



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° d'ordre : M...../ GE /2025

MEMOIRE

Pour obtenir le diplôme de

MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Spécialité: Electrotechnique Industrielle

Présenté par

ZAHAF YASSINE

CHAREF BENATIA FAICAL

Intitulé du sujet

**Conception et réalisation d'un système de surveillance à distance
d'une chambre froide**

Soutenu le 16/12/2025 devant le jury composé de :

Président :	Mr. MESKINE Said	Pr.	Université de Mostaganem
Examineur :	Mr. HENNI Sid Ahmed	MCA	Université de Mostaganem
Encadreur :	Mr. BENYAMINA Mansour	MCA	Université de Mostaganem
Co-Encadreur :	Mr. AZZEDINE Mohamed	MAA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2024/2025

Remerciement

Nous tenons avant tout à exprimer notre profonde gratitude à Allah, le Tout-Puissant, dont la grâce et la bénédiction nous ont accompagnés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à nos encadreur, Monsieur BENYAMINA Mansour et Monsieur AZZEDINE Mohamed, pour leurs accompagnements précieux, leurs orientations pertinentes, ainsi que pour leurs conseils et remarques constructives qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury qui ont accepté d'examiner notre mémoire et d'enrichir notre travail par leurs observations et leurs appréciations.

Nos pensées reconnaissantes vont aussi à nos familles, pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements constants et leurs sacrifices. Nous ne saurions jamais exprimer à quel point nous leur sommes reconnaissantes pour tout ce qu'elles ont fait pour nous permettre d'avancer et de réussir.

Enfin, nous souhaitons remercier toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin tout au long de ce projet, et tout particulièrement nos collègues, pour leur collaboration, leur soutien et leurs échanges enrichissants.

Dédicace

À nos chers parents,

Qui ont été notre soutien, notre aide et nos prières à chaque étape.

*À tous ceux qui ont tant sacrifié pour nous amener là où nous sommes
aujourd'hui...*

*Nous vous dédions humblement ce travail en témoignage de notre profonde
gratitude.*

À notre famille,

Pour leur présence, leurs encouragements et leur amour inconditionnel,

Nous vous offrons les fruits de cette entreprise.

À nos amis et collègues,

*Avec qui nous avons partagé des moments de fatigue, d'efforts et de
persévérance,*

Nous vous offrons une part de ce succès.

Yassine

À tous mes amis,

Qui ont été pour moi un soutien précieux tout au long de ce parcours.

*Merci pour votre présence, vos encouragements, vos conseils et pour tous les
moments partagés qui ont rendu ce chemin plus léger et plus agréable.*

Et tout particulièrement à Abdelmadjid,

Pour sa disponibilité, son aide sincère et son soutien constant.

*Ton accompagnement a été d'une grande valeur et je t'en suis profondément
reconnaisant.*

À vous tous, je dédie une part de ce travail.

Faiçal

ملخص

في هذا العمل قمنا بتصميم و إنجاز نظام كامل لمراقبة غرفة تبريد عن بُعد اعتمادًا على المتحكم ESP32. يسمح النظام بمتابعة ظروف الغرفة في الزمن الحقيقي من خلال جمع البيانات ومعالجتها ثم إرسالها إلى واجهة ويب تفاعلية، حيث يمكن عرض المعلومات والتحكم في التجهيزات الكهربائية بسهولة عبر الهاتف أو الحاسوب. يمثل هذا النظام نموذجًا عمليًا مطورًا باستخدام تقنيات إنترنت الأشياء، ويوفّر وسيلة فعّالة وبسيطة لإدارة غرفة التبريد وتحسين موثوقيتها.

Résumé

Dans ce travail, nous avons conçu et réalisé un système complet de surveillance à distance d'une chambre froide en utilisant le microcontrôleur **ESP32**. Le système permet de suivre en temps réel les conditions internes de la chambre grâce à la collecte et au traitement des données, puis leur affichage sur une interface Web interactive offrant également la possibilité de contrôler les équipements électriques à distance via un ordinateur. Ce système représente un prototype fonctionnel basé sur les technologies de l'Internet des objets, offrant une solution simple, fiable et efficace pour la gestion d'une chambre froide.

Abstract

In this work, we designed and developed a complete remote monitoring system for a cold room using the **ESP32** microcontroller. The system enables real-time tracking of the room's internal conditions by collecting and processing data, then displaying it through an interactive web interface that also allows remote control of electrical equipment via a phone or computer. This prototype, based on IoT technologies, provides a simple, reliable, and efficient solution for cold-room management and improved operational stability.

Sommaire

Résumé.....	4
Abstract	4
Introduction général	9
Chapitre I	10
Généralités	10
I.2 Paramètres physiques essentiels au contrôle d'une chambre froide :	12
I.2.1 La température	12
I.2.2 L'humidité	12
I.2.3 Luminosité	12
I.2.4 Le courant consommé :	12
I.2.5 Le monoxyde de carbone (CO)	12
I.2.6 Le méthane (CH ₄)	13
I.2.7 Le GPL (Gaz de pétrole liquéfié)	13
I.2.8 L'ozone (O ₃)	13
I.3 Architecture IoT Multi-Nœuds.....	13
Chapitre II	16
Fonctionnement du système	16
II.1 Introduction :.....	17
II.2 Schéma synoptique du système multi-nœuds	17
II.3 Schéma électrique de l'unité centrale (ESP32_M)	18
II.3 Schéma électrique de l'unité de mesure (ESP32_C)	19
II.4 Schéma électrique de l'unité d'actionnement (ESP32_R).....	20
II.5 Description détaillée des modules :.....	21
II.5.1 L'ESP32 :	21
II.5.1.2 Caractéristiques	22
II.6 Les capteurs d'une chambre froide	23
II.6.1 Capteur de température et d'humidité (DHT22)	23
II.6.2 Capteur de luminosité(BH1750)	24
II.6.3 Capteur de gaz monoxyde de carbone (CO) MQ-9	25
II.6.4 Capteur de gaz le méthane (CH ₄) MQ-4	26
II.6.5 Capteur de gaz GPL MQ-2	27
II.6.6 Capteur de gaz l'ozone (O ₃) MQ-131	28
II.6.7 Capteur de courant SCT013	28

II.6.8 Écran LCD 16x2	29
II.6.9 Les relais	29
II.7 Commande des actionneurs et types de moteurs utilisés	30
II.7.1 Relais 1 – Commande du système de climatisation	30
II.7.2 Relais 2 – Commande de l’humidificateur	30
II.7.3 Relais 3 – Commande de l’éclairage	31
II.7.4 Relais 4 – Commande de la ventilation (gaz CO) :	31
II.7.5 Relais 5 – Commande de la pompe de gaz (CH ₄)	31
II.7.6 Relais 6 – Commande de la ventilation (GPL)	32
II.7.7 Relais 7 – Commande du système d’ozone (O ₃)	32
II.7.8 Relais 8 – Commande du groupe électrogène.....	32
II.7 Conclusion	33
Chapitre III	34
Programme et simulation	34
III.1 Introduction	35
III.2 Organigramme général du système	36
III.3 Simulation du système	37
III.3.1 Utilisation de la plateforme Wokwi	37
III.4 Simulation de l’unité principale (ESP32_M) avec l’afficheur LCD	38
III.5 Simulation du câblage de l’unité de mesure (ESP32_C)	39
III.6 Simulation de l’unité d’action (ESP32_R) sur les modules relais	40
III.6 Conception de pages Web	41
Chapitre IV	42
Résultats et commentaires	42
Introduction	43
IV.1 Réalisation prototype de système:	43
IV.1.1 Carte ESP32_M	43
IV.1.2 Carte ESP32_C	44
IV.1.3 Carte ESP32_R	45
IV.2 Résultat température et humidité	46
IV.3 Résultats Luminosité	46
IV.4 Monoxyde de carbone (CO)	47
IV.5Méthane	47

IV.6 Pollution	48
IV.7 Courant	48
IV.8 Ozone	49
IV.9 Résultats et commentaires :	50
IV.10 Les graphes des différents types de capteurs sur page HTML	51
IV.10.1 : graphe du capteur de Température	51
IV.10.2 Graphe du capteur Humidité	52
IV.10.3 Graphe du capteur Monoxyde de carbone (CO)	52
IV.10.4 Graphe du capteur Méthane	53
IV.10.5 graphe du capteur Pollution	53
IV.10.6 Graphe du capteur Courant	54
IV.10.7 Graphe du capteur Luminosité	54
IV.10.8 Graphe du capteur Ozone	55
IV.11 Conclusion :	55
Conclusion générale	56
Perspectives et recommandations	56
Annexe	59
Recherches bibliographiques	62

Liste des figures

Figure I.1: Chambre froide	11
Figure II.1:Schéma synoptique	17
Figure II.2 :Carte principale ESP32_M	18
Figure II.3 :Schéma électrique ESP32_C	19
Figure II.4 :Schéma électrique ESP32_R	20
Figure II.5 :L'ESP32	21
Tableau 1 : Caractéristique de ESP32	22
Figure II.6:Capteur de température et d'humidité (DHT22)	23
Figure II.7 :Signaux de variation de température et humidité	23
Figure II.8:Capteur de luminosité (BH1750)	24

Figure II.10 :Organigram de fonctionnement deucapteur BH1750 [Annex].	24
Figure II.9: graph de variation lumenosite[Annexe].	24
Figure II.11 :Capteur de gaz monoxyde de carbone (CO) MQ-9	25
Figure II.12 :graph de variation de CO en fonction résistanse [Annexe].	25
Figure II.13 : Capteur de gaz le méthane (CH ₄) MQ-4	26
Figure II.14 :graph de variation de CH ₄ en fonction de résitanse [Annexe].	26
Figure II.15 :Capteur de gaz GPL MQ-2.	27
Figure II.16 : graph de variation de gpl en fonction de résitance [Annexe].	27
Figure II.17 :Capteur de gaz l'ozone (O ₃) MQ-131	28
Figure II.18 :graph de variation de O ₃ en fonction de résistance [Annexe].	28
Figure II.19:Capteur de courent SCT013	28
Figure II.20 :1graph de varitiation de curant en fonction de tension [Annexe].	29
Figure II.21 : Écran LCD 16x2	29
Figure II.22 : Les relais	29
Figure II.23 :Compresseur de climatisation	30
Figure II.24 :Humidificateur	30
Figure II.25:Ventilateur de ventilation	31
Figure II.26 :Pompe de gaz O ₃	31
Figure II.27 :Ventilateur GPL	32
Figure II.28 : Groupe électrogène.	32
Figure III.2.a :temperateur	38
Figure III.2.b : humidité	38
Figure III.2.c : luminosité	38
Figure III.2.d : courant	38
Figure III.2.e : monoxyde de carbone	38
Figure III.2.f : méthane.	38
Figure III.2.i : GPL gaz inflammables	38
Figure III.2.g : Ozone.	38
Figure III.2 :Simulation de l'unité principale (ESP32_M) avec l'afficheur LCD.	38
Figure III.3 : Simulation des grandeures physiques (ESP32_C)	39
Figures III.4 : un exmple de l'unité d'action (ESP32_R)	40
Figure III.5:Page HTML correspondante a la figure III.4.	41
Figure IV.1 :image de prototype carte ESP32_M	43
Figure IV.2 :image de prototype carte ESP32_C	44
Figure IV.3 :image de prototype carte ESP32_R	45
Figure IV.4 :DHT22 et ESP32.	46
Figure IV.5: Résultat fournit par le capteur DHT22	46
Figure IV.7:BH1750 et ESP32.	46
Figure IV.6: Résultat fournit par le capteur BH175	46
Figure IV.5:MQ_9 et ESP32	47
Figure IV.8:Résultat fournit par le capteur MQ_9	47
Figure IV.11 :MQ_4 et ESP32	47
Figure IV.10:Résultat fournit parle capteur MQ_2	47

Figure IV.13:MQ_2 et ESP32	48
Figure IV.12:Résultat fournit par le capteur.....	48
Figure IV.15 :SCT013 et ESP32	48
Figure IV.14: Résultat fournit par le capteur.....	48
Figure IV.17 :MQ-131 et ESP32	49
Figure IV.16 : Résultat fournit par le capteur MQ_131.....	49
Figure IV.18:Intrface HTML.....	50
Figure IV.19:Graphe de la variation de température	51
Figure IV.20: Graphe de la variation d'humidité	52
Figure IV.21:Graphe de la variation du monoxyde de carbone	52
Figure IV.22:Graphe de variation de methane	53
Figure IV.23:Graphe de variation de pollution.....	53
Figure IV.24: Graphe de courant	54
Figure IV.26:Graphe de variation de luminosité	54
Figure IV.27:Graphe de variation d'ozone	55

Abréviation

PPM: Partie Par Million.

MQ : Capteur de gaz.

HTML: Hyper Text Markup Language.

Introduction général :

Dans un monde en constante évolution, les technologies de surveillance et de contrôle à distance prennent une place de plus en plus importante dans divers secteurs, notamment dans celui de la chaîne du froid. La conservation des produits périssables, tels que les denrées alimentaires, les produits pharmaceutiques ou encore certains produits chimiques, nécessite des conditions de température strictement contrôlées. Toute variation non maîtrisée de la température peut entraîner une détérioration irréversible de ces produits, engendrant ainsi des pertes économiques importantes et des risques sanitaires.

Face à ces enjeux, la mise en place de systèmes de surveillance intelligents et à distance devient une nécessité. Ces systèmes permettent non seulement de surveiller en temps réel les paramètres critiques d'une chambre froide, comme la température et l'humidité, mais aussi d'alerter instantanément l'utilisateur en cas d'anomalie. Grâce aux technologies embarquées comme les microcontrôleurs, les capteurs connectés et les modules de communication (Wi-Fi, GSM), il est désormais possible de concevoir des solutions à la fois économiques, fiables et accessibles.

Ce travail s'inscrit dans cette démarche en proposant la conception et la réalisation d'un système de surveillance à distance d'une chambre froide, capable de relever les données environnementales, de les transmettre en temps réel à une plateforme distante, et d'alerter l'utilisateur en cas de dysfonctionnement.

L'objectif principal de ce projet est de mettre en œuvre une solution technologique basée sur des composants électroniques et informatiques modernes, en intégrant des aspects matériels (hardware) et logiciels (software), tout en assurant une interface conviviale pour l'utilisateur final.

Chapitre I :

Généralités

Dans un contexte où les enjeux liés à la conservation des produits sensibles sont de plus en plus critiques, les chambres froides représentent une solution incontournable dans plusieurs secteurs comme l'agroalimentaire, la pharmaceutique ou encore la logistique. Cependant, la gestion efficace de ces installations nécessite un suivi continu et rigoureux des paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité, l'éclairage, la concentration des gaz ainsi que la consommation électrique.

L'évolution des technologies embarquées et l'avènement de l'Internet des Objets (IoT) permettent aujourd'hui de développer des systèmes intelligents capables de surveiller en temps réel ces paramètres et d'intervenir automatiquement ou manuellement en cas d'anomalies. Grâce à des microcontrôleurs performants comme l'ESP32, associés à une panoplie de capteurs environnementaux et de modules de communication, il devient possible de réaliser des solutions économiques, fiables et accessibles.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre projet, visant à concevoir et réaliser un système de surveillance à distance d'une chambre froide, basé sur l'ESP32, intégrant plusieurs capteurs (température, humidité, gaz, lumière, courant électrique) et permettant le contrôle d'équipements via des relais. Le tout est accompagné d'une interface de visualisation et de commande accessible à distance via Wi-Fi.

Dans le cadre de ce projet, le système proposé n'est plus basé sur une seule carte ESP32 comme dans les architectures classiques, mais sur **trois unités ESP32 distinctes** travaillant ensemble et communiquant entre elles via Wi-Fi [1].

- La première unité est dédiée à la **mesure des gaz et de la luminosité**.
- La deuxième unité joue le rôle d'**unité centrale**, assurant l'acquisition du courant, l'affichage (LCD), l'hébergement de la page web et la prise de décision.
- La troisième unité est consacrée à l'**actionnement**, notamment le pilotage des relais. Cette architecture distribuée permet d'améliorer la modularité, la fiabilité et la clarté du fonctionnement global du système.



Figure I.1: Chambre froide

I.2 Paramètres physiques essentiels au contrôle d'une chambre froide :

Le contrôle d'une chambre froide repose principalement sur la surveillance de la température, de l'humidité relative, de la qualité de l'air et de la pression. Ces paramètres garantissent la bonne conservation des produits, limitent les pertes et assurent un fonctionnement optimal de l'installation [2].

I.2.1 La température :

La température est un facteur essentiel dans la conservation des produits périssables. Un contrôle rigoureux permet de ralentir les réactions biologiques et microbiologiques, garantissant ainsi la qualité et la durée de conservation des denrées. Toute variation anormale peut entraîner des pertes économiques importantes.

I.2.2 L'humidité :

L'humidité relative influence directement la conservation des produits en chambre froide. Un excès d'humidité peut favoriser la prolifération des moisissures, tandis qu'un air trop sec peut provoquer le dessèchement des marchandises. Le maintien d'un niveau d'humidité adapté est donc indispensable.

I.2.3 Luminosité :

La lumière, notamment lorsqu'elle est trop intense, peut altérer certains produits sensibles, accélérer leur dégradation ou affecter leur apparence. Le contrôle de l'éclairage dans la chambre froide vise à préserver la qualité des produits tout en réduisant la consommation énergétique.

I.2.4 Le courant consommé :

Le suivi de la consommation électrique des équipements de la chambre froide permet d'assurer leur bon fonctionnement, de prévenir les surcharges ou les anomalies techniques, et d'optimiser la gestion énergétique. Un courant anormalement élevé peut être un signe avant-coureur d'un dysfonctionnement.

I.2.5 Le monoxyde de carbone (CO) :

Dans une chambre froide, la surveillance du monoxyde de carbone est essentielle pour des raisons de sécurité. Ce gaz peut résulter d'un dysfonctionnement des systèmes à combustion, des groupes électrogènes ou d'équipements annexes. Sa présence, même en faible quantité, constitue un risque sérieux d'intoxication pour le personnel intervenant. La détection du CO permet ainsi de prévenir les accidents, d'assurer la conformité aux normes de sécurité et de garantir un environnement de travail sain.

I.2.6 Le méthane (CH₄) :

Gaz inflammable, le méthane peut être émis par des fuites de gaz naturel ou de systèmes frigorifiques utilisant certains gaz réfrigérants. Sa surveillance est indispensable pour éviter les risques d'incendie ou d'explosion.

I.2.7 Le GPL (Gaz de pétrole liquéfié) :

Mélange de gaz inflammables utilisé dans certaines installations industrielles. Le contrôle de sa présence est essentiel pour la prévention des fuites pouvant causer des accidents graves [4].

I.2.8 L'ozone (O₃) :

Gaz oxydant puissant, l'ozone peut être utilisé pour la désinfection des surfaces ou de l'air dans certaines chambres froides. Toutefois, à des concentrations élevées, il devient dangereux pour la santé humaine et pour les matériaux. La surveillance de sa concentration permet de garantir un environnement sécurisé.

I.3 Architecture IoT Multi-Nœuds:

Dans une architecture IoT moderne, les systèmes peuvent être distribués sur plusieurs nœuds afin d'améliorer la modularité, la fiabilité et la gestion des tâches. Dans le cadre de notre projet, le système adopte une structure **multi-nœuds**, constituée de **trois modules ESP32** interconnectés via Wi-Fi. Chaque nœud joue un rôle spécifique :

- un **nœud de mesure** chargé de collecter les données environnementales (gaz et luminosité),
- un **nœud central** responsable du traitement, de l'affichage des informations et de l'interface web,
- et un **nœud d'actionnement** dédié au contrôle des relais. Cette organisation distribuée offre une meilleure flexibilité et permet d'étendre le système en ajoutant facilement de nouveaux capteurs ou actionneurs.

I.4 L'application principale du système proposé dans notre travail concerne la surveillance intelligente des chambres de stockage de la pomme de terre.

La conservation de ce produit agroalimentaire exige un contrôle strict de plusieurs paramètres environnementaux afin d'éviter la germination, le noircissement interne, la déshydratation ou le développement de moisissures [2].

La température et l'humidité doivent être maintenues dans des plages précises afin d'assurer une conservation optimale. Le capteur **DHT22** permet de surveiller en continu ces paramètres.

La présence de certains gaz, tels que le CH_4 (dégagement dû à la fermentation), le CO (mauvaise combustion des systèmes de chauffage) ou encore l' O_3 (utilisé comme agent de désinfection), joue un rôle essentiel dans la qualité du stockage. Les capteurs **MQ** permettent donc de détecter toute anomalie pouvant affecter le produit.

De plus, la lumière excessive peut entraîner la **verdure** (formation de solanine), rendant la pomme de terre impropre à la consommation. Le capteur de luminosité **BH1750** assure une surveillance efficace de ce paramètre.

Grâce à la communication entre les trois unités ESP32, le système permet de collecter, analyser et afficher les données en temps réel, tout en contrôlant automatiquement les relais afin d'ajuster les équipements de ventilation, chauffage ou éclairage.

Cette application démontre la pertinence du système dans un contexte agro-industriel où la précision et la continuité de mesure sont essentielles pour garantir la qualité du produit et réduire les pertes économiques.

Les valeurs recommandées pour le stockage de la pomme de terre :

Le stockage optimal de la pomme de terre nécessite le respect de plusieurs paramètres environnementaux afin d'assurer une longue durée de conservation tout en préservant la qualité du produit. Les valeurs recommandées sont les suivantes :

- **Température : 4°C à 8°C**

Une température trop élevée favorise la germination, tandis qu'une température trop basse entraîne un noircissement interne.

- **Humidité relative : 90 % à 95 %**

Un niveau d'humidité insuffisant provoque un dessèchement du tubercule, alors qu'un excès d'humidité peut entraîner le développement de moisissures.

- **Luminosité : proche de 0 lux**

La pomme de terre doit être conservée dans l'obscurité, car l'exposition à la lumière provoque la **variation** et la formation de **solanine**, une substance toxique.

- **Gaz CH_4 (méthane) : doit resté à un niveau minimal**

La présence de méthane peut être liée à des processus de dégradation organique, indiquant une altération ou une fermentation.

- **CO (monoxyde de carbone) : < 50 ppm**

Une concentration élevée peut indiquer une mauvaise combustion dans les systèmes de chauffage ou de ventilation.

- **O₃ (ozone) : concentration contrôlée**

L'ozone peut être utilisé pour la désinfection, mais des niveaux trop élevés peuvent dégrader la qualité du produit et affecter l'environnement de stockage.

Le respect de ces limites permet de réduire les pertes post-récolte, d'assurer une conservation optimale et de maintenir un niveau de qualité conforme aux exigences agroalimentaire .

Chapitre II :

Fonctionnement du système

II.1 Introduction :

Ce chapitre traite le matériel utilisé pour la collecte des informations, le type du système à microcontrôleur à utiliser pour le traitement des données, et la manière dont les mesures sont transférées vers un ordinateur distant.

II.2 Schéma synoptique du système multi-nœuds:

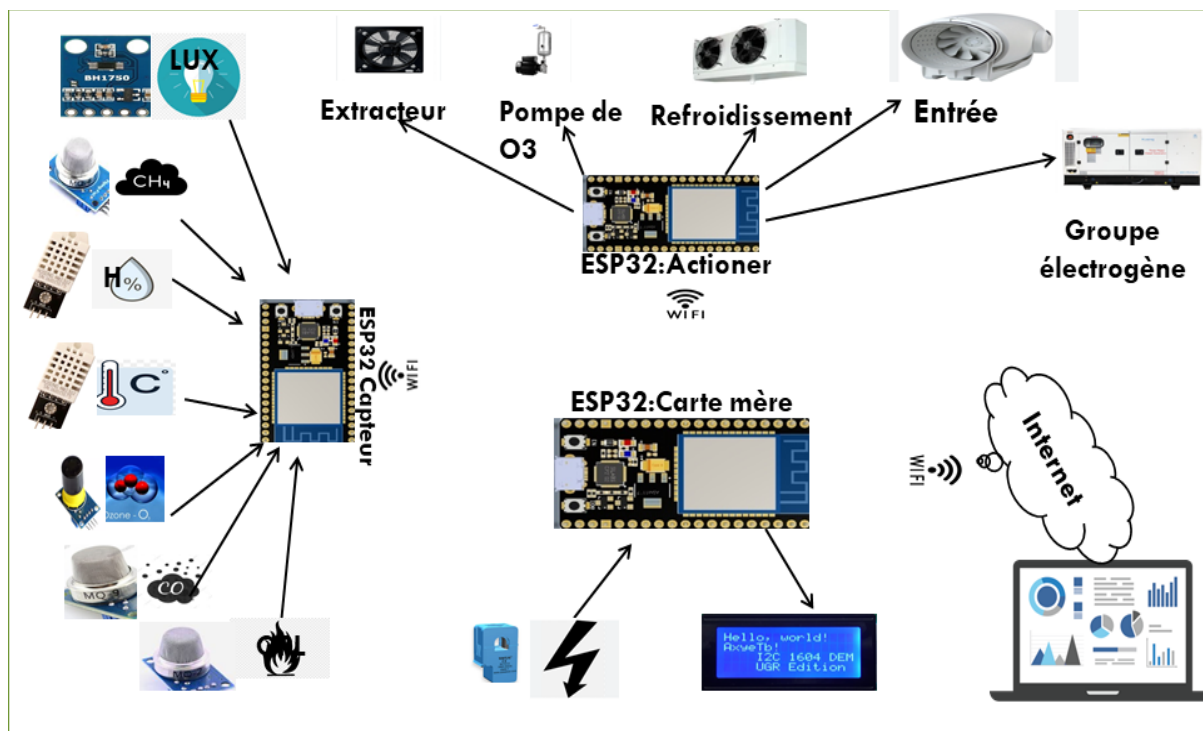


Figure II.1:Schéma synoptique

. Le système est composé de trois cartes ESP32 qui communiquent entre elles via Wi-Fi. L'ESP32_C Capteur mesure en temps réel les différentes grandeurs de la chambre froide et envoie les données à l'ESP32_M Carte mère. Cette dernière analyse les informations reçues et décide des actions nécessaires, puis transmet les commandes à l'ESP32_R Actionneur. Celui-ci pilote les équipements comme l'extracteur, la pompe d'ozon et le refroidissement. Enfin, la carte mère assure aussi la communication avec l'interface web, permettant la surveillance et le contrôle à distance via Internet.

II.3 Schéma électrique de l'unité centrale (ESP32_M) :

L'unité centrale réalise l'acquisition du courant, l'affichage local des informations ainsi que l'hébergement de la page web.

Le module ADS1115 est connecté à l'ESP32 via l'interface I2C (SDA, SCL), et il reçoit le signal du transformateur de courant SCT-013.

L'écran LCD 16×2 utilise également le bus I2C, ce qui permet une connexion simple et efficace.

Ce schéma regroupe les éléments essentiels du traitement local ainsi que les interfaces de communication internes à l'unité centrale.

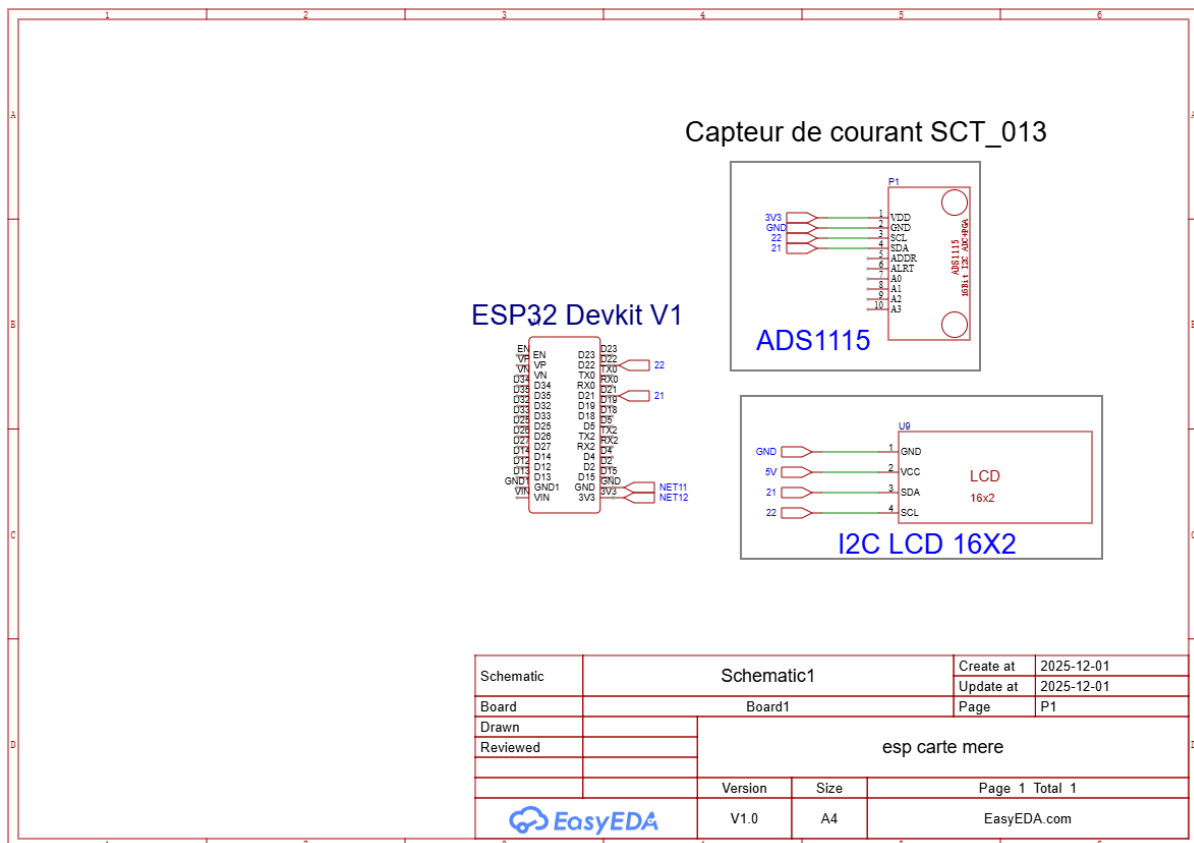


Figure II.2 :Carte principale ESP32_M

- **Carte ESP32 (unité principale de traitement)**
- **Module ADS1115 –** Convertisseur analogique/numérique 16 bits
- **Capteur de courant SCT-013 –** Mesure du courant AC
- **Écran LCD 16×2 avec interface I2C**
- **Mémoire SPIFFS intégrée –** Stockage de la page HTML et des fichiers
- **Alimentation 5V et régulateur**
- **Connecteurs, câbles et résistances diverses**

II.3 Schéma électrique de l'unité de mesure (ESP32_C) :

Cette unité regroupe l'ensemble des capteurs environnementaux utilisés pour la détection des gaz ainsi que la mesure de la luminosité.

Le schéma électrique associe les capteurs MQ2, MQ4, MQ9 et MQ131 aux entrées analogiques de l'ESP32, avec une alimentation 5V commune. Le capteur BH1750, quant à lui, est connecté via le bus I2C (SDA, SCL).

Ce schéma permet la lecture simultanée de plusieurs capteurs et l'envoi périodique des valeurs mesurées vers l'unité centrale (ESP32 n°2) via Wi-Fi.

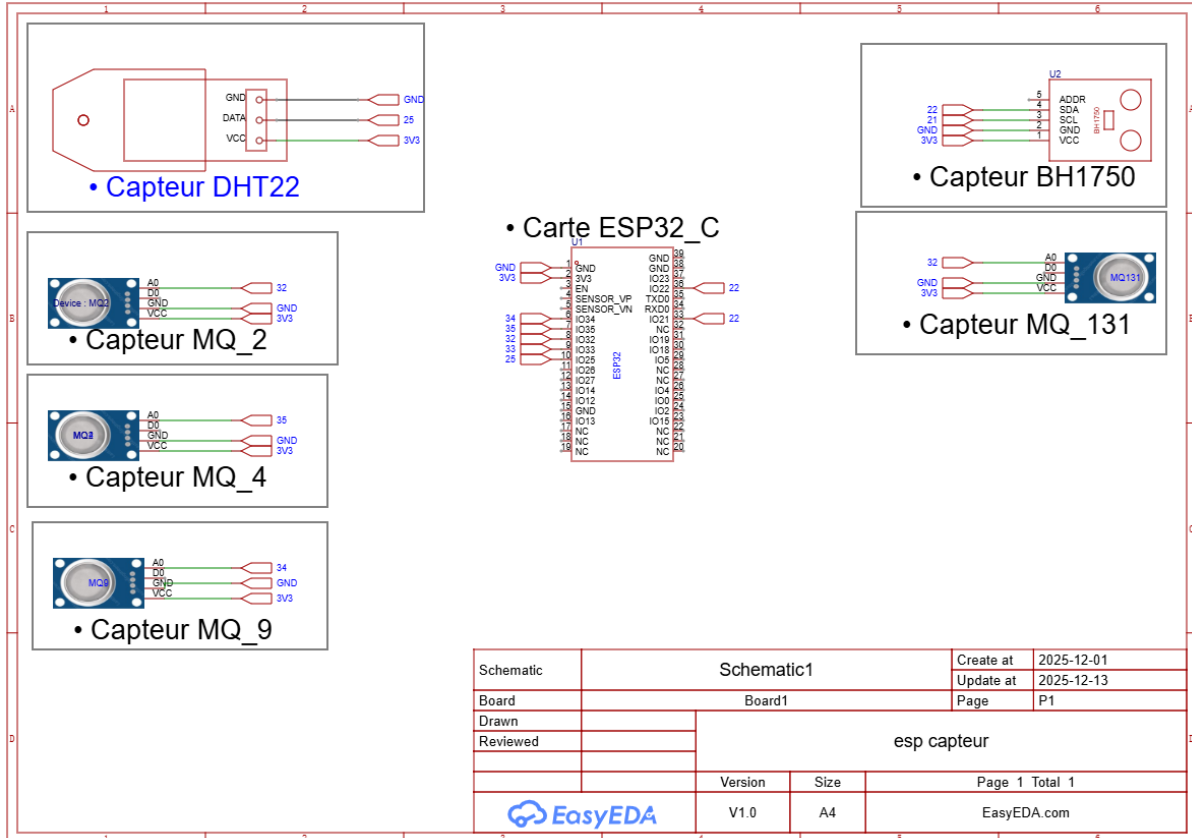


Figure II.3 :Schéma électrique ESP32_C

- **Carte ESP32 (Wi-Fi intégré)**
- **Capteur DHT22**– Détection la température et humidité
- **Capteur MQ2** – Détection du GPL et fumée
- **Capteur MQ4** – Détection du méthane (CH₄)
- **Capteur MQ9** – Détection du CO et gaz combustibles
- **Capteur MQ131** – Détection de l’ozone (O₃)
- **Capteur BH1750** – Capteur de luminosité numérique (I2C)
- **Câblage et alimentation 5V**

II.4 Schéma électrique de l'unité d'actionnement (ESP32_R) :

Cette unité est dédiée au pilotage des relais permettant l'activation ou la désactivation des charges électriques (moteur, compresseur, éclairage...).

Le microcontrôleur ESP32 pilote directement l'entrée du module relais via une broche GPIO, tandis que le relais est alimenté en 5V.

Le schéma inclut également la séparation entre la partie commande (ESP32) et la partie puissance (charge), garantissant ainsi la sécurité électrique.

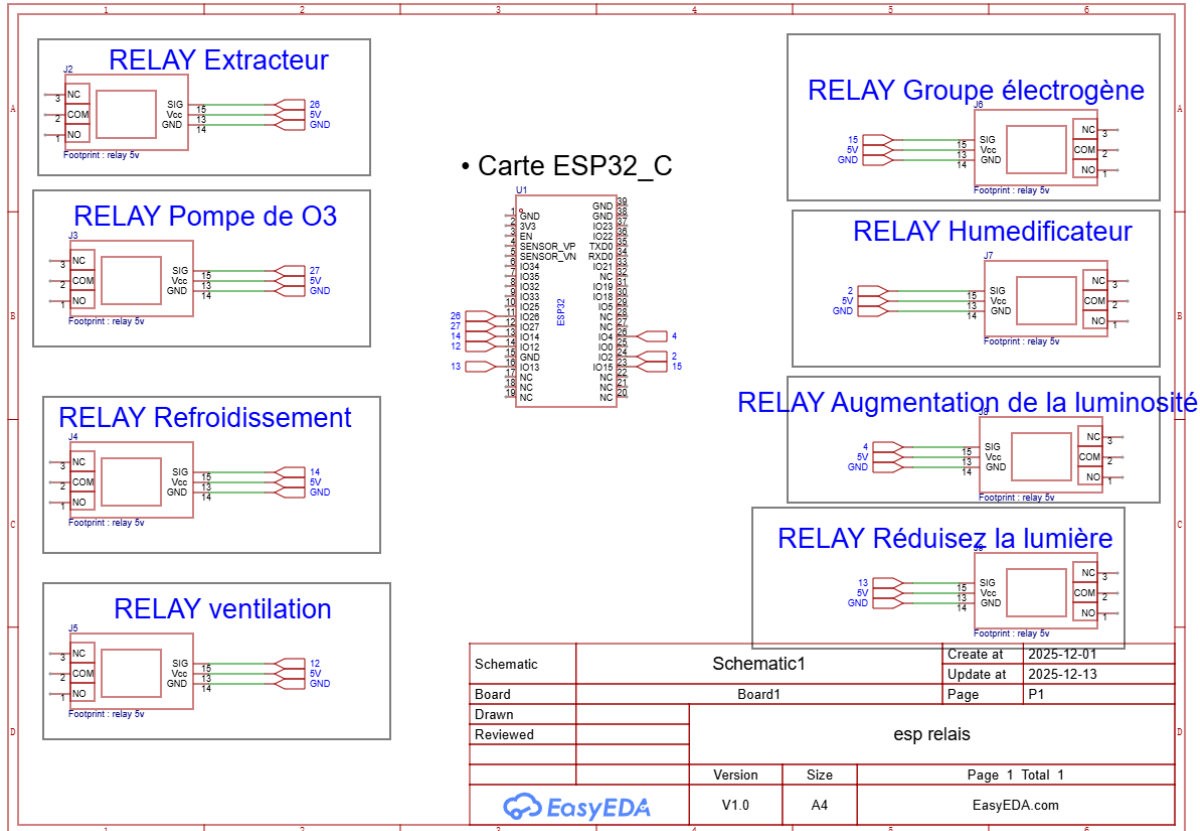


Figure II.4 :Schéma électrique ESP32_R

- **Carte ESP32 (réception des commandes)**
- **Module relais 1 à 4 canaux – Commande de charges électriques**
- **Alimentation 5V des relais**
- **Câblage et borniers pour les charges**

II.5 Description détaillée des modules :

II.5.1 L'ESP32 :

ESP32 est un circuit programmable compatible avec l'environnement ARDUINO. Accepte les modules extensibles compatibles l'ARDUINO. Le module de développement "ESP32 DEVKIT V1" est construit autour du circuit ESP32. L'unité ESP32 est programmée à l'aide de l'interface ARDUINO IDE. Un avantage majeur de ce circuit est qu'il inclut la connectivité sans fil WIFI et un processeur multicore qui le rend extrêmement puissant pour les objets IOT (Internet Of Things) [3].

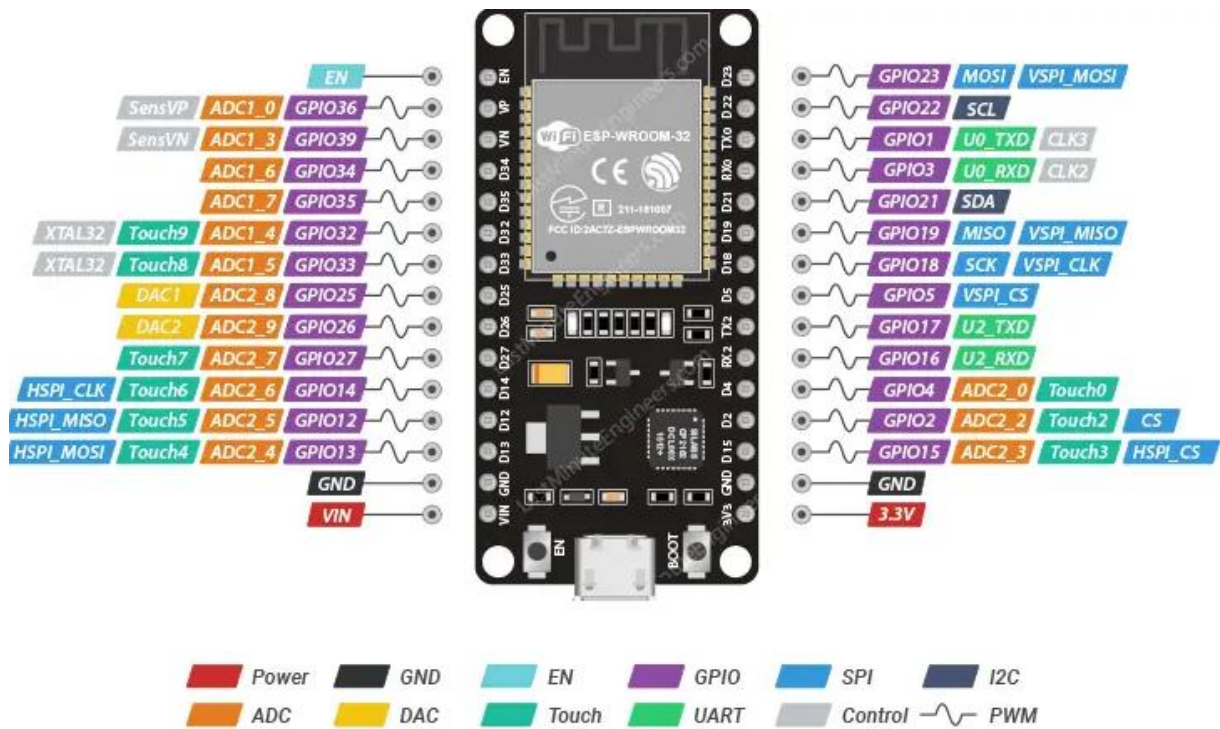


Figure II.5 :L'ESP32

II.5.1.2 Caractéristiques : [3]

Connectivité	sans fil
Wifi	débit de données de 150,0 Mbps avec HT40
Bluetooth	BLE (Bluetooth Low Energy) et Bluetooth classique
Processeur	microprocesseur LX6 32 bits Dual-Core Tensilica Xtensa, fonctionnant à 160 ou 240 MHz
ROM	448 Ko
SRAM	520 Ko
Basse consommation	garantis que vous pouvez toujours utiliser les conversions ADC, par exemple pendant le sommeil profond.
Entrée / sortie périphérique:	<p>Minuteries et chien de garde</p> <p>Horloge temps réel</p> <p>Convertisseur analogique-numérique (ADC) 12 bits</p> <p>Convertisseur numérique-analogique (DAC)</p> <p>Capteurs intégrés (Température, effet Hall)</p> <p>Détecteur tactile capacitif</p> <p>Coprocasseur Ultra Low Power (ULP)</p> <p>Interface Ethernet MAC</p> <p>Contrôleur hôte SD / SDIO / MMC</p> <p>Émetteur récepteur universel asynchrone (UART)</p> <p>Interface 2 fils (I2C)</p> <p>Interface son interconnecté intégré (I2S)</p> <p>Interface de périphérique série (SPI)</p> <p>Télécommande infrarouge</p> <p>Compteur d'impulsions</p> <p>Modulation de largeur d'impulsion (PWM) 16 sorties</p> <p>Accélérateur Matériel</p>

Tableau 1 : Caractéristique de ESP32

II.6 Les capteurs d'une chambre froide :

Un capteur est un transducteur qui converti une grandeur physique (comme la température, l'humidité, la lumière ou la concentration d'un gaz) en un signal électrique exploitable.

Il joue le rôle d'interface entre le monde physique et les systèmes électroniques de surveillance et de contrôle

II.6.1 Capteur de température et d'humidité (DHT22) :

Le choix du capteur DHT22 s'explique par sa capacité à fournir des mesures précises de la température et de l'humidité, deux paramètres essentiels dans une chambre froide.

La conservation des produits périssables dépend strictement du maintien d'une température et d'un taux d'humidité adéquats.

Le DHT22 se distingue par sa bonne précision, sa stabilité à long terme, ainsi que par la simplicité de son intégration dans un système numérique [4].

Tension d'alimentation : **3.3V à 6V**

Plage de mesure de la température : **-40°C à +80°C**

Plage de mesure de l'humidité : **0% à 100% HR**

Fils rouges : connectez le VCC du DHT22 à l'alimentation 3,3 V ou 5 V de l'ESP32 pour alimenter le capteur.

Fils noirs : connectez la masse (GND) du DHT22 à la masse (GND) de l'ESP32.

Fichiers inclus : connectez la sortie DATA du DHT22 à un numériseur numérique PIN25 de l'ESP32 pour visualiser les données.

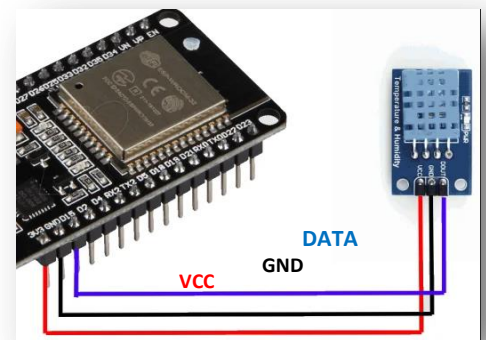


Figure II.6: Capteur de température et d'humidité (DHT22)

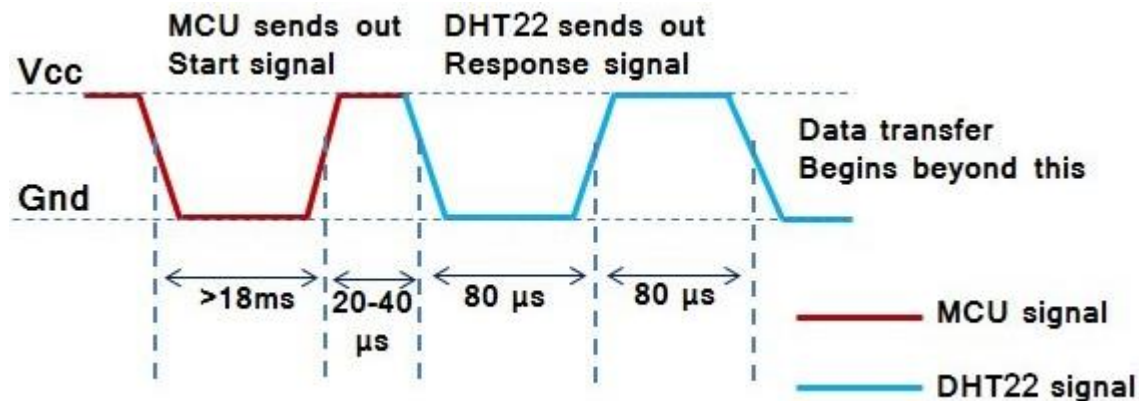


Figure II.7 :Signaux de variation de température et humidité.

II.6.2 Capteur de luminosité(BH1750) :

Nous avons choisi le capteur BH1750 pour sa capacité à mesurer avec précision la luminosité en lux, ce qui permet de contrôler l'éclairage dans la chambre froide et d'assurer des conditions de stockage optimales. Son interface I2C facilite son intégration avec l'ESP32 [5].

Connexions indiquées sur l'image :

VCC (rouge) → À connecter à l'alimentation 3,3 V ou 5 V de l'ESP32 pour alimenter le capteur.

GND (noir) → À connecter à la masse (GND) d'ESP32.

SCL (bleu) → À connecter à la broche D22 du ESP32 ; il s'agit de la ligne d'horloge du protocole I²C.

SDA (vert) → À connecter à la broche D21 du ESP32 ; il s'agit de la ligne de données du protocole I²C.

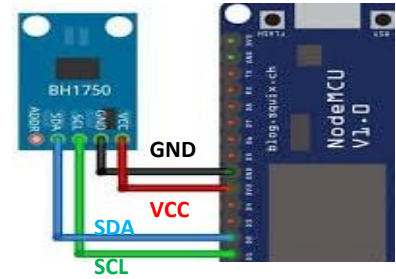


Figure II.8: Capteur de luminosité (BH1750)

Tension d'alimentation : 3.3V à 5V

Consommation : très faible (environ 0.12 mA en fonctionnement)

Plage de mesure : 1 à 65 535 lux. Interface : I2C

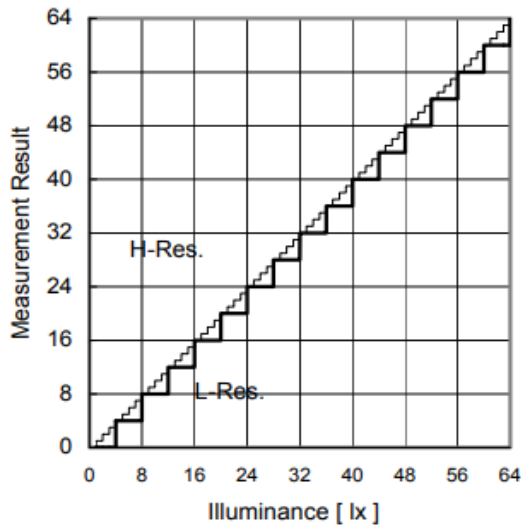


Figure II.9: graph de variation lumenosite[Annexe].

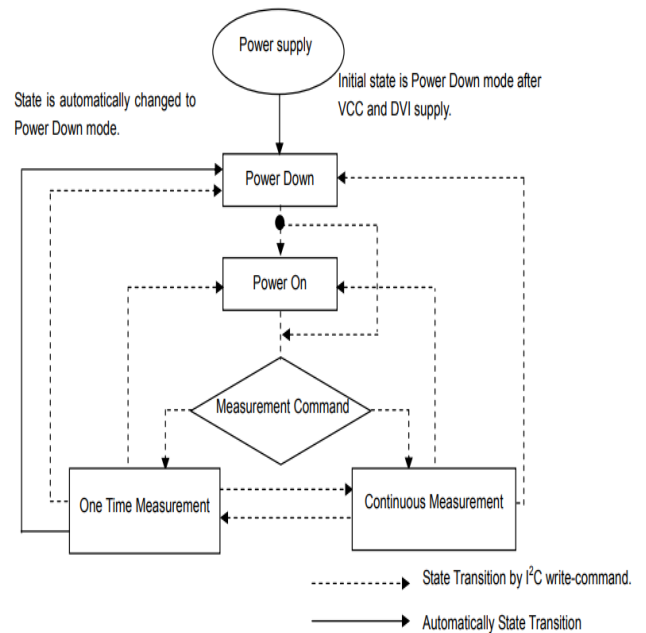


Figure II.10 :Organigram de fonctionnement de capteur BH1750 [Annex].

II.6.3 Capteur de gaz monoxyde de carbone (CO) MQ-9 :

Nous avons choisi le capteur de gaz MQ-9 pour sa capacité à détecter efficacement le monoxyde de carbone (CO). Sa présence permet de surveiller d'éventuelles fuites de gaz ou la présence de CO, ce qui est essentiel pour la sécurité dans une chambre froide. Le MQ-9 offre une bonne sensibilité et fonctionne facilement avec des microcontrôleurs grâce à sa sortie analogique [6].

VCC (Fil Rouge) : Alimentation ESP32

GND (Fil Noir): GND ESP32

AO (Analogie Output /Jaune):Broche PIN D34 (ESP32)

Tension d'alimentation : 5V

Température de fonctionnement : -10°C à 50°

Plage de détection : 10 à 1000 ppm

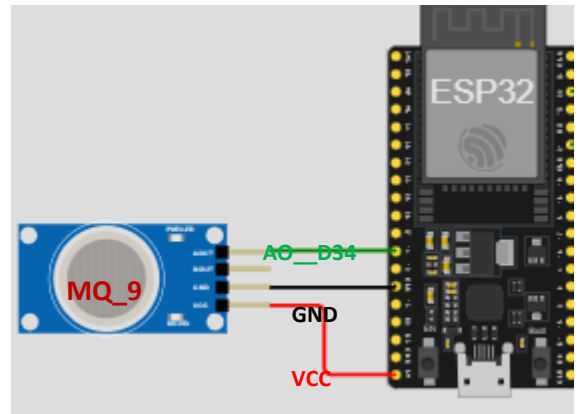


Figure II.11 :Capteur de gaz monoxyde de carbone (CO) MQ-9

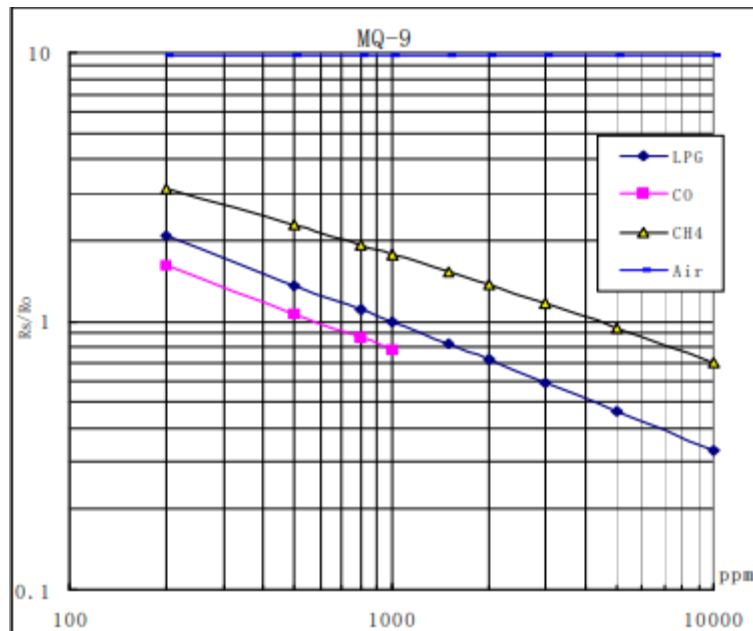


Figure II.12 :graph de variation de CO en fonction résistance [Annexe].

II.6.4 Capteur de gaz le méthane (CH₄) MQ-4 :

Le capteur MQ-4 a été choisi pour sa capacité à détecter efficacement le méthane (CH₄), gaz principal des fuites de gaz naturel. Sa présence dans la chambre froide permet d'assurer la sécurité en surveillant les risques de fuite. Il est sensible, économique, et facile à interfacer avec des microcontrôleurs grâce à sa sortie analogique [7].
Tension d'alimentation : 5V

Température de fonctionnement : -10°C à 50°C

Plage de détection : 200 à 10000 ppm

VCC (Fil Rouge) : Alimentation ESP32

GND (Fil Noir): GND ESP32

AO (Analogie Output /Jaune):Broche PIN D33 (ESP32)

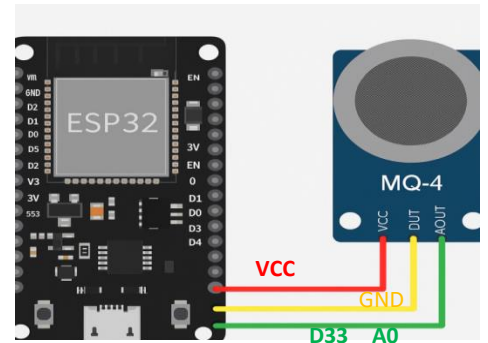


Figure II.13 : Capteur de gaz le méthane (CH₄) MQ-4

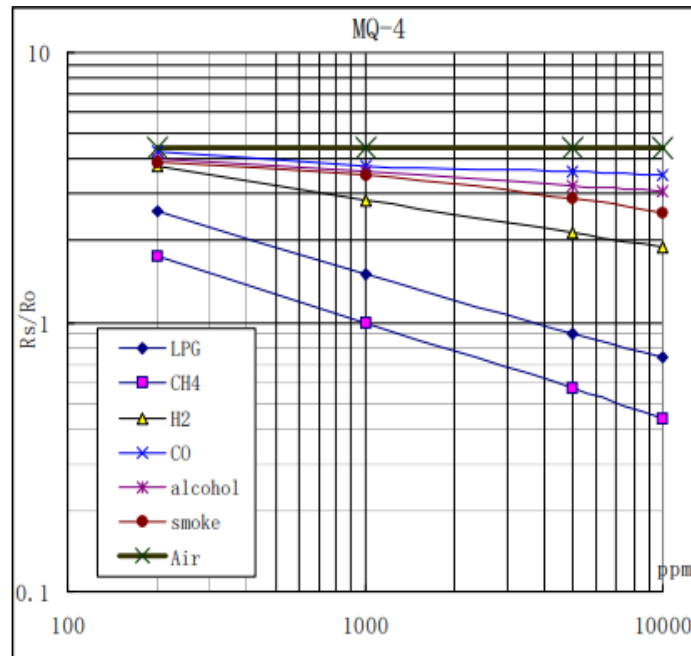


Figure II.14 :graph de variation de CH₄ en fonction de résistase [Annexe].

II.6.5 Capteur de gaz GPL MQ-2 :

Nous avons choisi le capteur MQ-2 pour sa polyvalence, car il permet de détecter plusieurs gaz inflammables tels que le GPL, le propane, le méthane et les fumées. Dans le cadre de la surveillance d'une chambre froide, il joue un rôle essentiel pour la prévention des risques d'incendie ou de fuite de gaz. Il est simple à utiliser grâce à sa sortie analogique et offre une bonne sensibilité [8].

Tension d'alimentation : 5V

Température de fonctionnement : -20°C à 50°C

Plage de détection : 300 à 10000 ppm

VCC (Fil Rouge) : Alimentation ESP32

GND (Fil Noir): GND ESP32

AO (Analogie Output /Jaune):Broche PIN D35(ESP32)

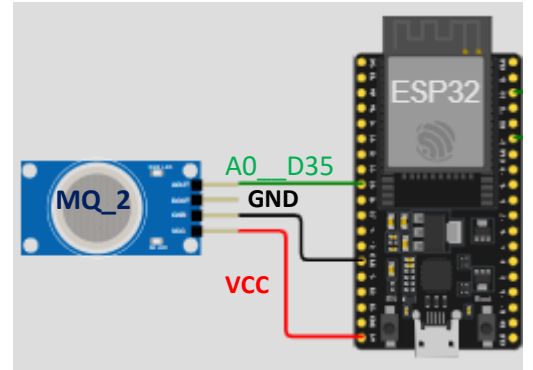


Figure II.15 :Capteur de gaz GPL MQ-2

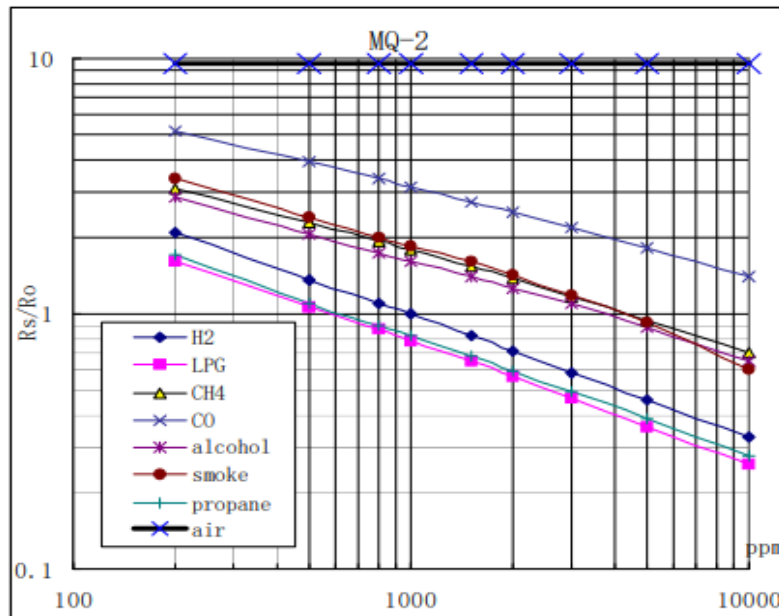


Figure II.16 : graph de variation de gpl en fonction de résistance [Annexe].

II.6.6 Capteur de gaz l'ozone (O₃) MQ-131 :

Le capteur MQ-131 a été choisi pour sa capacité à détecter l'ozone (O₃), un gaz utilisé ou pouvant se former dans certaines installations de réfrigération. Sa détection permet de prévenir les risques sanitaires et de protéger les équipements. Ce capteur est sensible, facile à intégrer avec une sortie analogique [9].

Tension d'alimentation : 5V

Température de fonctionnement : -20°C à 50°C

Plage de détection : 10 à 1000 ppm

VCC (Fil Rouge) : Alimentation ESP32

GND (Fil Noir): GND ESP32

AO (Analogie Output /Jaune):Broche PIN D33(ESP32)

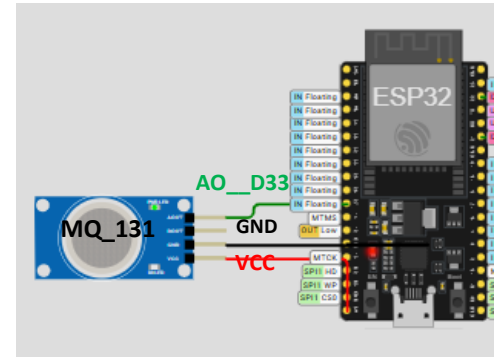


Figure II.17 :Capteur de gaz l'ozone (O₃) MQ-131

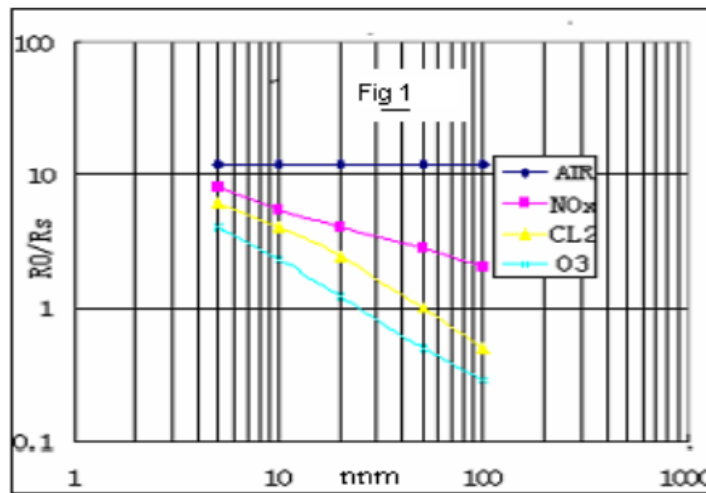


Figure II.18 :graph de variation de O₃ en fonction de résistance [Annexe].

II.6.7 Capteur de courant SCT013 :

Le capteur de courant SCT-013 a été choisi pour sa capacité à mesurer le courant alternatif sans contact direct, grâce à la technologie du transformateur de courant. Il permet de surveiller la consommation électrique des équipements de la chambre froide afin d'optimiser la gestion énergétique et de détecter d'éventuelles anomalies. Son intégration est simple et sûre [10].

Courant mesurable : 0 à 100A AC (selon modèle)

Sortie : signal analogique (0 à 1V ou 0 à 50mA selon version)

Type : Transformateur de courant à noyau ouvert

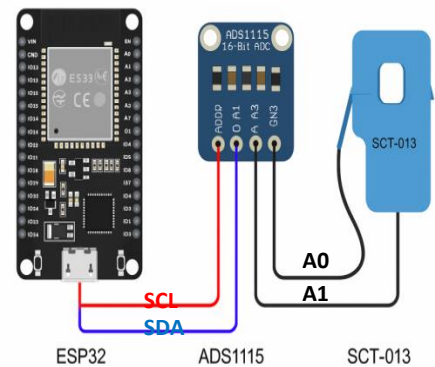


Figure II.19:Capteur de courant SCT013

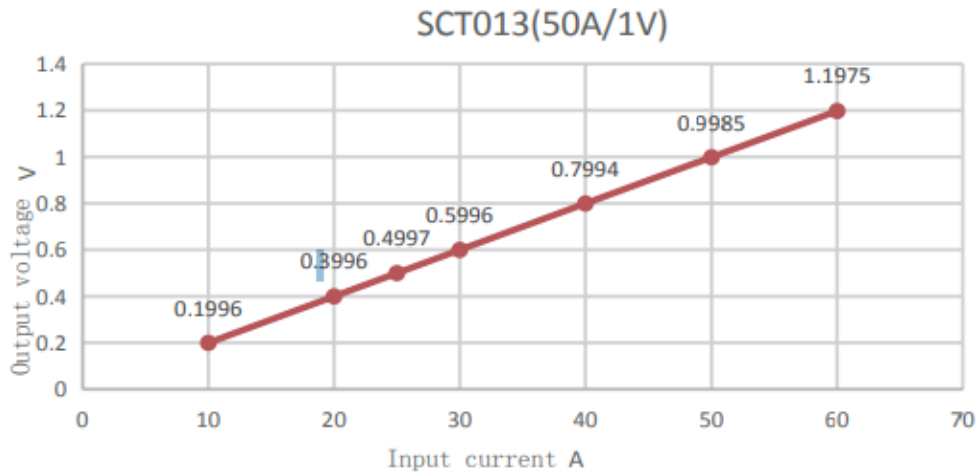


Figure II.20 :1graph de varitiation de curant en fonction de tension [Annexe].

II.6.8 Écran LCD 16x2 :

A été choisi pour afficher en temps réel les valeurs des capteurs (température, humidité, gaz...) et l'état des équipements. Grâce à son interface I2C, il nécessite seulement deux fils pour la communication avec l'ESP32, ce qui simplifie le câblage. Il constitue un moyen simple et efficace de visualisation locale des informations dans la chambre froide [11].

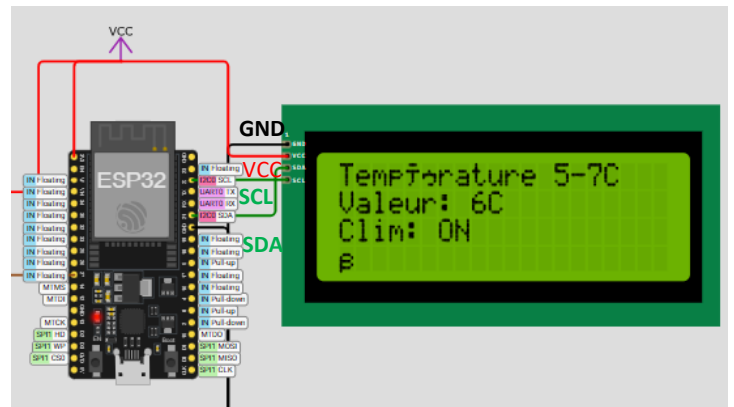


Figure II.21 : Écran LCD 16x2

II.6.9 Les relais :

Le module relais a été choisi pour sa capacité à commander des charges électriques importantes (comme des compresseurs, lampes ou ventilateurs) via le microcontrôleur ESP32. Il agit comme un interrupteur commandé électroniquement, assurant l'isolement entre la commande (basse tension) et la charge (haute tension). Son utilisation est essentielle pour automatiser et sécuriser le contrôle des équipements dans la chambre froide [12].

Tension de commande : 3.3V ou 5V (compatible ESP32)

Tension de charge : jusqu'à 250V AC ou 30V DC

Courant de charge : jusqu'à 10A (selon le modèle)

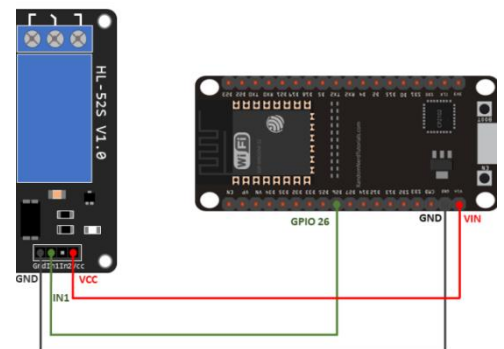


Figure II.22 : Les relais

II.7 Commande des actionneurs et types de moteurs utilisés :

Le choix du mode de commande des moteurs dépend de leur puissance et de leur type d'alimentation. Les moteurs de faible puissance sont commandés directement par relais, tandis que les moteurs de forte puissance ou triphasés sont commandés indirectement à l'aide de contacteurs.

II.7.1 Relais 1 – Commande du système de climatisation :

Actionneur commandé : Compresseur de climatisation

Type de moteur : Moteur asynchrone triphasé (AC)

Le relais 1 est dédié à la commande du système de climatisation de la chambre froide.

Lorsque la température mesurée par le capteur DHT22 dépasse la valeur maximale autorisée ($T > T_{max}$), l'ESP32 active le relais afin de commander le fonctionnement du compresseur.

Étant donné que le compresseur est entraîné par un moteur asynchrone Triphasé nécessitant un courant de démarrage élevé, le relais n'alimente pas directement le moteur, mais agit comme un organe de commande d'un contacteur, garantissant ainsi un fonctionnement sûr et fiable.

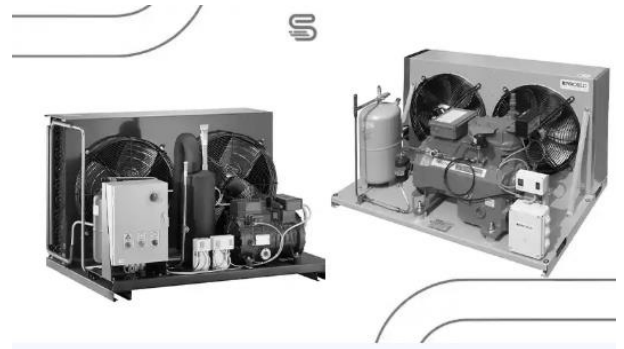


Figure II.23 : Compresseur de climatisation

II.7.2 Relais 2 – Commande de l'humidificateur :

Relais 2 – Commande de l'humidificateur

Actionneur commandé : Humidificateur

Type de moteur : Moteur électrique à courant continu (DC)

Le relais 2 commande l'humidificateur afin de réguler l'humidité relative à l'intérieur de la chambre froide.

Lorsque l'humidité devient inférieure au seuil minimal ($H < H_{min}$), le relais est activé pour faire fonctionner l'humidificateur.

Ce dernier étant équipé d'un moteur à courant continu de faible puissance ou d'un système à ultrasons, il peut être commandé directement par le relais sans dispositif intermédiaire



Figure II.24 : Humidificateur

II.7.3 Relais 3 – Commande de l'éclairage :

Actionneur commandé : Lampes LED

Type d'actionneur : Charge électrique (sans moteur)

Le relais 3 permet la commande du système d'éclairage à base de lampes LED.

Ce dispositif ne comporte pas de moteur électrique et constitue une charge de faible puissance.

L'éclairage est donc commandé directement par le relais, assurant une gestion efficace et une optimisation de la consommation énergétique.

II.7.4 Relais 4 – Commande de la ventilation (gaz CO) :

Actionneur commandé : Ventilateur de ventilation

Type de moteur : Moteur asynchrone monophasé (AC)

Le relais 4 assure la commande du ventilateur de ventilation en fonction de la concentration du monoxyde de carbone mesurée par le capteur MQ-9.

Le ventilateur est entraîné par un moteur asynchrone monophasé de puissance modérée, ce qui permet une commande directe par le relais pour un fonctionnement de type marche/arrêt.



Figure II.25: Ventilateur de ventilation

II.7.5 Relais 5 – Commande de la pompe de gaz (CH₄)

Actionneur commandé : Pompe de gaz O₃

Type de moteur : Moteur électrique à courant continu (DC)

Le relais 5 est utilisé pour commander la pompe de gaz associée à la détection du méthane.

Cette pompe fonctionne avec un moteur à courant continu de faible puissance, ce qui rend possible une commande directe par le relais, adaptée aux applications de sécurité.



Figure II.26 : Pompe de gaz O₃

II.7.6 Relais 6 – Commande de la ventilation (GPL)

Actionneur commandé : Ventilateur GPL

Type de moteur : Moteur asynchrone monophasé (AC)

Le relais 6 permet la commande d'un ventilateur destiné à l'évacuation du gaz GPL.

Le moteur asynchrone monophasé utilisé présente une consommation compatible avec les capacités du relais, ce qui autorise une commande directe sans recours à un contacteur.



Figure II.27 : Ventilateur GPL

II.7.7 Relais 7 – Commande du système d'ozone (O₃)

Actionneurs commandés :

Pompe à ozone → Moteur DC

Ventilateur → Moteur asynchrone monophasé (AC)

Le relais 7 gère le système d'ozone en fonction des mesures du capteur MQ-131.

La pompe à ozone, équipée d'un moteur à courant continu de faible puissance, est commandée directement par le relais.

Le ventilateur associé, de puissance modérée, peut également être commandé directement pour assurer la régulation de la concentration d'ozone dans des conditions de sécurité.

II.7.8 Relais 8 – Commande du groupe électrogène

Actionneur commandé : Groupe électrogène

Type de moteur : Moteur thermique à combustion interne

Le relais 8 permet la commande automatique du groupe électrogène en cas de coupure d'alimentation électrique.

Étant donné que le groupe électrogène est entraîné par un moteur thermique et associé à un alternateur triphasé, le relais ne commande pas directement le moteur.

Il est utilisé comme dispositif de commande indirecte, agissant sur le circuit de démarrage ou sur la bobine d'un contacteur, afin d'assurer la continuité de l'alimentation électrique en toute sécurité.



Figure II.28 : Groupe électrogène

II.7 Conclusion :

Ces objectifs visent à atteindre le système souhaité. Dans le chapitre suivant, nous présenterons les différentes étapes de mise en œuvre du système, sa programmation ainsi que la connexion de ses composants.

Chapitre III :

Programme et simulation

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons l'organigramme principal du système pour assurer la communication, le traitement et le contrôle entre les trois unités ESP32.

Le système proposé repose sur une organisation distribuée dans laquelle chaque microcontrôleur joue un rôle spécifique :

- l'ESP32_M est la carte principale réalise le traitement, l'analyse, l'affichage et l'hébergement de la page web,
- l'ESP32_C assure la collecte des données environnementales à partir des capteurs,
- et l'ESP32_R exécute les commandes en pilotant les relais.

Ce chapitre décrit en détail la structure organisationnelle adoptée, les mécanismes d'échange des données basés sur le Wi-Fi et le format JSON, ainsi que le fonctionnement interne de chaque programme. L'organigramme principal et schémas explicatifs sont fournis afin d'illustrer clairement la logique d'exécution du système.

III.2 Organigramme général du système :

Ce diagramme représente le fonctionnement global du système réparti sur trois unités ESP32 :

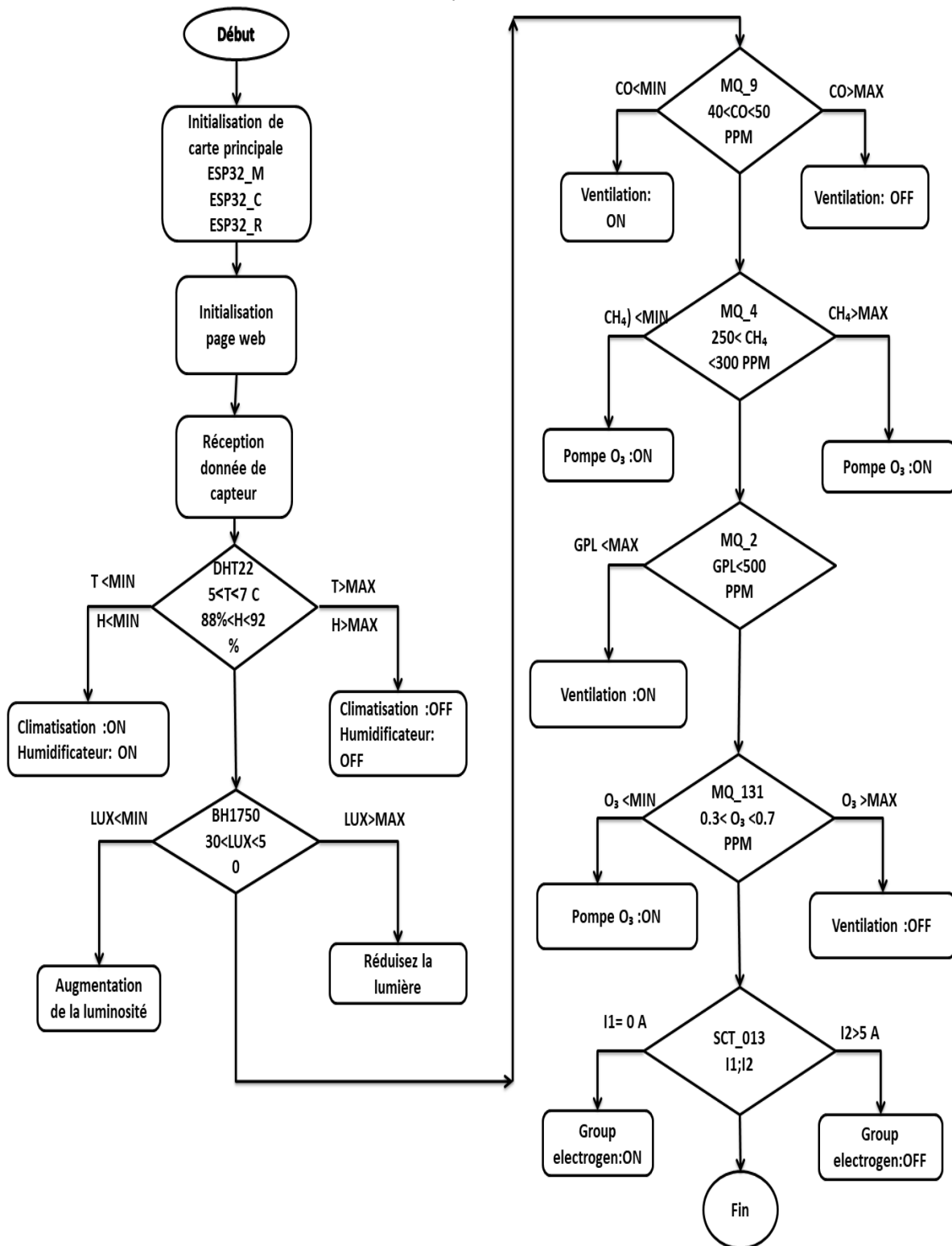


Figure III.1:Organigramme principal de fonctionnement.

Deux résultats sont présentes, une partie simulation et l'autre pratique. Dans ce chapitre nous présentons la partie simulation dans ce chapitre alors que la partie pratique est renvoyée au chapitre IV.

La programmation du système a été réalisée à l'aide du logiciel Arduino IDE, qui offre un environnement simple et efficace pour le développement des applications embarquées. Ce programme a permis d'écrire, de compiler et de télé verser le code vers les cartes ESP32, afin d'assurer la lecture des capteurs, l'affichage des données et le contrôle des relais selon les conditions définies.

III.3 Simulation du système :

Afin de valider le fonctionnement du système avant son implémentation physique, une phase de simulation a été réalisée. Cette étape permet de vérifier la cohérence du câblage, la stabilité de la communication entre les unités ESP32 et la justesse des mesures issues des différents capteurs.

La simulation a été effectuée à l'aide de la plateforme **Wokwi**, qui permet d'émuler le comportement des ESP32, des capteurs (DHT22, MQ, BH1750) ainsi que des modules externes tels que l'ADS1115 ou les relais.

Cette simulation a permis de tester :

- la lecture des capteurs environnementaux par l'ESP32_C ;
- l'envoi des données au format JSON vers l'ESP32_M ;
- l'actualisation de l'affichage LCD ;
- la réception et l'analyse des données par l'unité centrale ;
- l'envoi d'ordres de commande à l'ESP32_R ;
- l'activation et la désactivation des relais.

Les résultats observés au cours de la simulation confirment le bon fonctionnement de l'algorithme, la fiabilité du traitement effectué par chaque unité.

Des captures d'écran de la simulation sont présentées ci-après afin d'illustrer les différentes étapes du fonctionnement du système.

L'absence de la communication WIFI dans la plateforme WOKWI, m'impose une simulation par partie. La partie principale seule, la partie capteurs seule et ainsi que la partie relais aussi seule.

III.3.1 Utilisation de la plateforme Wokwi :

La plateforme **Wokwi** a été utilisée pour la simulation des composants électroniques du projet. Elle permet de tester virtuellement les codes et les connexions avant leur déploiement sur le matériel réel. Cette approche facilite la détection et la correction des erreurs, tout en réduisant le temps et les ressources nécessaires lors des phases de conception et de réalisation.

III.4 Simulation de l'unité principale (ESP32_M) avec l'afficheur LCD :

Cette simulation illustre le câblage virtuel de l'unité centrale ESP32 n°2 dans l'environnement Wokwi.

L'afficheur LCD (I2C) est connecté via les lignes SDA et SCL pour permettre l'affichage des mesures reçues depuis l'unité de détection.

Un potentiomètre ou capteur de courant dans est également simulé afin de tester la lecture analogique par l'ESP32.

Cette simulation permet de vérifier le bon fonctionnement de l'affichage et de l'acquisition des données avant la mise en œuvre matérielle.

Figure III.2 : Simulation de l'unité principale (ESP32_M) avec l'afficheur LCD

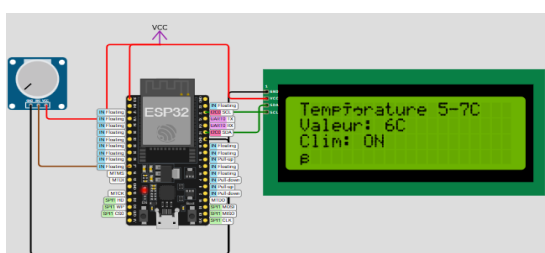


Figure III.2.a : temperatureur

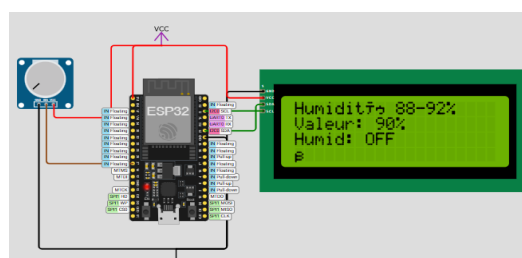


Figure III.2.b : humidité

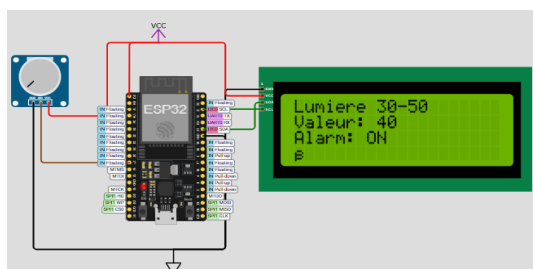


Figure III.2.c : luminosité

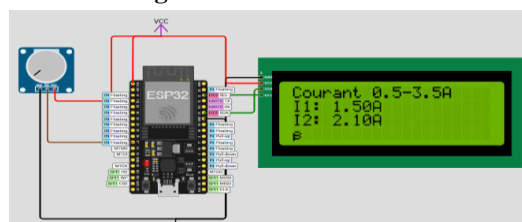


Figure III.2.d : courant

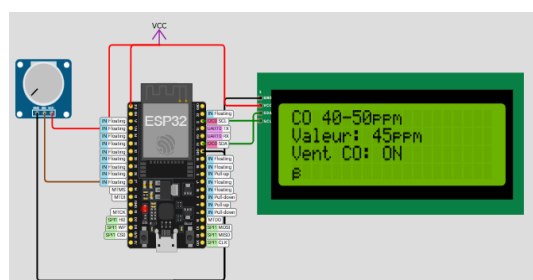


Figure III.2.e : monoxyde de carbone

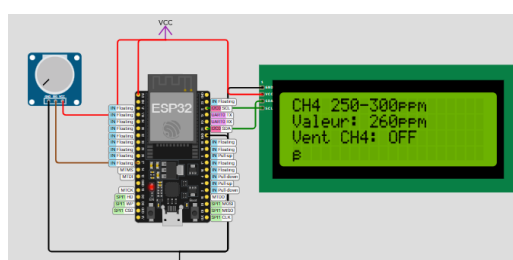


Figure III.2.f : méthane

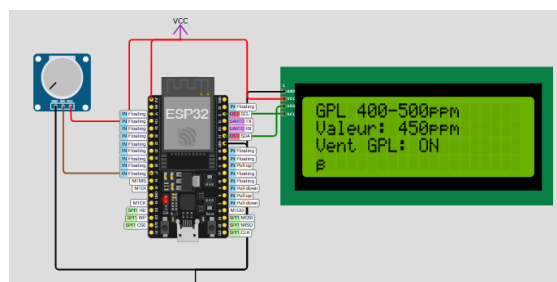


Figure III.2.i : GPL gaz inflammables

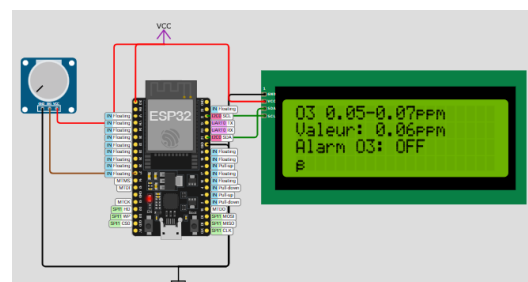


Figure III.2.g : Ozone

III.5 Simulation du câblage de l'unité de mesure (ESP32_C) :

Cette simulation illustre la connexion virtuelle des capteurs environnementaux à l'ESP32_C dans l'environnement Wokwi.

Le montage inclut le capteur DHT22 (température et humidité), les capteurs de gaz MQ, ainsi que le capteur de luminosité BH1750 via le bus I2C.

Cette étape de simulation permet de vérifier la cohérence du câblage et le fonctionnement correct des lectures avant la mise en œuvre matérielle réelle.

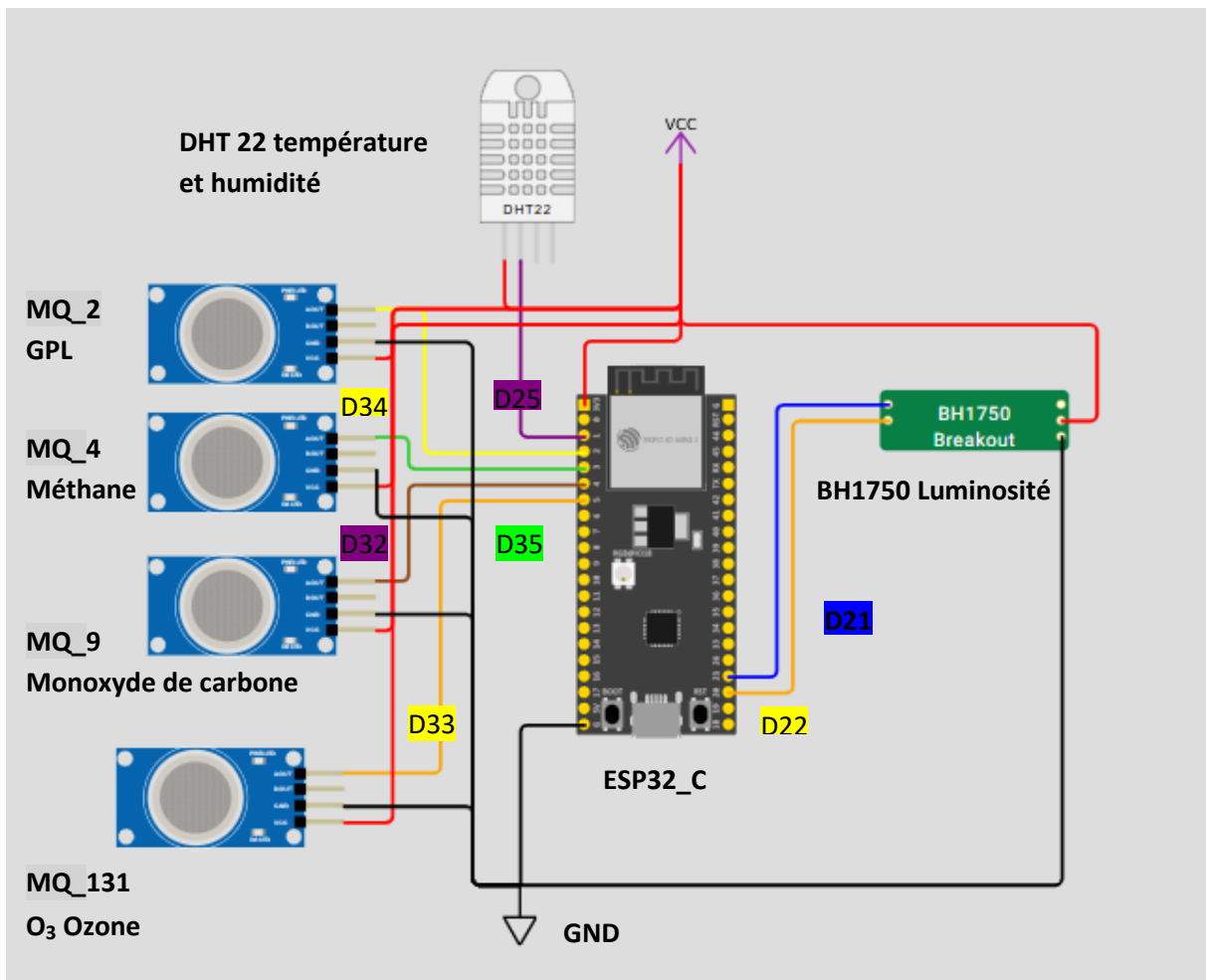


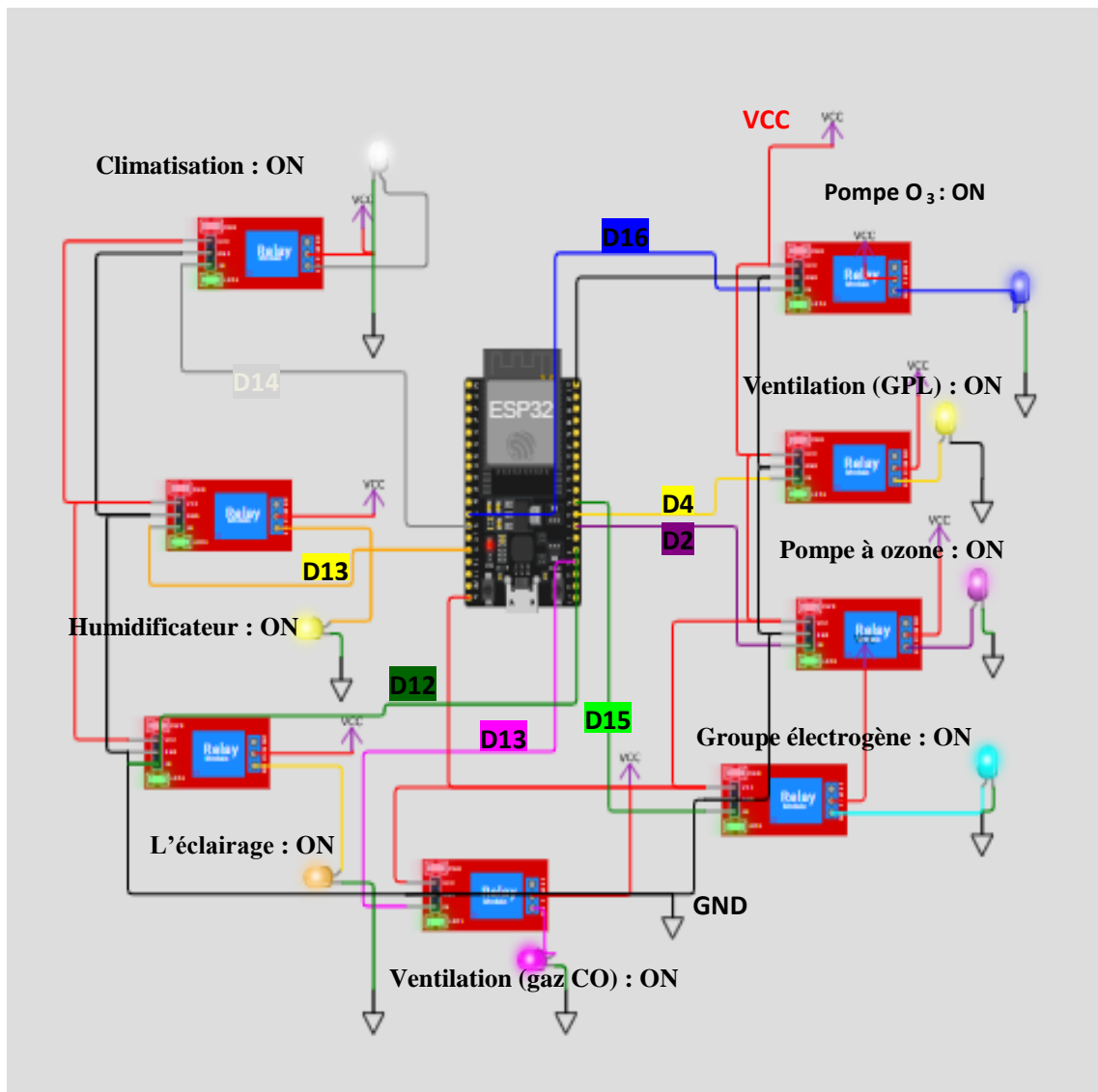
Figure III.3 : Simulation des grandeurs physiques (ESP32_C)

III.6 Simulation de l'unité d'action (ESP32_R) sur les modules relais :

Cette simulation représente le fonctionnement unitaire de l'ESP32 n°3 pour la commande de connexion. Le module est connecté à un numéro différent de l'ESP32 avant l'activation ou la désactivation d'autres charges. Le relais partage une alimentation commune, tandis que la masse (GND) est connectée au microcontrôleur pour assurer un fonctionnement stable. La simulation permet de valider le journal d'activation à distance et la réponse aux commandes reçues de l'unité centrale. La figure illustrant la simulation de l'unité d'action ESP32 n°3 est responsable de différentes commandes liées au système. Cette unité reçoit les instructions envoyées par l'ESP32 n°2 et active les connexions correspondantes pour contrôler les équipements externes.

Grâce à cette simulation, il est possible de vérifier la connexion, la stabilité de la communication et la conformité de la réponse aux ordres reçus.

Ce jeu de données constitue une validation essentielle avant la mise en œuvre du matériel.



Figures III.4 : un exemple de l'unité d'action (ESP32_R)

III.6 Conception de pages Web :

Dans cette partie on entre dans la troisième phase du schéma synoptique, c'est la réalisation de notre site web qui affiche toutes les données prélevées en temps réel.

Une interface HTML professionnelle a été conçue pour afficher les données des capteurs en temps réel de manière organisée et attrayante. La page utilise une interface à cartes et inclut des icônes distinctes pour chaque élément, comme la température, l'humidité, les gaz, l'intensité lumineuse et le courant électrique. Cela permet aux utilisateurs de surveiller facilement les conditions environnementales à l'intérieur de la chambre froide. Le design adaptatif prend en charge la langue arabe et offre une expérience utilisateur fluide sur ordinateur et appareils mobiles.

Un exemple de situation des états des relais, on distingue la couleur verte pour l'état normal et rouge pour un dépassement de valeur (cas du relais de température et d'humidité).



Figure III.5: Page HTML correspondante a la figure III.4

Chapitre IV :

Résultats et commentaires

Introduction :

Ce chapitre présente les résultats obtenus après la mise en œuvre des différentes phases de conception, de programmation et de test du système de surveillance à distance des chambres froides. L'analyse de ces résultats est une étape cruciale pour confirmer l'efficacité de la solution proposée et sa conformité aux exigences fonctionnelles définies lors du lancement du projet.

Ce chapitre présente les relevés enregistrés par les capteurs, la réponse du système aux variations de température, d'humidité, de gaz et d'intensité lumineuse, et évalue les performances des microcontrôleurs ESP32 en matière de transmission et de traitement des données. Il comprend également une discussion approfondie de ces résultats, une analyse des écarts potentiels et une interprétation du comportement du système dans différents scénarios expérimentaux.

IV.1 Réalisation prototype de système:

IV.1.1 Carte ESP32_M :



Figure IV.1 :image de prototype carte ESP32_M

IV.1.2 Carte ESP32_C :

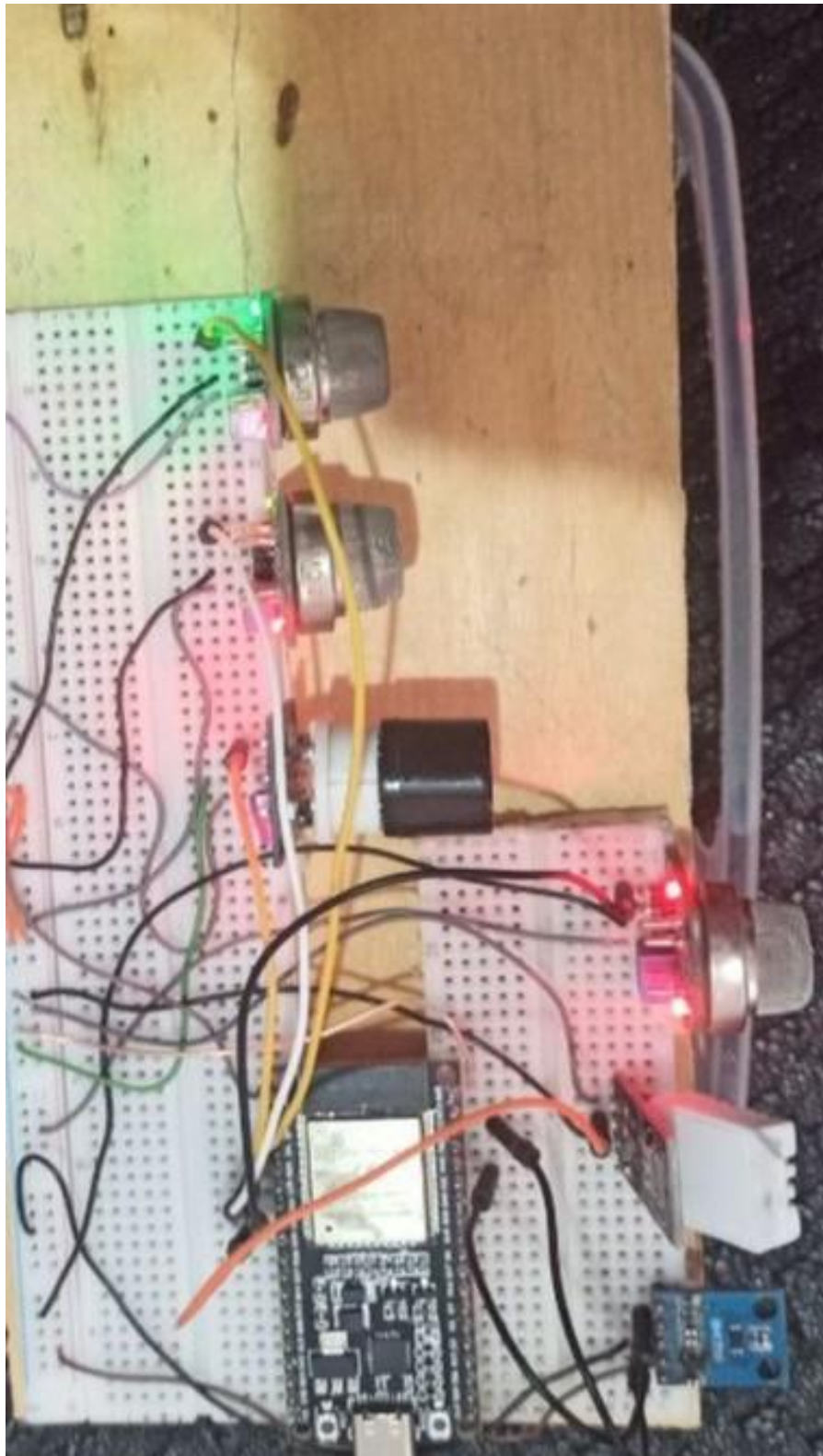


Figure IV.2 :image de prototype carte ESP32_C

IV.1.3 Carte ESP32_R :

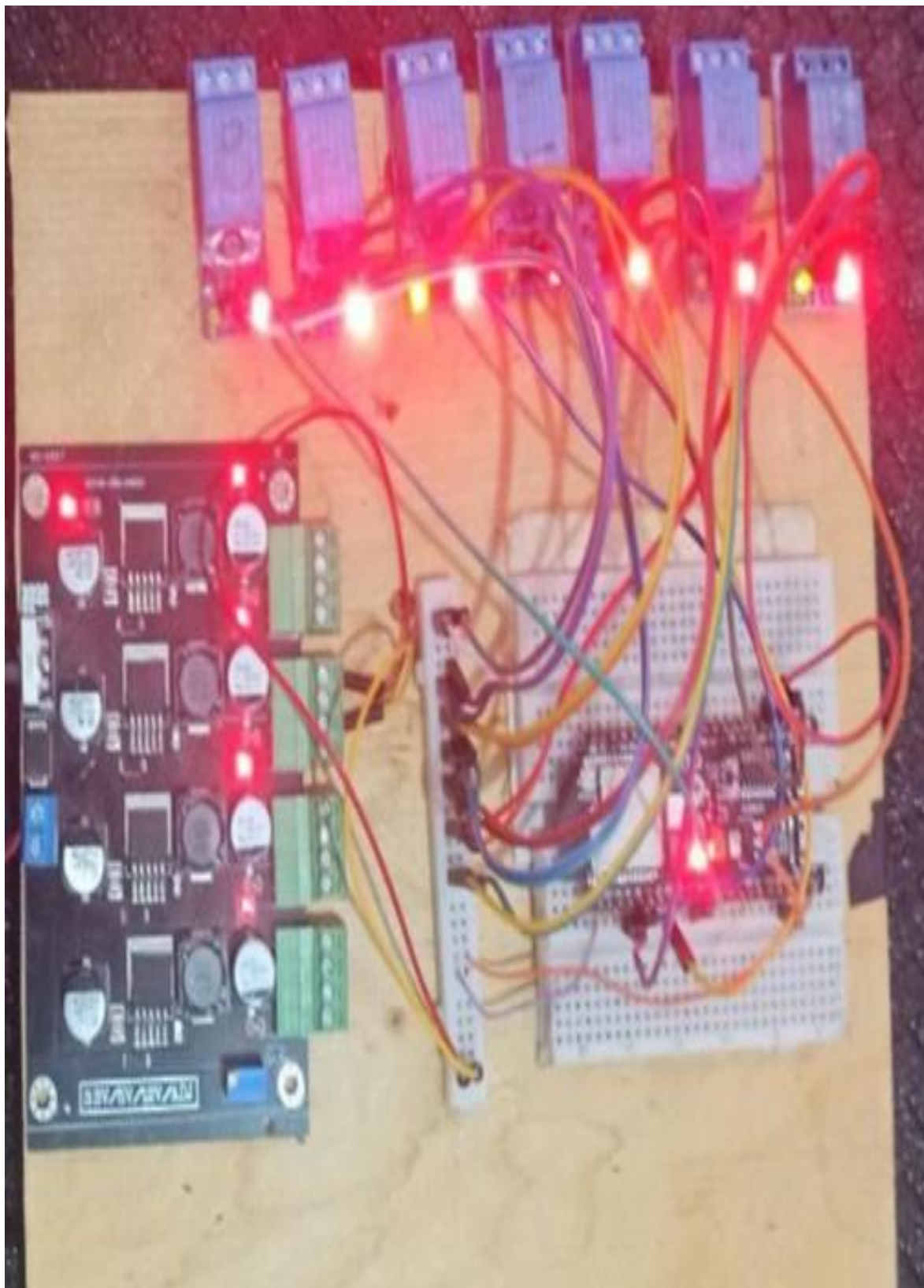


Figure 0.3 :image de prototype carte ESP32_R

IV.2 Résultat température et humidité :

La température et l'humidité sont mesurées à l'aide d'un capteur DHT22 et la communication avec l'ESP32 est assurée via le bus CAN.

Fourchette de température est $5\text{ C}^{\circ} < T < 7\text{ C}^{\circ}$

Fourchette de humidité est $88\% < H < 95\%$

```
Temp: 21.40 C | Hum: 68.00 %
Climatisation : ON
Humidificateur : ON
Temp: 21.40 C | Hum: 68.00 %
Climatisation : ON
Humidificateur : ON
Temp: 21.40 C | Hum: 68.00 %
Climatisation : ON
Humidificateur : ON
Temp: 21.40 C | Hum: 68.00 %
```

Figure IV.5: Résultat fournit par le capteur DHT22

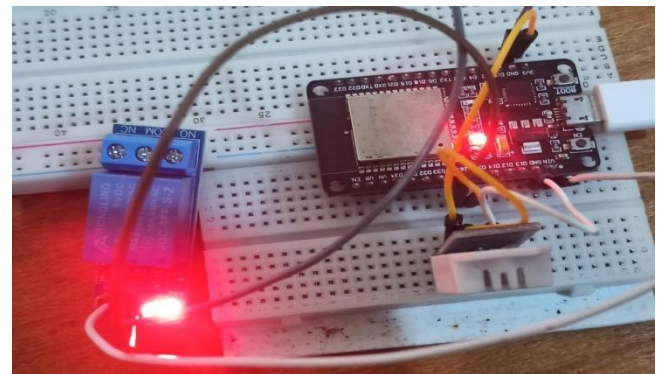


Figure IV.4 :DHT22 et ESP32

IV.3 Résultats Luminosité :

L'intensité lumineuse est mesurée à l'aide du capteur BH1750, et la communication avec l'ESP32 est assurée via le bus I²C.

Fourchette de Luminosité est $20 < \text{LUX} < 50$

```
Luminosité: 26.67 lux
L'éclairage : OFF
Luminosité: 40.83 lux
L'éclairage : OFF
Luminosité: 80.00 lux
L'éclairage : ON
Luminosité: 80.00 lux
L'éclairage : ON
```

Figure IV.6: Résultat fournit par le capteur BH175

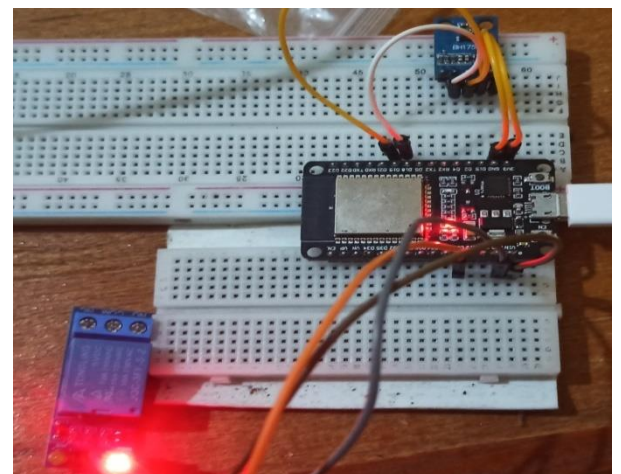


Figure IV.7: BH1750 et ESP32

IV.4 Monoxyde de carbone (CO) :

Le MQ-9 est un capteur de gaz permettant de détecter le monoxyde de carbone (CO). Il s'interface facilement avec des microcontrôleurs tels que l'ESP32 ou l'Arduino. Fourchette de CO et $CO < 50\text{PPM}$

```
CO (ppm): 25.48
Ventilation (gaz CO) : OFF
CO (ppm): 25.48
Ventilation (gaz CO) : OFF
CO (ppm): 25.48
Ventilation (gaz CO) : OFF
CO (ppm): 17.66
Ventilation (gaz CO) : OFF
CO (ppm): 17.66
Ventilation (gaz CO) : OFF
CO (ppm): 23.11
```

Figure IV.8:Résultat fournit par le capteur MQ_9

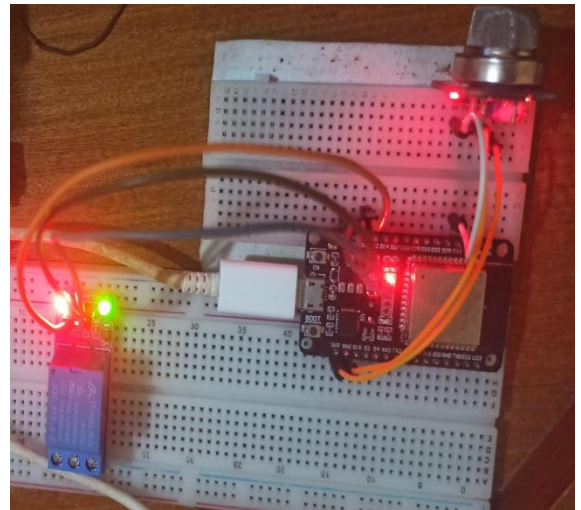


Figure IV.5:MQ_9 et ESP32

IV.5Méthane :

Le capteur MQ-4 est utilisé pour détecter le **méthane (CH₄)** et d'autres gaz inflammables. Il peut être facilement connecté à une carte **ESP32**. Fourchette de méthane est $250\text{ppm} < \text{CH}_4 < 300\text{ppm}$.

```
CH4 (ppm): 253.75
Pompe O3 : OFF
CH4 (ppm): 253.75
Pompe O3 : OFF
CH4 (ppm): 253.75
Pompe O3 : OFF
CH4 (ppm): 253.75
Pompe O3 : OFF
CH4 (ppm): 253.75
Pompe O3 : OFF
```

Figure IV.10:Résultat fournit parle capteur MQ_2

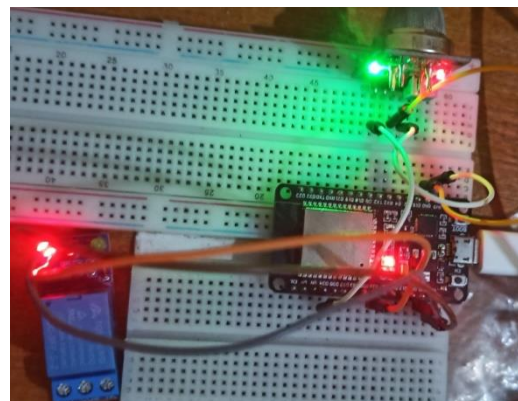


Figure IV.11 :MQ_4 et ESP32

IV.6 Pollution :

Le capteur **MQ-2** est utilisé pour détecter des gaz inflammables comme le **butane**, **propane**, **méthane**, **hydrogène** ainsi que la **fumée**. Il peut être connecté facilement à une carte **ESP32**.

Fourchette de GPL 400ppm<GPL<500ppm

```
GPL (ppm): 298.43
Ventilation (GPL) : OFF
GPL (ppm): 298.43
Ventilation (GPL) : OFF
GPL (ppm): 298.43
Ventilation (GPL) : OFF
GPL (ppm): 298.43
Ventilation (GPL) : OFF
GPL (ppm): 298.43
Ventilation (GPL) : OFF
```

Figure IV.12:Résultat fournit par le capteur

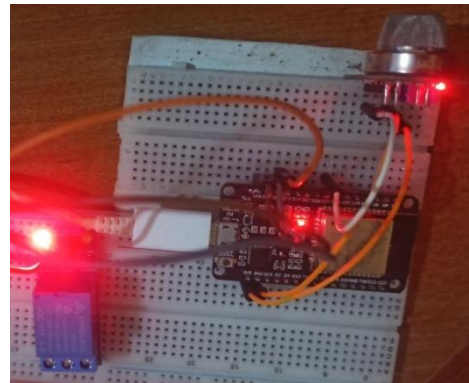


Figure IV.13:MQ_2 et ESP32

IV.7 Courant :

Le capteur SCT-013 mesure le courant alternatif sans contact direct, en se fixant autour du fil de phase. Comme son signal de sortie est très faible, on utilise un convertisseur ADC externe (ADS1115) pour le connecter avec précision à une carte ESP32.

```
-----
Irms Sensor 1: 0.000A
Irms Sensor 2: 0.315A
-----
Irms Sensor 1: 0.000A
Irms Sensor 2: 0.266A
-----
Irms Sensor 1: 0.000A
Irms Sensor 2: 0.267A
-----
Irms Sensor 1: 0.000A
Irms Sensor 2: 0.497A
-----
Irms Sensor 1: 0.000A
Irms Sensor 2: 0.249A
-----
```

Figure IV.14: Résultat fournit par le capteur

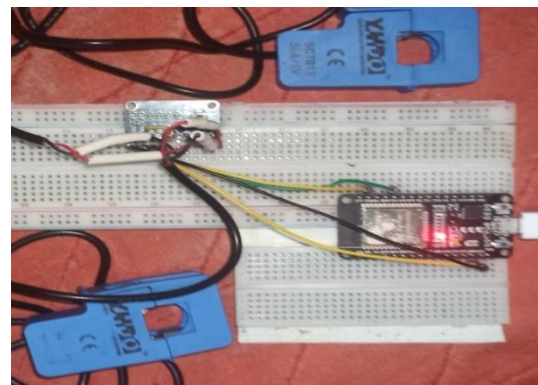


Figure IV.15 :SCT013 et

IV.8 Ozone :

Le capteur **MQ-131** est utilisé pour détecter le **gaz ozone (O₃)** présent dans l'air. Il délivre une **tension analogique** proportionnelle à la concentration d'ozone et peut être facilement connecté à la carte **ESP32** pour la mesure et la surveillance en temps réel de la qualité de l'air.

Fourchette de ozone 0.05ppm<O₃<0.07ppm

```
Pompe à ozone : OFF
O3 (ppm): 2.36
Pompe à ozone : OFF
O3 (ppm): 2.43
Pompe à ozone : OFF
O3 (ppm): 2.31
Pompe à ozone : OFF
O3 (ppm): 3.35
Pompe à ozone : OFF
```

Figure IV.16 : Résultat fournit par le capteur MQ_131

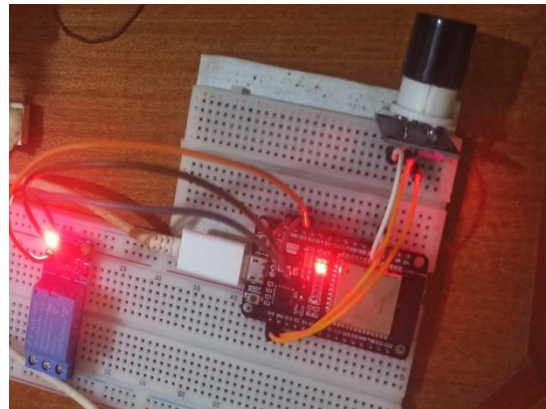


Figure IV.17 :MQ-131 et ESP32

IV.9 Résultats et commentaires :

Les premiers résultats obtenus apparaissent à travers l'écran LCD et l'interface web hébergée par l'ESP32, où l'on peut observer en temps réel les paramètres physiques essentiels de la chambre froide. Le système permet la lecture de la température ambiante en °C, du taux d'humidité relative en %, de la luminosité en Lux, ainsi que des concentrations de gaz (CO, CH₄, GPL et O₃) exprimées en ppm. De plus, l'intensité du courant consommé par les équipements est mesurée en ampères grâce au capteur SCT-013 associé au convertisseur ADC ADS1115.

Sur la page HTML interactive, chaque paramètre est affiché sous forme de carte avec une icône représentative, offrant une visualisation claire et conviviale. Les couleurs des cartes correspondent à ce qui suit aux situations des courbes et relais correspondants. L'utilisateur peut également commander les relais à distance (activation/désactivation de la ventilation, de l'éclairage ou d'autres charges) en temps réel. Les valeurs mesurées sont actualisées automatiquement toutes les trois 03 secondes, ce qui garantit un suivi continu de l'état de la chambre froide.

Remarque : certaines limites ont été rencontrées lors de la phase de test, notamment liées à la précision des capteurs de gaz et à la stabilité de la connexion Wi-Fi dans certaines conditions. Toutefois, ces contraintes n'ont pas empêché le système de remplir efficacement ses fonctions principales de surveillance et de contrôle.

Vert : situation normale.

Rouge : état de danger (dépassement du seuil).

Les boutons **ON/OFF** indiquent la commande des actionneurs associés.

Cette interface facilite la surveillance et le contrôle à distance de l'environnement d'une chambre froide de manière simple et efficace.



Figure IV.18: Interface HTML

IV.10 Les graphes des différents types de capteurs sur page HTML :

Exemple de variation des paramètres sur page HTML pour différents type de capteurs.

IV.10.1 : graphe du capteur de Température :

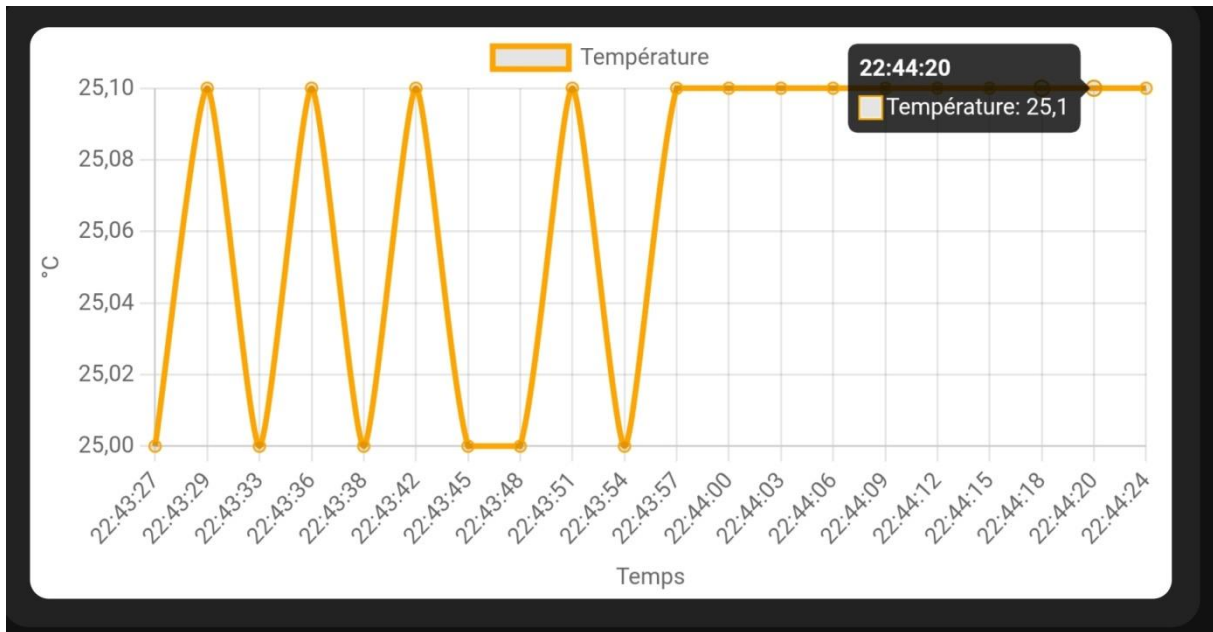


Figure IV.19: Graphe de la variation de température

IV.10.2 Graphe du capteur Humidité :

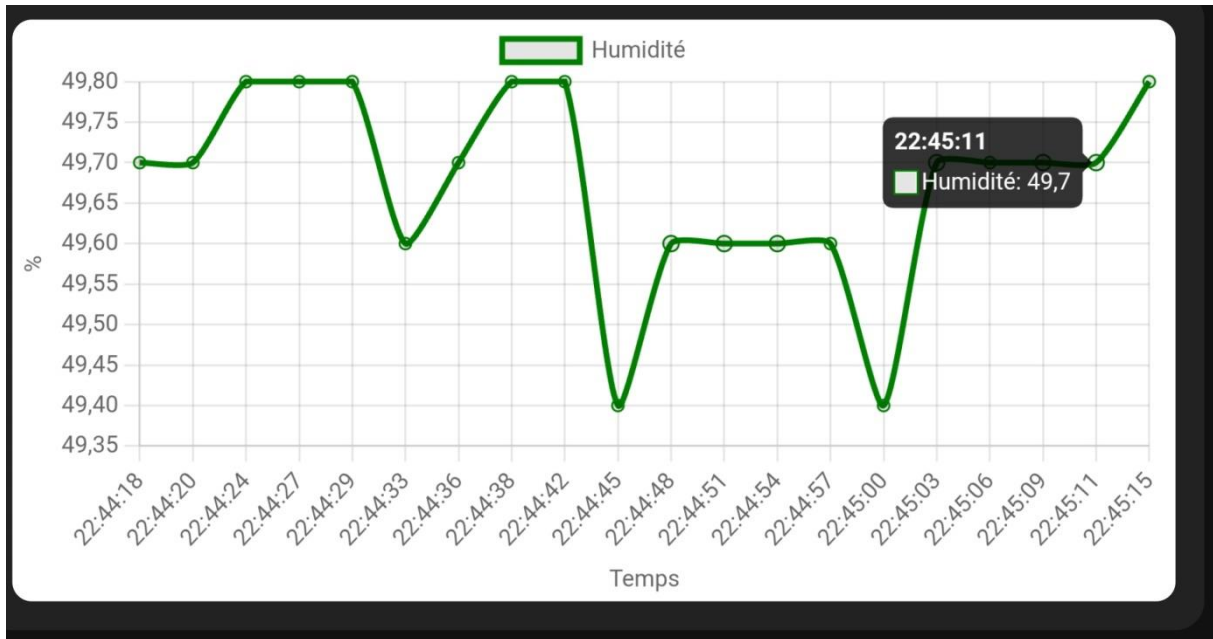


Figure IV.20: Graphe de la variation d'humidité

IV.10.3 Graphe du capteur Monoxyde de carbone (CO) :

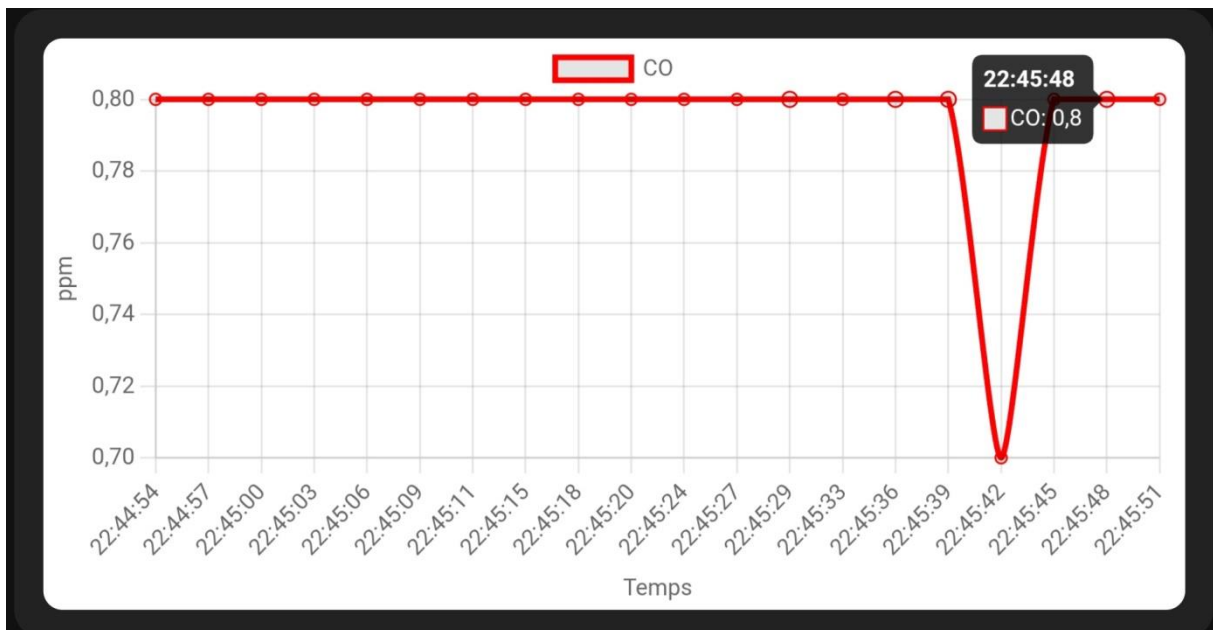


Figure IV.21: Graphe de la variation du monoxyde de carbone

IV.10.4 Graphe du capteur Méthane :

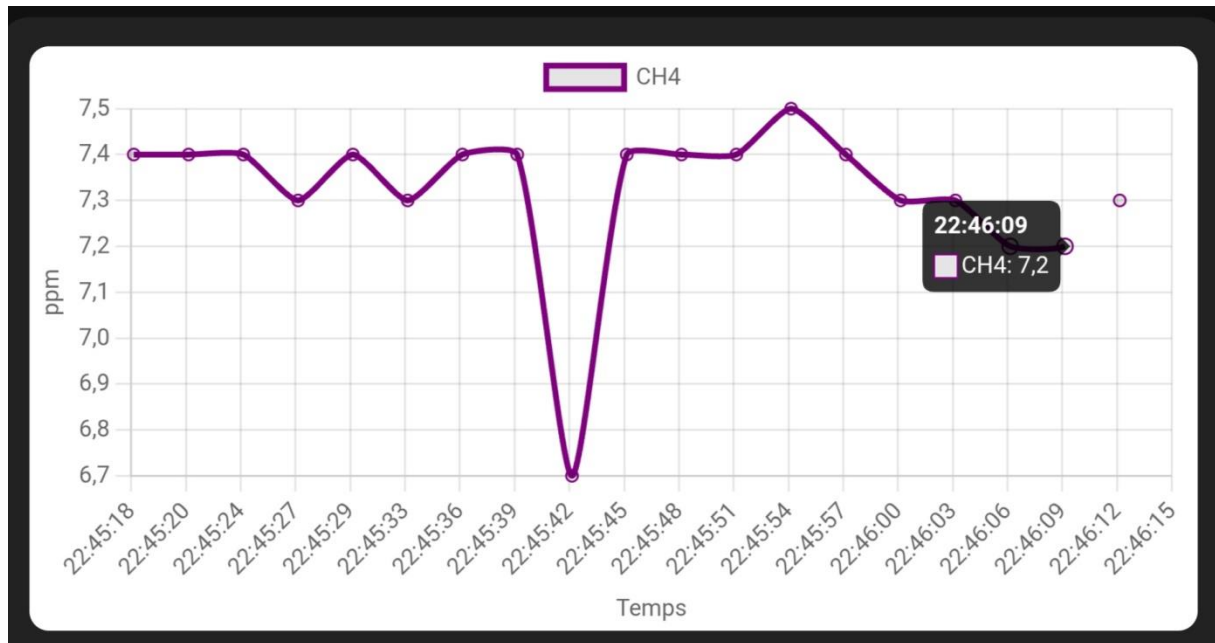


Figure IV.22:Graphe de variation de methane

IV.10.5 graphe du capteur Pollution :

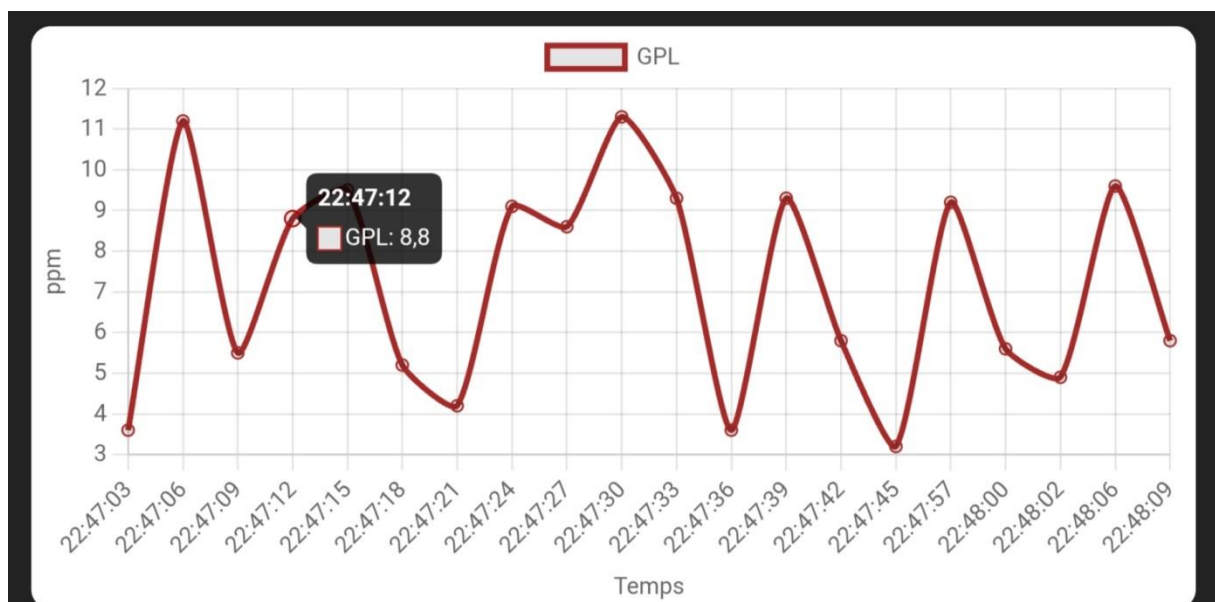


Figure IV.23:Graphe de variation de pollution

IV.10.6 Graphe du capteur Courant :

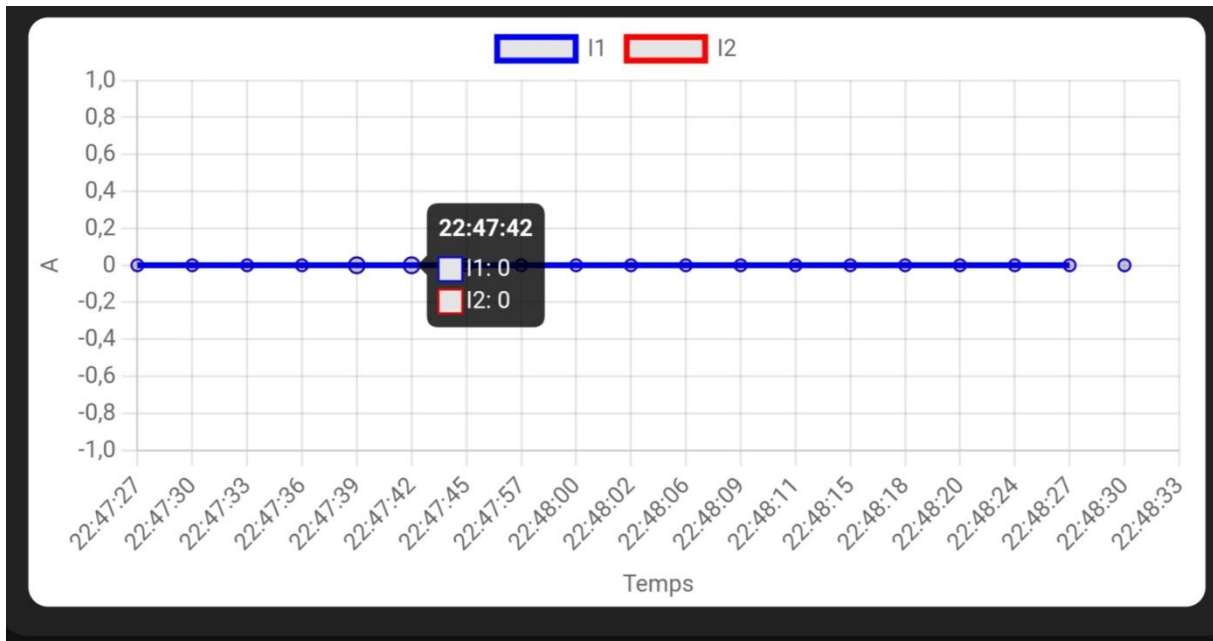


Figure IV.24: Graphe de courant

IV.10.7 Graphe du capteur Luminosité :

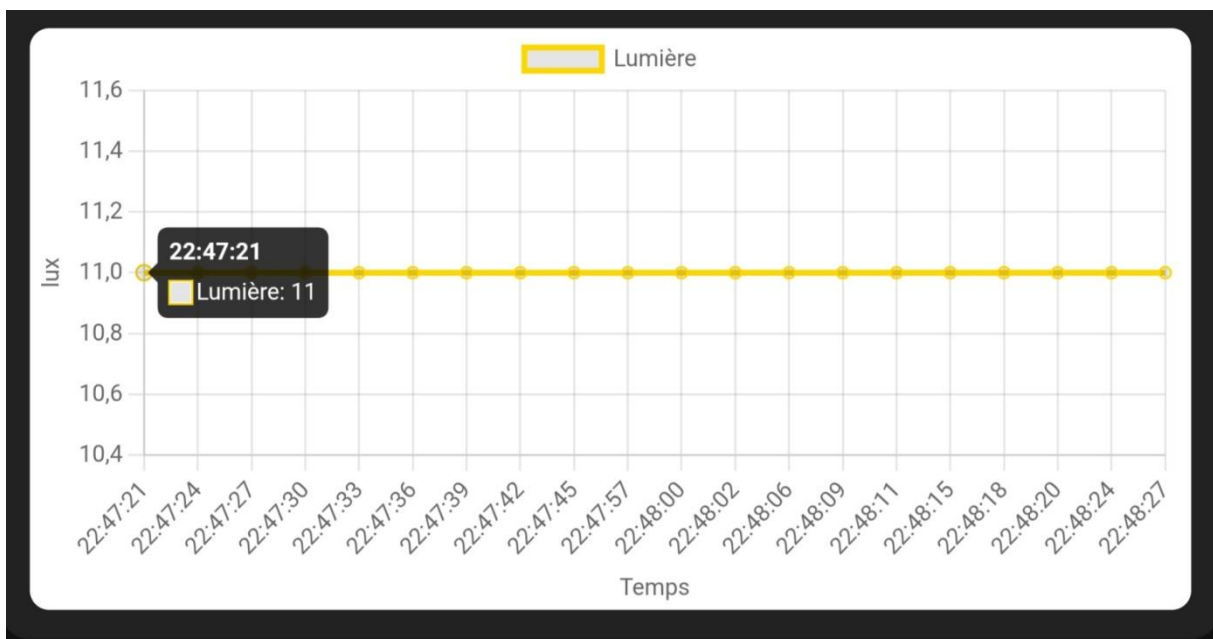


Figure IV.26: Graphe de variation de luminosité

IV.10.8 Graphe du capteur Ozone :

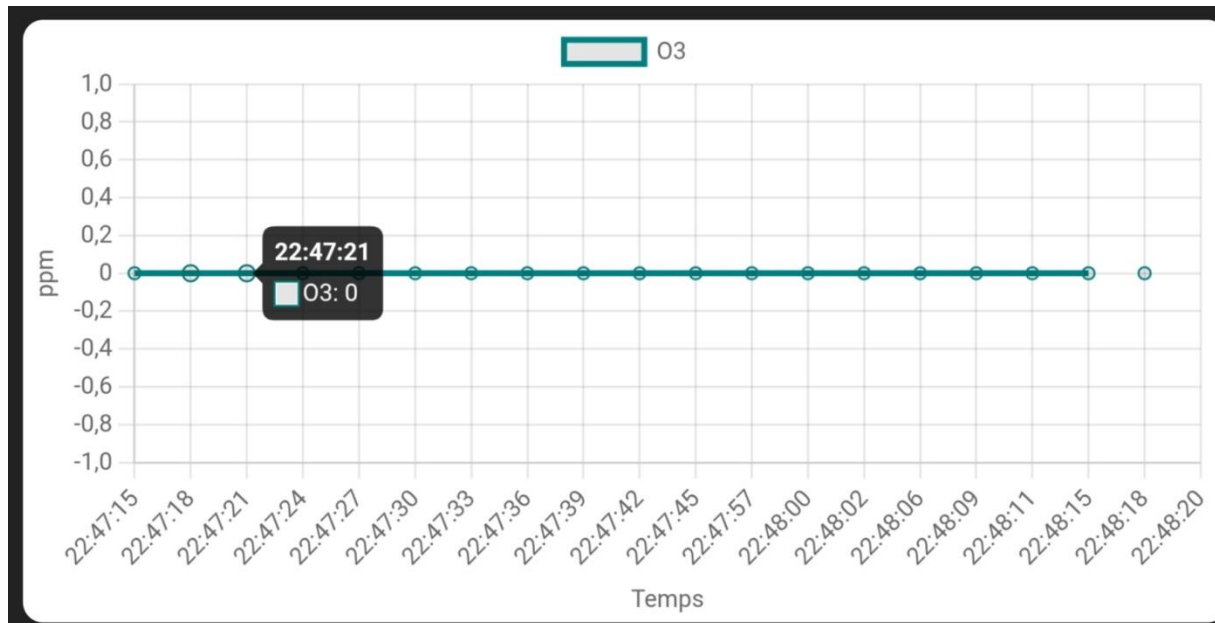


Figure IV.27:Graphe de variation d'ozone

IV.11 Conclusion :

En conclusion de ce chapitre, l'efficacité du système de surveillance à distance de la chambre froide, basé sur l'Internet des Objets (IoT) et l'ESP32, a été démontrée avec succès.

Les résultats confirment la capacité à collecter des données en temps réel pour tous les paramètres critiques (température, humidité, gaz, etc.) et à les afficher de manière interactive via une interface web simple. Ce système a permis une surveillance précise et des alertes immédiates, en plus d'une capacité de contrôle à distance des actionneurs.

Le projet constitue ainsi une solution intelligente et fiable pour gérer les chambres froides avec une grande efficacité.

Conclusion générale :

En conclusion de ce travail, qui a porté sur la conception et la réalisation d'un système intelligent de surveillance à distance d'une chambre froide, nous pouvons affirmer que les objectifs fixés au départ ont été atteints de manière satisfaisante.

Nous avons pu développer un prototype fonctionnel basé sur des cartes ESP32, capable de mesurer et de surveiller en temps réel les principaux paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité, la luminosité et la concentration des gaz, tout en permettant le contrôle à distance des actionneurs (relais) via une interface web interactive.

Le système a démontré son efficacité dans la collecte et la visualisation des données en temps réel, contribuant ainsi à améliorer la supervision et à réduire les interventions humaines, ce qui optimise la performance du processus de réfrigération et la conservation des produits sensibles.

Ce projet met également en évidence le rôle essentiel des technologies de l'Internet des Objets (IoT) dans le développement de solutions innovantes et intelligentes pour divers domaines industriels, agricoles et alimentaires.

Malgré les résultats obtenus, des perspectives d'amélioration restent possibles, notamment à travers l'intégration du stockage Cloud, l'envoi d'alertes automatiques en cas d'anomalie, ou encore l'exploitation de l'intelligence artificielle pour la prédiction des pannes.

En somme, ce projet constitue une étape concrète vers la digitalisation des systèmes de surveillance environnementale, et ouvre la voie à des applications plus avancées et plus intelligentes dans un avenir proche.

Perspectives et recommandations :

À l'issue de la réalisation de ce projet, plusieurs perspectives d'amélioration peuvent être envisagées afin d'accroître la performance, la fiabilité et la valeur ajoutée du système.

• Intégration d'une plateforme Cloud:

La mise en place d'un espace de stockage Cloud permettrait l'archivage sécurisé et l'analyse historique des données, offrant ainsi une meilleure visibilité sur l'évolution des paramètres de la chambre froide à long terme.

• Implémentation d'un système d'alertes automatisées:

L'envoi de notifications par SMS, e-mail ou via des applications de messagerie en cas de dépassement de seuils critiques renforcerait la sécurité, la réactivité et la prise de décision en temps réel.

- **Recours à l'intelligence artificielle:**

L'intégration de modèles prédictifs basés sur la machine Learning pourrait permettre la détection anticipée des anomalies, la prévention des pannes, ainsi que l'optimisation de la consommation énergétique du système.

- **Développement d'une application mobile dédiée:**

Une application mobile ergonomique offrirait un moyen plus flexible et intuitif pour consulter l'état du système et contrôler les équipements à distance.

En conclusion, ces perspectives constituent une base solide pour faire évoluer ce projet vers une solution plus intelligente, plus robuste et davantage adaptée aux exigences industrielles modernes.

Annexe

Annexe:

Le capteur DHT22 présente les caractéristiques suivantes :

- **Alimentation** : 3,3 – 6 V DC.
- **Signal de sortie** : numérique via un **bus unique (Single-Wire)**.
- **Élément de détection** : **capteur capacitif en polymère**.
- **Plage de fonctionnement** :
 - Humidité relative : 0 – 100 %RH
 - Température : -40 à +80 °C
- **Précision** :
 - Humidité : ± 2 %RH (max ± 5 %RH)
 - Température : $< \pm 0,5$ °C
- **Résolution / sensibilité** :
 - Humidité : 0,1 %RH
 - Température : 0,1 °C
- **Répétabilité** :
 - Humidité : ± 1 %RH
 - Température : $\pm 0,2$ °C
- **Hystérésis de l'humidité** : $\pm 0,3$ %RH
- **Stabilité à long terme** : $\pm 0,5$ %RH/an
- **Période de mesure** : moyenne **2 s**
- **Interchangeabilité** : entièrement interchangeable
- **Dimensions** :
 - Petite version : 14 × 18 × 5,5 mm
 - Grande version : 22 × 28 × 5 mm

Le capteur BH1750 présente les caractéristiques techniques suivantes :

- Interface de communication **I²C**, compatible avec les modes **Standard (100 kHz)** et **Fast (400 kHz)**.
- Réponse spectrale proche de celle de l'**œil humain**, assurant une mesure réaliste de l'éclairement lumineux.
- Convertisseur intégré **éclairage–numérique**, fournissant directement la valeur en lux.
- Large plage de mesure avec une **haute résolution**, comprise entre **1 lx et 65 535 lx**.
- Faible consommation énergétique grâce à la fonction **Power Down**.
- Fonction de rejet du bruit lumineux causé par les sources **50 Hz / 60 Hz**, améliorant la stabilité des mesures.
- Interface logique compatible **1,8 V**, facilitant l'intégration avec les microcontrôleurs modernes.
- Aucun composant externe requis pour le fonctionnement du capteur.
- Faible dépendance au type de source lumineuse (lampe à incandescence, fluorescente, halogène, LED blanche, lumière solaire).
- Possibilité de sélectionner **deux adresses I²C différentes**, permettant l'utilisation de plusieurs capteurs sur le même bus.
- Ajustement du résultat de mesure pour compenser l'influence d'une fenêtre optique, permettant une détection étendue de **0,11 lx à 100 000 lx**.
- Faible variation de mesure, avec une précision typique de **± 20 %**.

Caractéristiques techniques détaillées du capteur MQ-4

- **Vc (Tension de circuit)** : $5\text{ V} \pm 0,1\text{ V}$ (AC ou DC).
- **VH (Tension du chauffage)** : $5\text{ V} \pm 0,1\text{ V}$ (AC ou DC).
- **PL (Résistance de charge)** : $20\text{ k}\Omega$.
- **RH (Résistance du chauffage)** : $33\ \Omega \pm 5\%$ (à température ambiante).
- **PH (Puissance consommée par le chauffage)** : $< 750\text{ mW}$.
- **Tao (Température d'utilisation)** : $-10\text{ }^\circ\text{C}$ à $50\text{ }^\circ\text{C}$.
- **Tas (Température de stockage)** : $-20\text{ }^\circ\text{C}$ à $70\text{ }^\circ\text{C}$.
- **Humidité relative** : $< 95\%$ RH.
- **Concentration en O₂** : 21% (conditions standard). La concentration en oxygène peut influencer la sensibilité ; valeur minimale : $> 2\%$.
- **Rs (Résistance de détection)** : $10\text{ k}\Omega - 60\text{ k}\Omega$ pour 1000 ppm de CH₄.
- **α (Taux de variation selon la concentration, 1000ppm / 5000ppm CH₄)** : $\leq 0,6$.
- Conditions standard de détection :
 - Température : $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$
 - Humidité : $65\% \pm 5\%$ RH
 - Vc : $5\text{ V} \pm 0,1\text{ V}$
 - Vh : $5\text{ V} \pm 0,1\text{ V}$
- **Temps de préchauffage** : > 24 heures.
- **Plage de concentration détectable** : $200 - 10\ 000\text{ ppm}$.
-

Caractéristiques techniques du capteur MQ-131

- **Type de capteur** : Semi-conducteur
- **Encapsulation standard** : Bakélite noire
- **Gaz détecté** : Ozone (O₃)
- **Plage de concentration** : $10 - 1000\text{ ppm}$
- **Tension de boucle (Vc)** : $\leq 24\text{ V DC}$
- **Tension de chauffage (VH)** : $5,0\text{ V} \pm 0,2\text{ V}$ (AC ou DC)
- **Résistance de charge (RL)** : ajustable
- **Résistance du chauffage (RH)** : $31\ \Omega \pm 3\ \Omega$ (à température ambiante)
- **Puissance consommée par le chauffage (PH)** : $\leq 900\text{ mW}$
- **Résistance de détection (Rs)** : $50\text{ k}\Omega - 500\text{ k}\Omega$ (à 50 ppm O_3)
- **Sensibilité (S)** : $R_s(\text{dans l'air}) / R_s(\text{à } 50\text{ ppm O}_3) \geq 3$
- **Taux de variation (α)** : $R_s(50\text{ ppm}) / R_s(10\text{ ppm})$
- Température : $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$
- Humidité : $65\% \pm 5\%$ RH
- Circuit de test standard : Vc : $5,0\text{ V} \pm 0,1\text{ V}$; VH : $5,0\text{ V} \pm 0,1\text{ V}$
- **Temps de préchauffage** : > 48 heures

Caractéristiques techniques du capteur MQ-2

- **Type de capteur** : Semi-conducteur
- **Encapsulation standard** : Bakélite avec capuchon métallique
- **Gaz détectés** : Gaz inflammables et fumée
- **Plage de détection** : 300 – 10 000 ppm pour les gaz inflammables
- **Tension de boucle (Vc)** : ≤ 24 V DC
- **Tension de chauffage (VH)** : $5,0 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V}$ (AC ou DC)
- **Résistance de charge (RL)** : ajustable
- **Résistance du chauffage (RH)** : $29 \Omega \pm 3 \Omega$ (à température ambiante)
- **Puissance consommée par le chauffage (PH)** : ≤ 950 mW
- **Sensibilité (S)** : R_0 (dans l'air) / R_s (à 2000 ppm de C_3H_8) ≥ 5
- **Tension de sortie (Vs)** : $2,5 \text{ V} - 4,0 \text{ V}$ (à 2000 ppm de C_3H_8)
- **Taux de variation (α)** : $\leq 0,6$ (R3000ppm / R1000ppm C_3H_8)
- Température : $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
- Humidité : $55 \% \pm 5 \% \text{RH}$
- Circuit de test standard : Vc : $5,0 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V}$; VH : $5,0 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V}$
- **Temps de préchauffage** : > 48 heures

Caractéristiques techniques du capteur MQ-9 (CO)

- **Type de capteur** : Semi-conducteur
- **Encapsulation standard** : Bakélite
- **Gaz détectés** : CO et gaz combustibles
- **Plage de concentration** :
 - CO : 10 – 1000 ppm
 - Gaz combustibles : 100 – 10 000 ppm
- **Tension de boucle (Vc)** : ≤ 10 V DC
- **Tension de chauffage (VH)** :
 - Mode High : $5,0 \text{ V} \pm 0,2 \text{ V}$ (AC ou DC)
 - Mode Low : $1,5 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V}$ (AC ou DC)
- **Temps de chauffage (TL)** :
 - Mode High : 60 ± 1 s
 - Mode Low : 90 ± 1 s
- **Résistance de charge (RL)** : ajustable
- **Résistance du chauffage (RH)** : $31 \Omega \pm 3 \Omega$ (à température ambiante)
- **Puissance consommée par le chauffage (PH)** : ≤ 350 mW
- **Résistance de détection (Rs)** : $2 \text{ k}\Omega - 20 \text{ k}\Omega$ (à 100 ppm CO)
- **Sensibilité (S)** : R_s (dans l'air) / R_s (100 ppm CO) ≥ 5
- **Taux de variation (α)** : $\leq 0,6$ (R300 ppm / R100 ppm CO)
- Température : $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
- Humidité : $65 \% \pm 5 \% \text{RH}$
- Circuit de test standard :
 - Vc : $5,0 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V}$
 - VH High : $5,0 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V}$
 - VH Low : $1,5 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V}$
- **Temps de préchauffage** : > 48 heures

Recherches bibliographies:

[1] ASHRAE, *Refrigeration Handbook*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

[2] R. T. Pringle, R. C. Clayton, et C. F. H. Bishop, Eds., *Potatoes Postharvest*. Wallingford, UK: CABI Publishing.

[3] <https://espacerm.com/webgen/esp32intro/>

[4] <https://espacerm.com/webgen/esp32intro/>

[5] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur>

[6]. <https://www.adafruit.com/product/385>

[7] <https://components101.com/sensors/bh1750-ambient-light-sensor>

[8] <https://components101.com/sensors/mq9-gas-sensor>

[9] <https://components101.com/sensors/mq4-gas-sensor>

[10] <https://components101.com/sensors/mq2-gas-sensor>

[11] <https://components101.com/sensors/mq131-gas-sensor>

[12] <https://components101.com/sensors/sct-013-000-current-sensor>

[13] <https://components101.com/modules/5v-relay-module>

[14] <https://components101.com/displays/lcd-16x2-display-module>

Le Business Model Canvas (BMC)

نموذج العمل التجاري

Partenaires clés : <ul style="list-style-type: none"> • Entreprises de fabrication de capteurs et d'équipements. • Fournisseurs de services cloud. • Entreprises de cybersécurité. • Sociétés de marketing et de distribution. • Entreprises de développement logiciel. 	Proposition de valeur : <ul style="list-style-type: none"> • Surveillance à distance. • Alertes instantanées en cas de dépassement des valeurs autorisées. • Réduction des pertes dues à la détérioration des produits. • Garantie de la qualité du stockage et de la sécurité des marchandises. • Mise à disposition d'une interface facile à utiliser via le téléphone mobile ou le web. • Système intelligent réduisant l'intervention manuelle. 	Relations clients : <ul style="list-style-type: none"> - Réponse aux clients en cas de rencontre de tout problème dans le système. - Fourniture d'un service après-vente afin de garantir la satisfaction du client. 	Segments de clients : <ul style="list-style-type: none"> • Entrepôts de stockage (légumes, fruits, viandes). • Entreprises de l'industrie agroalimentaire. • Éleveurs de volailles.
Ressources clés : <ul style="list-style-type: none"> • Ressources matérielles : carte ESP32, capteurs (DHT22, MQ2, MQ4, MQ9, MQ131, BH1750, etc.). • Câbles, relais et source d'alimentation. • Ressources humaines : ingénieur chargé de la programmation du système. • Ressources techniques / logicielles : algorithmes d'envoi d'alertes et de commande automatique des équipements. • Ressources financières : budget destiné à l'achat des équipements, des pièces de rechange et à la maintenance du système. 		Activités clés : <ul style="list-style-type: none"> • Mesure de la température, de l'humidité et des gaz à l'intérieur de la chambre en temps réel. • Envoi des données vers le téléphone ou la page web. • Mise en marche / arrêt automatique des équipements. • Émission d'alertes en cas de dépassements ou de pannes. 	Canaux : <ul style="list-style-type: none"> • Réseaux sociaux (Facebook, Instagram, YouTube, etc.). • Publicité via les influenceurs pour présenter le système et mettre en avant ses fonctionnalités.

Structure des coûts :

1. Coûts des composants matériels : carte de contrôle ESP32, capteurs (MQ9, MQ2, MQ4, MQ131, DHT22, BH1750, SCT013, LCD) et câbles de connexion.
2. Coûts logiciels et de développement : conception de l'interface web et préparation des codes de programmation.
3. Coûts d'exploitation et de maintenance :
 - Maintenance des capteurs et remplacement des éléments défectueux.
 - Suivi du système et garantie de sa stabilité.
4. Coûts d'installation et de mise en œuvre :
 - Transport et installation du système داخل غرفة التبريد.
 - Outils de mesure et équipements d'assistance أثناء التنفيذ.

Flux de revenus :

- Vente du système complet (matériel + programmation).
- Services de maintenance et support technique.
- Mises à jour logicielles ou développements supplémentaires sur demande.
- Installation du système dans les chambres froides contre commission.
- Formation des utilisateurs à l'utilisation du système.