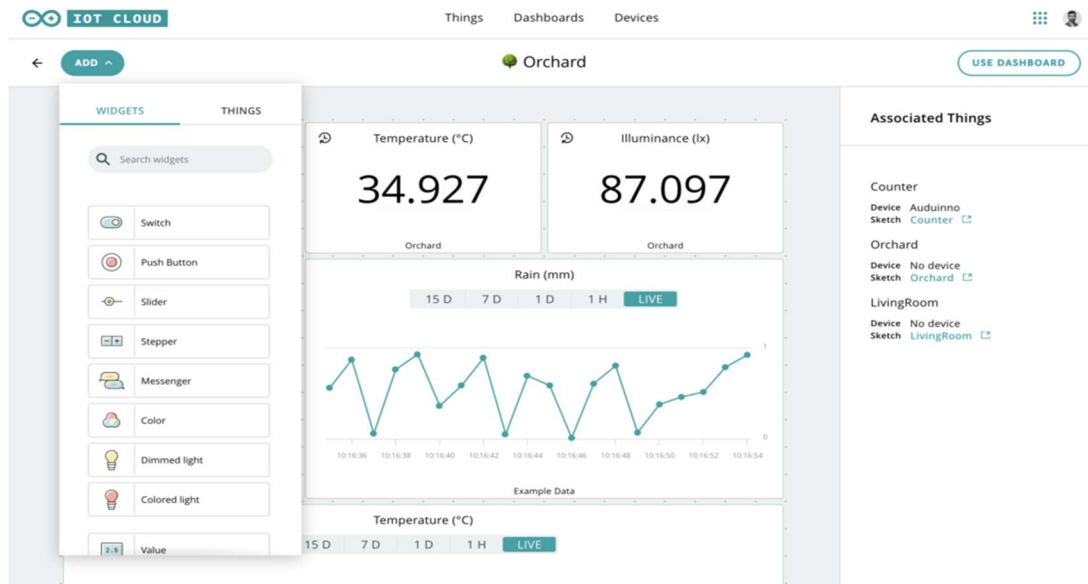


Figure III-9 Interface de l'IOT Arduino Cloud

III.9 Principe de fonctionnement du système

III.9.1 Schéma bloc du système

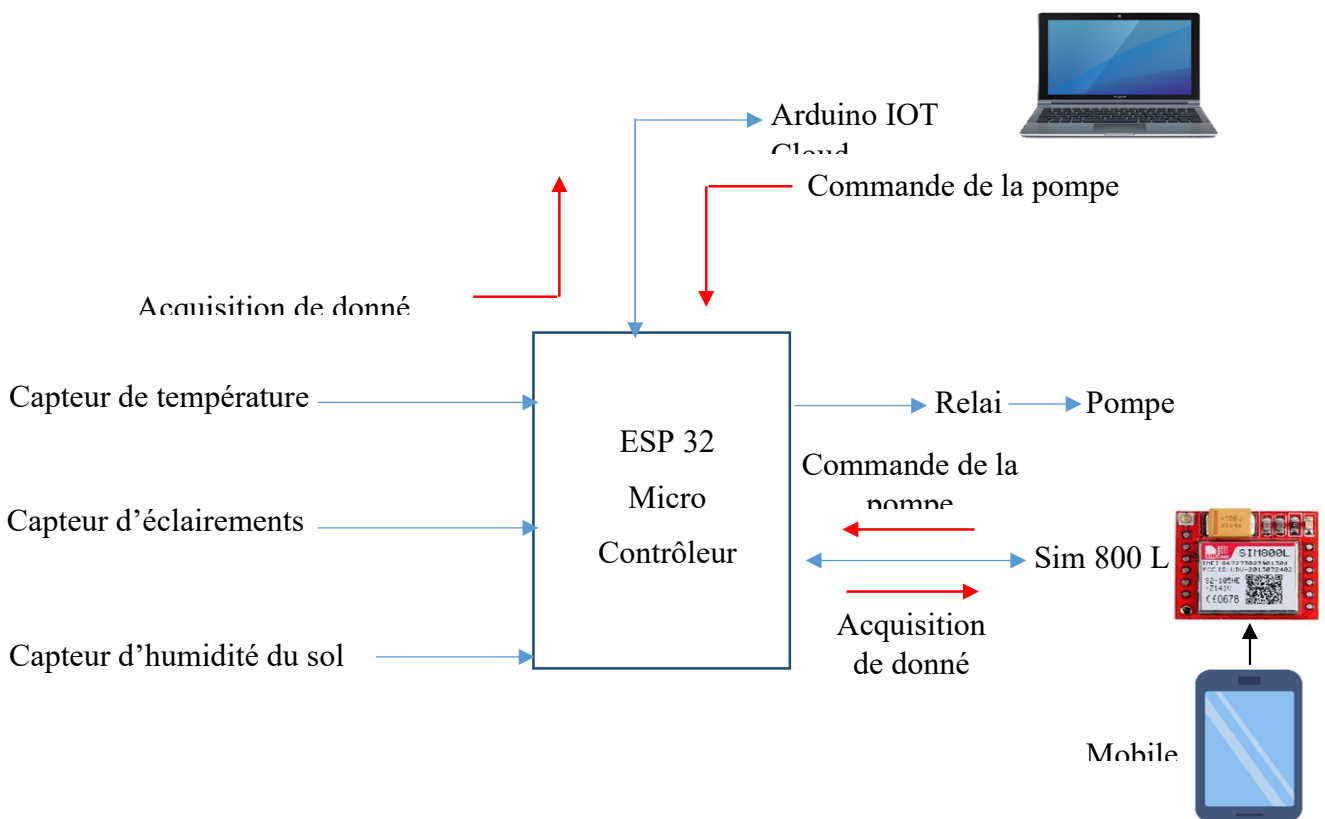


Figure III-10 Schéma bloc du système

III.10 Réalisations du montage

III.10.1 Matériels utilisés

III.10.1.1 Unité de traitement

III.10.1.1.1 ESP32 Dev module

L'ESP32 est une carte électronique créée par la firme ESPRESSIF permettant de réaliser des projets « IoT » assez facilement. Elle possède en effet une connectivité assez complète, que nous détaillerons dans la partie suivante. L'ESP32 est assez simple à prendre en main car elle est cousine de la carte Arduino. Il est donc possible de l'utiliser comme la carte microcontrôleur italienne, en utilisant le même langage de programmation, les mêmes modules complémentaires et surtout le même logiciel de compilation (Arduino IDE). Pas de changement fondamental d'interface pour l'utilisateur, ce qui la rend d'autant plus simple à utiliser. Par ailleurs, on peut relever que sa taille miniature lui est un avantage considérable : elle mesure en effet moins de 3 cm par 5 cm, malgré les technologies qu'elle embarque ! L'ESP32 est sans doute la carte microcontrôleur qui possède le meilleur compromis taille / connectivité / entrées sorties. Cela en fait un outil redoutable pour la miniaturisation des projets connectés pour finir elle est aussi tout à fait adaptée à la réalisation de prototypes et non uniquement à la réalisation de projets « finis et définitifs ». Elle est une référence dans l'univers « maker » pour ces nombreuses raisons, il est donc très facile de trouver de l'aide sur Internet pour utiliser cette carte.

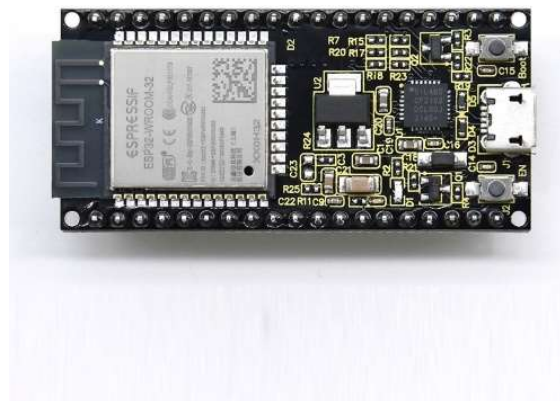


Figure III-11 Carte ESP32 Dev

III.10.1.1.1 Caractéristiques

- Alimentation :
 - ✚ 5 V via micro-USB
 - ✚ 3,3 V via broches Vin
- Microcontrôleur : ESP32
- Microprocesseur : Tensilica LX6 Dual-Core
- Fréquence : 240 MHz
- Mémoire SRAM : 512 kB
- Mémoire Flash : 4 Mb
- E/S disponibles :
 - ✚ 15 E/S digitales dont 10 compatibles PWM
 - ✚ 2 x sorties analogiques (DAC)
 - ✚ 15 x entrées analogiques (ADC)
- Interfaces: I2C, SPI, 2 x UART
- Interface Wi-Fi 802.11 b/g/n 2,4 GHz
- Bluetooth : Classique / BLE
- Antenne intégrée
- Température de service : -40 à 125 °C
- Dimensions : 48 x 26 x 11,5 mm
- Rapport performance-prix élevé
- Petit volume, facilement intégré à d'autres produits
- Forte fonction avec le protocole LWIP de soutien, Frérôts
- Prise en charge de trois modes : AP, STA et AP + STA
- Soutenir le programme Lau, facile à développer.

III.10.1.1.1.2 Architecture interne de la carte ESP32

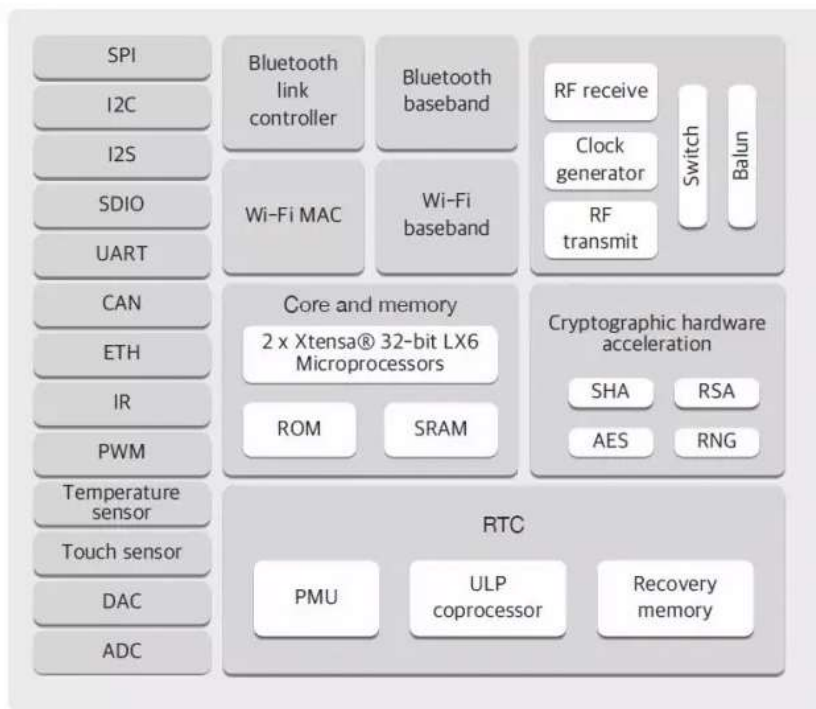


Figure III-12 Architecture interne de la carte ESP 32[25]

III.10.1.1.1.3 ESP 32 brochage

ESP32 Wroom DevKit Full Pinout

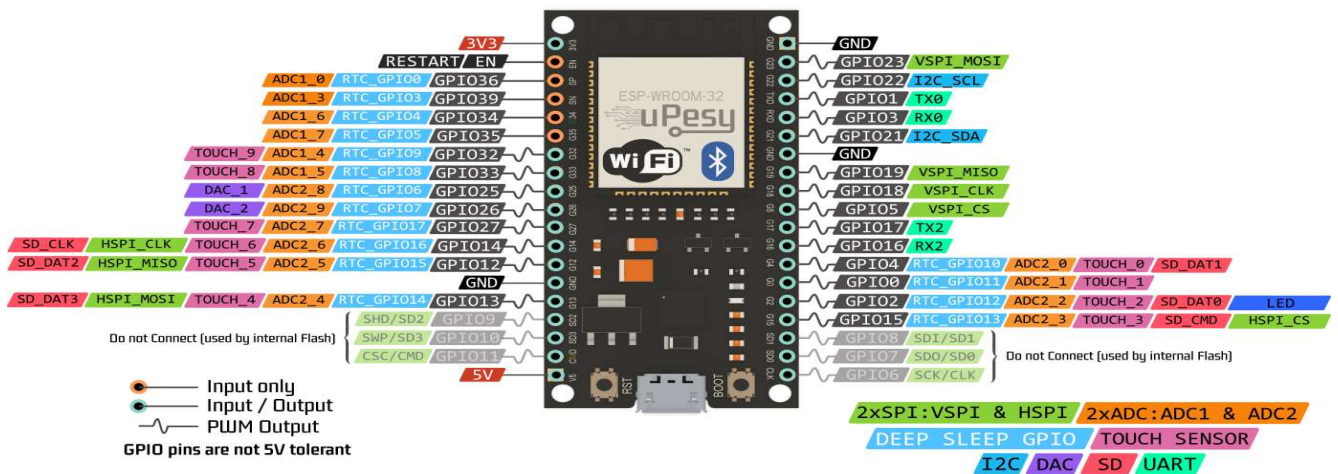


Figure III-13 Brochage de la carte ESP 32[26]

III.10.1.2 Unité d'alimentation

III.10.1.2.1 Panneau photovoltaïque

Le tableau (III.3) donne les caractéristiques du module JW-G1950/JW5672 sous les conditions standards (1000 W/m², masse optique : AM 1.5, Température de cellule : 25 °C)

Tableau III- 1 Caractéristiques du module JW-G1950/JW5672

| Grandeurs | Valeur |
|---|---------------|
| <i>Puissance maximale (P_{max})</i> | 195 W |
| <i>Tension en circuit ouvert (V_{oc})</i> | 44.90 V |
| <i>Courant en court-circuit (I_{s c})</i> | 5.82 A |
| <i>Fusible</i> | 9 A |
| <i>Fire Rating</i> | CLASS C |
| <i>Tension à puissance max (V_{mp})</i> | 36.40 V |
| <i>Courant à puissance max (I_{mp})</i> | 5.38 A |
| <i>Tension max pour un assemblage</i> | 1000 V |
| <i>3 Diodes by-pass</i> | 11 A |



Figure III-14 Panneau photovoltaïque

III.10.1.2.1.1 Caractéristiques I(V)

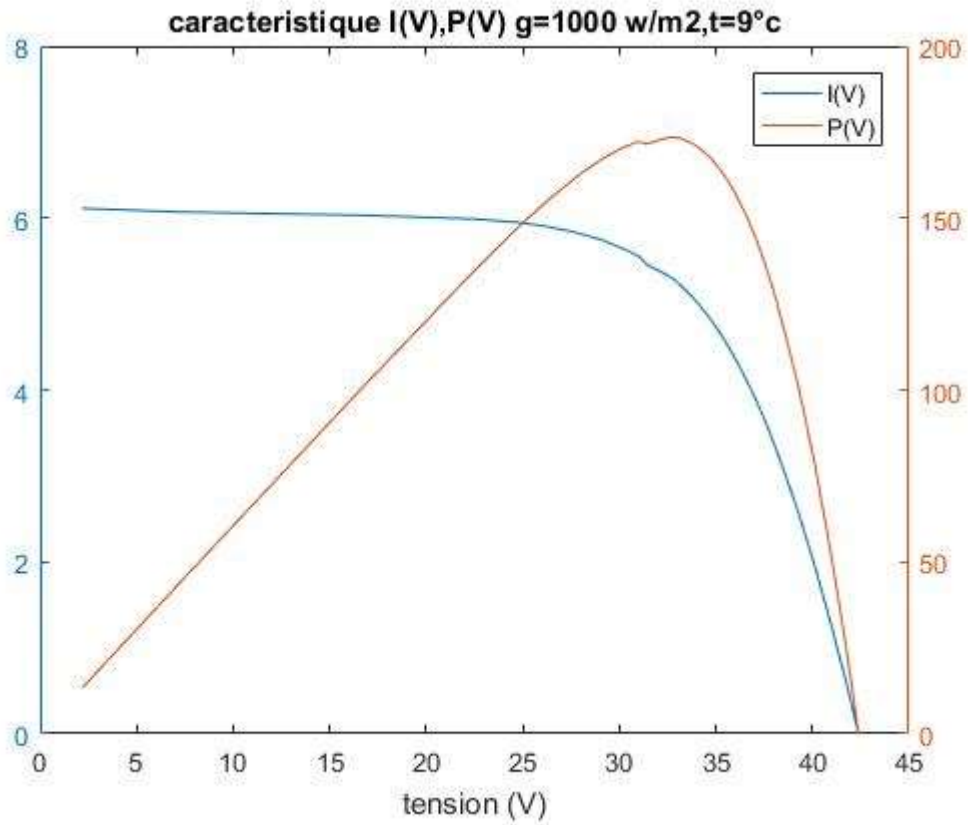


Figure III- 15 Caractéristique I(v),P(v) $G=1000\text{w/m}^2$, $t=9^\circ\text{c}$

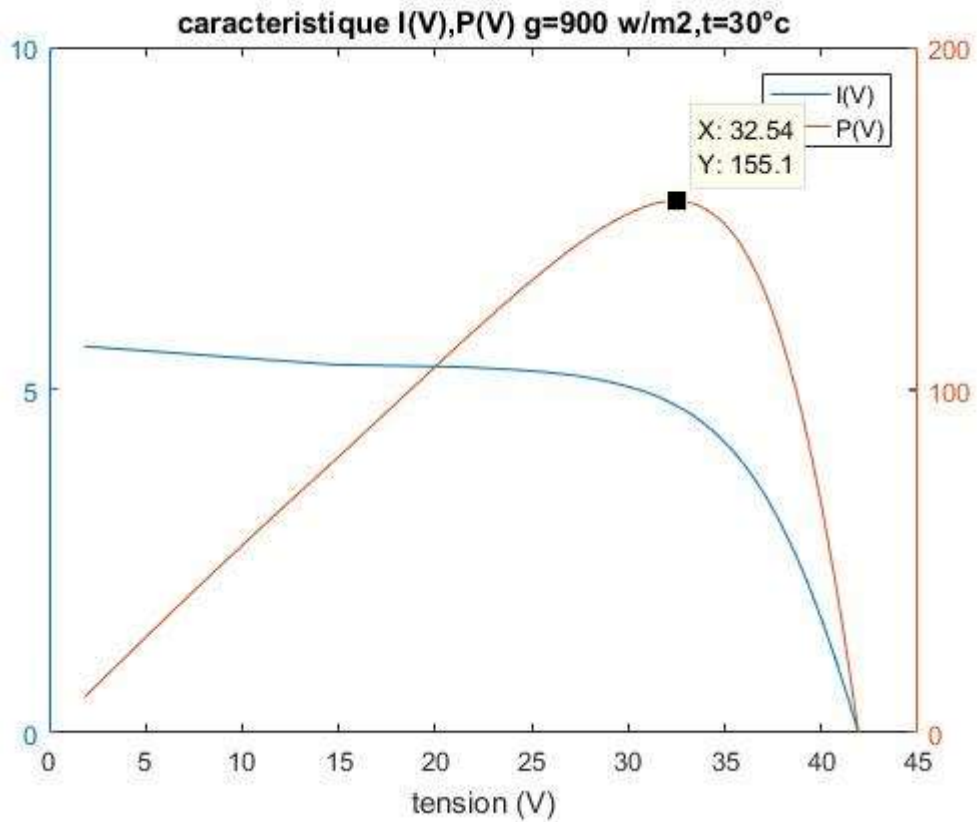


Figure III- 16 Caractéristique I(v),P(v) $G=900\text{w/m}^2$, $t=30^\circ\text{c}$

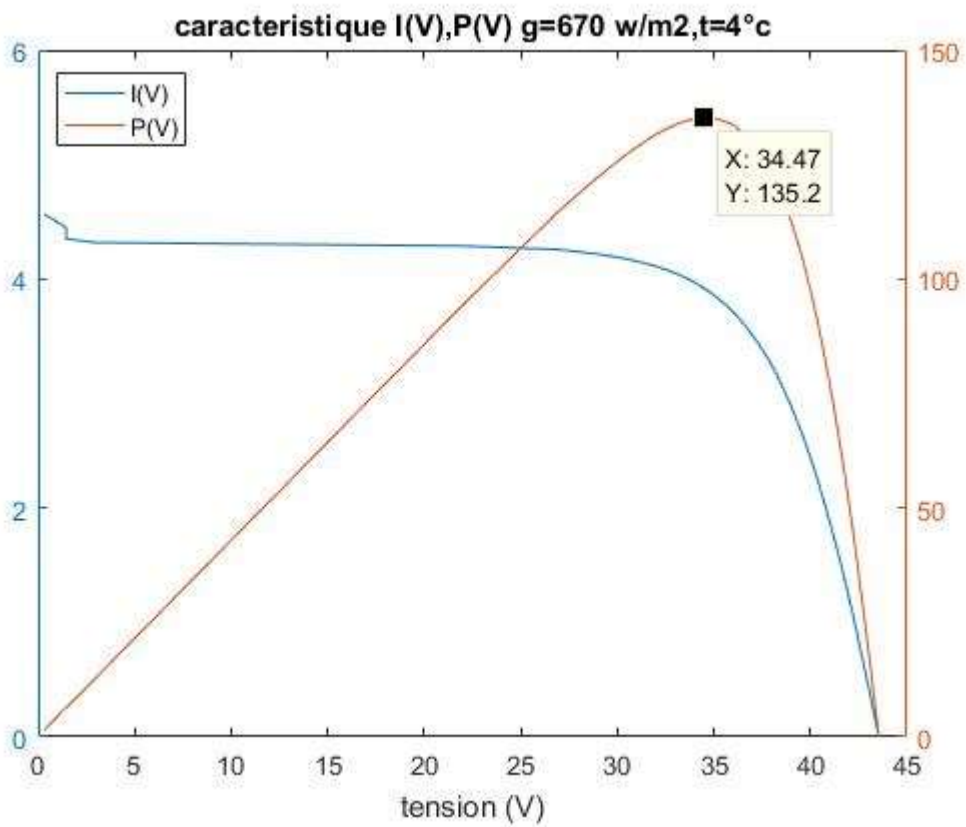


Figure III- 17 Caractéristique I(v),P(v) $G=670\text{w/m}^2$, $t=4^\circ\text{c}$

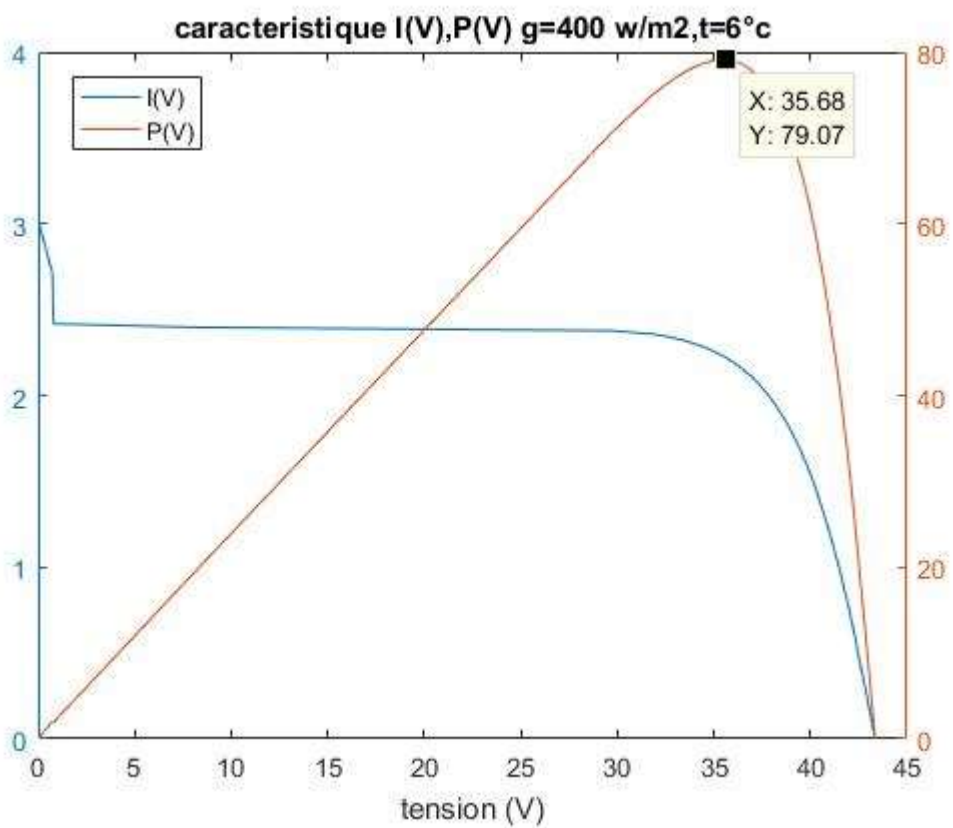


Figure III- 18 Caractéristique I(v),P(v) $G=400\text{w/m}^2$, $t=6^\circ\text{c}$

III.10.1.3 Unité des capteurs

III.10.1.3.1 Capteur d'humidité du sol FC 28

III.10.1.3.1.1 Caractéristiques

C'est un capteur résistif qui mesure l'humidité du sol à partir des changements de la conductivité électrique de la terre (la résistance du sol augmente avec la sécheresse).

Il possède deux pin de communication une digitale et une seconde analogique pour plus de précision.

Voir image (III.15).



Figure III-19 Capteur d'humidité du sol FC 28

III.10.1.3.2 Capteur de température DS18B20

III.10.1.3.2.1 Caractéristiques

Le capteur DS18B20 de Maxi (anciennement Dallas semiconducteur) est un capteur numérique de température il communique via le protocole 1 wire avec une résolution de 12 bits. Voir figure(III-16) tableau (III-2).



Figure III-20 Capteur de température DS18B20

Tableau III- 2 Caractéristiques du capteur DS18B20

| PARAMETRE | SYMBOLE | CONDITIONS | | MIN | MAX | UNITES |
|-----------------------|---------|----------------------|-----------|------|------|--------|
| Tension alimentation | VDD | Local power (Note 1) | | +3.0 | +5.5 | V |
| Pullup Supply Voltage | VPU | Parasite power | (Notes 1, | +3.0 | +5.5 | |

| | | | | | | |
|------------------|------|-------------------|-------------|------|-------------------------------|----|
| | | Local power | 2) | +3.0 | VDD | V |
| Erreur | tERR | -10°C to +85°C | (Note 3) | ±0.5 | | °C |
| | | -30°C to +100°C | | ±1 | | |
| | | -55°C to +125°C | | ±2 | | |
| Input Logic-Low | VIL | (Notes 1, 4, 5) | | -0.3 | +0.8 | V |
| Input Logic-High | VIH | Local power | (Notes 1,6) | +2.2 | The lower of 5.5 or VDD + 0.3 | V |
| | | Parasite power | | +3.0 | | |
| Sink Current | IL | VI/O = 0.4V | | 4.0 | | mA |
| Standby Current | IDDS | (Notes 7, 8) | | 7 | 1000 | nA |
| | | | | 5 | | |
| | | | | 0 | | |
| Active Current | IDD | VDD = 5V (Note 9) | | 1 | 1.5 | mA |
| DQ Input Current | IDQ | (Note 10) | | 5 | | µA |
| Drift | | (Note 11) | | ±0.2 | | °C |

III.10.1.3.2 Schéma bloc du capteur

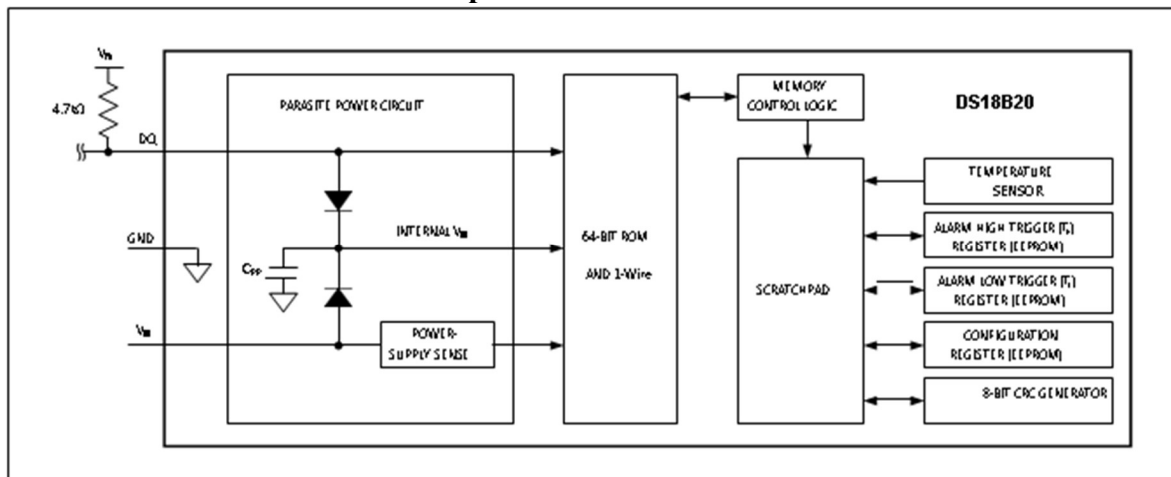


Figure III-21 Schéma bloc du capteur DS18B20

III.10.1.3.3 Capteur d'éclairément BH1750

III.10.1.3.3.1 Caractéristiques

Le BH1750 est un capteur numérique 16 bits qui permet la mesure de l'intensité de la lumière ambiante et la transmettre en lux (1-65535 lux) au microcontrôleur par le protocole de communication I2C. voir image (III-18).



Figure III-22 Capteur d'éclairément BH1750

Tableau III- 3 Caractéristiques du capteur d'éclairément BH1750

| Parameters | Symboles | Limites | Unités |
|--------------------------|----------|---------|--------|
| Tension alimentation | Vmax | 4.5 | V |
| Temperature de service | Topr | -40~85 | °C |
| Intervalle de mesure | Tstg | -40~100 | °C |
| Puissance de Dissipation | Pd | 260 | mW |

III.10.1.3.3.2 Schéma bloc du capteur

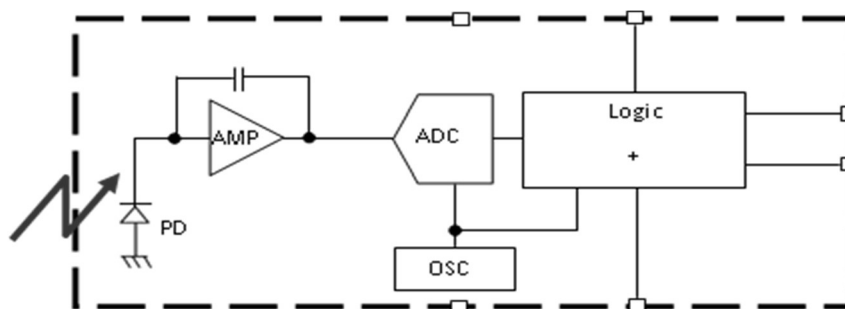


Figure III-23 Schéma bloc du capteur

III.10.1.4 Unité des actionneurs

III.10.1.4.1 Relai 5 v

III.10.1.4.1.1 Description

Un module de relais 5V est un module de relais monocanal ou multicanal qui fonctionne avec une tension de déclenchement de bas niveau de 5V DC. La tension d'entrée peut provenir de n'importe quel microcontrôleur ou puce logique qui émet un signal numérique.

Comme la plupart des autres relais, le module de relais 5V est un interrupteur électromagnétique à commande électrique qui peut être utilisé pour allumer ou éteindre un circuit. Il se compose de deux parties : le relais lui-même et le module de commande.

III.10.1.4.1.2 Principe de fonctionnement

Le relais est constitué d'un électroaimant et d'un contacteur mécanique. Lorsque le courant est suffisamment important sur la bornes d'entrée, le solénoïde se magnétise ce qui force le contacteur à fermer le circuit de puissance. Comme il n'y a pas de liaison mécanique entre le circuit de commande et le circuit de puissance (actionnement magnétique), il y a une isolation galvanique entre les deux circuits ; ce qui permet de protéger le circuit de commande.

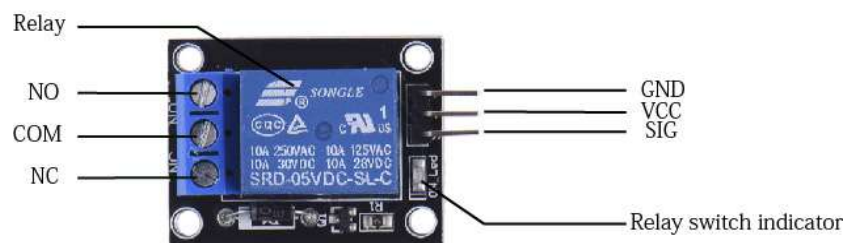


Figure III-24 Les bornes de relai

III.10.1.4.1.3 Caractéristique

- Tension normale : 5 V CC
- Courant normal : 70mA
- Courant de charge maximum : 10A/250V AC, 10A/30V DC
- Tension de commutation maximale : 250 V CA, 30 V CC
- Temps de fonctionnement : 10 ms
- Temps de relâchement : ≤ 5 ms

III.10.1.4.2 Station de pompage (solpuit)

SOLPUITS est une station de pompage solaire totalement autonome en énergie électrique. Ce système permet aux élèves de comprendre et d'analyser son fonctionnement mais aussi de câbler des composants électriques solaires.



Figure III- 25 station de pompage SOLPUIT

- 1.Panneau photovoltaïque
- 2.cable de 30 mètres pour la liaison du panneau solaire vers l'armoire technique.
- 3.cuve de 100 Litres représentant la nappe d'eau phréatique
- 4.Armoire technique
 - ✚ Connectiques photovoltaïques pour la liaison du panneau solaire
 - ✚ Interrupteur sectionneur pour isoler le panneau solaire de l'armoire.
 - ✚ Batteries au Gel 12V-8Ah.
 - ✚ Parafoudre DC
 - ✚ Régulateur de charge
 - ✚ Protection par coupe circuit a fusibles bipolaire.

- ✚ Câblage.
 - ✚ Interrupteur pour commander le fonctionnement de la pompe,
 - ✚ Interrupteur pour commander l'éclairage
 - ✚ Régulateur de charge 24VDC
 - ✚ Éclairage 24VDC
- 6. Cuve de réserve d'eau équipée d'un robinet d'évacuation de l'eau
 - 7. Pompe de surface solaire 24VDC-6A 140W nominal

III.10.1.5 Unité de télécommunication

III.10.1.5.1 Module SIM800 L



Figure III-26 Module SIM800 L

III.10.1.5.1.1 Description :

Le module SIM800L est un petit module GSM / GPRS et idéal pour les petits projets idéaux. Le module prend en charge le réseau GSM / GPRS quadri-bande, disponible pour la transmission à distance de données de messages SMS et GPRS. Le SIM800L communique avec le microcontrôleur via le port UART, prend en charge les commandes telles que 3GPP TS 27.007, 27.005 et les commandes AT améliorées SIMCOM. En outre, la carte prend également en charge la technique A-GPS qui est appelée positionnement mobile et obtient la position par réseau mobile. Cette caractéristique fait qu'il peut également être un module de suivi.

Le SIM800L peut fonctionner jusqu'à 2 ampères de courant en pointe. Il dispose également d'une fonction de faible consommation d'énergie qui consomme 1 mA de courant en mode veille. Vous

devez alimenter le module de 3,7 V à 4,2 V selon la fiche technique. Plus que cela endommagerait le module. Vous pouvez utiliser un convertisseur abaisseur pour atteindre cette plage de tension.

III.10.1.5.1.2 Caractéristiques

- 2G quadri-bande 850/900/1800 / 1900MHz
- Recevez et passez des appels à l'aide des sorties haut-parleur et microphone
- Recevoir et envoyer des SMS
- Écoutez les émissions de radio FM
- Connectivité GPRS multi-slot classe12: max. 85,6 kbps (téléchargement / téléchargement)
- Station mobile GPRS classe B
- Contrôlé par AT Command (3GPP TS 27.007, 27.005 et SIMCOM Enhanced AT Commands)
- Prend en charge l'horloge en temps réel
- Plage de tension de fonctionnement 3,4 V ~ 4,4 V
- Prend en charge A-GPS
- Faible consommation d'énergie, 1mA en mode veille
- Carte micro SIM

III.10.2 Logiciels utilisés

III.10.2.1 Logiciels de programmation

III.10.2.1.1 Visual studio code

Visual Studio Code est un éditeur de code extensible développé par Microsoft pour Windows, Linux et macOS[43].

Les fonctionnalités incluent la prise en charge du débogage, la mise en évidence de la syntaxe, la complétion intelligente du code (IntelliSense4.), les snippets, la refactorisation du code et Git intégré. Les utilisateurs peuvent modifier le thème, les raccourcis clavier, les préférences et installer des extensions qui ajoutent des fonctionnalités supplémentaires[43].

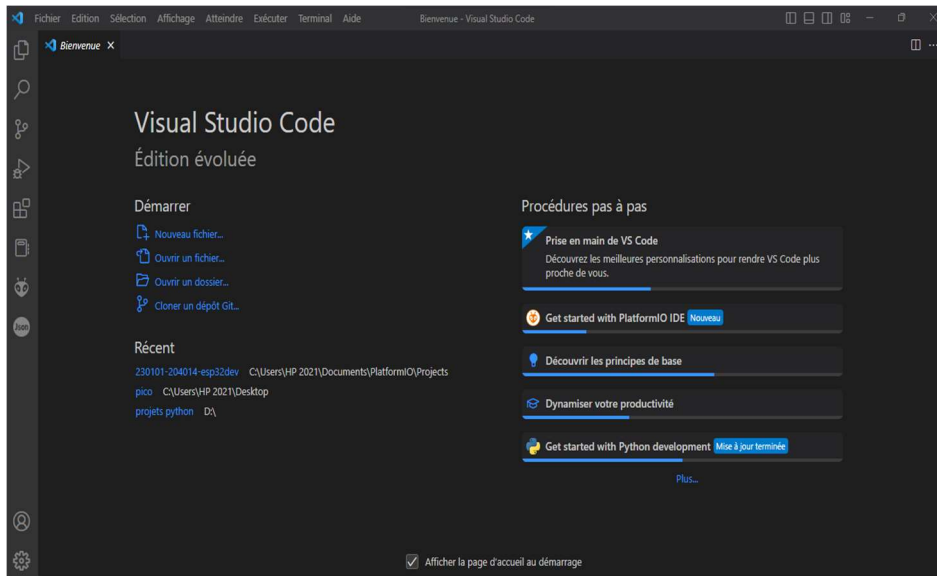


Figure III-27 L'interface de visual studio code

III.10.2.1.2 Platformio

Platform IO est un IDE, c'est-à-dire un environnement de développement intégré, avec son éditeur de code professionnel, et son compilateur pour compiler le code source pour une multitude de plateformes, un débogueur, ainsi qu'une série de fonctions et d'outils de programmation très intéressants (unité de moniteur de test série, analyseur de code, saisie semi-automatique de code, gestionnaire de bibliothèque, etc.). C'est gratuit, open source, et vous pouvez étendre ses capacités grâce à des plugins ou des extensions. Il permet même le développement à distance, peut être intégré aux référentiels de code GitHub et GitLab, etc.

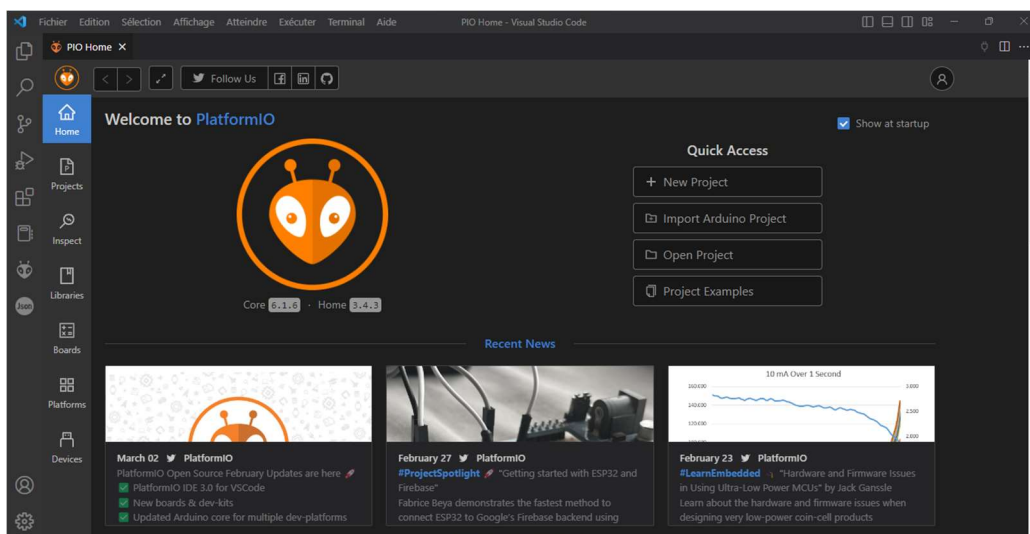


Figure III-28 L'interface de Platformio

Outils de conception de schémas et circuits imprimés

III.10.2.1.3 EASYEDA

EasyEDA est un outil de CAO (conception assistée par ordinateur) pour l'électronique (EDA= Électronique design automation) gratuit pour les particuliers et fonctionnant dans un navigateur web, donc sans installation[44].

Il a été conçu pour permettre aux amateurs d'électronique, aux ingénieurs, aux professeurs, aux élèves ingénieurs... d'accéder facilement et gratuitement à la CAO électronique. Avec EasyEDA la conception, la simulation de fonctionnement et la création du circuit imprimé (PCB) se font dans votre navigateur[44].

Il permet la conception de schéma de montage et le convertir en circuit imprimé.

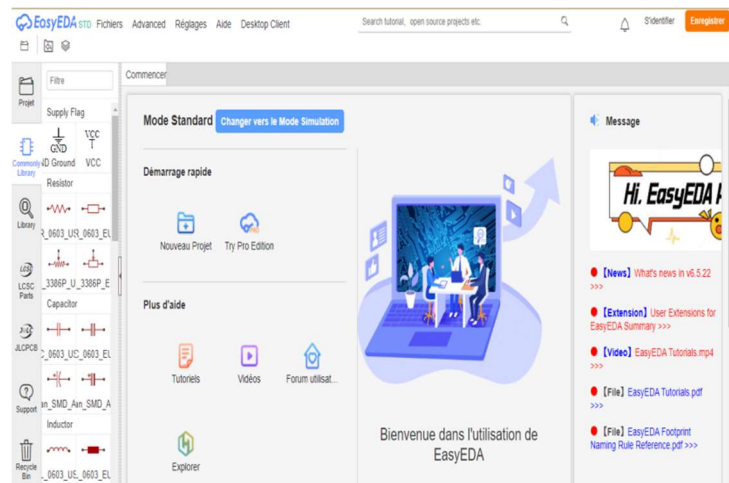


Figure III-29 L'interface de EASYEDA

III.10.3 Schéma du montage

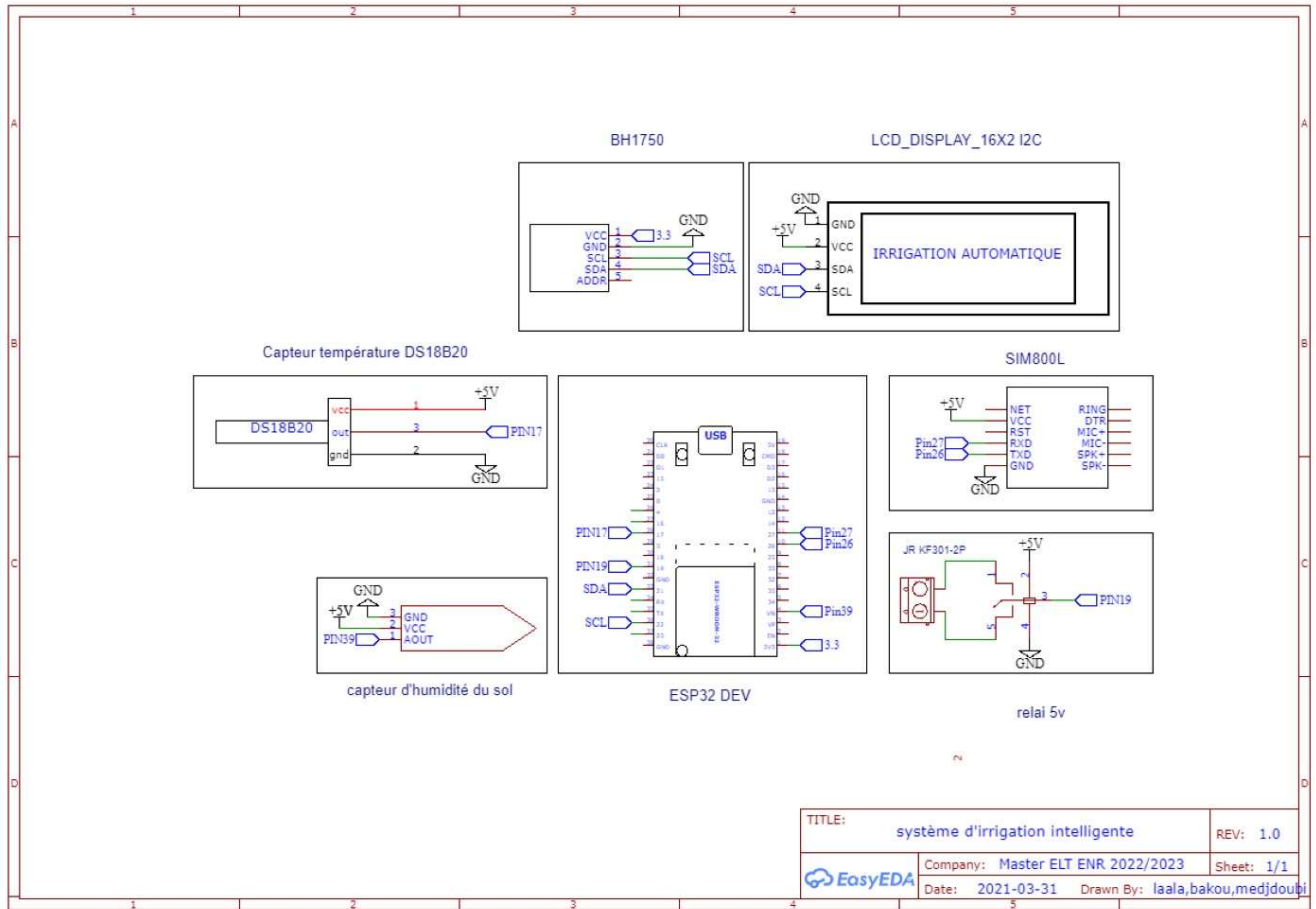


Figure III- 30 Schéma de Montage

III.10.4 Réalisation de la maquette

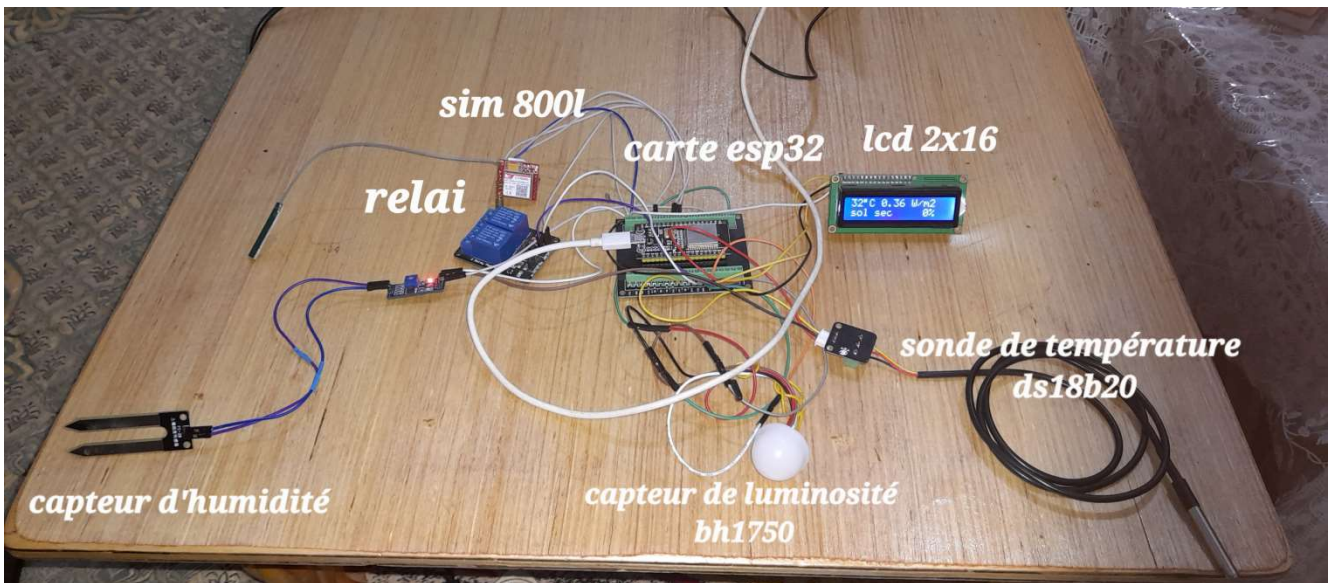


Figure III- 31 Montage de système D'irrigation intelligente

III.10.5 Programme (code en C++) téléversé sur l'ESP 32

Le programme téléversé sur la carte ESP32 est en annexe I

III.10.6 Interface de IOT Arduino Cloud sur PC

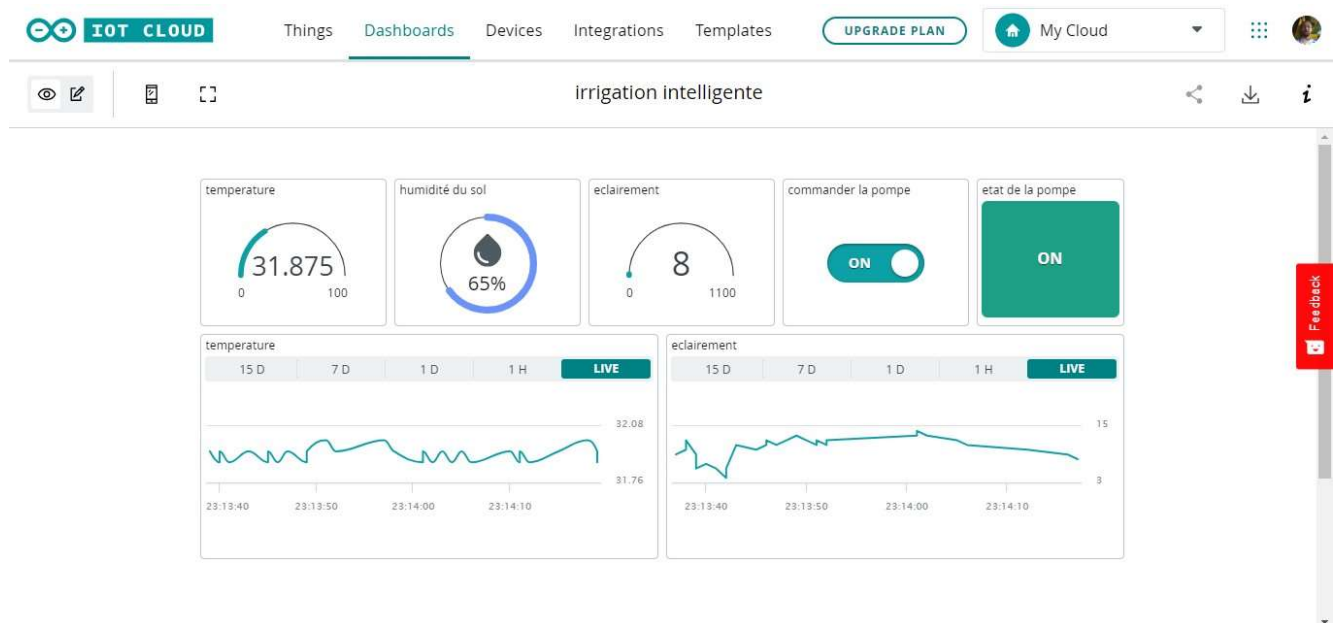


Figure III- 32 Interface de IOT Arduino Cloud sur PC

III.10.7 Interface de l'application IoT Remote sur mobile

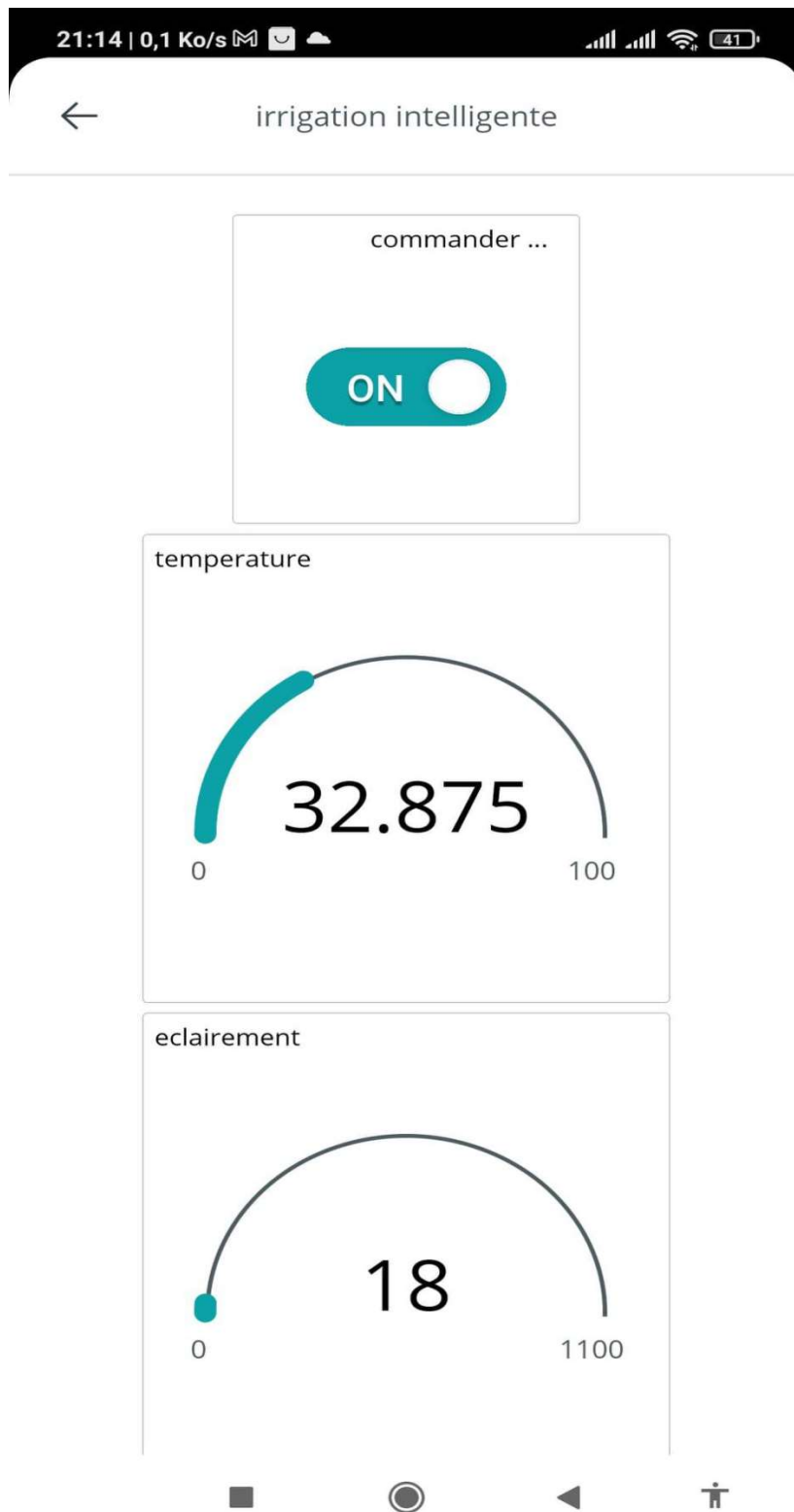


Figure III- 33 (A) Interface de l'application IoT Remote sur mobile

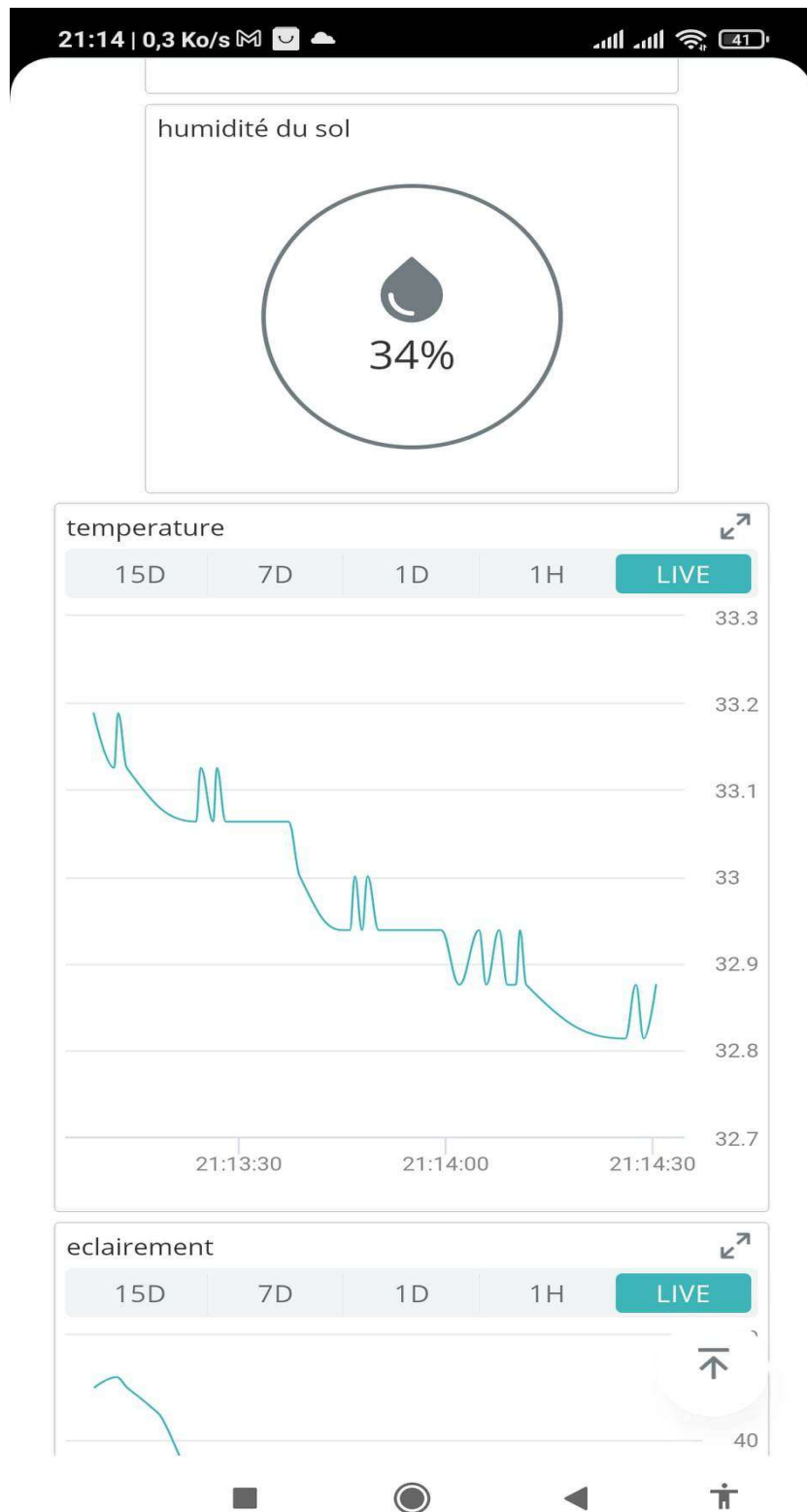


Figure III- 34 (B) Interface de l'application IoT Remote sur mobile



Figure III- 35 (C) Interface de l'application IoT Remote sur mobile

III.11 Conclusion

L'intégration de l'IoT (Internet des objets) dans les systèmes d'irrigation intelligente offre de nombreux avantages significatifs pour l'agriculture et l'irrigation comme ç*il* assure l'Optimisation de l'efficacité de l'irrigation : Grâce à l'IoT, les capteurs répartis dans les champs peuvent mesurer et transmettre des données précises sur l'humidité du sol, la température, la luminosité, etc. Ces informations permettent de prendre des décisions éclairées sur la quantité et le moment de l'irrigation. L'automatisation basée sur les données IoT permet d'optimiser l'efficacité de l'irrigation en fournissant la quantité d'eau nécessaire au bon moment, évitant ainsi le gaspillage et assurant une utilisation efficace des ressources.

IV. Conclusion Générale

L'irrigation intelligente utilisant le pompage photovoltaïque et l'IoT présente de nombreux avantages et opportunités. Cette combinaison de technologies permet une utilisation plus efficace de l'eau et de l'énergie, tout en offrant une gestion plus précise et automatisée de l'irrigation agricole. Voici quelques points clés à retenir :

- **Efficacité de l'eau :** L'irrigation intelligente utilise des capteurs pour mesurer le niveau d'humidité du sol et les conditions météorologiques, ce qui permet de fournir la quantité d'eau nécessaire au bon moment et au bon endroit. Cela réduit les pertes d'eau par évaporation et permet une utilisation plus rationnelle des ressources en eau.
- **Énergie renouvelable :** L'utilisation de pompes alimentées par des panneaux solaires photovoltaïques permet de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et aux sources d'énergie non renouvelables. Cela rend le système plus durable sur le plan environnemental et plus économique à long terme.
- **Automatisation et contrôle précis :** Grâce à l'IoT, les agriculteurs peuvent surveiller et contrôler l'irrigation à distance. Les capteurs collectent des données en temps réel sur l'humidité du sol, la température et d'autres paramètres, ce qui permet d'ajuster les besoins d'irrigation de manière précise et d'optimiser les rendements des cultures.
- **Réduction des coûts :** L'utilisation de l'énergie solaire pour alimenter les pompes d'irrigation permet de réduire les coûts d'exploitation à long terme. De plus, une meilleure gestion de l'eau et une utilisation plus efficace des ressources contribuent à optimiser les dépenses liées à l'irrigation.
- **Durabilité environnementale :** En réduisant la consommation d'eau et en utilisant une source d'énergie renouvelable, l'irrigation intelligente contribue à la préservation des ressources naturelles et à la réduction des émissions de carbone. Cela favorise une agriculture plus durable et respectueuse de l'environnement.

En somme, l'irrigation intelligente avec le pompage photovoltaïque et l'IoT présente un énorme potentiel pour améliorer l'efficacité de l'irrigation, réduire les coûts et promouvoir une agriculture plus

durable. En adoptant ces technologies, les agriculteurs peuvent optimiser leurs rendements, tout en réduisant leur empreinte environnementale et en contribuant à la préservation des ressources naturelles.

Bibliographie

- [1] C. Acket et J. Vaillant, *Les énergies renouvelables: état des lieux et perspectives*. Editions TECHNIP, 2011.
- [2] « Energie et environnement_Maafa.pdf ». Consulté le: 26 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://fac.unc.edu.dz/fstech/cours/ST/Energie%20et%20environnement_Maafa.pdf
- [3] « images (155×130) ». <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTAzZ3fxu7sxbQB1FMJMPOkzoKVBFA5BytdscJxWTgG1A&s> (consulté le 30 juin 2023).
- [4] « Ashalim Power Station in Israel · Free Stock Photo ». <https://www.pexels.com/photo/ashalim-power-station-in-israel-13248713/> (consulté le 30 juin 2023).
- [5] « Énergie éolienne : fonctionnement, avantages, chiffres clés et enjeux », 25 avril 2011. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne> (consulté le 26 mars 2023).
- [6] « images (97×130) ». <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTlrq8WU8Uc3vVYS8PJKqczPDAdDwZ5XhD1SupIgL&s> (consulté le 30 juin 2023).
- [7] Futura, « Définition | Énergie hydraulique | Futura Planète », *Futura*. <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-hydraulique-6659/> (consulté le 26 mars 2023).
- [8] « L'énergie hydraulique – 75% d'énergie renouvelable en Europe en 2050: mythe ou possibilité? » <https://futureenergiesrenouvelables.wordpress.com/2016/02/19/lenergie-hydraulique-2/> (consulté le 30 juin 2023).
- [9] « La biomasse et la bioénergie ».
- [10] « La biomasse est une énergie renouvelable », *Biomasse Normandie*. <https://www.biomasse-normandie.fr/encyclopedie/la-biomasse-est-une-energie-renouvelable/> (consulté le 30 juin 2023).
- [11] « L'énergie marémotrice | Nausicaa », 14 juin 2023. <https://www.nausicaa.fr/fr/le-mag-ocean/lenergie-maremotrice> (consulté le 30 juin 2023).
- [12] « ALMEE-photovoltaïque.pdf ». Consulté le: 27 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://meetmed.org/wp-content/uploads/2019/12/ALMEE-photovoltaïque.pdf>
- [13] « Pompage solaire : pourquoi l'adopter ? », *APB ENERGY*. <https://www.apb-energy.com/pompage-solaire> (consulté le 30 juin 2023).
- [14] « iepf_pompage_photovoltaïque.pdf ». Consulté le: 27 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.pseau.org/outils/ouvrages/iepf_pompage_photovoltaïque.pdf
- [15] « 3 -Schéma représentant une pompe centrifuge (Fraenkel [Fra94]) | Download Scientific Diagram ». https://www.researchgate.net/figure/Schema-representant-une-pompe-centrifuge-Fraenkel-Fra94_fig3_338500756 (consulté le 30 juin 2023).
- [16] « Cours pompe - pompe volumétrique à piston ». https://www.azprocede.fr/Cours_GC/pompe_volumetrique_piston.html (consulté le 30 juin 2023).

- [17] « CI971534.pdf ». Consulté le: 28 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://om.ciheam.org/om/pdf/a31/CI971534.pdf>
- [18] « pexels-photo-4863824.jpeg (600×571) ». <https://images.pexels.com/photos/4863824/pexels-photo-4863824.jpeg?auto=compress&cs=tinsyrgb&w=600> (consulté le 30 juin 2023).
- [19] « s8684f.pdf ». Consulté le: 28 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fao.org/3/s8684f/s8684f.pdf>
- [20] A. S. F. Africa, « L'irrigation par aspersion : l'avantage pour des cultures prospères », *ASFA*, 29 avril 2023. <https://asfa-ci.net/irrigation-par-aspersion/> (consulté le 30 juin 2023).
- [21] « Principes de fonctionnement du système goutte a goutte - Agronomie ». <https://agronomie.info/fr/principes-de-fonctionnement-de-systeme-goutte-a-goutte/> (consulté le 30 juin 2023).
- [22] « Cellule Photovoltaïque – Sciences de l'Ingénieur ». <https://si.blaisepascal.fr/1t-cellule-photovoltaique/> (consulté le 30 juin 2023).
- [23] « Ms.Eln.Meguenni-Tani+Reguig.pdf ». Consulté le: 30 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/15854/1/Ms.Eln.Meguenni-Tani%2BReguig.pdf>
- [24] « Chapitre6_MCC.pdf ». Consulté le: 30 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: http://www.est-usmba.ac.ma/coursenligne/Chapitre6_MCC.pdf
- [25] « ing ZEMOURI AZEDDINE.pdf ». Consulté le: 26 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <http://eprints.univ-batna2.dz/1287/1/ing%20ZEMOURI%20AZEDDINE.pdf>
- [26] « OBEIDI TCHOKETCH KEBIR.Gul Filiz.pdf ». Consulté le: 3 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <http://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/3845/1/OBEIDI%20TCHOKETCH%20KEBIR.Gul%20Filiz.pdf>
- [27] « 341.pdf ». Consulté le: 9 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1655/341.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [28] « Barrade - Cours d'électronique de puissance Conversion DCD.pdf ». Consulté le: 9 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.thierry-lequeu.fr/data/CVS_DCDC.pdf
- [29] « Régulateurs MPPT : tout savoir sur les régulateurs de charge solaire », *Dolphin Charger*. <https://www.dolphin-charger.fr/actualites/regulateurs-mppt-regulateurs-charge-solaire> (consulté le 24 avril 2023).
- [30] M.-Y. Malki, « Régulateur MPPT », *EVAEIS*, 30 mars 2021. <https://evaeis.com/regulateur-mppt/> (consulté le 30 juin 2023).
- [31] F. Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », 2018.
- [32] agritech, « Economiser l'eau avec une irrigation intelligente », *Agritech*, 11 novembre 2021. <https://www.agri-tech.tn/economiser-leau-avec-une-irrigation-intelligente/> (consulté le 3 mars 2023).
- [33] « Galcon G.S.I. Vigne : Système d'irrigation intelligent | Irrigazette ». <https://irrigazette.com/fr/articles/galcon-gsi-vigne-systeme-dirrigation-intelligent> (consulté le 30 juin 2023).

- [34] « Qu'est-ce que l'Internet des objets (IoT) ? », *NextPit*, 28 février 2017. <https://www.nextpit.fr/internet-des-objets-c-est-quoi> (consulté le 24 avril 2023).
- [35] « Qu'est ce que l'internet des objets (IoT) | TIBCO Software ». <https://www.tibco.com/fr/reference-center/what-is-the-internet-of-things-iot> (consulté le 30 juin 2023).
- [36] « BUSINESS INTELLIGENCE ARCHITECTURE BASED ON INTERNET OF THINGS », . *Vol.*, vol. 50, 2005.
- [37] S. Ladjouzi, B. Saoud, S. Medjedoub, et M. Benziane, « Proposition d'un réseau de communication entre les objets dans une maison intelligente à base d'Internet des Objets ».
- [38] Y. Atoumi, M. E. Khanouche, promoteur, et S. Bensadi, « Approche évolutionnaire pour la composition de services sensible à la QoS dans l'Internet des Objets à large échelle. », Thesis, Université Abderrahmane Mira- Bejaia, 2018. Consulté le: 25 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <http://172.17.1.105:8080/xmlui/handle/123456789/12408>
- [39] G. Plouin, « Modèles d'architectures de l'Internet des Objets », *OCTO Talks !*, 13 septembre 2011. <https://blog.octo.com/en/modeles-architectures-internet-des-objets/> (consulté le 24 avril 2023).
- [40] M. Nedjema, « Architecture Basée Agents pour le diagnostic d'un système d'IoT (Internet of Things) ».
- [41] « Qu'est-ce que le cloud? | Définition du cloud », *Cloudflare*. <https://www.cloudflare.com/fr-fr/learning/cloud/what-is-the-cloud/> (consulté le 30 avril 2023).
- [42] « YahiToufik.pdf ». Consulté le: 30 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ummtto.dz/dspace/bitstream/handle/ummtto/12880/YahiToufik.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [43] « Visual Studio Code », *Wikipédia*. 25 février 2023. Consulté le: 5 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Visual_Studio_Code&oldid=201737437
- [44] F. MOCQ, « EasyEDA : Dessinez vos circuits imprimés en ligne », *Framboise 314, le Raspberry Pi à la sauce française....*, 7 mai 2016. <https://www.framboise314.fr/easyeda/> (consulté le 5 mars 2023).

Annexe I

Programme téléversé dans la carte ESP32

```
#include <DallasTemperature.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <OneWire.h>
#include <BH1750.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "thingProperties.h"
#define one_wire_bus 17
#define hum_pin 39
#define relay 19
#define SIM800_TX_PIN 26
#define SIM800_RX_PIN 27
SoftwareSerial sim800l(SIM800_TX_PIN, SIM800_RX_PIN);
int pourcentage = 0;
OneWire onewire(one_wire_bus);
DallasTemperature temp(&onewire);
BH1750 lightMeter;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2 );
void setup() {
// Initialize serial and wait for port to open:
Serial.begin(115200);
sim800l.begin(9600);
digitalWrite(relay, HIGH);
initProperties();
delay(2000); // Attente de la connexion
sim800l.println("AT"); // Vérifier la communication
delay(2000);
sim800l.println("AT+CMGF=1"); // Configurer le mode SMS en texte
```

```

delay(1000);
  sim8001.println("AT+CNMI=2,2,0,0,0"); // Activer la réception automatique des SMS
delay(1000);
Serial.println("Prêt à recevoir des SMS !");
ArduinoCloud.begin(ArduinoIoTPreferredConnection);
setDebugMessageLevel(2);
ArduinoCloud.printDebugInfo();
pinMode(hum_sol, INPUT);
  pinMode(relay,OUTPUT);
  Wire.begin();
  lightMeter.begin();
  temp.begin();
  Serial.begin(9600);
delay(1000);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(3, 0);
  lcd.print("IRRIGATION");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(" AUTOMATIQUE");
  delay(5000);
  lcd.clear();
}
void loop() {
  ArduinoCloud.update();
  temp.requestTemperatures();
  float tempc = temp.getTempCByIndex(0);
  temperature=tempc;
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(tempc, 0);
  lcd.print((char)223);
  lcd.print("C");
  lcd.setCursor(5, 0);

```

```

float lux = (lightMeter.readLightLevel()) * 0.0079;
eclaircement=lux;
lcd.print(lux);
lcd.print(" W/m2 ");
int humsol = analogRead(hum_pin);
pourcentage = map(humsol, 0, 4095, 100, 0);
hum_sol=pourcentage;
if (pourcentage >= 70)
{
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(temperature, 0);
lcd.print((char)223);
lcd.print("C");
lcd.setCursor(5, 0);
float lux = (lightMeter.readLightLevel()) * 0.0079;
lcd.print(lux);
lcd.print(" W/m2 ");
digitalWrite(relay,HIGH);
relay_pompe=0;
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("sol humide ");
lcd.print(pourcentage);
lcd.print("% ");
}
else
{
digitalWrite(relay,LOW);
relay_pompe=1;
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(tempc, 0);
lcd.print((char)223);
lcd.print("C");
}

```

```

    lcd.setCursor(5, 0);
    float lux = (lightMeter.readLightLevel()) * 0.0079;
    lcd.print(lux);
    lcd.print(" W/m2  ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("sol sec  ");
    lcd.print(pourcentage);
    lcd.print("% ");
}
delay(20);
if (sim8001.available() {
String message = sim8001.readStringUntil('\n');
Serial.println(message);
if (message.indexOf("ON") != -1) {
    digitalWrite(relay, LOW); // Activer le relais
    Serial.println("pompe demaree !");
    sim8001.println("AT+CMGS=\"+213658713889\"");
    delay(1000);
    sim8001.print("pompe demaree !");
    sim8001.write(26);
}
    if (message.indexOf("OFF") != -1 ) {
digitalWrite(relay, HIGH); // Désactiver le relais
Serial.println("pompe arretee !");
    sim8001.println("AT+CMGS=\"+213658713889\"");
    delay(1000);
    sim8001.print("pompe arretee !");
    sim8001.write(26);
}
if (message.indexOf("data") != -1) {
    sim8001.println("AT+CMGS=\"+213658713889\"");
    delay(1000);
    sim8001.print("temperature: ");

```

```

sim8001.println(tempc);
sim8001.println(" C");
sim8001.print("eclaircement: ");
sim8001.println(lux);
sim8001.println(" W/m2");
sim8001.print("humidite du sol: ");
sim8001.println(pourcentage);
sim8001.println(" %");
sim8001.write(26);
}
}
}
void onTemperatureChange() {
temp.requestTemperatures();
    //float temperature = temp.getTempCByIndex(0);
    float tempc = temp.getTempCByIndex(0);
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(tempc, 0);
    lcd.print((char)223);
    lcd.print("C");
    lcd.setCursor(5, 0);
    delay(20);
}
void onEclaircementChange() {
    // Add your code here to act upon Eclaircement change
}
void onRelayPompeChange() {
    if ((relay_pompe=1) && ((pourcentage >= 70) || (pourcentage < 70))) {
        digitalWrite(relay,HIGH);
    }
    else if ((relay_pompe=0) && ((pourcentage >= 70) || (pourcentage < 70))) {
        digitalWrite(relay,LOW);
    }
}

```

}

}