

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou
FACULTE DE GENIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
Département d'Électronique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du

DIPLOME DE MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Électrique

Spécialité : Microélectronique

Thème :

**Conception et réalisation d'une enceinte climatique intelligente basée
sur ESP32 et l'application Telegram**

Présenté par

M^r BETTAHAR Rafik

M^r MELLAH Khemisti

Mémoire soutenu le ... / 09 / 2025

devant le jury composé de :

M ^{me} AITABEDELMALEK Ghania	MCA, UMMTO	Président
M ^{me} OURAHMOUN Ourida	MCA, UMMTO	Encadreur
M ^{me} SIDI SAID Amel	MAA, UMMTO	Examineur

2024/2025

Remercîment

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la patience et le courage pour réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

En premier lieu, nous adressons nos sincères remerciements à notre encadrante, Mme ORAHMOUN Ourida, pour son accompagnement, ses conseils précieux, sa disponibilité et sa patience tout au long de ce projet.

Nous exprimons également notre reconnaissance à Mme AIT ABDELMALEK Ghania, Présidente du jury, pour l'honneur qu'elle nous fait en acceptant de présider et d'évaluer notre mémoire, ainsi que pour l'attention et le temps qu'elle y consacre.

Nos remerciements vont aussi à Mme SIDI SAID Amel, maître assistante et membre du jury, pour, sa disponibilité et sa précieuse contribution au bon déroulement de cette soutenance.

Dédicace

À ma chère mère, source infinie d'amour, de tendresse et de patience. Ses prières, ses sacrifices et ses encouragements constants m'ont donné la force de persévérer et de croire en moi, même dans les moments les plus difficiles.

À mon cher père, pour sa sagesse, ses conseils précieux et son soutien indéfectible. Son abnégation et ses efforts quotidiens pour m'offrir les meilleures conditions possibles d'études resteront pour moi un exemple de courage et de dévouement.

À mon ami Hakim, pour son aide précieuse, son soutien moral et son amitié sincère. Sa présence et ses encouragements m'ont apporté une grande motivation et m'ont permis d'aller de l'avant dans la réalisation de ce projet.

Aziz, ton inspiration et ta motivation m'ont poussé à donner le meilleur de moi-même. Ta présence, même à distance, a été une source de force et de détermination.

A tous mes amis, Pour leurs soutiens et aide dans les moments difficiles

A toute la promotion Microélectronique 2025.

Dédicace

Du plus profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers

À ma mère bien-aimée, pour sa tendresse infinie, ses prières constantes et son soutien inconditionnel. Elle a toujours été pour moi un refuge, une lumière et une inspiration, M'accompagnant de son affection et de sa patience dans chaque étape de mon parcours.

À mon père respecté, pour sa sagesse, sa confiance et ses efforts inlassables afin de m'offrir les meilleures conditions de réussite. Son dévouement, sa force et son courage resteront pour moi un modèle à suivre et une source de motivation dans ma vie.

À mon cher frère, pour son soutien inestimable, son affection fraternelle et sa présence réconfortante dans toutes les étapes de ma vie.

À mon cher ami Saïd, pour son soutien constant, sa présence bienveillante et son amitié sincère.

À notre Département d'Électronique, qui nous a offert un cadre d'apprentissage riche et stimulant.

À l'ensemble de notre promotion, avec qui nous avons partagé des années d'apprentissage, de solidarité et d'amitié.

Table des matières

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Table des matières

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale..... 1

Chapitre 1 : Généralité sur les enceintes climatiques

1. Introduction	4
2. Principes de fonctionnement des enceintes climatique	4
2.1 Les paramètres environnement contrôle	4
2.2 Les composant principaux d'une enceinte climatique	5
3. Les différent types d'enceintes climatique	7
3.1 Enceinte climatique constant HPP	7
3.2 Enceintes hygrométrique HCP	7
3.3 Enceinte climatique ICH	8
3.4 Enceinte d'essais environnementaux CTC	9
4. Applications des enceintes climatiques	9
4.1 Industrie pharmaceutique	9
4.2 Agronomie et biologie végétale	9
4.3 Tests de matériaux et de composants	10
4.4 L'industrie automobile, aéronautique et électronique	10
5. Technologies de régulation et de contrôle climatique	10
5.1 Systèmes de régulation thermique	10
5.2 Contrôle de l'humidité	10
6. Capture utilise dans les enceintes climatiques	11
6.1 Capture de température	11
6.2 Capture de pression	11
6.3 Capture d'humidité	12
7. Avantages et limites des enceintes climatiques	13
7.1 Avantages des enceintes climatiques	13
7.2 Limites des enceintes climatiques	13
8. Technologies émergentes dans les enceintes climatiques	14
8.1 Enceintes climatiques intelligentes	14

8.2 Optimisation énergétique et réfrigération écologique.....	14
8.3 Microclimats et multi-zonage.....	14
9. Maintenance et calibration des enceintes climatiques.....	15
9.1 Maintenance Préventive des Enceintes Climatiques.....	15
9.2 Calibration des Enceintes Climatiques.....	15
10. Conclusion.....	16

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilise pour la réalisation de l'enceinte climatique

1. Introduction sur les captures.....	18
1.1 Présentation générale du rôle des capteurs.....	18
2. Capteur température/humidité – DHT11.....	18
2.1 Présentation générale	18
2.2 Fonctionnement du capteur	18
2.3 Caractéristiques techniques	18
3. Capteur de pression atmosphérique MPX5100GVP.....	19
3.1 Présentation générale	19
3.2 Fonctionnement du capteur	19
3.3 Caractéristiques techniques	20
4. Capteur de gaz MQ-135	21
4.1 Présentation générale	21
4.2 Principe de fonctionnement	21
4.3 Caractéristiques techniques	21
5. Capteur de luminosité : Résistance dépendante de la lumière (LDR).....	22
5.1 Présentation générale	22
5.2 Principe de fonctionnement	22
5.3 Caractéristiques techniques	22
6. Capteur de particules en suspension : DSM501A	23
6.1 Présentation générale	23
6.2 Principe de fonctionnement	23
6.3 Caractéristiques techniques	23
7. Buzzer piézoélectrique HYDZ	24
7.1 Présentation générale	24
7.2 Principe de fonctionnement	24
7.3 Caractéristiques techniques	25

8. Humidificateur Micro USB 20mm 5V.....	25
8.1 Présentation générale	25
8.2 Principe de fonctionnement	26
8.3 Caractéristiques techniques	26
9. Ventilateur VD 4010MS 9V	27
9.1 Présentation générale	27
9.2 Principe de fonctionnement	27
9.3 Caractéristiques techniques	27
10. Le microcontrôleur ESP32 WROOM-32.....	28
10.1 Présentation générale	28
10.2 Principe de fonctionnement	28
10.3 Domaines d'application	29
10.4 Justification de choix.....	30
11. Afficheur graphique OLED 1.5" – SSD1107.....	32
11.1 Présentation générale	32
11.2 Fonction dans le projet	32
11.3 Caractéristiques techniques.....	32
12. Horloge temps réel (RTC) DS3231.....	33
12.1 Présentation générale	33
12.2 Fonction dans le projet	33
12.3 Caractéristiques techniques	33
13. Plaque chauffante KT-20180827.....	34
13.1 Présentation générale	34
13.2 Fonction dans le projet	34
13.3 Caractéristiques techniques	34
14. Présentation de logicielle de programmation	35
14.1 Arduino IDE	35
14.2 l'interface du logiciel Arduino IDE	35
14.3 Langage de programmation Arduino	37
15. Arduino IDE et carte ESP32.....	37
16. Conclusion.....	42
Chapitre 3 : Réalisation de l'enceinte climatique	
1. Introduction	44

2. Présentation du logiciel ISIS Proteus.....	44
3. Teste déferent capteur sur la lab d’essai.....	45
4. Réalisation de circuit imprime.....	47
4.1 Les étapes de la fabrication de la plaque.....	48
5. Branchement et programmation des captures de la station.....	49
5.1 Capteur de gaz (MQ135).....	49
5.2 Capteur de pression MPX5100GVP.....	49
5.3 Capture de température et humidité DH-11.....	50
5.4 Capteur de particules en suspension DSM501A.....	51
5.5 Afficheur graphique OLED 1.5" – SSD1107.....	52
5.6 Horloge temps réel (RTC) DS3231.....	53
5.7 Buzzer piézoélectrique.....	54
5.8 Capteur de luminosité (LDR) et les lampes LED.....	55
5.9 Les deux Ventilateur 9V.....	56
5.10 Plaque chauffante et humidificateur ultrasonique.....	57
5.11 Schéma global du système.....	58
6. Création de la communication à distance.....	59
6.1 Communication avec ThingSpeak.....	59
6.2 Créer un compte ThingSpeak.....	60
6.3 Créer un canal ThingSpeak.....	61
6.4 Configurer l’envoi des données.....	63
6.5 Recevoir les données sur le smartphone.....	64
7. Utilisation de Telegram pour contrôler l’ESP32 à distance.....	68
7.1 Installation de l'application Telegram.....	68
7.2 créer un compte sur Telegram.....	69
7.3 Création d’un bot Telegram avec BotFather.....	70
7.4 Récupération du Chat ID personnel.....	73
7.5 Intégration du bot Telegram dans le code Arduino de l’ESP32.....	75
7.6 Test et validation du bot Telegram sur smartphone.....	76
8. Le fonctionnement de Telegram.....	78
8.1 Réglage de l'heure via le bot Telegram.....	78
8.2 Consultation des données des capteurs avec /status.....	79
8.3 Configuration des seuils avec /seuils.....	80
8.4 Contrôle des actionneurs avec /actionneurs.....	81

8.5 MODES GLOBAUX : /autoon et /autoff.....	82
9. Les alertes du Système en cas de Dépassement de Seuils.....	83
9.1 Alerte Gaz (MQ135)	84
9.2 Alerte Pression Atmosphérique.....	85
9.3 Alerte Poussière/Particules	86
9.4 Alerte Température (DHT11)	87
9.5 Alerte Humidité (DHT11)	88
10. Réalisation complète de l'enceinte climatique	89
Conclusion.....	95
Reference bibliographique.....	98

La liste des figures

Figure 1. Résistance chauffante.....	5
Figure 2 : Humidificateur à vapeur directe.....	6
Figure 3 : Système de refroidissement.....	6
Figure 4 : Enceinte climatique constant HPP.....	7
Figure 5 : Enceintes hygrométrique HCP.....	8
Figure 6 : Enceinte climatique ICH.....	8
Figure 7 : Enceinte d'essais environnementaux CTC.....	9
Figure 8 : Capture de température.....	11
Figure 9 : Capture de pression.....	12
Figure 10 : Capture d'humidité.....	12
Figure 11 : capteur DHT11.....	19
Figure 12 : Capteur de pression MPX5100GVP.....	20
Figure 13 : Capteur de gaz MQ-135.....	22
Figure 14 : Capteur de luminosité (LDR).....	23
Figure 15 : Capteur de particules DSM501A.....	24
Figure 16 : Buzzer piézoélectrique HYDZ.....	25
Figure 17 : Humidificateur Micro USB 20mm 5V.....	26
Figure 18 : Ventilateur 9V.....	28
Figure 19 : IoT objets connecté.....	29
Figure 20 : microcontrôleur ESP32 WROOM-32.....	31
Figure 21 : Afficheur graphique OLED 1.5" – SSD1107.....	33
Figure 22 : Horloge temps réel (RTC) DS3231.....	34
Figure 23 : Plaque chauffante KT-20180827.....	35
Figure 24 : l'interface du logiciel Arduino IDE.....	37
Figure 25 : Interface de Proteus.....	45
Figure 26 : Teste déférent capteur sur la lab d'essai.....	46
Figure 27 : Fonctionnement des circuits sur la lab d'essai.....	47
Figure 28 : circuit imprime (typon).....	48
Figure 29 : Schéma de branchement de capture de gaz MQ135.....	49
Figure 30 : Schéma de branchement de capture de pression.....	50
Figure 31 : Schéma de branchement de Capture de température et humidité.....	51
Figure 32 : Schéma de branchement de Capteur de particules DSM501A.....	52

Figure 33 : Schéma de branchement Afficheur OLED 1.5.....	53
Figure 34 : Schéma de branchement d'Horloge (RTC) DS3231.....	54
Figure 35 : Schéma de branchement de buzzer.....	55
Figure 36 : Schéma de branchement de LDR et les LED.....	56
Figure 37 : Schéma de branchement des Ventilateur.....	57
Figure 38 : Schéma de branchement de Plaque chauffante et humidificateur.....	58
Figure 39 : Schéma global du système.....	59
Figure 40 : Interface de la plateforme ThingSpeak.....	60
Figure 41 : Configuration de wifi et ThingSpeak sur le programme arduino.....	64
Figure 42 : Changement de gaz entre 00 :00 et 00 :30.....	65
Figure 43 : Changement de pression entre 00 :00 et 00 :30.....	65
Figure 44 : Changement de poussière entre 00 :00 et 00 :30.....	66
Figure 45 : Changement de l'humidité entre 00 :00 et 00 :30.....	66
Figure 46 : Changement de température entre 00 :00 et 00 :30.....	67
Figure 47 : Changement de luminosité entre 00 :00 et 00 :30.....	67
Figure 48 : Installation de l'application Telegram depuis Play store.....	69
Figure 49 : Configuration de Telegram sur le programme arduino.....	76
Figure 50 : Organigramme du fonctionnement de l'enceinte climatique.....	90
Figure 51 : L'enceinte climatique réaliser.....	91
Figure 52 : L'intérieur de l'enceinte climatique.....	92

Liste des abréviations

- (HPP):** High Pressure Processing
- (HCP):** Hygrometric Conditioning Platform
- (ICH):** Integrated Climatic chamber
- (CTC):** Climatic Test Chamber
- (IoT):** Internet of Things
- (IA) :** Intelligence Artificielle
- (NTC):** Negative Temperature Coefficient
- (AC):** Alternating Current
- (RTC):** Real Time Clock
- (L'IDE) Arduino:** Integrated Development Environment
- (ISIS):** Intelligent Schematic Input System
- (SCL):** Serial Clock
- (GND):** Ground
- (SDA):** Serial Data
- (VCC):** Voltage Common Collector
- (NO):** Normally Open
- (COM):** Common
- (SSID):** Service Set Identifier
- (API):** Application Programming Interface

Introduction générale

Dans un monde où les technologies intégrées et l'Internet des Objets (IoT) prennent de plus en plus d'importance, le suivi et la régulation automatique des conditions écologiques se transforment en défis cruciaux. Il est crucial de contrôler des paramètres tels que la température, l'humidité, la pression ou la qualité de l'air dans divers secteurs : la recherche scientifique, le stockage de produits délicats, l'agriculture de précision et les expérimentations en laboratoire.

C'est dans cette optique que nous avons développé une enceinte climatique connectée et intelligente basée sur un microcontrôleur ESP32. Ce système permet de mesurer, surveiller et réguler automatiquement les principaux paramètres climatiques grâce à l'intégration de plusieurs capteurs : température et humidité (DHT11), gaz (MQ135), pression, luminosité (LDR) et poussière (DSM501A). Ces données sont traitées par le microcontrôleur, qui commande différents actionneurs tels que les ventilateurs, la plaque chauffante, l'humidificateur, la LED et le buzzer afin de maintenir des conditions internes stables.

L'un des atouts majeurs de ce projet réside dans sa connectivité intelligente. En effet, l'enceinte peut être pilotée à distance via l'application Telegram, grâce à l'intégration d'un bot permettant à l'utilisateur d'envoyer des commandes textuelles, de recevoir les mesures en temps réel et de consulter l'état général du système. Ce contrôle à distance offre une grande flexibilité d'utilisation et une interaction simplifiée avec le dispositif.

Parallèlement, toutes les données mesurées sont transmises vers la plateforme ThingSpeak, où elles sont automatiquement stockées et représentées sous forme de graphiques interactifs. Cette fonctionnalité permet une analyse continue et un suivi historique des conditions climatiques, rendant le système exploitable à la fois localement et à distance.

Le premier chapitre présente les généralités sur les enceintes climatiques : leur définition, leur fonctionnement, leurs différentes typologies ainsi que leurs domaines d'application. Il aborde également les technologies de régulation et les capteurs utilisés pour le contrôle des variables environnementales. Enfin, ce chapitre met en lumière les avantages, les limitations et les tendances technologiques émergentes dans ce domaine.

Le deuxième chapitre est consacré à la description détaillée du matériel et du logiciel utilisés pour la réalisation d'une enceinte climatique expérimentale. Il présente les différents capteurs environnementaux intégrés, tels que ceux de température, d'humidité, de pression, de gaz, de luminosité, de particules et de poussière. Il décrit également les actionneurs mis en œuvre, notamment les ventilateurs 9V, les LED et le buzzer, ainsi que le microcontrôleur ESP32 et les modules de visualisation et de commande qui assurent l'interaction avec le système.

Enfin, le troisième chapitre est consacré aux étapes pratiques de la conception de l'enceinte climatique, depuis la modélisation du circuit électronique à l'aide du logiciel ISIS Proteus jusqu'à la réalisation finale du système. Il comprend les phases de test des capteurs, la fabrication du circuit imprimé, le branchement des différents composants ainsi que la programmation des fonctionnalités intelligentes, telles que les alertes, la télécommande via Telegram et l'envoi des données vers la plateforme ThingSpeak. Ce chapitre se conclut par une évaluation globale de la solution proposée, mettant en évidence ses performances et ses apports. Solution proposée.

Ce projet illustre la mise en œuvre d'une solution domotique complète, combinant l'IoT, l'automatisation et la connectivité en temps réel. L'enceinte climatique développée offre une approche fiable, économique et évolutive du contrôle climatique, adaptée aux besoins de la recherche expérimentale et des environnements contrôlés.

Chapitre 1 :

Généralité sur les enceintes climatiques

1. Introduction :

L'enceinte climatique ou l'enceinte hygrométrique est un matériel très courant dans les laboratoires. En effet, elle permet d'effectuer une multitude d'applications pour des essais chauds ou froids, à une température et une humidité très variables selon le modèle d'enceinte climatique. Une enceinte climatique est une machine permettant de simuler un environnement précis grâce au contrôle par la chambre d'essai de la température, de l'humidité, de la lumière et de la pression. L'objectif d'un essai climatique est donc de simuler des facteurs de stress afin de tester la fiabilité d'un produit dans un environnement précis.

Une chambre d'essais peut disposer d'une chaleur sèche ou humide, mais aussi de froid sec ou humide, voire de capacités de givrage, de pluie et de gel. Les variations rapides de température et le contrôle des différents éléments dans une enceinte climatique peuvent permettre de contrôler l'impact de phénomènes comme l'oxydation, la corrosion, le gonflement et les changements globaux de caractéristiques. Pour la culture accélérée une enceinte climatique à constantes stables est primordiale pour éviter les chocs thermiques justement recherchés dans les tests de stabilité. [1]

2. Principes de fonctionnement des enceintes climatique :**2.1 Les paramètres environnementaux contrôlés :*****a. contrôle de la température :***

Lors d'un essai climatique, un système climatique fermé peut réguler la température, ce qui signifie qu'il peut réchauffer ou refroidir le compartiment. Il régule la vitesse de l'air et garantit que toutes les surfaces de l'échantillon maintiennent la même température. Dotée d'une capacité de 600 à 2 000 litres, une enceinte thermique intègre un système en boucle fermée destiné à diminuer la température. L'appareil assure un refroidissement uniforme du compartiment d'essai en compressant et en dilatant successivement un gaz frigorigène. Le taux moyen de refroidissement se situe entre 0,5 et 5,5 K/min. Pour les chambres climatiques à un étage, la température la plus basse peut descendre jusqu'à -40°C, tandis que pour celles à deux étages, elle peut atteindre -70°C. Le dispositif de réchauffement d'une chambre climatique intègre des résistances électriques positionnées près du système de ventilation. L'air réchauffé pénètre dans la chambre d'essai via la ventilation, avec une température moyenne augmentant de 1 à 10 K par minute. Ainsi, la température maximale peut atteindre jusqu'à +180°C, et même +200°C pour les modèles de haute performance. [2]

b. contrôle de l'humidité :

L'humidité est également un élément central dans le fonctionnement d'une enceinte climatique. Cet appareil ajuste l'humidité de l'air en fonction des exigences de l'expérience en cours, soit en humidifiant, soit en déshumidifiant. L'armoire climatique garantit une uniformité du taux d'humidité au sein du compartiment de test. Dans une enceinte climatique, l'humidité relative fait référence à la température intérieure et à la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. Elle fluctue généralement entre 10 et 98 %. Quand le niveau d'humidité est faible, l'appareil thermique utilise un humidificateur électrique intégré pour insuffler de la vapeur d'eau dans le flux d'air. Cette méthode assure une humidification directe sans passer par un aérosol. Quand l'humidité dans la chambre d'essai est forte, elle se condense sur la partie la plus froide de l'appareil, qui est sa surface. L'enceinte climatique est immédiatement débarrassée de son humidité. Un évaporateur intégré à l'appareil assure ce processus. [2]

2.2 Les composants principaux d'une enceinte climatique :a. résistances électriques de puissance appropriée :

Les résistances électriques convertissent l'énergie électrique en chaleur grâce à l'effet Joule. Quand un courant passe à travers la résistance, elle se réchauffe et diffuse cette chaleur dans l'air environnant à l'intérieur de l'espace. La température intérieure s'élève progressivement jusqu'à atteindre la valeur paramétrée [3]. Sur la figure 1 est représentée une résistance chauffante.



Figure 1. Résistance chauffante. [18]

b. Le système d'humidification :

L'humidification fait référence à l'action d'introduire de la vapeur d'eau dans l'air intérieur de la pièce pour accroître l'humidité relative. Ceci peut être accompli par différents outils

Technologies comme humidification par vapeur, qui produit de la vapeur d'eau à partir d'un réservoir chauffé ou bien par la méthode ultrasons humidification qui fait appel à des ondes ultrasonores pour convertir de l'eau en microgouttelettes. [3]

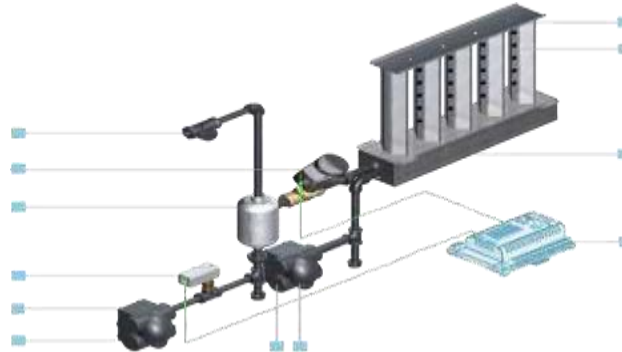


Figure 2 : Humidificateur à vapeur directe. [19]

c. Le système de réfrigération :

L'enceinte climatique dispose d'un système de refroidissement qui permet de réduire de manière maîtrisée la température interne, reproduisant ainsi des conditions frigorifiques. Le principe de la réfrigération s'appuie principalement sur un système frigorifique qui fait circuler un fluide réfrigérant (gaz) à travers divers éléments, afin d'absorber la chaleur présente à l'intérieur de l'espace confiné et de la libérer à l'extérieur. [3]



Figure 3 : Système de refroidissement. [20]

3. Les différents types d'enceintes climatiques :

3.1 Enceinte climatique constante HPP :

Concernant les économies d'énergie, les chambres à climat constant HPP (Humidified Precision Plant) sont tout simplement inégalables. Ces équipements peuvent fonctionner pendant de nombreuses années presque sans entretien, ce qui les rend parfaitement appropriés pour effectuer des tests de stabilité, le stockage climatique et les conditionnements. La régulation thermique de haute précision, ainsi que l'humidification et la déshumidification actives. [4]



Figure 4 : Enceinte climatique constant HPP. [21]

3.2 Enceintes hygrométrique HCP :

Ces dispositifs ont la capacité de générer des environnements contrôlés, physiologiquement optimaux pour reproduire des conditions réelles. Pour ce faire, ils ont mis en place des programmes pour contrôler la température et l'humidité. Contrôle actif de l'humidité de 20 à 95 % rh, avec une régulation hautement précise pour les températures allant jusqu'à +90 °C. Sans apport d'humidité, dans la chambre HCP, les températures peuvent atteindre jusqu'à +160 °C. [4]



Enceinte hygrométrique HCP
Logiciel «Celsius»

Modèles: 108 / 153 / 246
+20 °C à +90 °C (avec humidité)
+20 °C à +160 °C (sans humidité)
Hygrométrie de 20 à 95 % rh

Figure 5 : Enceintes hygrométrique HCP. [21]

3.3 Enceinte climatique ICH :

Sont les chambres d'essai de stabilité, refroidies par un système de compression, se distinguent par la constance de leur température et de leur humidité, ce qui les rend idéales pour des tests prolongés dans des conditions stables. L'enceinte climatique ICH est spécifiquement conçue pour les tests de produits pharmaceutiques en respectant les normes ICH, Q1A et Q1B, option 2, ou des normes équivalentes pour les tests de stabilité des produits cosmétiques et alimentaires. [4]



Enceinte climatique ICH
Équipée TwinDISPLAY et AtmoCONTROL

Modèles: 110 / 260 / 750
ICH avec régulation d'humidité
ICH L avec régulation d'humidité et lumière
ICH C avec régulation d'humidité et de CO₂

Gamme des températures avec régulation d'humidité

ICH +10 °C à +60 °C

ICH L +10 °C à +60 °C

ICH C +10 °C à +50 °C

Humidité de 10 à 80 % rh

Gamme des températures sans régulation d'humidité

ICH -10 °C à +60 °C

ICH L 0 °C à +60 °C

ICH C +10 °C à +50 °C

Figure 6 : Enceinte climatique ICH. [21]

3.4 Enceinte d'essais environnementaux CTC :

Les chambres d'essai environnemental CTC peuvent reproduire des conditions atmosphériques idéales pour tous les tests de climat et de température. Notamment ceux qui sont en accord avec la norme IEC 60068. L'opération en mode rampe, un contrôle actif de l'humidité et de la déshumidification de 10 à 98 % rh, une régulation précise des températures allant de -42 °C à +190 °C (sans humidité) et de +10 °C à +95 °C avec humidité, fournit une flexibilité illimitée pour toutes les vérifications de matériaux et les essais fonctionnels, ainsi que pour les procédures de vieillissement. [4]



Figure 7 : Enceinte d'essais environnementaux CTC. [21]

4. Applications des enceintes climatiques :

4.1 Industrie pharmaceutique :

Dans le secteur pharmaceutique, les chambres environnementales sont essentielles pour effectuer des tests de stabilité sur les médicaments, vaccins, suppléments nutritionnels ou équipements médicaux. Ces tests sont essentiels pour assurer que les produits maintiennent leur qualité, leur efficacité et leur sécurité tout au long de leur cycle de vie en utilisant les enceintes climatiques ICH. [4]

4.2 Agronomie et biologie végétale :

Les chambres climatiques ont une importance cruciale en agronomie et en biologie végétale. Ces installations offrent la possibilité de reproduire des conditions naturelles ou extrêmes pour observer le comportement des plantes, évaluer la robustesse des graines ou examiner

l'impact des éléments climatiques sur le développement végétal en utilisant des enceintes climatiques constant HPP. [4]

4.3 Tests de matériaux et de composants :

Des applications étendues allant de la physique du bâtiment aux tests de corrosion et à la recherche biologique. Ces dispositifs ont la capacité de produire des environnements maîtrisés, physiologiquement optimaux pour reproduire des conditions authentiques. Souvent mises en œuvre pour effectuer des tests de vieillissement, de fatigue et de résistance sur divers matériaux (plastiques, métaux, composites), ainsi que sur des éléments électroniques ou mécaniques. Ces examens assurent la robustesse, la sûreté et l'efficacité des produits dans des conditions réelles ou extrêmes de l'environnement [4].

4.4 L'industrie automobile, aéronautique et électronique :

Dans les domaines de l'automobile, de l'aéronautique et de l'électronique, les pièces mécaniques et électroniques font face à des conditions extrêmes : variations thermiques importantes, humidité intense, vibrations, poussières... Les chambres climatiques offrent la possibilité de reproduire ces situations pour évaluer la robustesse, la fiabilité et la longévité des composants et systèmes intégrés en utilisant les enceintes d'essais environnementaux CTC. [4]

5. Technologies de régulation et de contrôle climatique :

5.1 Systèmes de régulation thermique :

Les dispositifs de contrôle thermique dans les chambres climatisées jouent un rôle crucial pour préserver des conditions environnementales déterminées, comme la température et l'humidité. Cela est essentiel pour diverses applications telles que l'expérimentation de matériaux, la culture végétale, les recherches biologiques ou encore la conservation d'échantillons. Ces dispositifs se servent d'une combinaison de détecteurs, d'effecteurs et de régulateurs pour contrôler et moduler l'environnement interne des enceintes thermiques. [5]

5.2 Contrôle de l'humidité :

Le contrôle d'humidité est un composant essentiel des chambres climatiques destiné à gérer et garder certains critères environnementaux à des valeurs précises, y compris ceux relatifs à la température et à l'humidité relative. Le taux d'humidité est le rapport entre la quantité de

Vapeur d'eau dans l'air et la quantité maximale que l'air pourrait contenir à une température spécifique. Il est déterminé par un taux variant de 0 % à 100 % et représente l'un des éléments environnementaux clés susceptibles d'avoir un impact considérable sur le comportement et les caractéristiques des matériaux ainsi que des produits dans divers scénarios. [6]

6. Capture utilise dans les enceintes climatiques :

6.1 Capture de température :

Les capteurs de température sont des éléments électriques et électroniques capables, en tant que tels, d'évaluer la température via un signal électrique spécifique. Ils ont la possibilité de transmettre ce signal de manière directe ou indirecte en modifiant la résistance. On les appelle aussi des capteurs thermiques ou thermo capteurs. Un détecteur de température est, entre autres, employé dans le contrôle des circuits de commutation. On peut également désigner les capteurs de température comme des détecteurs thermiques, des sondes de chaleur ou des capteurs de chaleur. [7]



Figure 8 : Capture de température. [22]

6.2 Capture de pression :

Un capteur de pression est un appareil qui a la capacité de mesurer la pression exercée. Le capteur de pression transforme la pression physique en un signal sous forme électrique. Un dispositif de mesure de pression, également connu sous le nom de transducteur ou transmetteur de pression, sert à convertir une pression mécanique ou hydraulique en un signal électrique. L'information électrique peut servir à représenter la mesure de pression sur un écran ou à être transmise à un dispositif de régulation, un automate ou un système d'acquisition de données pour une analyse future. Cette évaluation de la pression peut servir à

plusieurs objectifs, y compris le suivi des fluides, la surveillance des fluides et la détermination de la pression atmosphérique. [8]



Figure 9 : Capture de pression. [23]

6.3 Capture d'humidité :

Les capteurs capacitifs d'humidité font appel à des condensateurs sensibles à l'humidité pour déterminer le niveau d'humidité. On utilise fréquemment ces capteurs pour évaluer l'humidité relative dans les dispositifs de climatisation ainsi que dans les systèmes de chauffage ventilation et climatisation. Les capteurs d'humidité résistifs évaluent le changement électrique dans les polymères conducteurs et les substrats modifiés. Ces capteurs, qui sont économiques et de petite dimension, trouvent leur utilité dans une multitude d'applications et de dispositifs. [9]

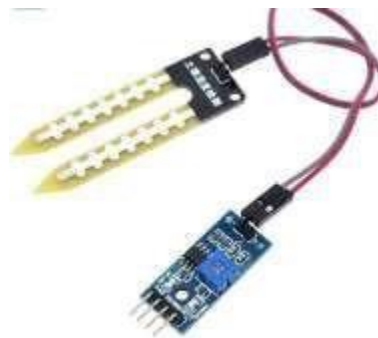


Figure 10 : Capture d'humidité. [24]

7. Avantages et limites des enceintes climatiques :

7.1 Avantages des enceintes climatiques :

a. Contrôle précis des paramètres environnementaux :

Les chambres climatiques offrent la possibilité de reproduire avec une précision remarquable des conditions spécifiques de température, d'humidité et parfois de pression, élément crucial pour l'évaluation de matériaux ou de produits dans des contextes d'environnement particuliers. [10]

b. Tests accélérés :

Ces chambres, qui offrent un contrôle rigoureux des conditions météo, facilitent la conduite de tests accélérés pour analyser la réaction des matériaux face à des contraintes climatiques simulées. Cela offre la possibilité d'estimer la longévité d'un produit sans devoir attendre des années de tests en conditions réelles. [11]

c. Flexibilité d'application :

On peut les appliquer dans divers secteurs, comme l'électronique, l'automobile, l'aérospatiale et la recherche en biomédecine. Elles reproduisent des conditions extrêmes et maîtrisées pour évaluer la performance des appareils et des matériaux dans divers environnements. [12]

7.2 Limites des enceintes climatiques :

a. Coût élevé :

Les enceintes climatiques, notamment celles qui proposent une large gamme de températures et d'humidité, ont tendance à être onéreuses tant à l'acquisition qu'à la maintenance, ce qui représente un frein potentiel pour certaines sociétés. [11]

b. Capacité de simulation limitée :

Bien qu'elles puissent simuler de nombreuses conditions, les enceintes climatiques ont des limites, notamment pour simuler des changements rapides de température ou des conditions environnementales très spécifiques comme les vibrations ou les radiations. Les enceintes climatiques offrent un contrôle précis de certains paramètres, elles n'ont pas toujours la capacité de simuler de manière réaliste des changements environnementaux dynamiques. [10]

c. Consommation énergétique élevée et impact environnemental :

Les chambres climatiques peuvent réclamer une importante quantité d'énergie, particulièrement quand elles reproduisent des températures extrêmes ou des conditions de haute pression. Ceci peut conduire à des dépenses énergétiques importantes et à une empreinte écologique amplifiée. [11]

8. Technologies émergentes dans les enceintes climatiques :

8.1 Enceintes climatiques intelligentes :

Les chambres climatiques intelligentes constituent une percée significative dans le secteur des examens environnementaux. Désormais, elles intègrent des capteurs connectés (IoT), des interfaces de contrôle à distance et, dans certaines situations, des algorithmes d'intelligence artificielle (IA). Ces outils offrent la capacité de surveiller en direct les paramètres environnementaux (comme la température, l'humidité, la pression, etc.) grâce à des interfaces web conviviales. Elles proposent aussi d'adapter automatiquement les conditions de test selon les données collectées, assurant ainsi une meilleure précision et reproductibilité des essais. En outre, suite à l'analyse des données recueillies, on peut instaurer une maintenance prédictive qui diminue les chances de panne et améliore le temps d'opération des machines. [13]

8.2 Optimisation énergétique et réfrigération écologique :

Devant les défis environnementaux grandissants, les producteurs d'enceintes climatiques conçoivent des versions plus écologiques. Les enceintes modernes utilisent maintenant des réfrigérants naturels tels que le CO₂ (R-744) ou le propane (R-290), qui ont un potentiel de réchauffement global (PRG) nettement inférieur à celui des gaz fluorés conventionnels. De même, l'emploi de compresseurs à vitesse variable autorise l'ajustement de la consommation d'énergie en fonction de la charge réelle, diminuant par conséquent les pertes énergétiques. Ces avancées permettent de diminuer considérablement l'usage d'électricité, de minimiser l'empreinte carbone des installations et de réduire les dépenses opérationnelles sur le long terme, tout en se conformant aux normes environnementales les plus rigoureuses. [14]

8.3 Microclimats et multi-zonage :

Une évolution technologique marquante dans l'évolution des chambres de culture est la capacité à générer des microclimats ou zones climatiques spécifiques au sein d'un même espace. Cette fonction sophistiquée offre la possibilité d'expérimenter sur plusieurs échantillons en même temps, chacun exposé à des conditions environnementales particulières (comme la température, l'humidité, etc.). [15]

9. Maintenance et calibration des enceintes climatiques :**9.1 Maintenance Préventive des Enceintes Climatiques :**

La maintenance fréquente et l'étalonnage régulier des enceintes climatiques sont indispensables pour assurer des résultats de test précis et reproductibles. Ces appareils sont prévus pour opérer avec une précision élevée sur une durée prolongée, cependant ils peuvent être sujets à des dérives engendrées par l'usure des détecteurs, l'obstruction des dispositifs de ventilation ou des variations dans les réseaux de régulation. [16]

9.2 Calibration des Enceintes Climatiques :

La calibration implique de juxtaposer les valeurs observées (comme la température, l'humidité, la pression) avec des références établies selon des standards métrologiques (tels que l'ISO 17025 par exemple), dans le but d'identifier et rectifier les divergences. Un manque de calibration appropriée peut provoquer des erreurs lors des tests ou des manquements aux normes réglementaires, notamment dans les domaines de la pharmacie, de l'aéronautique et de l'agroalimentaire. Les producteurs préconisent des programmes de maintenance préventive qui incluent le changement des composants fragiles, l'inspection des dispositifs d'étanchéité, l'actualisation des logiciels et l'examen annuel des capteurs de mesure. [16]

10. Conclusion :

Les chambres climatiques sont des outils indispensables pour simuler et tester des conditions environnementales extrêmes, assurant ainsi la qualité, la fiabilité et la longévité des produits dans différents domaines industriels, de l'électronique à l'aérospatiale. Avec des progrès récents tels que l'amélioration de l'efficacité énergétique, l'utilisation de réfrigérants naturels et une connectivité sophistiquée, ces dispositifs gagnent en performance tout en demeurant écologiquement responsables. Les difficultés liées aux coûts, à l'entretien périodique et à la consommation d'énergie demeurent des barrières à franchir pour une adoption à grande échelle. Cependant, les perspectives pour le futur des enceintes climatiques s'avèrent encourageantes, avec des possibilités d'automatisation savante, de diminution de l'empreinte carbone et de miniaturisation, répondant par conséquent aux besoins du secteur industriel. [17]

Chapitre 2 :

**Description du matériel et du logiciel utilisé
pour la réalisation de l'enceinte climatique**

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilisé pour la réalisation de l'enceinte climatique

1. Introduction sur les capteurs :

1.1 Présentation générale du rôle des capteurs :

Dans divers secteurs (secteur industriel, recherche scientifique, services, divertissement...), il est nécessaire de surveiller des variables physiques (température, force, localisation, rapidité, luminosité...). L'élément essentiel pour détecter ces grandeurs physiques est le capteur. Un capteur est un dispositif de collecte d'informations qui génère à partir d'une grandeur physique une autre grandeur physique de nature distincte (généralement électrique). Cette valeur représentative de la grandeur mesurée peut être employée pour des opérations de mesure ou de contrôle. [25]

2. Capteur température/humidité – DHT11 :

2.1 Présentation générale :

Le DHT11 est un capteur numérique de mesure de température et d'humidité, pensé pour des applications simples et économiques. Élaboré par l'entreprise Aosong Electronics, il connaît une vaste application dans les initiatives pédagogiques, la domotique ou encore les systèmes intégrés qui n'exigent pas une grande exactitude. Le DHT11 transmet régulièrement des données relatives à la température (en °C) et à l'humidité relative (en %) grâce à une communication numérique sur un seul fil. [26]

2.3 Fonctionnement du capteur :

Le DHT11 est un instrument numérique qui évalue la température et l'humidité relative de l'air grâce à un détecteur de type NTC (Coefficient de Température Négatif) pour la température, et à un détecteur capacitif pour l'humidité. Ces informations sont par la suite transformées en signal numérique et acheminées à un microcontrôleur, tel que l'ESP32. [26]

2.4 Caractéristiques techniques :

Voici les Caractéristiques techniques du capteur DHT11 :

- Tension d'alimentation : 3.3 V à 5.5 V
- Type de signal de sortie : Numérique (1 fil, protocole propriétaire)
- Plage de température : 0 °C à +50 °C
- Précision température : ± 2 °C

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilise pour la réalisation de l'enceinte climatique

- Plage d'humidité : 20 % à 90 % HR
- Fréquence d'échantillonnage : 1 Hz (1 mesure par seconde). [26]



Figure 11 : capteur DHT11 [27]

3. Capteur de pression atmosphérique MPX5100GVP :

3.1 Présentation générale :

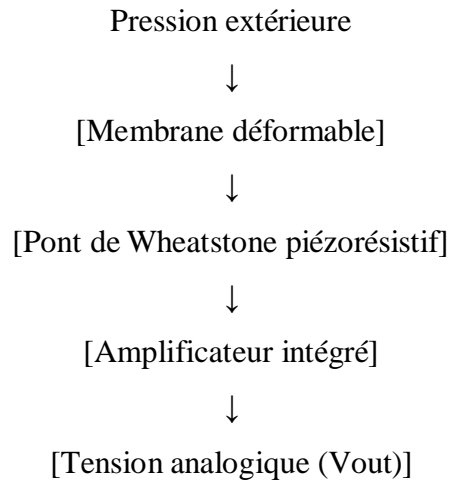
NXP Semi-conducteurs a conçu le MPX5100GVP, un capteur de pression absolue. Ce dispositif génère une sortie analogique en fonction de la pression atmosphérique détectée, ce qui le rend idéal pour être utilisé avec des microcontrôleurs tels que l'ESP32, disposant d'entrées analogiques. On utilise souvent ce capteur dans les applications industrielles, médicales ou environnementales qui requièrent des mesures précises de la pression dans des conditions confinées ou contrôlées. [28]

3.2 Fonctionnement du capteur :

Le MPX5100GVP est un capteur de pression absolue qui s'appuie sur la technologie piézorésistive, incorporée au sein d'une structure en silicium. Il évalue la pression atmosphérique exercée sur une membrane flexible positionnée à l'intérieur du capteur. Cette déformation est par la suite transformée en une tension électrique correspondant à la pression appliquée. [28]

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilise pour la réalisation de l'enceinte climatique

Schéma simplifié du fonctionnement :



3.3 Caractéristiques techniques :

Voici les caractéristiques techniques du Capteur de pression MPX5100GVP :

- Type de capteur : Pression absolue
- Plage de mesure : 15 kPa à 115 kPa
- Sortie : Tension analogique (0.2 V – 4.7 V)
- Alimentation : 5 V
- Précision : ± 1.5 % pleine échelle
- Temps de réponse : 1 ms typique

Interface : Sortie analogique. [28]



Figure 12 : Capteur de pression MPX5100GVP. [29]

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilisé pour la réalisation de l'enceinte climatique

4. Capteur de gaz MQ-135 :

4.1 Présentation générale :

Le capteur MQ-135 est un dispositif semi-conducteur destiné à mesurer la qualité de l'air. Il est entraîné pour reconnaître une variété étendue de gaz polluants tels que l'ammoniac (NH_3), les oxydes d'azote (NO_x), l'éthanol, le benzène, le dioxyde de carbone (CO_2) et d'autres composés organiques volatils. On utilise souvent ce capteur dans les systèmes de contrôle environnemental, les stations météorologiques, les appareils de sécurité résidentielle ou les initiatives d'automatisation concernant la qualité de l'air. [30]

4.2 Principe de fonctionnement :

Le capteur MQ-135 utilise la technologie des capteurs semi-conducteurs chauffés, s'appuyant plus spécifiquement sur l'effet piézorésistif du dioxyde d'étain (SnO_2). Ce genre de capteur est élaboré pour identifier divers gaz polluants présents dans l'atmosphère, en tirant parti du changement de sa résistance électrique lorsqu'il est exposé à des gaz réactifs. Quand le capteur reçoit de l'énergie, l'élément chauffant augmente la température de la surface active, ce qui déclenche les réactions chimiques à la surface du SnO_2 . [31]

4.3 Caractéristiques techniques :

Voici les Caractéristiques techniques du Capteur de gaz MQ-135 :

- Gaz détectés : NH_3 , NO_x , alcool, benzène, fumée, CO_2 , etc.
- Type de capteur : Semi-conducteur chauffé (SnO_2)
- Plage de détection : ~10 à 1000 ppm (selon le gaz)
- Tension de fonctionnement : 5 V DC
- Consommation électrique : 90 mA (chauffage actif)
- Sortie : Tension analogique (0 à ~4 V selon la concentration de gaz)
- Temps de réponse : < 30 secondes
- Température de fonctionnement : -10 °C à +50 °C
- Stabilité : Bonne stabilité à long terme après étalonnage
- Dimensions : ~18 × 17 mm (boîtier type capuchon). [31]

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilise pour la réalisation de l'enceinte climatique



Figure 13 : Capteur de gaz MQ-135. [32]

5. Capteur de luminosité : Résistance dépendante de la lumière (LDR) :

5.1 Présentation générale :

Un composant électronique appelé photorésistance, également connu sous l'acronyme LDR (Resistor Dépendant de la Lumière), voit sa résistance modifiée en fonction de la quantité de lumière reçue. Sa résistance se réduit en présence de lumière, alors qu'elle connaît une augmentation significative en son absence. Ce processus repose sur le principe de la photoconductivité, qui consiste à libérer des électrons grâce à l'absorption de photons, ce qui accroît la conductivité du matériau semi-conducteur. [33]

5.2 Principe de fonctionnement :

La LDR fonctionne selon le principe de la photoconductivité. Lorsqu'elle est exposée à la lumière, les photons absorbés par le matériau semi-conducteur libèrent des électrons, réduisant ainsi sa résistance. Cette variation de résistance peut être mesurée et utilisée pour détecter l'intensité lumineuse ambiante. [33]

5.3 Caractéristiques techniques :

Voici les Caractéristiques techniques du Capteur de luminosité (LDR) :

- Dimensions : 10 mm
- Résistance à 10 Lux : 30-50K ω
- Résistance dans l'obscurité : jusqu'à 1M Ω
- Tension maximale : 200V DC

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilisé pour la réalisation de l'enceinte climatique

- Puissance maximale : 200Mw
- Plage de température de fonctionnement : -30°C à +70°C
- Longueur d'onde de pic : 600 nm
- Temps de réponse : 20ms (montée), 30ms (descente)
- Matériau : Sulfure de cadmium. [33]



Figure 14 : Capteur de luminosité (LDR). [34]

6. Capteur de particules en suspension : DSM501A

6.1 Présentation générale :

Le DSM501A est un détecteur optique élaboré pour évaluer la teneur en particules fines (PM2.5) dans l'atmosphère. Il opère sur la base de la dispersion de la lumière : des particules flottant dans l'air dispersent la lumière générée par une diode émettrice infrarouge, et cette lumière dispersée est captée par un capteur photoélectrique. L'intensité de la lumière dispersée est en relation directe avec la densité de particules présentes dans l'atmosphère. [34]

6.2 Principe de fonctionnement :

Le DSM501A est un détecteur optique élaboré pour évaluer la teneur en particules fines (PM2.5) dans l'atmosphère. Il opère sur la base de la dispersion de la lumière : des particules flottant dans l'air dispersent la lumière générée par une diode émettrice infrarouge, et cette lumière dispersée est captée par un capteur photoélectrique. L'intensité de la lumière dispersée est en relation directe avec la densité de particules présentes dans l'atmosphère. [34]

6.3 Caractéristiques techniques :

Voici les Caractéristiques techniques du Capteur de particules DSM501A :

- Plage de détection : Particules de taille supérieure à 1 μm

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilise pour la réalisation de l'enceinte climatique

- Plage de concentration mesurable : 0 à 1,4 mg/m³
- Sortie : Signal PWM (modulation de largeur d'impulsion)
- Tension d'alimentation : 5V ±10%
- Consommation électrique : Environ 90 mA en fonctionnement, 50 mA en veille
- Température de fonctionnement : -10°C à +65°C
- Humidité de fonctionnement : Jusqu'à 95% HR sans condensation
- Dimensions : 59 mm x 45 mm x 20 mm
- Poids : Environ 25 g. [34]



Figure 15 : Capteur de particules DSM501A. [34]

7. Buzzer piézoélectrique HYDZ :

7.1 Présentation générale :

Le buzzer piézoélectrique HYDZ est un élément électronique qui sert à produire un son en réaction à une impulsion électrique. Dans les systèmes embarqués et IoT, il est souvent employé pour générer des alertes sonores, telles que des avertissements de seuils excédés ou des notifications d'état. Les buzzer piézoélectriques, comme le modèle HYDZ, fonctionnent grâce à l'effet piézoélectrique. Dans ce phénomène, un matériau particulier se déforme lorsqu'une tension est appliquée, générant par conséquent un son. [35]

7.2 Principe de fonctionnement :

Le buzzer piézoélectrique opère selon le principe de l'effet piézoélectrique inversé. Autrement dit, un matériau piézoélectrique (à l'image de la céramique piézoélectrique) se modifie

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilisé pour la réalisation de l'enceinte climatique

mécaniquement lorsqu'on lui impose une tension alternative (AC). Cette distorsion cyclique engendre des vibrations à une fréquence déterminée, produisant un son perceptible. [35]

7.3 Caractéristiques techniques :

Voici les Caractéristiques techniques du piézoélectrique HYDZ :

- Tension nominale : 3 V
- Plage de tension de fonctionnement : 2 ~ 5 V
- Fréquence de résonance : 2300 ± 300 Hz
- Niveau sonore (à 10 cm) : ≥ 85 Db
- Température de fonctionnement : -30°C à $+80^{\circ}\text{C}$
- Température de stockage : -30°C à $+80^{\circ}\text{C}$
- Dimensions (diamètre \times hauteur) : $12 \times 9,5$ mm
- Poids : Environ 2 g. [35]



Figure 16 : Buzzer piézoélectrique HYDZ. [35]

8. Humidificateur Micro USB 20mm 5V :

8.1 Présentation générale :

Il s'agit d'un dispositif d'humidification ultrasonique de petite taille, élaboré pour des projets électroniques à faire soi-même. Il est capable de produire une brume froide grâce à une céramique piézoélectrique intégrée, qui est alimentée en 5V par le biais d'un port Micro USB.

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilisé pour la réalisation de l'enceinte climatique

Ce module est parfait pour concevoir un petit humidificateur, un diffuseur d'essences ou un système automatique de contrôle de l'humidité. [36]

8.2 Principe de fonctionnement :

L'humidificateur ultrasonique emploie un disque piézoélectrique qui, lorsqu'il est alimenté à 5 V, vibre à une fréquence extrêmement haute (approximativement 108 kHz). Ces vibrations produisent des ondes ultrasoniques qui décomposent la surface de l'eau en gouttelettes extrêmement petites, formant ainsi une brume fraîche. Une mèche en coton absorbe régulièrement l'eau, tout en restant en contact avec le disque céramique pour garantir une humidification constante. Cette méthode n'échauffe pas l'eau, ce qui rend l'humidification plus sécurisée et plus efficace pour une utilisation à la maison. [36]

8.3 Caractéristiques techniques :

- Tension d'alimentation : 5 V DC
- Puissance consommée : 2 W
- Fréquence ultrasonique : Environ 108 kHz \pm 3 kHz
- Diamètre du disque céramique : 20 mm
- Humidité relative de fonctionnement : 10 % à 90 % RH
- Accessoires inclus : Câble Micro USB, support, coton-tige absorbant 10 mm
- Température de fonctionnement : 0 °C à 85 °C. [35]



Figure 17 : Humidificateur Micro USB 20mm 5V. [36]

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilisé pour la réalisation de l'enceinte climatique

9. Ventilateur VD 4010MS 9V :

9.1 Présentation générale :

Le ventilateur TIDAR VD 4010MS 9V est un minuscule ventilateur sans balais à courant continu, conçu pour fournir un refroidissement efficace même dans des espaces confinés. Avec sa taille réduite (40 × 40 × 10 mm) et une tension d'entrée de 9 V, il est particulièrement approprié pour la fonction de refroidissement. [37]

9.2 Principe de fonctionnement :

Il fonctionne grâce à un moteur électrique intégré qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique, entraînant les pales pour produire un courant d'air. Le moteur sans balais repose sur des bobines statiques et un rotor doté d'aimants permanents, contrôlé par un circuit électronique minimal qui oscille le courant dans les bobines afin de maintenir sa rotation. [37]

9.3 Caractéristiques techniques :

- Type : Ventilateur brushless à courant continu (DC)
- Dimensions : 40 mm × 40 mm × 10 mm
- Courant nominal : 0,08 A
- Puissance consommée : 0,72 W
- Démarrage : Automatique dès l'alimentation
- Applications typiques : Refroidissement de circuits imprimés, modules embarqués, boîtiers compacts. [37]

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilise pour la réalisation de l'enceinte climatique



Figure 18 : Ventilateur 9V. [37]

10. Le microcontrôleur ESP32 WROOM-32 :

10.1 Présentation générale :

Le module microcontrôleur ESP32-WROOM-32, conçu par Espressif Systems, allie hautes performances, faible consommation énergétique et connectivité sans fil complète en un seul composant de petite taille.

L'un de ses avantages majeurs est l'association simultanée du Wi-Fi et du Bluetooth, offrant une connectivité sans fil à la fois sûre et adaptable. Un circuit RF intégré gère ces fonctionnalités sans fil, incluant une antenne PCB intégrée qui simplifie l'incorporation du module sur des cartes de développement et des produits finaux, sans nécessiter de composants additionnels externes.

Le dispositif est conçu pour une utilisation dans des contextes industriels, supportant une large plage de températures (de -40 °C à +85 °C), ce qui lui confère la solidité nécessaire pour des usages dans des conditions ardues. En outre, il est doté de plusieurs modes d'économie d'énergie, y compris le mode sommeil profond (deep sleep), qui consomme moins de 10 μ A, une caractéristique essentielle pour les systèmes autonomes fonctionnant sur batterie. [38]

10.2 Principe de fonctionnement :

Le ESP32-WROOM-32 fait office de centre névralgique dans un système électronique intégré. Sa mission principale consiste à faire fonctionner un programme intégré, à recueillir des informations issues de capteurs, à traiter ces données, puis à provoquer des actions ou à

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilise pour la réalisation de l'enceinte climatique

transmettre des renseignements par le biais d'interfaces de communication, dont le Wi-Fi ou le Bluetooth.

Le dispositif renferme un processeur Xtensa 32 bits à double cœur, garantissant l'exécution simultanée des tâches et par conséquent, une amélioration notable des performances et de la réactivité. Un des cœurs peut être attribué à l'exécution de tâches en arrière-plan ou à la coordination des communications, alors que l'autre se charge des calculs essentiels ou des échanges avec les capteurs et actionneurs. [38]

10.3 Domaines d'application :

Le ESP32-WROOM-32 est largement utilisé dans de nombreux domaines grâce à sa double connectivité Wi-Fi et Bluetooth. Voici les principaux domaines d'application :

- **Objets connectés (IoT) :** Le ESP32-WROOM-32 est particulièrement approprié pour les applications d'Internet des Objets (IoT) en raison de sa double connectivité sans fil (Wi-Fi et Bluetooth), son faible usage d'énergie et sa capacité à gérer un grand nombre de capteurs et actionneurs en même temps. Dans un environnement IoT, l'ESP32 a la capacité de fonctionner comme un nœud intelligent qui recueille diverses informations (température, humidité, qualité de l'air, mouvement...), les traite sur place et les transmet à un serveur. [39]

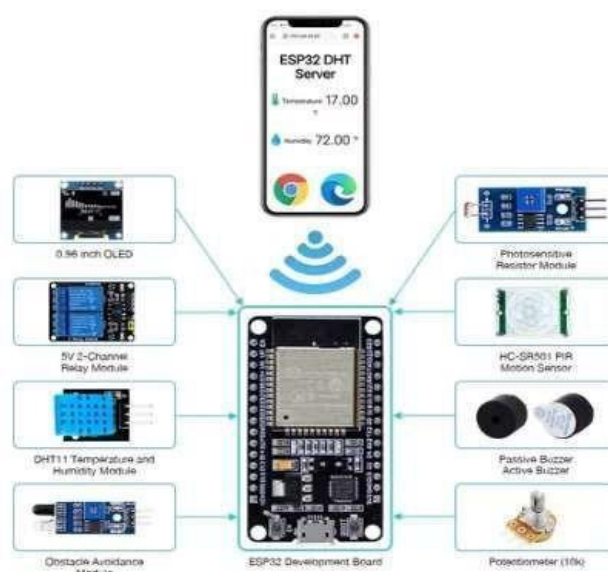


Figure 19 : IoT objets connectés. [39]

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilisé pour la réalisation de l'enceinte climatique

- **Domotique** : Agit comme un contrôleur intelligent des appareils domestiques, jouant ainsi un rôle central. Grâce à sa connexion Wi-Fi, cet appareil peut être connecté à un réseau local, permettant de contrôler des équipements à distance à travers une interface web ou une application mobile. Avec ses multiples broches GPIO, cet appareil est en mesure de contrôler des relais, des détecteurs de mouvement, des capteurs thermiques, des diodes électroluminescentes, des moteurs et même des dispositifs de sécurité. [39]
- **Systèmes de surveillance environnementale** : grâce à sa compétence à connecter divers capteurs tout en garantissant la connexion sans fil pour l'acquisition et la diffusion des informations. Il est capable de lire les données provenant des capteurs qui mesurent la température, l'humidité, la qualité de l'air (gaz CO₂, COV), la luminosité, le taux de poussière ou même la pression atmosphérique grâce à ses entrées analogiques et numériques. [39]
- **Automatisation industrielle** : Dans un environnement industriel, il peut servir de contrôleur local pour superviser et gérer des machines, des moteurs, des relais ou même des capteurs de production (comme les capteurs de position, de température, de vibration, etc.). Il offre aussi la possibilité de transmettre des données en temps réel vers des systèmes de surveillance. [39]
- **Dispositif audio** : Il est aussi employé dans le secteur des appareils audio intelligents, en raison de sa capacité de traitement, de sa mémoire adéquate et surtout de son support du Bluetooth Classique et BLE, ce qui le rend parfait pour les transmissions audios sans fil. Ceci permet la conception d'enceintes Bluetooth, de récepteurs audios, de systèmes d'alerte vocale et même d'assistants vocaux intégrés. [39]

10.4 Justification de choix :

Le choix du microcontrôleur ESP32 pour la réalisation de notre projet de surveillance

environnementale s'est imposé pour plusieurs raisons techniques, économiques et pratiques :

- **Intégration de la connectivité sans fil** : L'ESP32, avec sa capacité Wi-Fi et Bluetooth intégrée, autorise une connexion sans fil à un smartphone, une interface web

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilise pour la réalisation de l'enceinte climatique

locale ou un système centralisé, sans nécessité d'installer des modules externes. Ceci allège l'équipement et diminue le coût total du système.

- **Polyvalence et nombre de broches disponibles** : L'ESP32, doté de plus de 30 GPIO, offre la possibilité de brancher plusieurs capteurs simultanément (MQ135, DHT11, LDR, pression, poussière), un écran OLED, une horloge RTC et des actionneurs tels qu'un relais, une LED et un buzzer, sans nécessiter de composants additionnels comme un expandeur I/O.
- **Puissance de calcul adaptée** : Grâce à son double cœur cadencé jusqu'à 240 MHz et à ses capacités multitâches, l'ESP32 peut traiter les données de plusieurs capteurs, gérer l'affichage local, et héberger une interface web en parallèle sans ralentissement perceptible.
- **Faible consommation énergétique** : L'ESP32, avec ses modes d'économie d'énergie (light sleep, deep sleep), peut être adapté à des projets indépendants ou alimentés par batterie si besoin, tout en conservant une performance optimale.
- **Coût abordable** : Bien qu'il soit riche en fonctionnalités, l'ESP32 est un microcontrôleur économique, parfait pour les projets étudiants ou à budget limité.
- **Large communauté et support logiciel** : L'ESP32 s'intègre parfaitement à l'environnement Arduino IDE, simplifiant ainsi la programmation même pour les utilisateurs moins expérimentés. En outre, une vaste communauté offre un grand volume d'exemples, de bibliothèques et de ressources open-source.

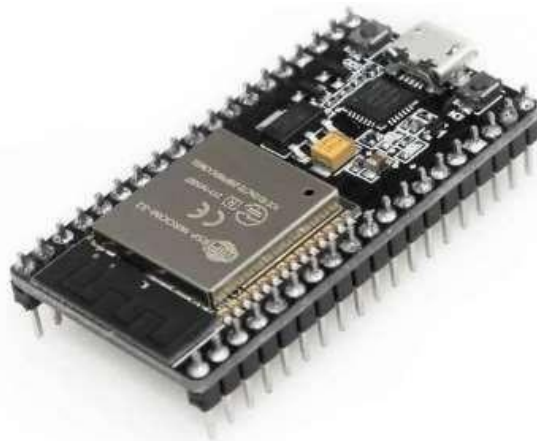


Figure 20 : microcontrôleur ESP32 WROOM-32. [39]

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilise pour la réalisation de l'enceinte climatique

11. Afficheur graphique OLED 1.5" – SSD1107 :

11.1 Présentation générale :

L'écran OLED de 1,5 pouces est un affichage monochrome (habituellement en blanc ou bleu), qui repose sur le contrôleur SSD1107. C'est un panneau d'affichage matriciel OLED (diodes électroluminescentes organiques), donc il n'a pas besoin de rétroéclairage et présente un contraste élevé tout en consommant peu d'énergie. [41]

11.2 Fonction dans le projet :

Dans ce projet, l'afficheur OLED sert à présenter en temps réel :

- Les valeurs mesurées par les capteurs (température, humidité, gaz, poussière, luminosité, pression)
- L'état des actionneurs (relais, LED, humidificateur, buzzer)
- L'heure actuelle fournie par l'horloge RTC DS3231
- Le chronomètre en fonctionnement

Cela permet à l'utilisateur d'avoir un retour visuel immédiat sans passer par l'interface web.

11.3 Caractéristiques techniques :

- Type d'écran : OLED graphique
- Taille : 1.5 pouces
- Résolution : 128 x 128 pixels
- Tension d'alimentation : 3.3V
- Consommation moyenne : Très faible. [41]

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilisé pour la réalisation de l'enceinte climatique



Figure 21 : Afficheur graphique OLED 1.5" – SSD1107. [41]

12. Horloge temps réel (RTC) DS3231 :

12.1 Présentation générale :

Le DS3231 est un module d'horloge temps réel (RTC - Real Time Clock) extrêmement précis, conçu pour conserver l'heure même en l'absence de courant ou lors du redémarrage du microcontrôleur. Ce dispositif est fondé sur un oscillateur à compensation de température intégré, lui conférant une stabilité supérieure en comparaison aux modules RTC traditionnels tels que le DS1307. [42]

12.2 Fonction dans le projet :

Dans ce projet, le DS3231 permet de :

- Maintenir l'heure actuelle de manière fiable, même en cas de coupure de l'ESP32.
- Afficher l'heure sur l'écran OLED.
- Gérer des actions programmées dans le temps si nécessaire (par ex. : activer un relais à une heure précise).
- Fournir un cadre temporel précis pour le chronomètre intégré.
-

12.3 Caractéristiques techniques :

- Référence : DS3231
- Alimentation : 3.3V ou 5V

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilisé pour la réalisation de l'enceinte climatique

- Fonctions intégrées : Horloge, calendrier, alarmes, température interne
- Type: RTC (Real-Time Clock). [42]



Figure 22 : Horloge temps réel (RTC) DS3231. [43]

13. Plaque chauffante KT-20180827 :

13.1 Présentation générale :

L'appareil électrothermique KT-20180827 est destiné à chauffer une surface de manière maîtrisée. On l'utilise fréquemment dans des contextes industriels, de prototypage ou en laboratoire, où une source thermique précise est indispensable.

13.2 Fonction dans le projet :

Dans ton système, cette plaque chauffante est pilotée par un relais commandé par l'ESP32. Elle permet de chauffer une zone spécifique selon les données collectées par les capteurs (par exemple, pour maintenir une température constante dans un boîtier, un incubateur, ou pour une expérience nécessitant un chauffage contrôlé).

13.3 Caractéristiques techniques :

- Modèle : KT-20180827
- Tension d'alimentation : 220 V AC
- Matériau : base en aluminium avec résistance chauffante intégrée
- Interface de contrôle : généralement connectée via un relais commandé par un microcontrôleur. [44]

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilisé pour la réalisation de l'enceinte climatique



Figure 23 : Plaque chauffante KT-20180827. [44]

14. Présentation de logiciel de programmation :

14.1 Arduino IDE :

L'IDE Arduino (Integrated Development Environment) est un environnement de développement convivial et pratique, élaboré pour faciliter la programmation de microcontrôleurs tels que l'ESP32. Ce dernier offre la possibilité de rédiger, compiler et téléverser du code en C/C++ grâce à une interface utilisateur intuitive. L'IDE Arduino, grâce à sa vaste communauté, ses bibliothèques abondantes et son adaptabilité à divers capteurs et modules, est devenu un outil incontournable pour les projets embarqués, éducatifs ou professionnels. [45]

L'IDE arduino permet :

- Rédiger du code en langage C/C++ adapté aux microcontrôleurs.
- Compiler le programme pour vérifier qu'il ne contient pas d'erreurs.
- Gérer les bibliothèques pour intégrer facilement des composants externes.
- Configurer différents types de cartes grâce au gestionnaire de cartes. [45]
-

14.2 L'interface du logiciel Arduino IDE :

L'interface de l'Arduino IDE a été pensée pour être simple, intuitive et accessible, y compris pour ceux qui débutent. Elle comprend plusieurs éléments majeurs :

- Menus déroulants : Positionnés en haut de la fenêtre, ils offrent une variété de fonctions du logiciel, comme la manipulation des fichiers, la modification du code, l'upload, et plus encore.

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilise pour la réalisation de l'enceinte climatique

- Boutons d'accès rapides : Situés sous les menus, ces boutons offrent la possibilité d'effectuer rapidement des tâches habituelles telles que la vérification du code, le transfert vers la carte, l'initiation d'un nouveau fichier, et ainsi de suite.
- Onglets des fichiers ouverts : Ils permettent de naviguer entre les différents fichiers ouverts dans l'éditeur.
- Éditeur de texte : Zone principale où l'utilisateur écrit le code source du programme.
- Rubrique d'information : Affiche les opérations en cours, telles que la compilation ou le téléversement.
- Détail des informations de compilation : Montre les notifications produites pendant la compilation du code, y compris les erreurs et les alertes.
- Ligne de statut : Indique le microcontrôleur actuellement sélectionné et le port de communication utilisé. [45]

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilisé pour la réalisation de l'enceinte climatique

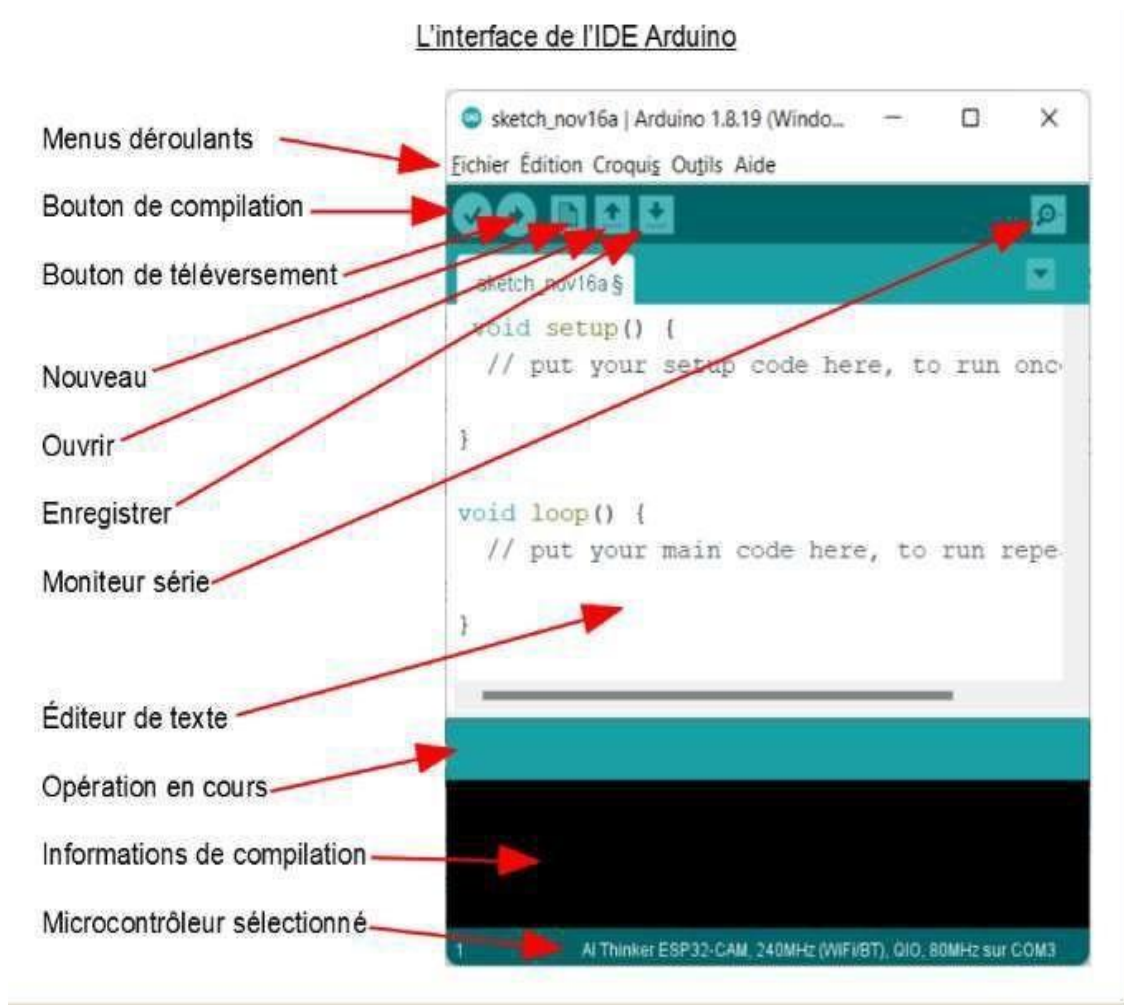


Figure 24 : l'interface du logiciel Arduino IDE. [45]

14.3 Langage de programmation Arduino :

Dans l'environnement Arduino IDE, le langage de programmation utilisé s'appuie sur le langage C/C++, qui est couramment employé dans la conception de systèmes embarqués. Toutefois, Arduino a facilité sa syntaxe et son environnement pour le rendre accessible aux novices tout en préservant une forte performance pour les utilisateurs expérimentés.

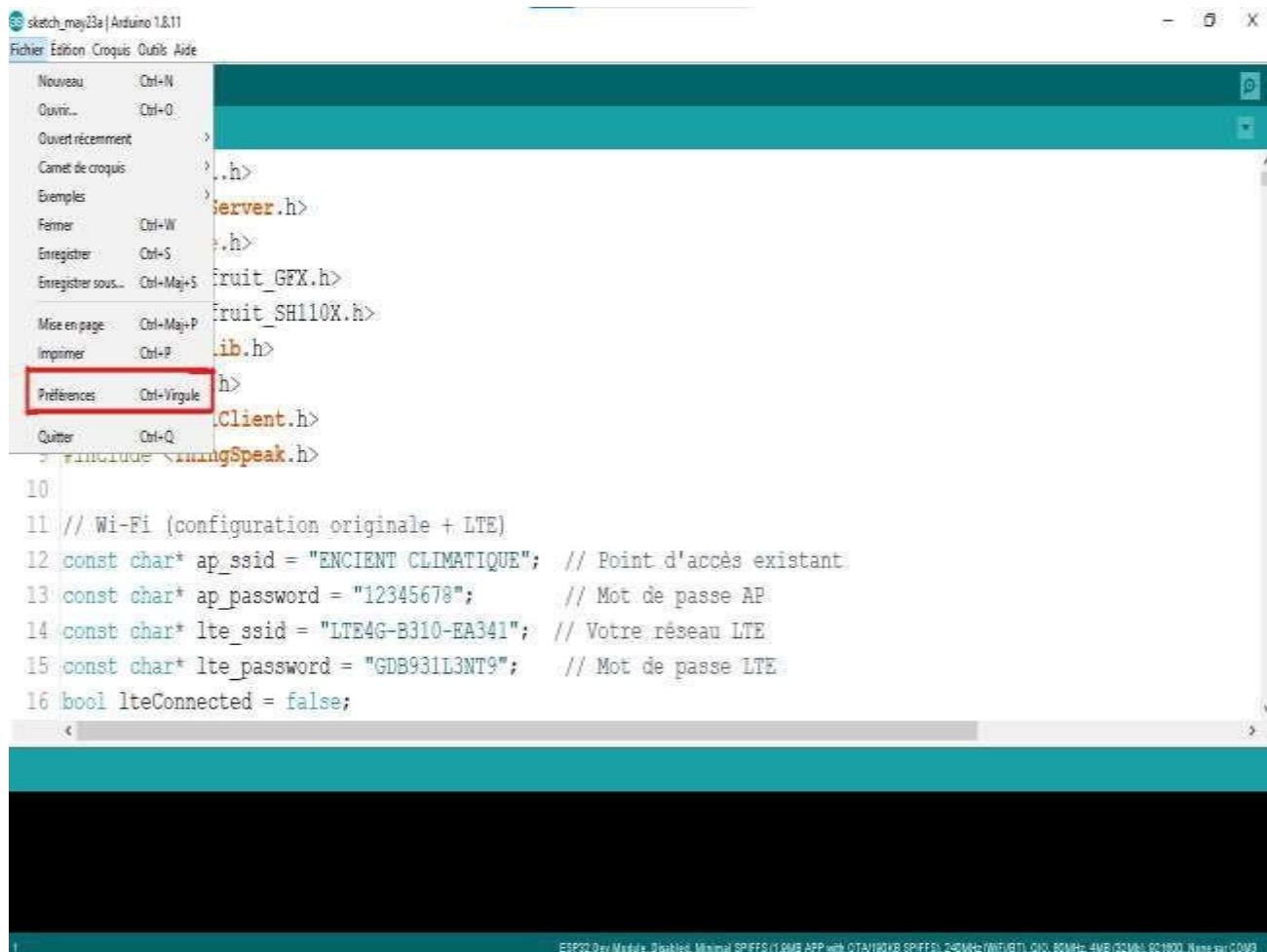
15. Arduino IDE et carte ESP32 :

Pour pouvoir programmer notre ESP32 depuis l'IDE Arduino, il est nécessaire d'ajouter sa prise en charge en suivant ces étapes :

- 1- Ouvrir Arduino IDE

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilise pour la réalisation de l'enceinte climatique

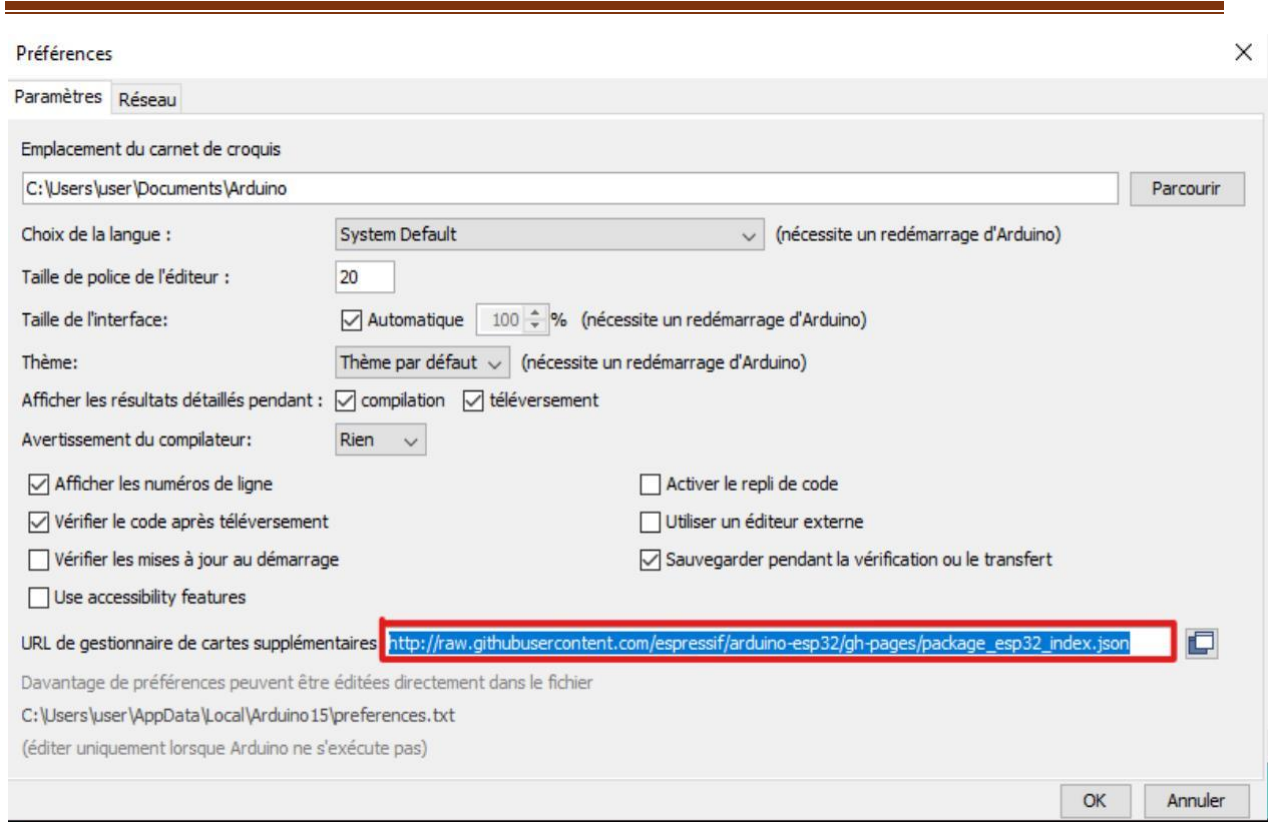
2- Aller dans Fichier > Préférences



3- Dans le champ URL de gestionnaire de cartes supplémentaires, on ajoute cette adresse :

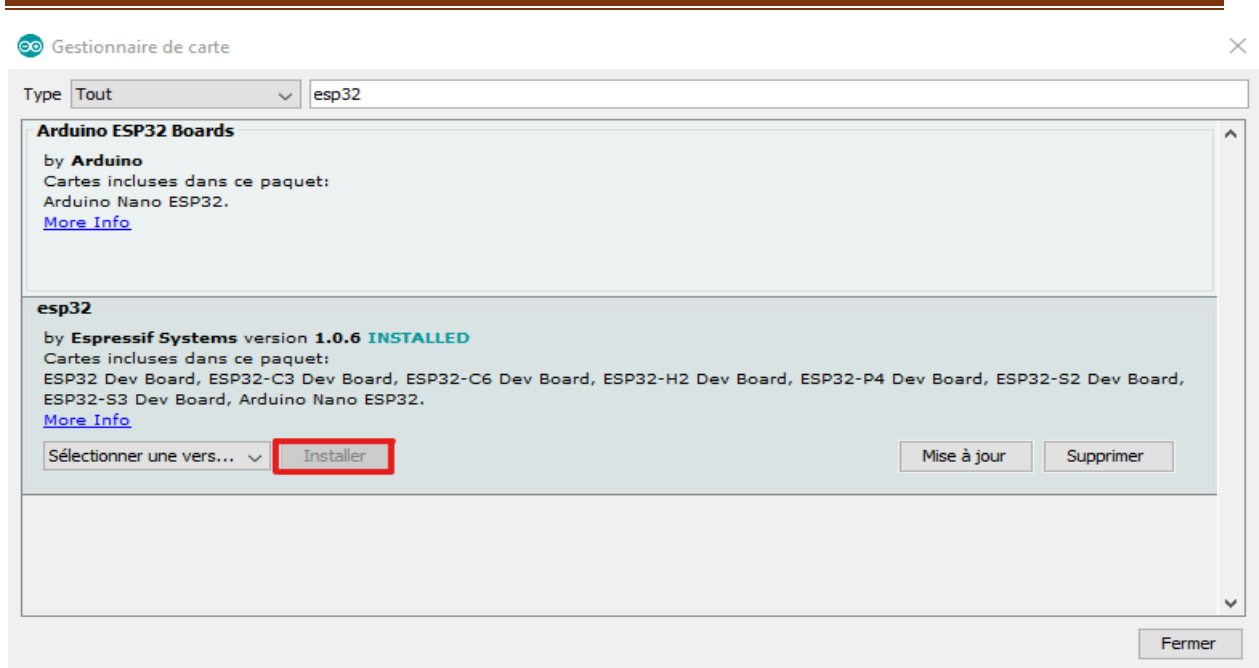
https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/gh-pages/package_esp32_index.json

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilisé pour la réalisation de l'enceinte climatique



- 4- Ensuite cliquer sur OK.
- 5- Ensuite, aller dans Outils
- 6- Type de carte
- 7- Gestionnaire de cartes.
- 8- Rechercher esp32 et cliquer sur *Installer*.

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilisé pour la réalisation de l'enceinte climatique



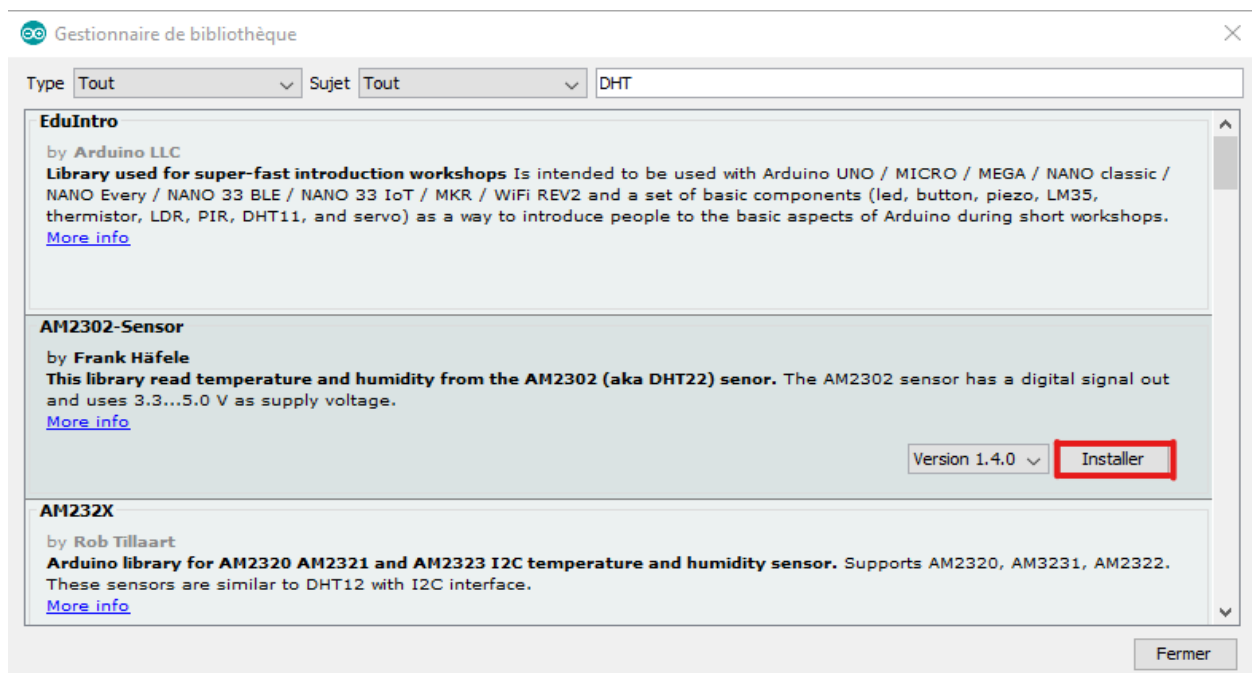
Une fois l'ESP32 reconnu par l'IDE, il est possible d'écrire et de télé verser du code. [45]

On peut également ajouter facilement des fonctionnalités supplémentaires à notre projet, telles que la prise en charge de capteurs, d'écrans, de modules de communication ou d'horloges temps réel, grâce au système de gestion de bibliothèques intégré dans l'Arduino IDE.

Pour ouvrir le gestionnaire de bibliothèques :

- 1- Lancer Arduino IDE.
- 2- Aller dans Croquis.
- 3- Inclure une bibliothèque.
- 4- Gérer les bibliothèques.
- 5- Rechercher le nom de la bibliothèque souhaitée [ex. : DHT].

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilisé pour la réalisation de l'enceinte climatique



6- Cliquer sur Installer. [45]

Chapitre 2 : Description du matériel et du logiciel utilise pour la réalisation de l'enceinte climatique

16. Conclusion :

Ce chapitre offre une présentation approfondie des capteurs employés dans le projet, soulignant leur importance cruciale pour la collecte d'informations environnementales telles que la température et l'humidité. Chaque capteur a été sélectionné en tenant compte de ses spécifications techniques et de sa concordance avec la carte ESP32. Nous avons aussi examiné les logiciels employés pour concevoir et programmer le système, y compris l'Arduino IDE, qui propose un environnement accessible, intuitif et efficace pour la rédaction, la compilation et le transfert du code. L'interface de gestion de bibliothèques intégrée simplifie l'intégration de nouvelles fonctionnalités, facilitant ainsi le support rapide des capteurs et modules externes.

Chapitre 3 :

Réalisation de l'enceinte climatique

1. Introduction :

Une fois les exigences fonctionnelles et techniques du système établies, cette section de mémoire se concentre sur la réalisation pratique de l'enceinte climatique intelligente. Le but est de contrôler et d'ajuster l'environnement intérieur d'un espace fermé en utilisant une carte ESP32, qui centralise la collecte des données provenant de différents capteurs et commande automatiquement les actionneurs selon des seuils configurables.

La mise en œuvre repose sur une démarche intégrée qui combine des composants matériels (tels que les capteurs, relais, actionneurs, écran OLED et horloge RTC) et une structure logicielle élaborée en utilisant le langage Arduino C++. Le dispositif propose une interface de contrôle local via un serveur web intégré, ainsi qu'une surveillance à distance par l'intermédiaire de l'interface ThingSpeak. De plus, il opère de façon indépendante grâce à la connectivité LTE.

2. Présentation du logiciel ISIS Proteus :

Avant l'installation réelle, le logiciel ISIS Proteus a été employé pour la simulation afin de confirmer la conception du système. Ce programme sert d'outil de conception assistée par ordinateur performant, facilitant la modélisation, la simulation et l'essai de circuits électroniques en mode virtuel.

ISIS (Intelligent Schematic Input System) constitue un des modules majeurs de la suite Proteus, qui est couramment employée dans le domaine de l'ingénierie électronique pour la conception rapide de prototypes de systèmes intégrés. Il offre la possibilité de créer des circuits électroniques complets, d'incorporer des éléments analogiques et numériques, ainsi que de reproduire leur comportement dynamique en direct. On peut aussi y importer du code Arduino ou de microcontrôleur (tel que celui de l'ESP32) pour reproduire le comportement logiciel intégré à l'équipement.

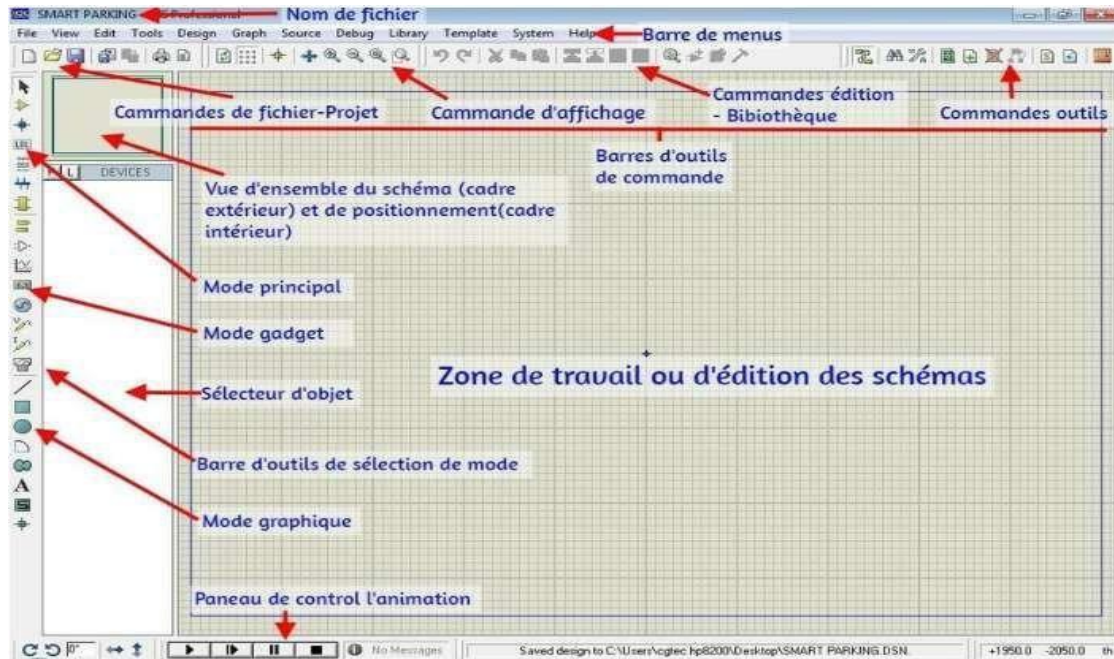


Figure 25 : Interface de Proteus. [46]

3. Teste déferent capteur sur la lab d'essai :

Avant l'intégration définitive dans l'environnement climatique, chaque capteur a été soumis à des tests individuels sur un banc d'essai (laboratoire de test) pour confirmer son bon fonctionnement, sa précision et sa compatibilité avec le microcontrôleur ESP32. Ces essais ont été effectués en utilisant des connexions temporaires sur un prototype (breadboard), en employant un code de test spécifique pour chaque module.

Chaque capteur a donc été vérifié individuellement sur le lab d'essai, ce qui a permis d'assurer la fiabilité des mesures avant l'intégration définitive dans l'enceinte climatique. Ces tests ont également permis de calibrer certains seuils de fonctionnement (ex. : qualité de l'air, humidité minimale) en conditions réelles.

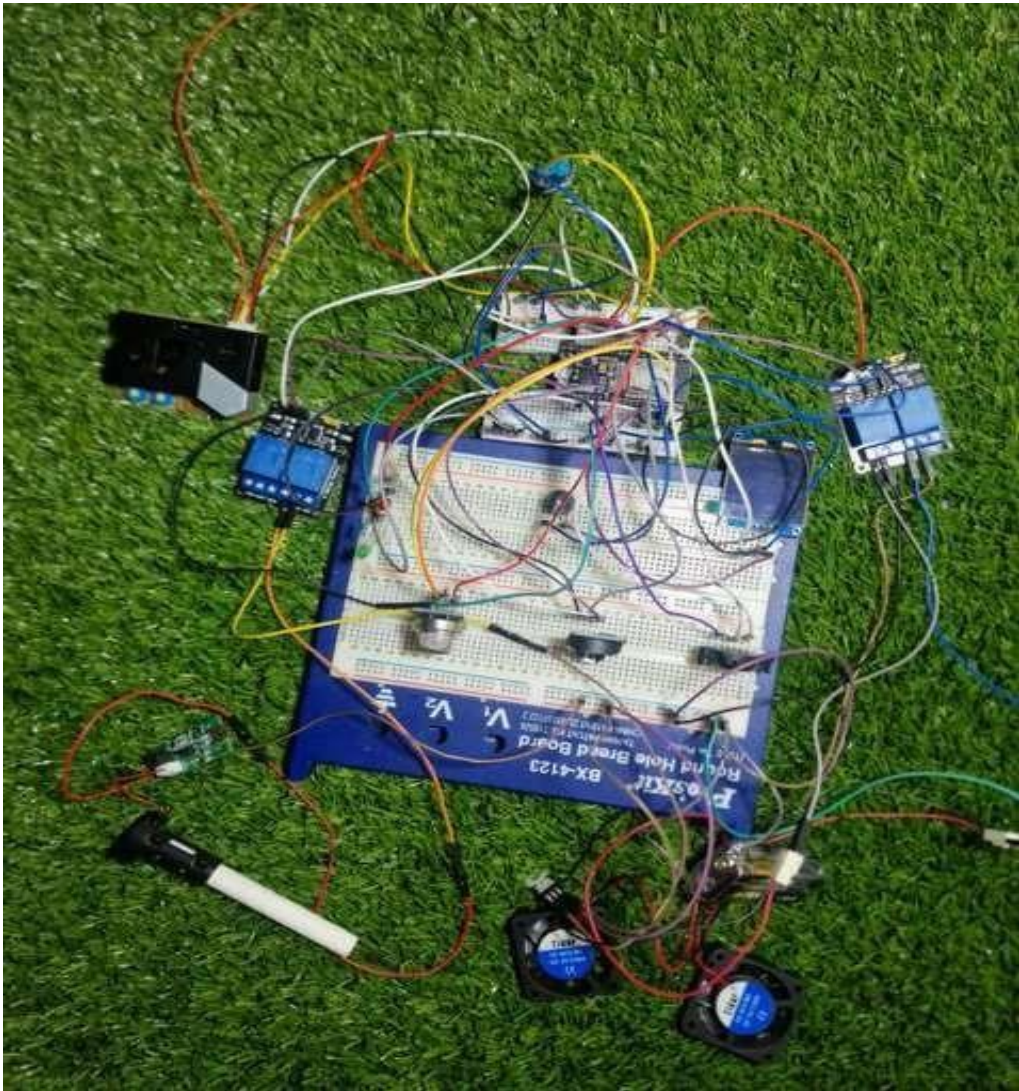


Figure 26 : Teste déférent capteur sur la lab d'essai.

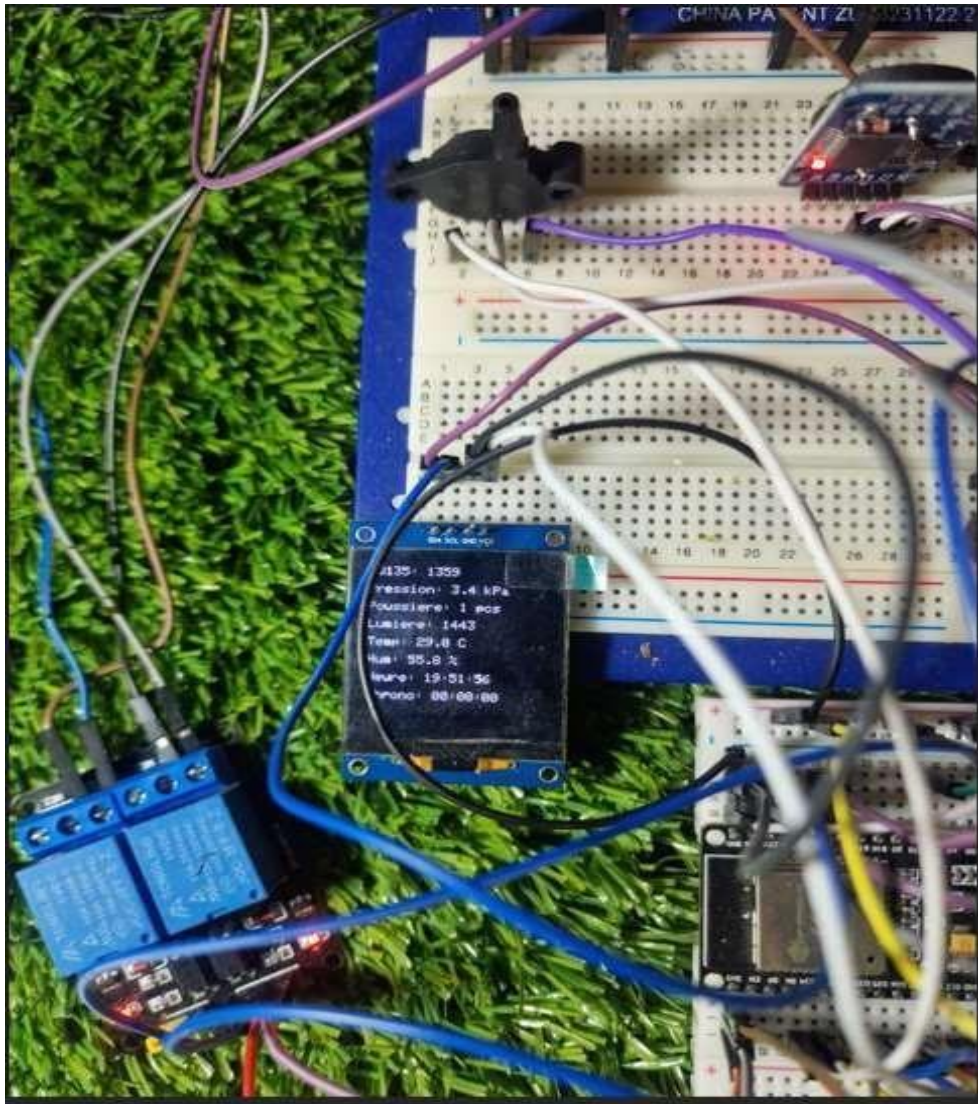


Figure 27 : Fonctionnement des circuits sur la lab d'essai.

4. Réalisation de circuit imprimé :

Pour garantir une intégration électronique solide et efficace, la conception d'un circuit imprimé (typon) s'est révélée être une phase cruciale du projet. Le typon offre la possibilité de rassembler l'ensemble des composants électroniques sur une unique carte, garantissant ainsi des liaisons nettes et pérennes entre ces derniers. Grâce à un logiciel de conception assistée par ordinateur, tel que Proteus, le schéma électrique a été transformé en une implantation physique, avec le routage des pistes en tenant compte des contraintes techniques et de la disposition optimale des composants.

Une fois le typon finalisé, il a été transféré sur un support en cuivre pour l'étape de gravure, assurant ainsi la fabrication d'un circuit fonctionnel, compact et adapté à l'enceinte

climatique. Ce circuit imprimé contribue à la fiabilité, à l'organisation et à la maintenance du système global.

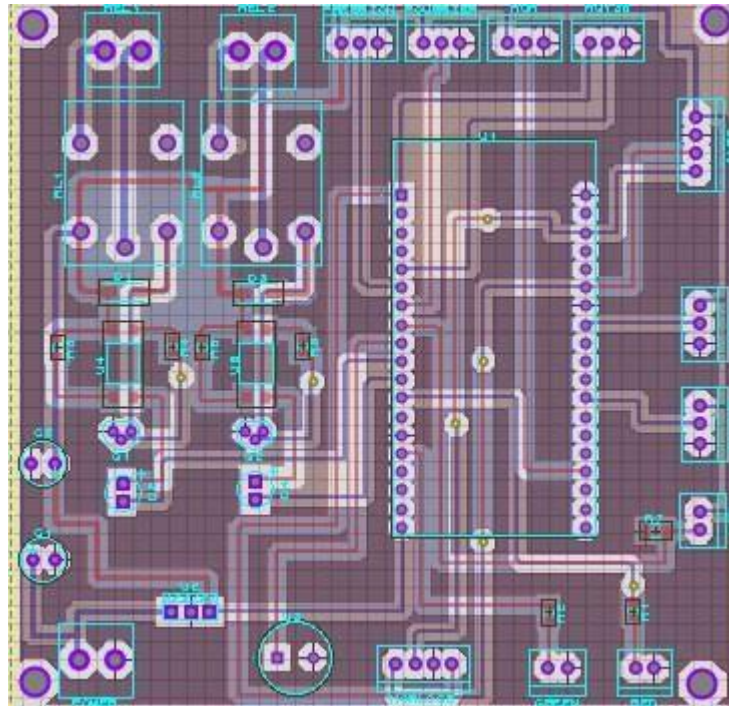


Figure 28 : circuit imprimé (typon).

4.1 Les étapes de la fabrication de la plaque :

- **Coupe** : On Découpe, à l'aide d'une cisaille, la plaque Epoxy /cuivre aux dimensions du futur circuit imprimé.
- **Préparation** : On place le typon dans l'insoleuse en s'assurant de son orientation. Pour procéder à l'insolation, il est nécessaire d'enlever le film protecteur opaque qui préserve la couche photosensible des rayons ultraviolets de la lumière ambiante.
- **Insolation** : On Ferme le capot protecteur de l'insoleuse et réglez la minuterie sur 2 min 30 sec. Les ultra-violets émis par les tubes de l'insoleuse vont détruire la couche photosensible aux endroits non protégés par le tracé du typon.
- **Révélation** : On met la plaque dans le bain révélateur le produit désagrège la couche photo-sensible brûlée par les ultra-violets, ne laissant que le tracé des futures pistes sur la couche de cuivre.
- **Gravure** : On place la plaque dans la graveuse le perchlorure de fer décompose le cuivre qui n'est pas protégé par la couche photosensible : le cuivre sera donc éliminé sur toute la plaque sauf sur les pistes tracées sur le typon. [47]

5. Branchement et programmation des captures de la station :

Le système de l'enceinte climatique repose sur l'intégration de plusieurs capteurs connectés à la carte ESP32. Chaque capteur a été câblé en respectant ses caractéristiques électriques et ses broches de sortie.

5.1 Capteur de gaz (MQ135) :

Le capteur MQ135 est utilisé pour détecter la concentration de gaz polluants dans notre projet, le capteur est alimenté en 3.3V, et sa sortie analogique est connectée à la broche GPIO34 de l'ESP32.

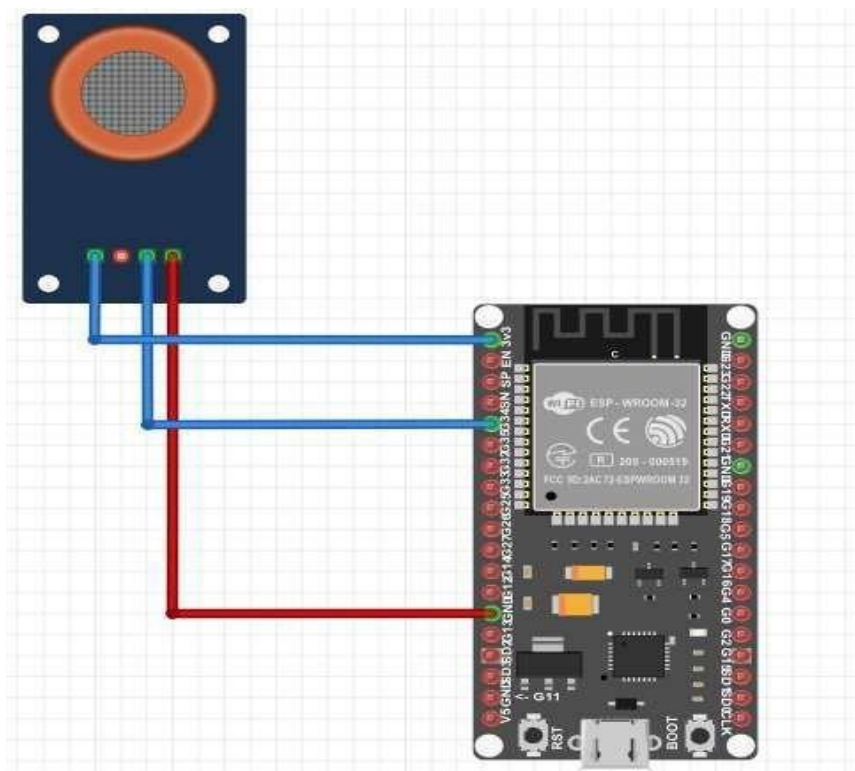


Figure 29 : Schéma de branchement de capture de gaz MQ135.

5.2 Capteur de pression MPX5100GVP :

Le capteur de pression utilisé dans ce projet est capable de détecter des variations de pression atmosphérique. Ce capteur permet de surveiller en temps réel la pression atmosphérique à l'intérieur de l'enceinte climatique. Les données analogiques sont lues par le microcontrôleur ESP32 via la broche GPIO35 est alimentation vers 5.

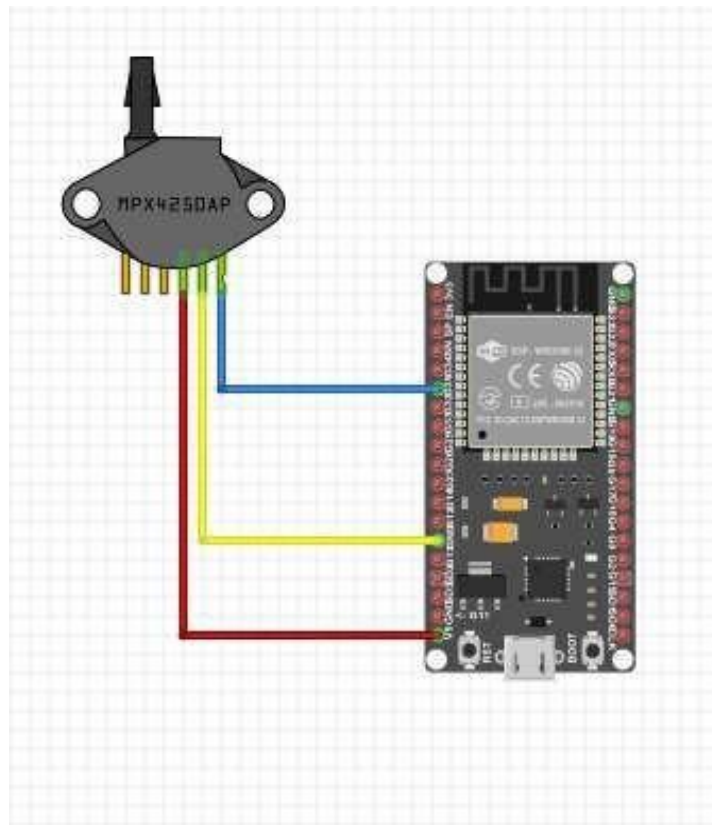


Figure 30 : Schéma de branchement de capture de pression.

5.3 Capture de température et humidité DH-11 :

Le DHT11 est un capteur numérique combiné qui permet de mesurer la température ambiante ainsi que l'humidité relative de l'air est connectée à l'ESP32 via trois fils : l'alimentation 5V et la masse (GND) et la broche de données GPIO19.

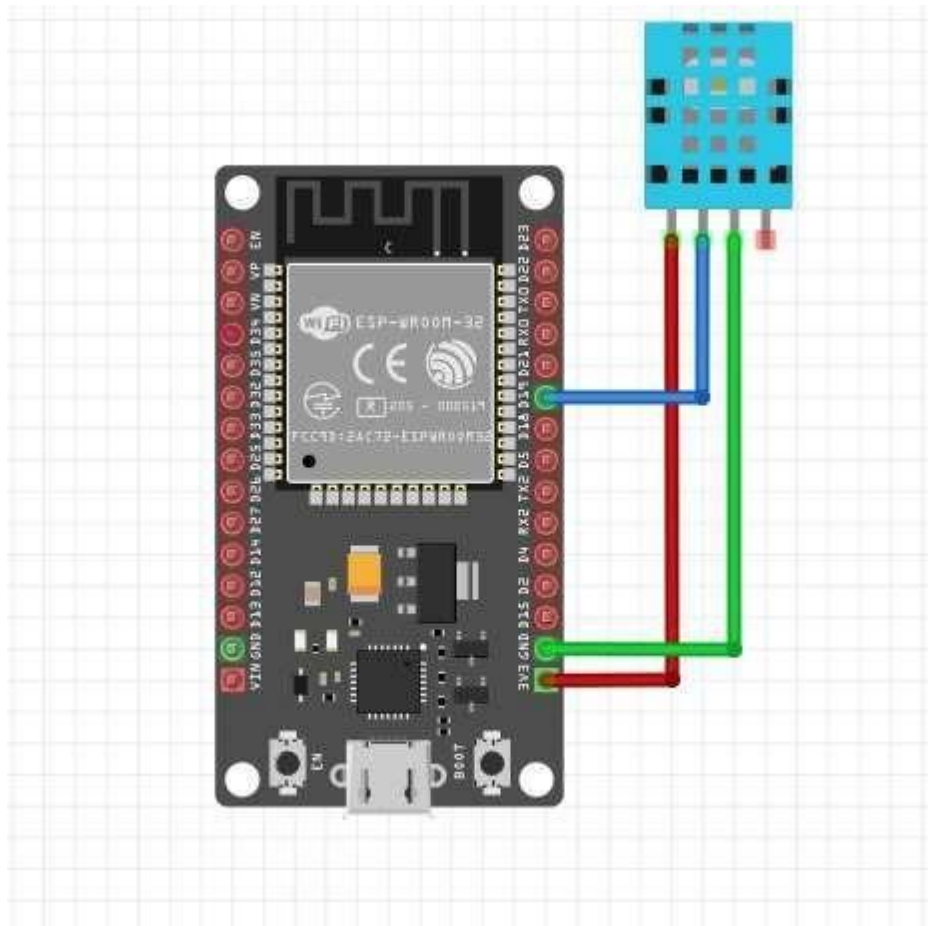


Figure 31 : Schéma de branchement de Capture de température et humidité

5.4 Capteur de particules en suspension DSM501A :

Le capteur de poussière DSM501A utilise un capteur optique à LED infrarouge pour détecter les particules fines en suspension dans l'air. Il est alimenté en 5V, et GND est reliée à la masse (GND) et la sortie P1 est utilisée pour le GPIO 32 de l'ESP32.

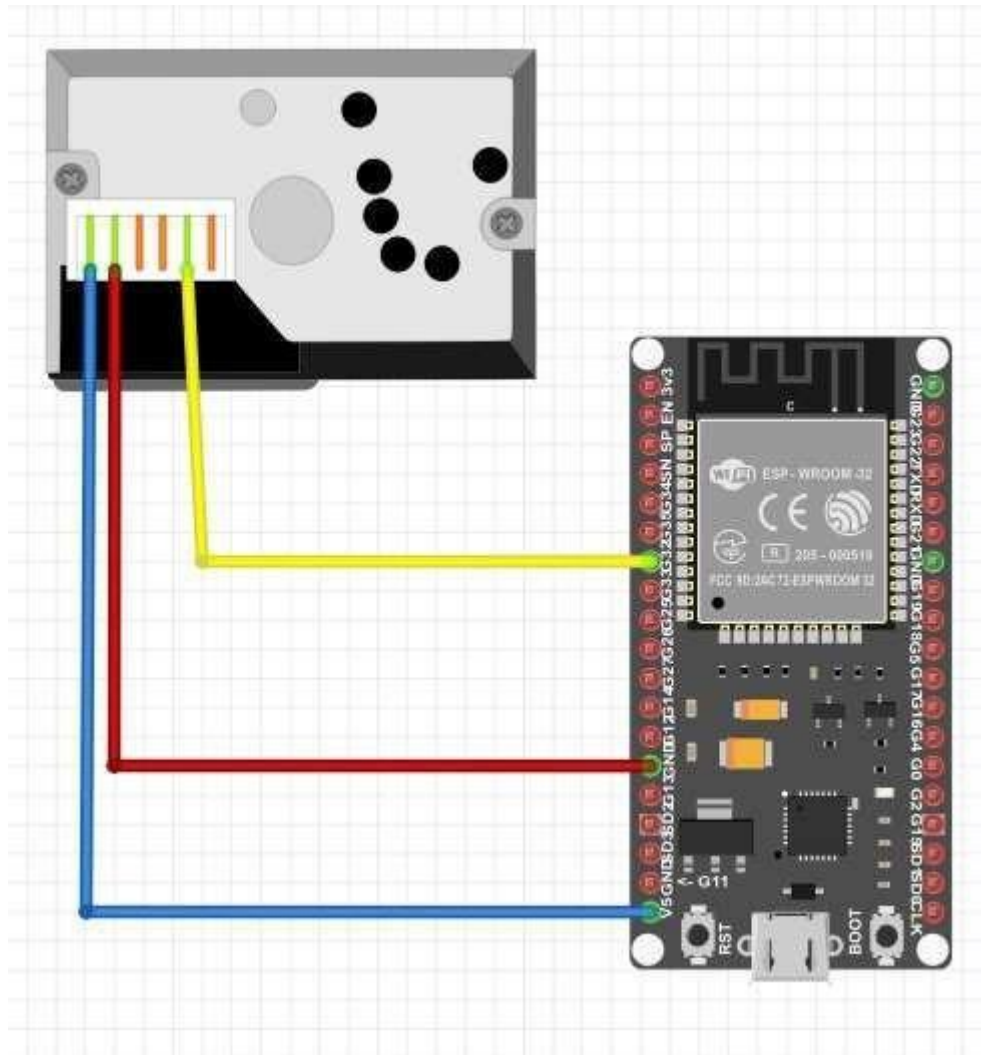


Figure 32 : Schéma de branchement de Capteur de particules DSM501A.

5.5 Afficheur graphique OLED 1.5" – SSD1107 :

L'écran OLED utilisé dans ce projet est un modèle de 1.5 pouces la broche VCC de l'écran est connectée à la sortie 3.3V de l'ESP32 pour l'alimenter, tandis que la broche GND est reliée à la masse (GND) de l'ESP32. Pour la communication I2C, la broche SCL (Serial Clock) de l'écran est connectée à la broche GPIO22 de l'ESP32, et la broche SDA (Serial Data) est connectée à la GPIO21.

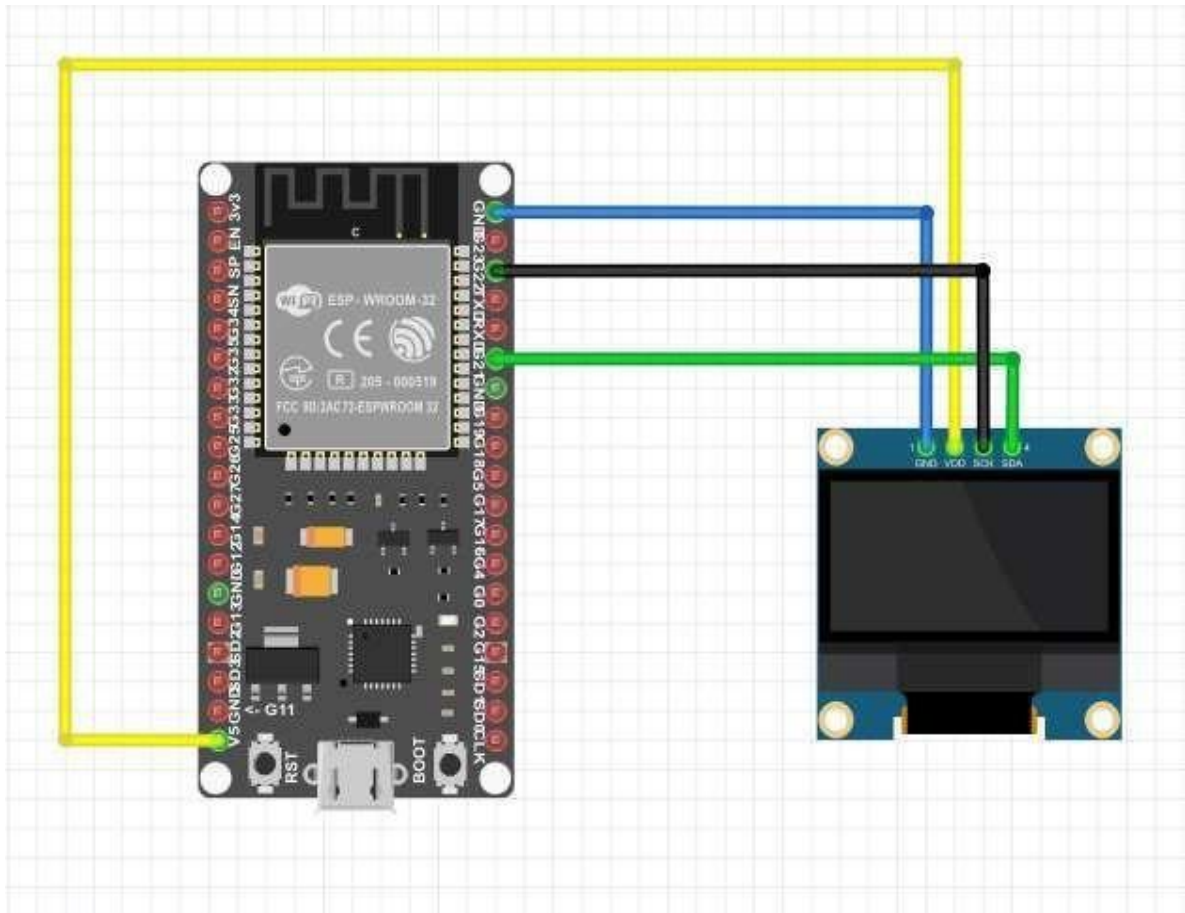


Figure 33 : Schéma de branchement Afficheur OLED 1.5.

5.6 Horloge temps réel (RTC) DS3231 :

Le module d'horloge temps réel (RTC) DS3231 est utilisé pour maintenir une mesure précise du temps, même en cas de redémarrage ou de coupure de courant, grâce à sa pile bouton intégrée. La broche VCC du module est connectée à la sortie 3.3V de l'ESP32, et la broche GND est reliée à la masse GND. Pour la communication, la broche SCL du DS3231 est reliée à la broche GPIO22 de l'ESP32, tandis que la broche SDA est connectée à la GPIO21.

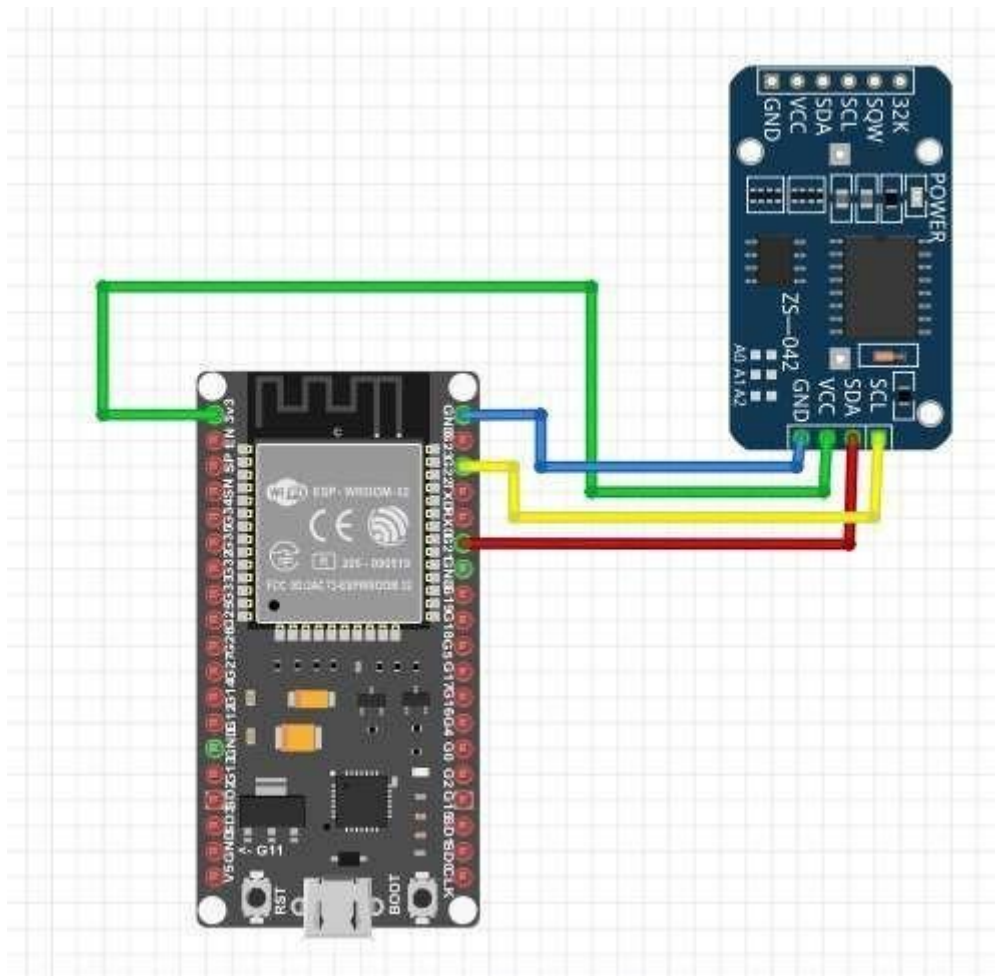


Figure 34 : Schéma de branchement d'Horloge (RTC) DS3231.

5.7 Buzzer piézoélectrique :

Le buzzer utilisé dans ce projet est un composant d'alerte sonore. Son branchement est simple : la broche positive (VCC) du buzzer est connectée à la broche GPIO25, tandis que la broche négative (GND) est reliée à la masse (GND) de l'ESP32.

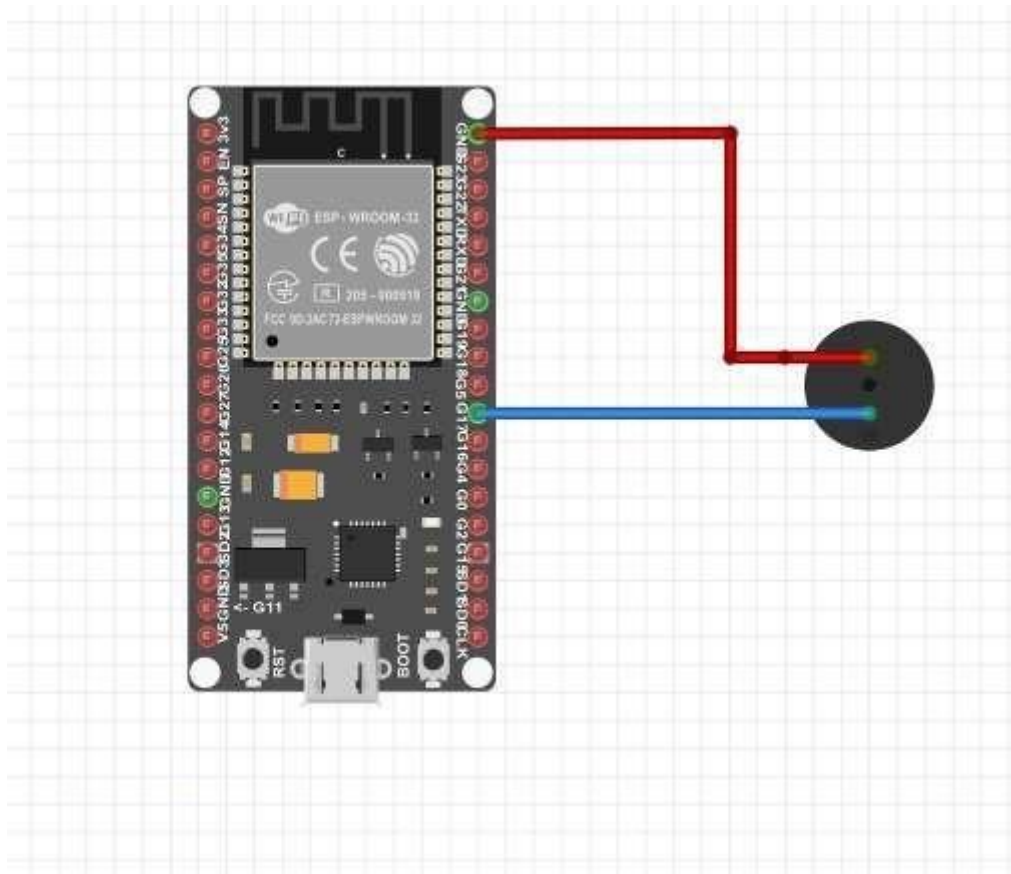


Figure 35 : Schéma de branchement de buzzer.

5.8 Capteur de luminosité (LDR) et les lampes LED :

Le capteur de luminosité utilisé dans ce projet est une photorésistance. Pour l'exploiter avec l'ESP32, la LDR est câblée en pont diviseur de tension avec une résistance fixe de $10\text{ k}\Omega$. L'une des extrémités de la LDR est connectée au 3.3V, et l'autre à la jonction entre la résistance et l'entrée analogique GPIO 33 de l'ESP32.

Dans ce projet, deux LED de signalisation sont utilisées pour indiquer visuellement l'état du système. La LED verte signale un fonctionnement normal, tandis que la LED rouge alerte. La LED rouge est connectée à GPIO 14 et la LED verte est connectée à GPIO 13 de l'ESP32 à travers une résistance de limitation de $220\ \Omega$ pour éviter de les endommager.

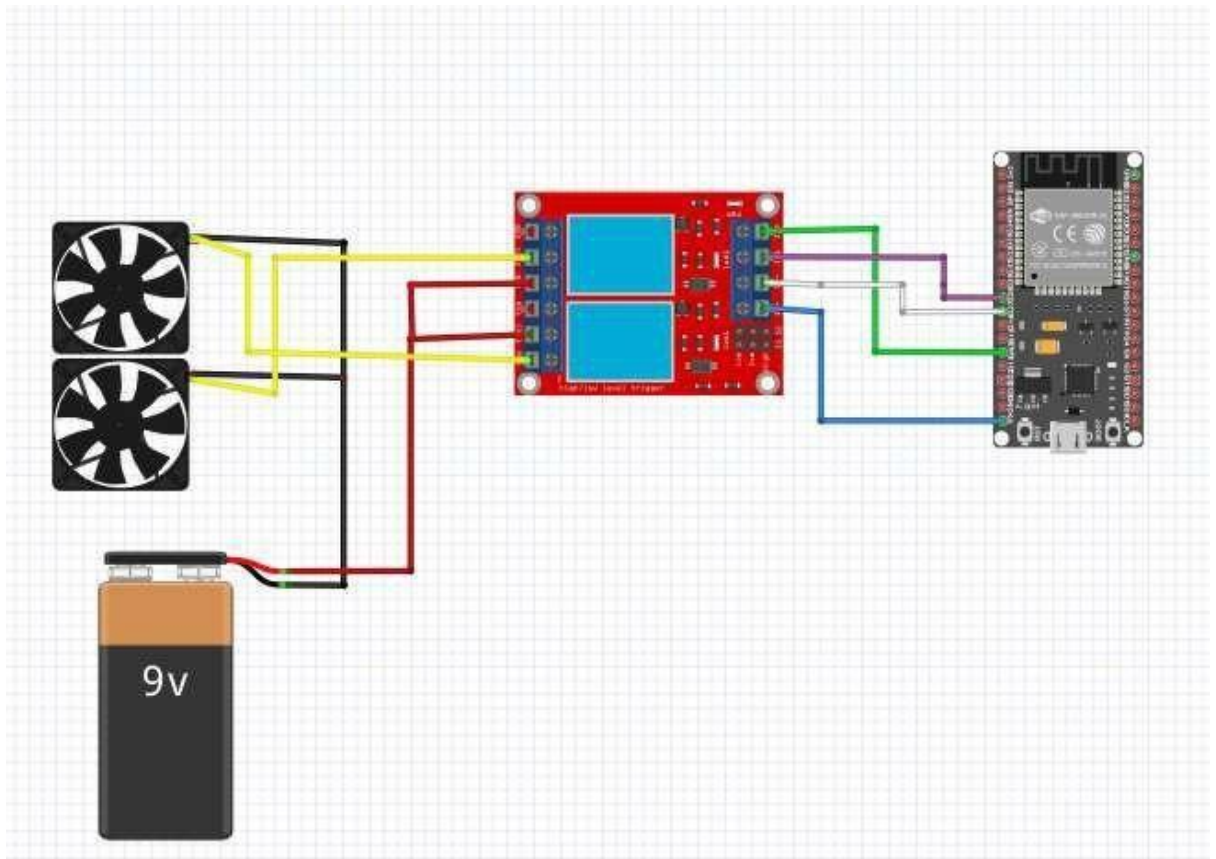


Figure 37 : Schéma de branchement des Ventilateur

5.10 Plaque chauffante et humidificateur ultrasonique :

La plaque chauffante utilisée dans ce projet est un élément chauffant fonctionnant sous une tension de 220V. Pour des raisons de sécurité et de compatibilité avec l'ESP32, son activation est assurée à l'aide d'un module relais est contrôlé par l'ESP32 via la broche numérique GPIO 16.

L'humidificateur ultrasonique utilisé dans cette enceinte climatique est alimenté à l'aide d'une batterie 9V, associée à un régulateur de tension, permettant d'abaisser la tension à 5V stable nécessaire à son fonctionnement. Cette tension régulée alimente ensuite l'humidificateur. Son activation est assurée à l'aide d'un module relais est contrôlé par l'ESP32 via la broche numérique GPIO 15.

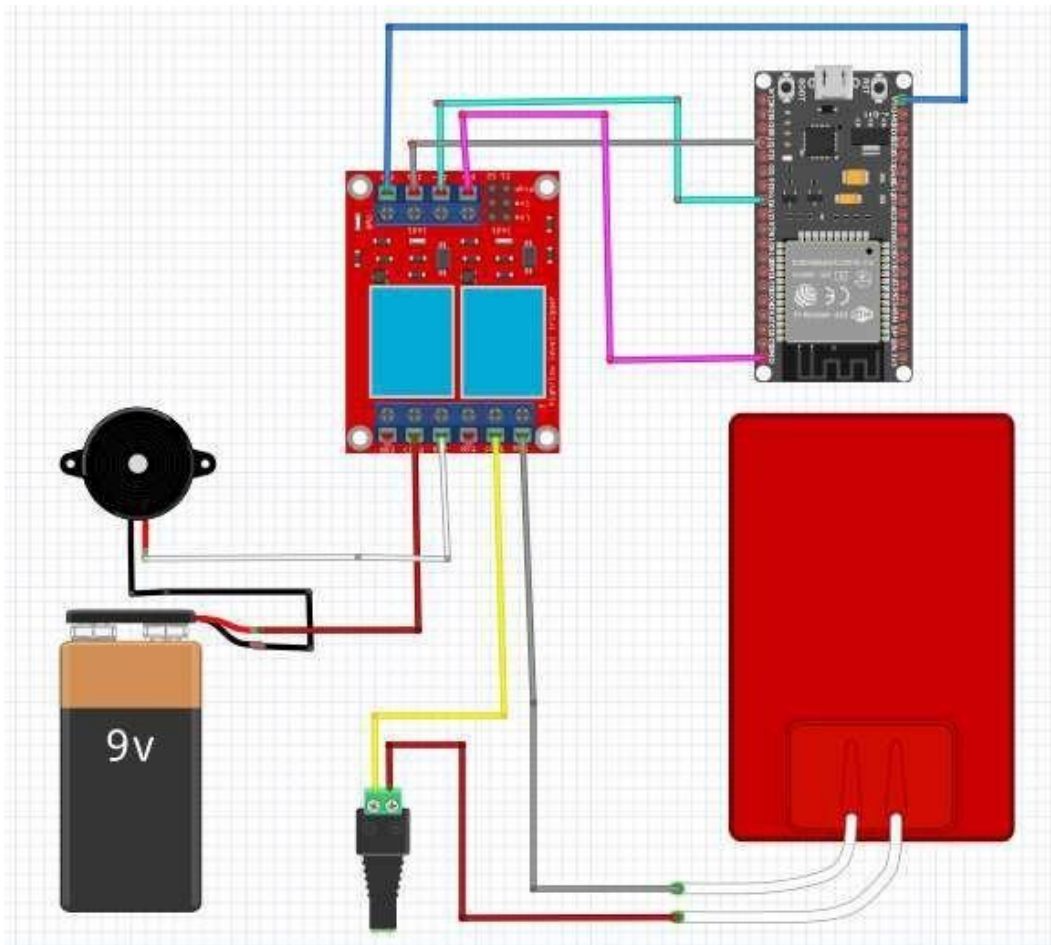


Figure 38 : Schéma de branchement de Plaque chauffante et humidificateur.

5.11 Schéma global du système :

Le schéma global représente l'architecture matérielle complète de la station climatique connectée. Il inclut tous les capteurs, actionneurs, composants d'interface et le microcontrôleur ESP32.

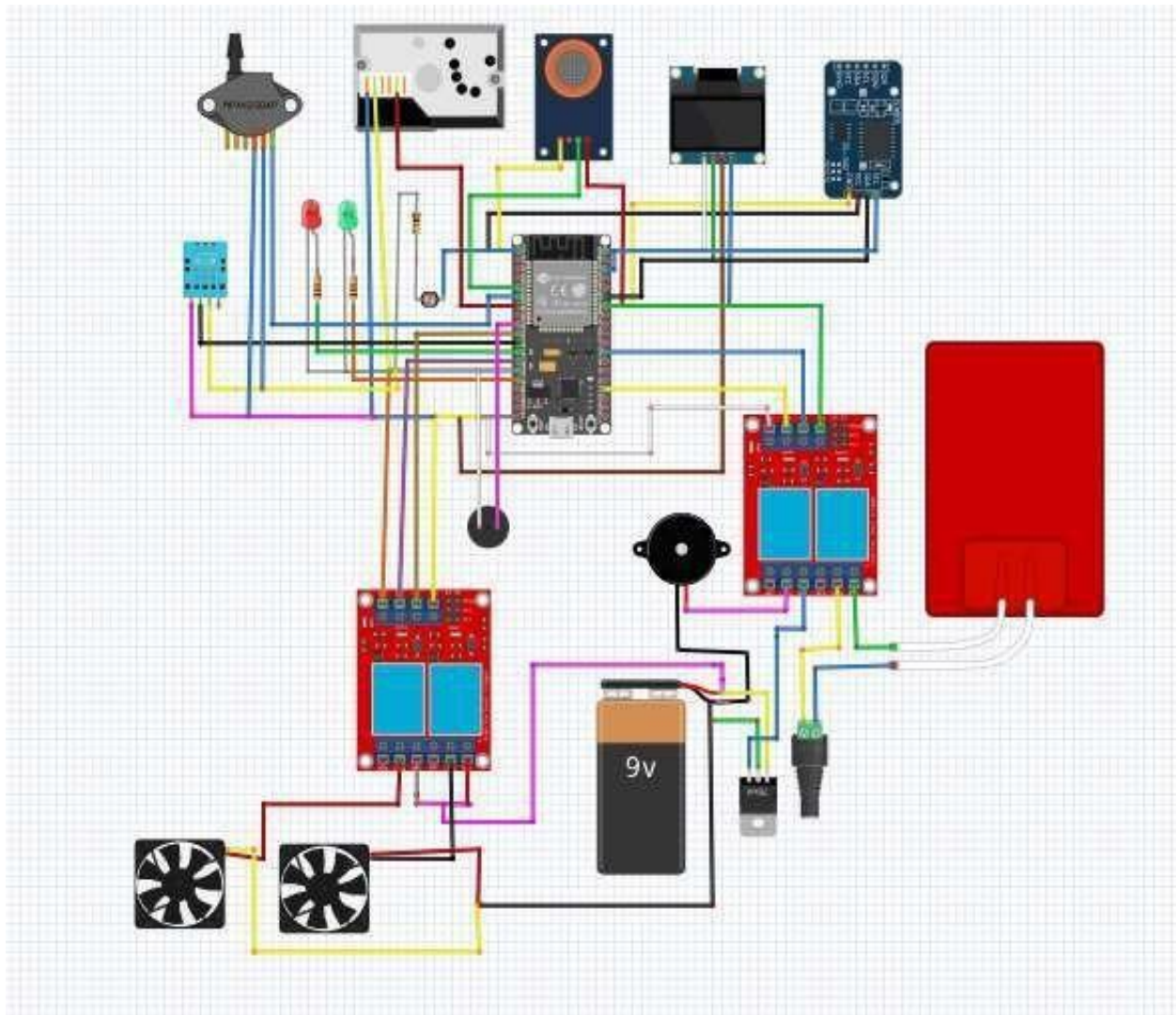


Figure 39 : Schéma global du système.

6. Création de la communication à distance :

6.1 Communication avec ThingSpeak :

ThingSpeak, développé par MathWorks, est une plateforme IoT (Internet of Things) qui facilite la collecte, le stockage, la visualisation et l'analyse de données issues de capteurs connectés, tels que ceux utilisés en association avec un microcontrôleur ESP32. À l'aide d'une connexion Wi-Fi, des données collectées (comme la température, l'humidité ou la qualité de l'air) peuvent être transmises à un canal ThingSpeak. Une fois enregistrées, ces informations sont présentées en tant que graphiques en direct, ce qui simplifie la supervision à distance d'un environnement. ThingSpeak offre aussi la possibilité d'automatiser des tâches ou de réaliser des traitements grâce à MATLAB intégré. Il s'agit d'une solution pratique et performante pour tout projet de monitoring environnemental, domotique ou contrôle à distance. [48]

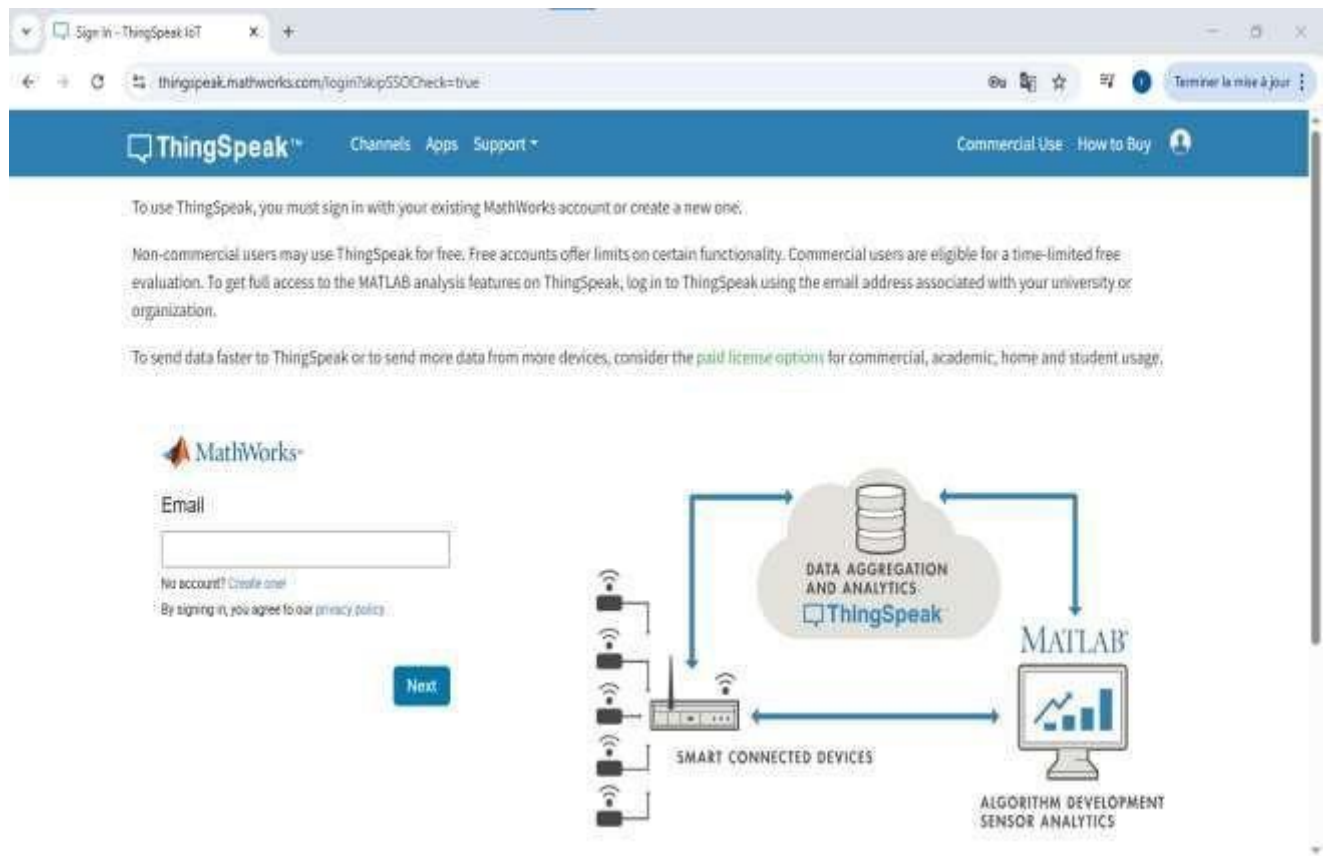
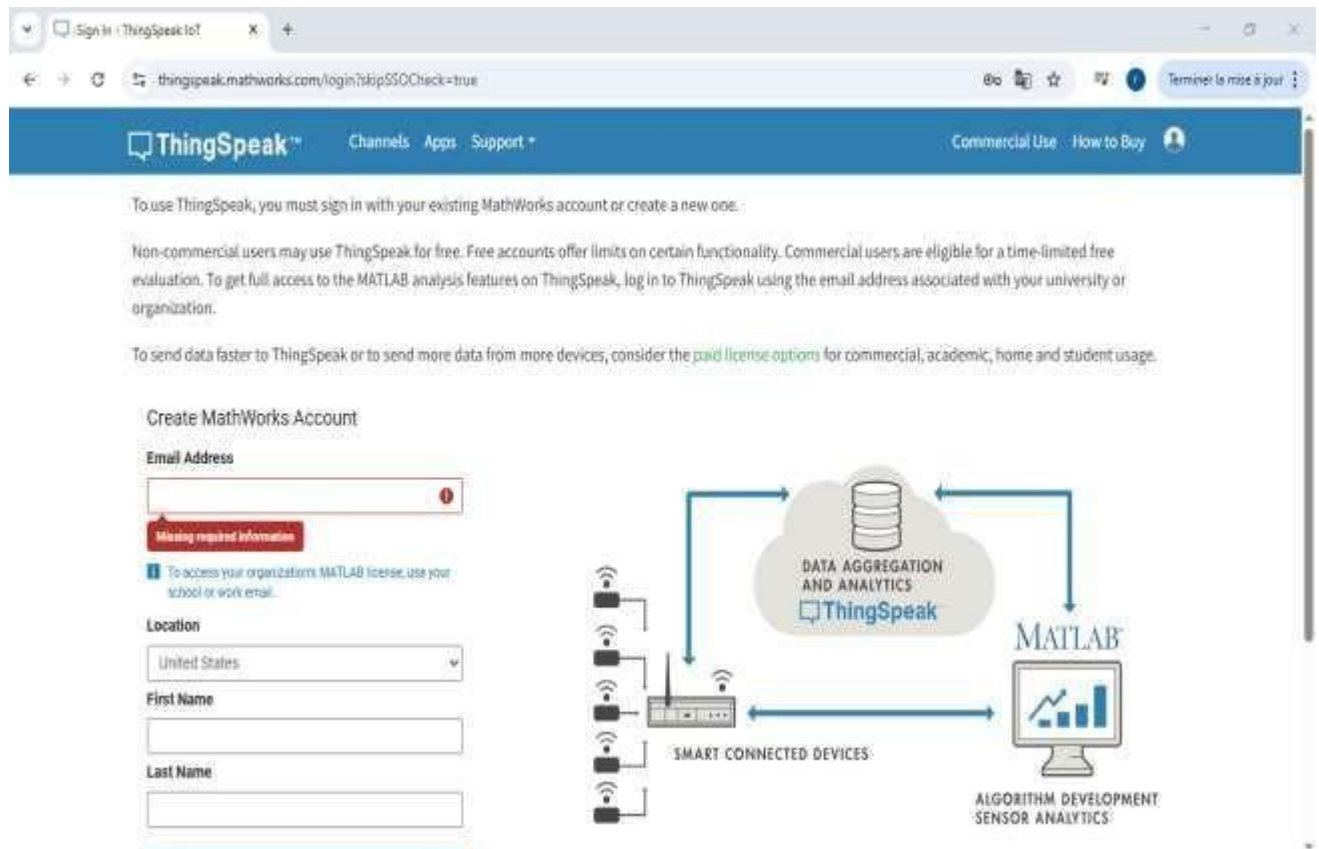


Figure 40 : Interface de la plateforme ThingSpeak.

6.2 Créer un compte ThingSpeak :

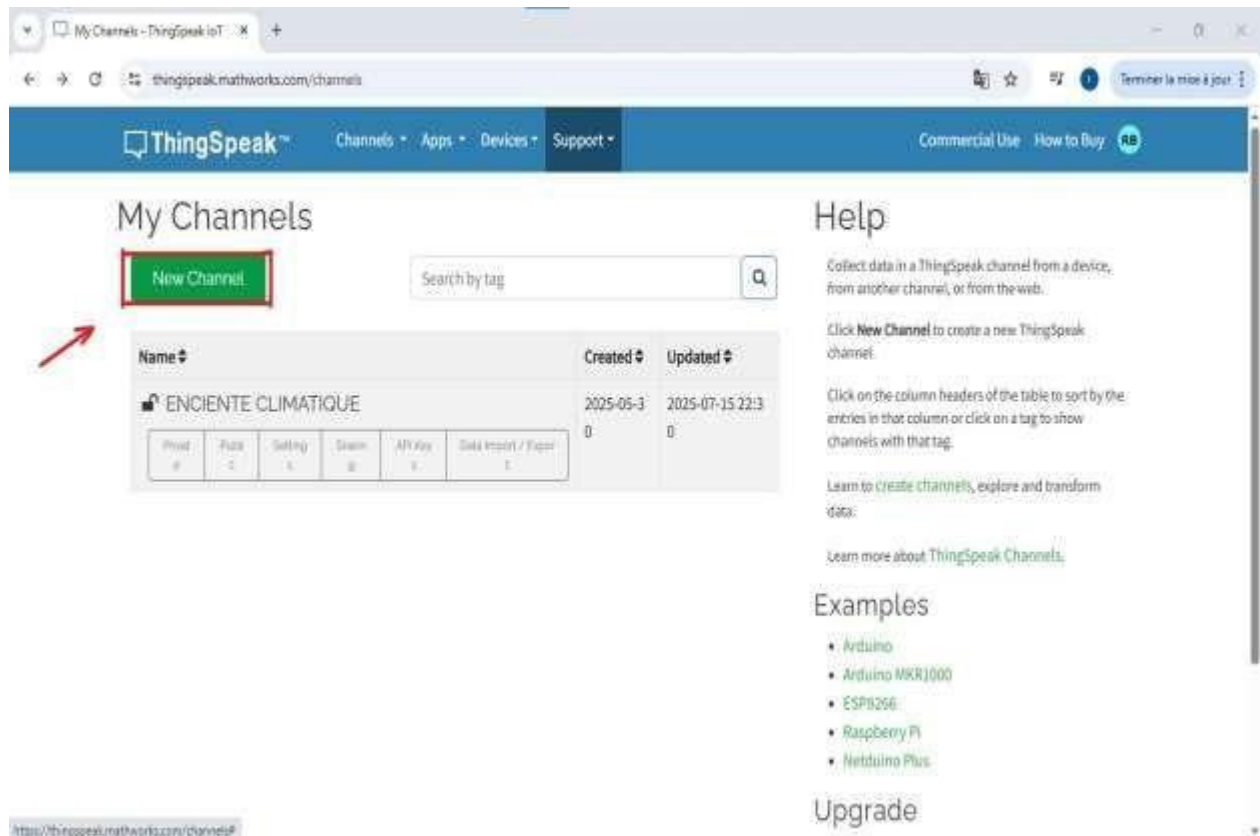
Pour utiliser ThingSpeak, il est nécessaire de créer un compte via le site officiel thingspeak.com, ce qui redirige vers la création d'un compte MathWorks il suffit juste de suivre les étapes afficher.



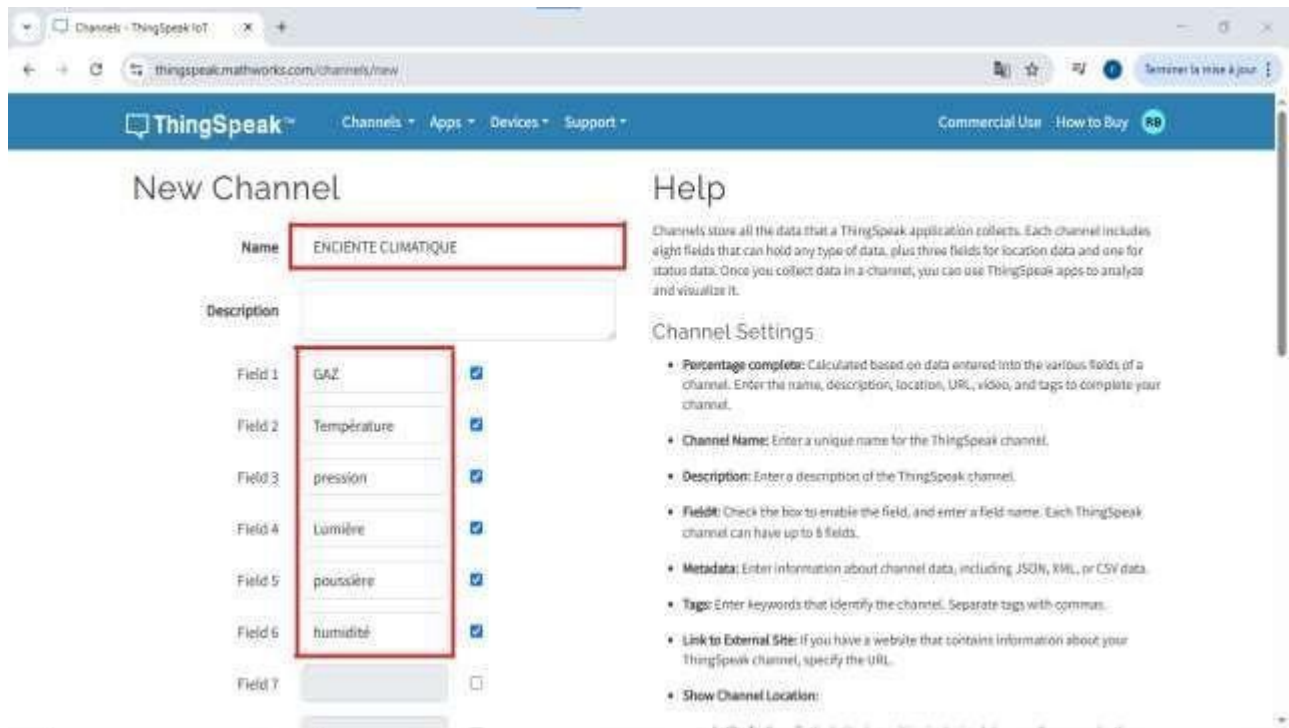
The screenshot shows the ThingSpeak login page in a browser. The page title is "Sign In | ThingSpeak IoT". The URL is "thingSpeak.mathworks.com/login?skipSSOCheck=true". The page has a blue header with the ThingSpeak logo, "Channels", "Apps", "Support", "Commercial Use", and "How to Buy". Below the header, there is a message: "To use ThingSpeak, you must sign in with your existing MathWorks account or create a new one." followed by text about non-commercial and commercial users. Below that, it says "To send data faster to ThingSpeak or to send more data from more devices, consider the paid license options for commercial, academic, home and student usage." The main content is a "Create MathWorks Account" form with fields for "Email Address", "Location" (set to "United States"), "First Name", and "Last Name". A red error message says "Missing required information". A blue note says "To access your organization's MATLAB license, use your school or work email." To the right of the form is a diagram showing "SMART CONNECTED DEVICES" connected to a "DATA AGGREGATION AND ANALYTICS" cloud (ThingSpeak), which is then connected to a "MATLAB" monitor displaying a bar chart, labeled "ALGORITHM DEVELOPMENT SENSOR ANALYTICS".

6.3 Créer un canal ThingSpeak :

Une fois connecté, il suffit de cliquer sur l'onglet "Channels" dans le menu principal, puis sur le bouton vert "New Channel" pour créer un nouveau canal " .



Dans le formulaire, on saisit un nom de canal, une description, puis on active les champs nécessaires (Field 1, Field 2, etc.) selon les types de données que l'on souhaite envoyer (par exemple : température, humidité, gaz, etc.). Une fois le formulaire complété, on clique sur "Save Channel".



6.4 Configurer l'envoi des données :

Pour envoyer des données depuis l'ESP32 vers ThingSpeak, il est nécessaire d'installer les bibliothèques suivantes :

- **Wifi.h** : elle permet à la carte ESP32 de se connecter à Internet en utilisant un réseau Wi-Fi. Il faut y renseigner le nom du réseau (SSID) et le mot de passe correspondant.
- **ThingSpeak.h** : cette bibliothèque permet de communiquer avec la plateforme ThingSpeak. Elle est utilisée pour envoyer les données vers le canal (Channel) créé. Pour cela, on doit spécifier l'identifiant du canal (Channel ID) ainsi que la clé API d'écriture (Write API Key).



```
1 // Configuration WiFi
2 const char* lte_ssid = "Galaxys24";
3 const char* lte_password = "00000000";
4 bool lteConnected = false;
5
6
7
8
9
10 // Configuration Telegram
11 #define BOT_TOKEN "8186916028:AAFSAijJU0e_kx4R08brlRzOm4jPjqjLe3M"
12 #define CHAT_ID "8187129837"
13 WiFiClientSecure secured_client;
14 UniversalTelegramBot bot(BOT_TOKEN, secured_client);
15
16
17
18 // Configuration ThingSpeak
19 const unsigned long THINGSPEAK_CHANNEL_ID = 2975997;
20 const char* THINGSPEAK_WRITE_API_KEY = "IEHPH40CCQSVPC4P";
21 WiFiClient thingSpeakClient;
```

Leaving...
Hard resetting via RTS pin...

Figure 41 : Configuration de wifi et ThingSpeak sur le programme arduino.

6.5 Recevoir les données sur le smartphone :

Pour recevoir les données sur un smartphone, il suffit d'accéder au lien public ou privé du canal (Channel) créé sur ThingSpeak. Ce lien permet de visualiser en temps réel les courbes et valeurs envoyées par l'ESP32, directement depuis le navigateur du téléphone, sans avoir besoin d'application supplémentaire voici notre lien :

<https://thingspeak.com/channels/2975997>

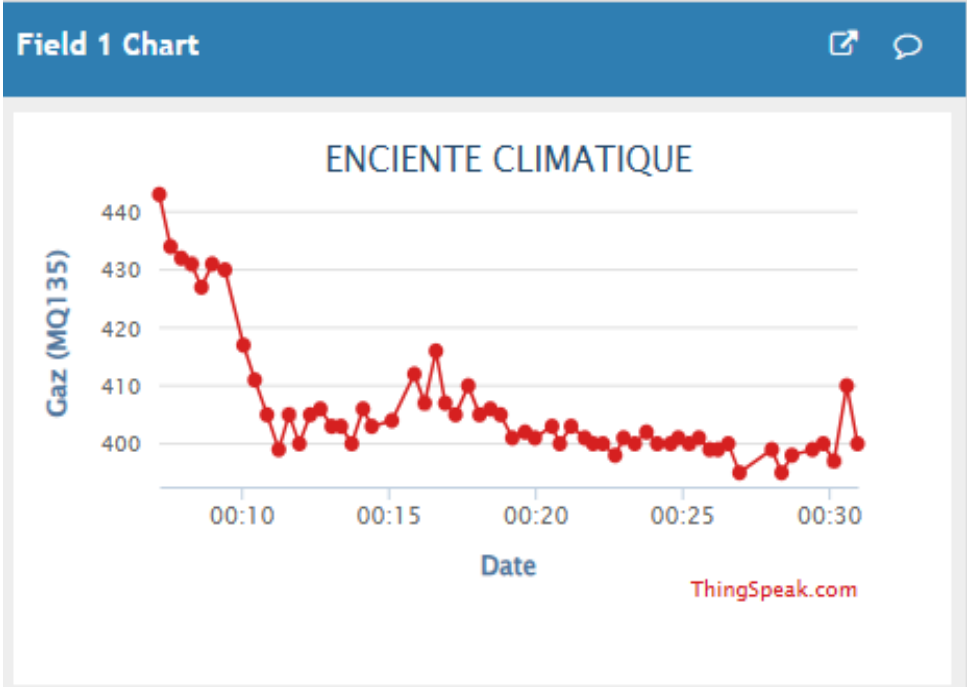


Figure 42 : Changement de gaz entre 00 :00 et 00 :30.



Figure 43 : Changement de pression entre 00 :00 et 00 :30.

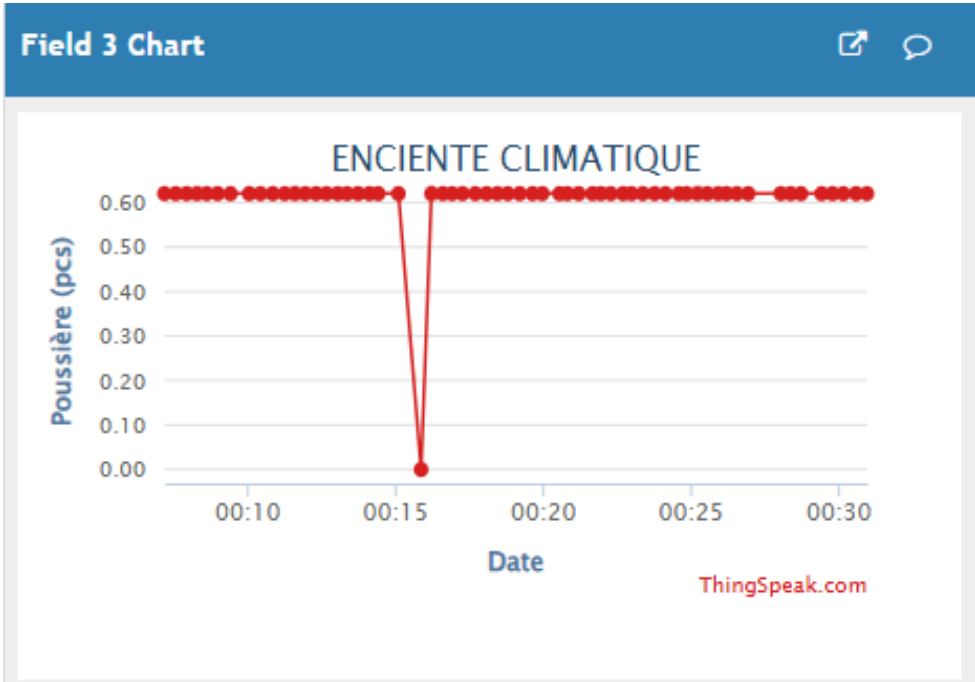


Figure 44 : Changement de poussière entre 00 :00 et 00 :30.

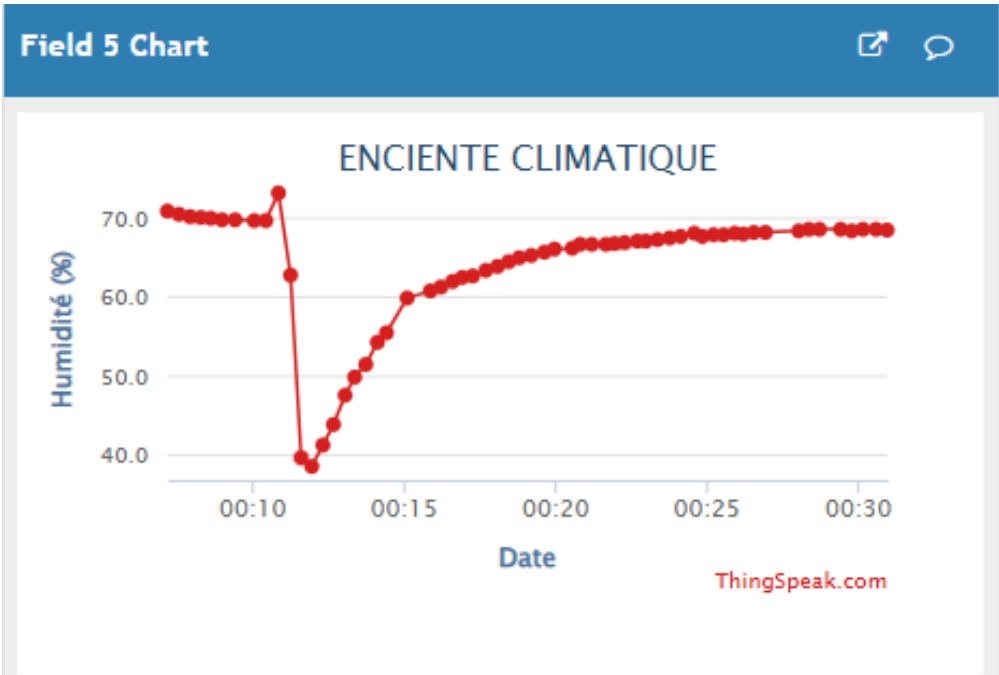


Figure 45 : Changement de l'humidité entre 00 :00 et 00 :30.

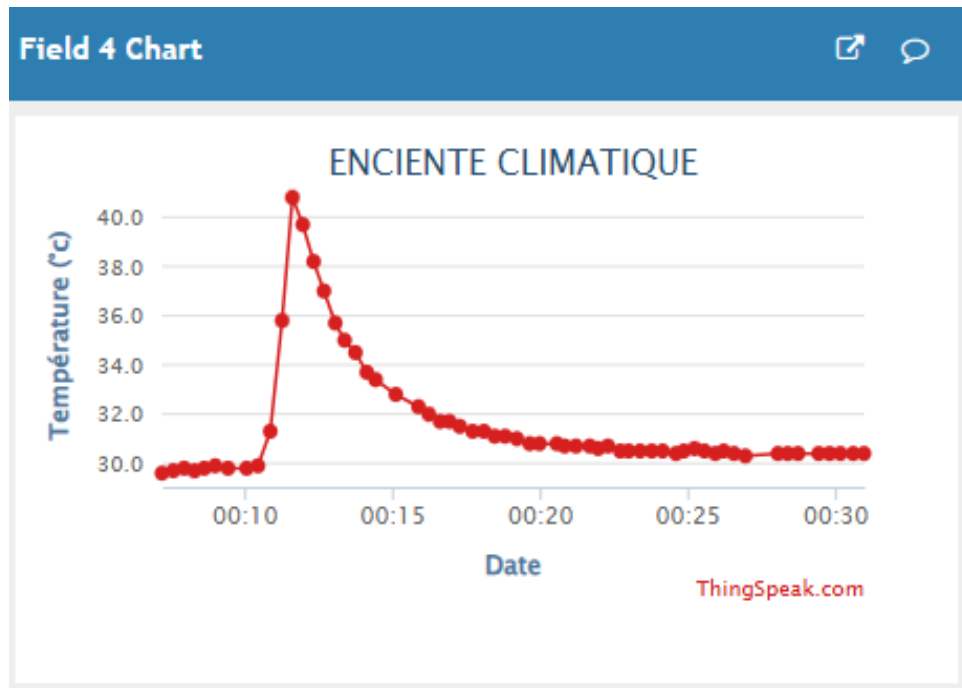


Figure 46 : Changement de température entre 00 :00 et 00 :30.

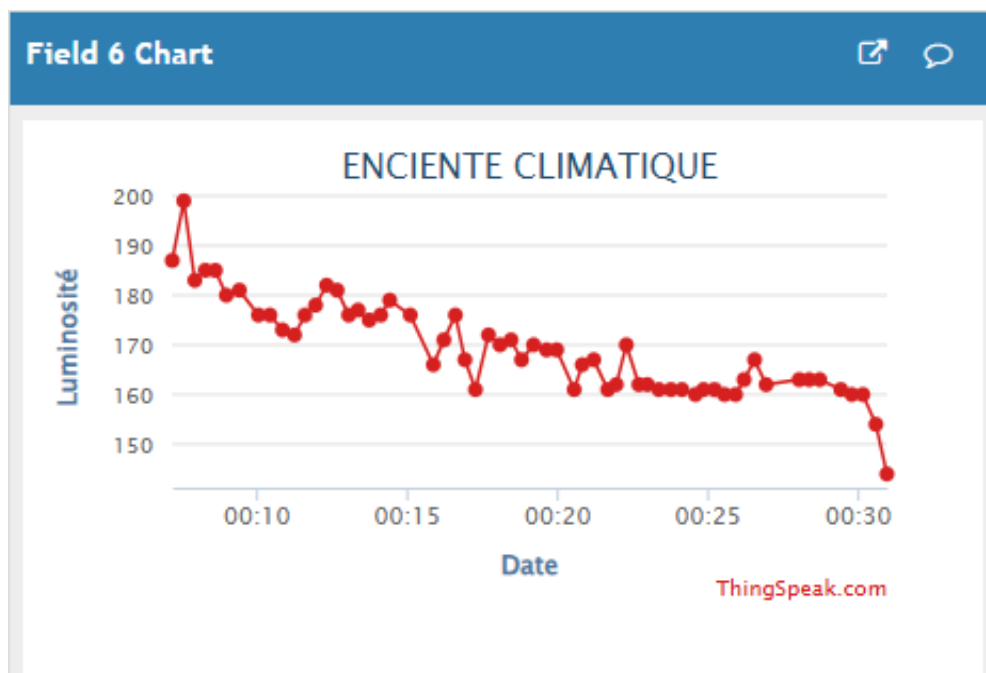


Figure 47 : Changement de luminosité entre 00 :00 et 00 :30.

7. Utilisation de Telegram pour contrôler l'ESP32 à distance :**7.1 Installation de l'application Telegram :**

Telegram est une application de messagerie instantanée basée sur le cloud, disponible sur smartphones, tablettes et ordinateurs. Elle permet l'échange de messages texte, fichiers multimédias, documents, ainsi que la réalisation d'appels vocaux et vidéo. Telegram se distingue par sa rapidité, sa sécurité grâce au chiffrement, et sa capacité à héberger des groupes très larges et des canaux d'information. [49]

La première étape consiste à installer l'application Telegram sur un smartphone. Pour cela, il suffit de se rendre sur le Google Play Store, rechercher "Telegram", puis l'installer gratuitement.



Figure 48 : Installation de l'application Telegram depuis Play store.

7.2 Créer un compte sur Telegram :

Une fois l'application installée, l'utilisateur doit créer un compte en utilisant un numéro de téléphone valide. Telegram envoie ensuite un code de vérification par SMS pour activer le compte.



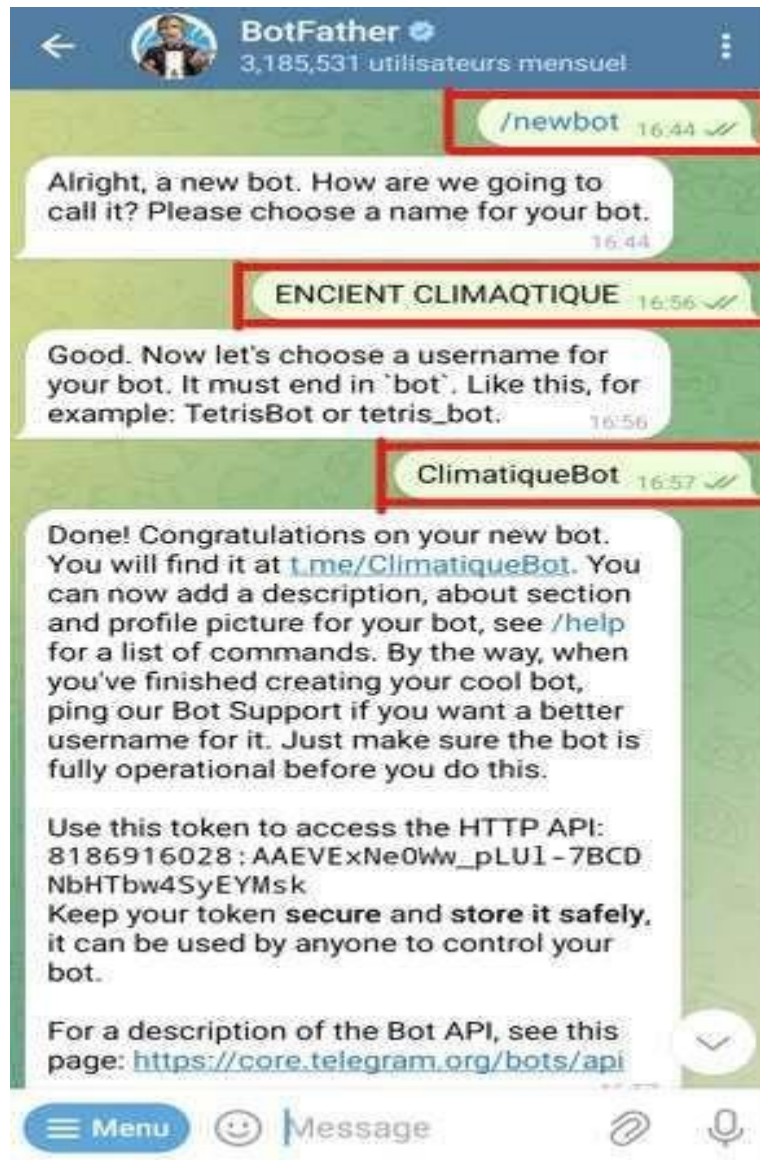
7.3 Création d'un bot Telegram avec BotFather :

Une fois inscrit sur Telegram, il faut créer un bot personnel qui permettra de communiquer avec l'ESP32. Pour cela :

- Ouvrir l'application Telegram.
- Dans la barre de recherche, taper @BotFather et ouvrir la discussion.

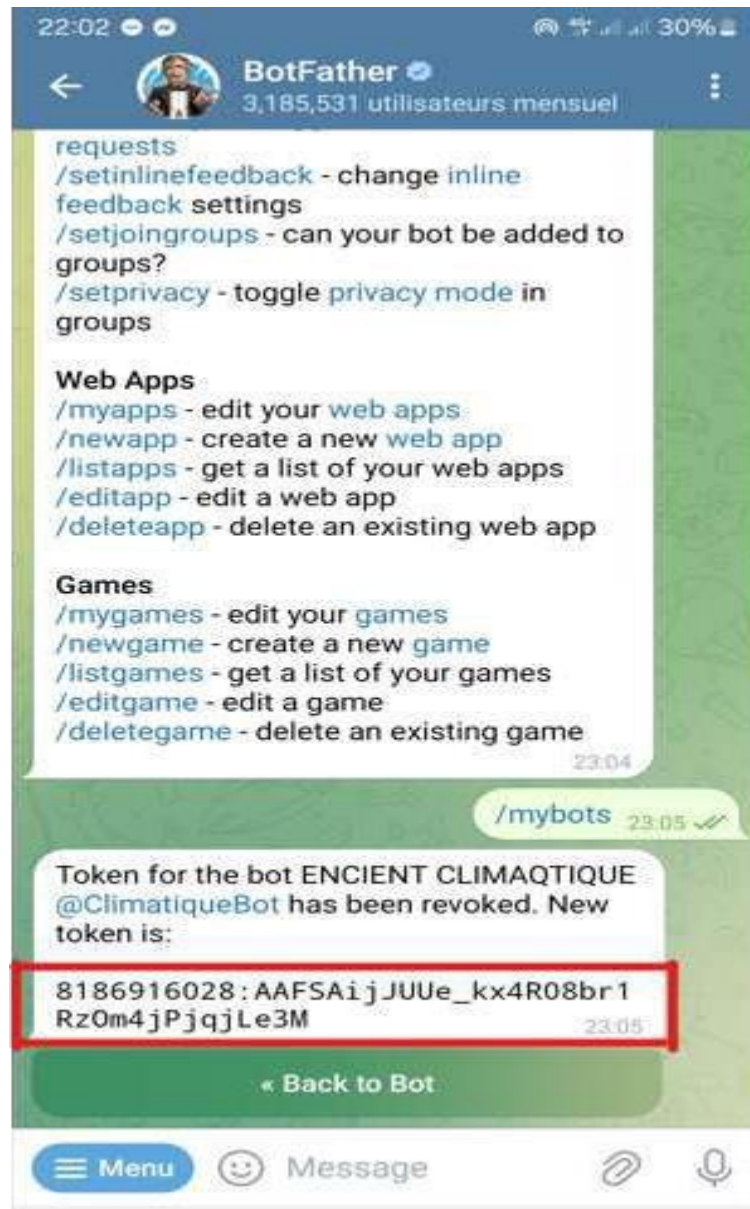


- Envoyer la commande /newbot.
- Telegram demande alors un nom pour le bot (ENCIENTE CLIMATIQUE).
- Ensuite, choisir un nom d'utilisateur unique pour le bot, qui doit se terminer par bot (ClimatiqueBot)



Une fois validé, BotFather génère automatiquement un token d'authentification, appelé Token API dans notre cas voici le token :

8186916028:AAFSAijJUUE_kx4R08br1RzOm4jPjqjLe3M

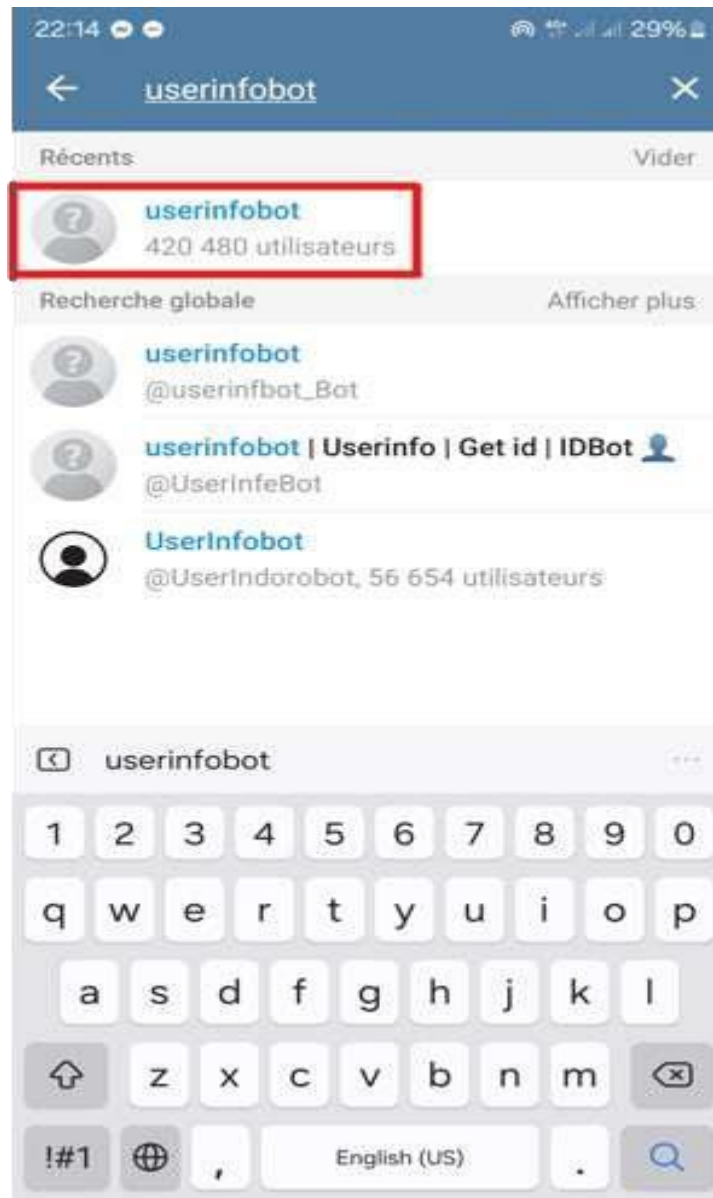


7.4 Récupération du Chat ID personnel :

Le Chat ID est un identifiant unique attribué à chaque utilisateur Telegram. Il permet de sécuriser les échanges entre l'ESP32 et l'utilisateur, en s'assurant que seul le propriétaire du bot (toi) peut envoyer des commandes et recevoir les réponses.

Pour obtenir ton Chat ID :

- Ouvrir Telegram et rechercher le bot suivant : **@userinfobot**



- Démarrer la conversation Envoyer la commande / Start.
- Le bot répond automatiquement avec notre Chat ID : (8187128837)



7.5 Intégration du bot Telegram dans le code Arduino de l'ESP32 :

Une fois le bot Telegram créé et le Chat ID récupéré, il faut maintenant programmer l'ESP32 pour qu'il se connecte à Internet, communique avec Telegram et réponde aux commandes envoyées par le bot.

Voici les étapes :

- Ouvrir l'IDE Arduino.
- Installer les bibliothèques suivantes (WiFiClientSecure et UniversalTelegramBot).
- Créer un nouveau sketch et y coller un code de base de communication avec Telegram.



```
16 bool lteConnected = false;
17
18 // Configuration Telegram
19 #define BOT_TOKEN "8186916028:AAFSA1jJU0e_kx4R08br1RzOm4jPjqjLe3M"
20 #define CHAT_ID "9187128837"
21 WiFiClientSecure secured_client;
22 UniversalTelegramBot bot(BOT_TOKEN, secured_client);
23
24 // Configuration Thingspeak
25 const unsigned long THINGSPEAK_CHANNEL_ID = 2975997;
26 const char* THINGSPEAK_WRITE_API_KEY = "IEHPH40CCQSVPC4P";
27 WiFiClient thingspeakClient;
28
29 // Déclaration des capteurs
30 const int ml35Pin = 34;
```

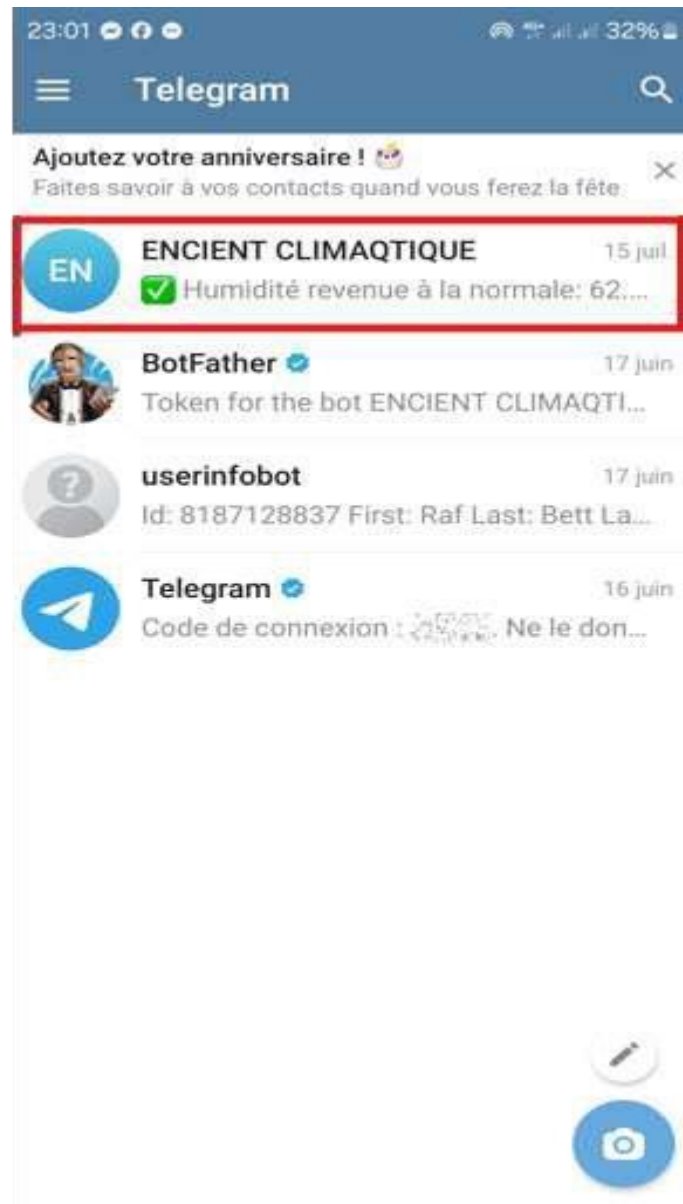
Leaving..
Hard resetting via RTS pin..

Figure 49 : Configuration de Telegram sur le programme arduino.

7.6 Test et validation du bot Telegram sur smartphone :

Une fois le code téléversé dans l'ESP32, il est temps de tester le fonctionnement du bot Telegram depuis un smartphone. Cette étape permet de vérifier que la communication entre l'utilisateur, Telegram et l'ESP32 fonctionne correctement.

- Ouvrir l'application Telegram sur le smartphone.
- On va entrer sur notre bot créé.



- Démarrer la conversation Envoyer la commande / Start.
- Menu principale affiche de notre Bot.



8. Le fonctionnement de Telegram :

Le bot Telegram développé pour ce projet permet un contrôle intelligent à distance du système climatique basé sur ESP32. Grâce à une interface simple accessible via smartphone on peut consulter les données environnementales, ajuster les seuils, et commander les actionneurs, tout en basculant facilement entre les modes automatique et manuel.

Lorsqu'on envoie la commande /start, le bot répond automatiquement avec un **menu interactif**, contenant plusieurs sections organisées :

8.1 Réglage de l'heure via le bot Telegram :

Le système climatique utilise une horloge temps réel DS3231 pour garder l'heure exacte même sans connexion internet. Cependant, il peut être nécessaire de mettre à jour l'heure manuellement.

/setheure HH :MM Lorsque l'utilisateur envoie cette commande dans Telegram, le système met à jour automatiquement l'heure interne de la RT



8.2 Consultation des données des capteurs avec /status :

Le système climatique basé sur ESP32 intègre plusieurs capteurs environnementaux pour mesurer les conditions internes de l'enceinte. Grâce à la commande /status envoyée via Telegram, l'utilisateur peut obtenir en temps réel toutes les données mesurées. Il affiche aussi le status des actionneurs.



8.3 Configuration des seuils avec /seuils :

Dans un système climatique automatisé, il est essentiel de pouvoir définir des valeurs seuils pour déclencher les actionneurs (ventilateur, chauffage, humidificateur). La commande /seuils permet de consulter ou modifier ces valeurs à distance via Telegram.

Pour modifier le seuil il faut juste répondre par le numéro de seuils et sa valeur.



8.4 Contrôle des actionneurs avec /actionneurs :

Dans une enceinte climatique intelligente, les actionneurs (ventilateur, humidificateur, chauffage, LED rouge, buzzer, etc.) sont les éléments qui réagissent aux conditions mesurées par les capteurs.

La commande /actionneurs permet à l'utilisateur de prendre le contrôle manuel de ces dispositifs directement via Telegram.

Exemple de contrôle des actionneurs :

- /fanon — Activer le ventilateur

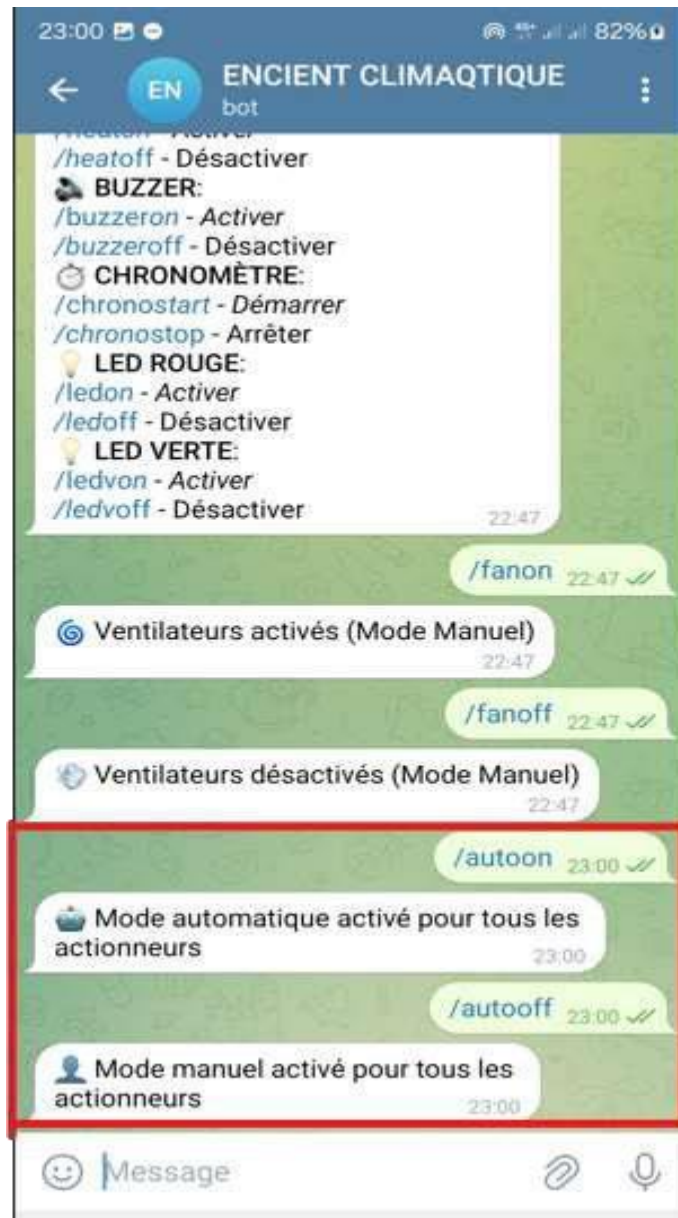
- /fanoff— Désactiver le ventilateur
- /chronostart — Lancer le chronomètre
- /chronostop— Arrêter le chronomètre



8.5 MODES GLOBAUX : /autoon et /autoff :

Le système climatique peut fonctionner selon deux modes distincts : automatique ou manuel. Les commandes /autoon et /autoff permettent à l'utilisateur de basculer dynamiquement entre ces deux modes, directement depuis Telegram.

- Mode automatique (/autoon) : Le système contrôle lui-même tous les actionneurs en se basant sur les valeurs mesurées par les capteurs et les seuils définis.
- Mode manuel (/autoff) : L'utilisateur prend le contrôle total des actionneurs via les commandes Telegram ou l'interface web.



9. Les alertes du Système en cas de Dépassement de Seuils :

Pour assurer une surveillance intelligente et réactive, le système climatique basé sur ESP32 génère automatiquement des alertes lorsqu'une ou plusieurs valeurs mesurées dépassent les

seuils critiques définis par l'utilisateur. Ces alertes sont transmises en temps réel à l'utilisateur via Telegram, assurant une intervention rapide.

9.1 Alerte Gaz (MQ135) :

Actions :

Si > Seuil Max :

- Activation des ventilateurs (si en mode auto).
- Allumage du buzzer et LED rouge (si en mode auto).
- Message Telegram : "⚠ ALERTE GAZ ⚠ - DÉPASSEMENT SEUIL MAX".

Si < Seuil Min :

- Message Telegram : "⚠ ALERTE GAZ ⚠ - SOUS LE SEUIL MIN".
- Surveillance renforcée (pas d'action physique).

Retour à la normale :

- Désactivation des ventilateurs (si activés par l'alerte).
- Message Telegram : "✓ NIVEAU GAZ NORMAL".



9.2 Alerte Pression Atmosphérique :

Actions :

Si > Seuil Max :

- Message Telegram : "⚠ ALERTE PRESSION ÉLEVÉE ⚠".

Si < Seuil Min :

- Activation des ventilateurs (si en mode auto).
- Message Telegram : "⚠ ALERTE PRESSION BASSE ⚠".

Retour à la normale :

- Désactivation des ventilateurs (si activés).
- Message Telegram : "✅ Pression revenue à la normale".



9.3 Alerte Poussière/Particules :

Actions :

Si > Seuil Max :

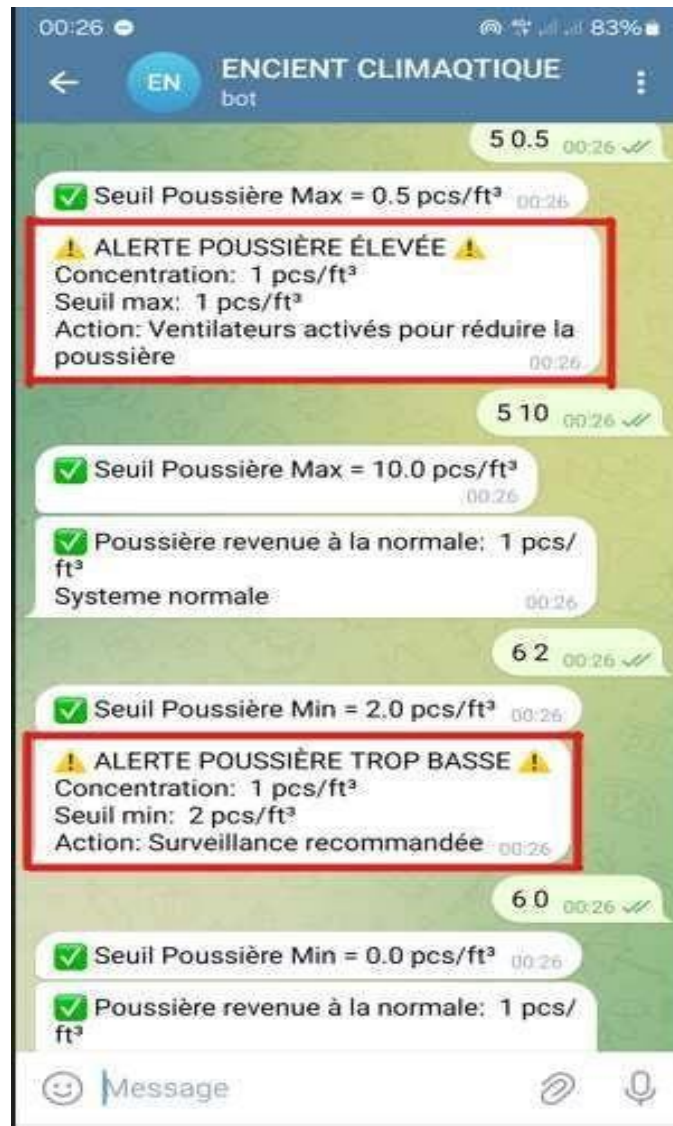
- Activation des ventilateurs (si en mode auto).
- Message Telegram : "⚠ ALERTE POUSSIÈRE ÉLEVÉE ⚠".

Si < Seuil Min :

- Message Telegram : "🚫 ALERTE POUSSIÈRE TROP BASSE 🚫".

Retour à la normale :

- Désactivation des ventilateurs (si activés).
- Message Telegram : "✅ Poussière revenue à la normale".



9.4 Alerte Température (DHT11) :

Actions :

Si > Seuil Max :

- Activation des ventilateurs (si en mode auto)
- Désactivation du chauffage (si en mode auto)
- Message Telegram : " 🚨 ALERTE TEMPÉRATURE ÉLEVÉE 🚨 " Si

< Seuil Min :

- Désactivation des ventilateurs (si en mode auto)
- Activation du chauffage (si en mode auto)
- Message Telegram : " 🚨 ALERTE TEMPÉRATURE BASSE 🚨 " "

Retour à la normale :

- Réinitialisation des actionneurs

- Message Telegram : "✓ Température revenue à la normale"



9.5 Alerte Humidité (DHT11) :

Actions :

Si > Seuil Max :

- Désactivation de l'humidificateur (si en mode auto)
- Activation des ventilateurs (si en mode auto)
- Message Telegram : " 🚨 ALERTE HUMIDITÉ ÉLEVÉE 🚨 " Si

< Seuil Min :

- Activation de l'humidificateur (si en mode auto)
- Désactivation des ventilateurs (si en mode auto)
- Message Telegram : " 🚨 ALERTE HUMIDITÉ BASSE 🚨 "

Retour à la normale :

- Réinitialisation des actionneurs

- Message Telegram : "✓ Humidité revenue à la normale"



10. Réalisation complète de l'enceinte climatique :

L'organigramme du système climatique illustre une structure claire et fonctionnelle organisée cette architecture modulaire permet une gestion optimisée des flux de données la conception reflète un équilibre entre la réactivité locale et la connectivité, caractéristique des systèmes.

Voici l'organigramme générale dans notre enceinte climatique :

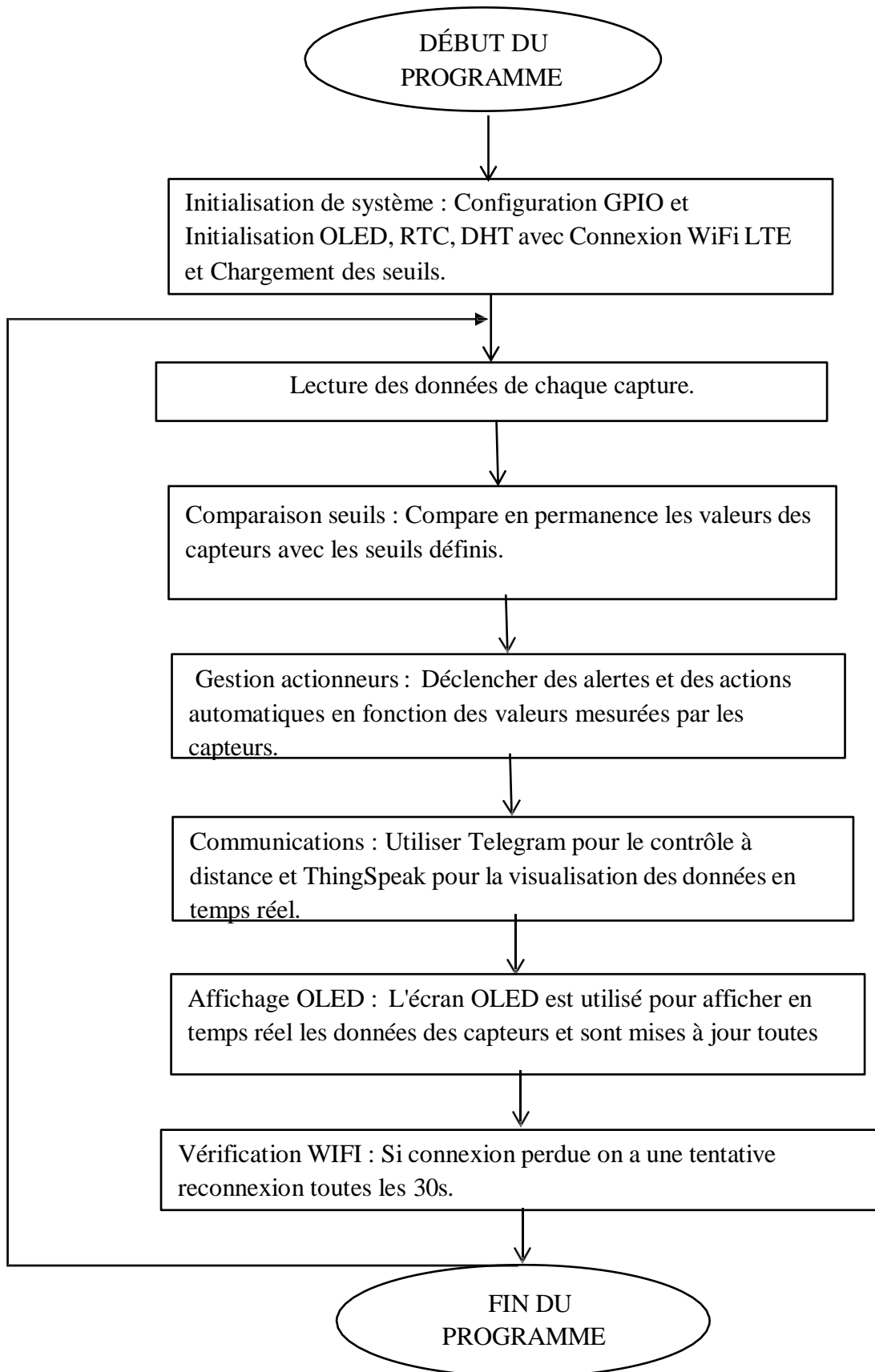


Figure 50 : Organigramme du fonctionnement de l'enceinte climatique.



Figure 51 : L'enceint climatique réaliser.





Figure 52 : L'intérieur de l'enceinte climatique.



Figure 52 : L'intérieur de l'enceinte climatique

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans un environnement où la connectivité et l'automatisation sont essentielles pour moderniser les systèmes de contrôle et de mesure, ce projet a abouti à la création d'une chambre climatique connectée qui peut contrôler et ajuster divers paramètres environnementaux à distance.

La problématique principale de ce projet était l'élaboration d'un système de contrôle à distance capable de gérer et d'ajuster les conditions climatiques internes d'un espace, tout en assurant une grande exactitude et une simplicité d'utilisation. Pour répondre à cela, nous avons conçu une solution utilisant le microcontrôleur ESP32, qui associe divers capteurs environnementaux (de température, d'humidité, de pression, de gaz, de poussière, de luminosité) à différents actionneurs (des ventilateurs, une plaque chauffante, un humidificateur, des LED et un buzzer).

L'ajout du module Telegram Bot a été crucial, offrant à l'utilisateur la possibilité d'interagir directement avec le système, de transmettre des instructions, d'obtenir des indicateurs en direct et de vérifier la condition générale de l'appareil simplement via un smartphone. Cette interface rend le système intelligent, interactif et aisément administrable à distance.

En complément, la plateforme ThingSpeak a permis d'assurer un suivi en ligne continu des mesures. Grâce à cette intégration, les données issues des capteurs sont automatiquement enregistrées et représentées sous forme de graphiques, facilitant ainsi l'analyse et l'historisation des conditions environnementales.

Enfin, plusieurs perspectives d'amélioration peuvent être envisagées : l'ajout de nouveaux capteurs (CO₂, bruit, vibration), l'intégration d'une base de données locale, ou encore le développement d'une application mobile dédiée pour un contrôle plus ergonomique.

En conclusion, cette réalisation a permis de répondre efficacement à la problématique du contrôle et de la supervision à distance d'une enceinte climatique, tout en illustrant les potentialités offertes par l'Internet des Objets (IoT) et la communication temps réel entre machines et utilisateurs. Ce travail constitue ainsi une base solide pour le développement futur de systèmes de régulation environnementale intelligents et connectés.

Références bibliographiques

1. https://jeulin.com/lelaborantin_fr/le-laborantin/equipement-de-laboratoire/enceintes-climatiques.html?product_list_limit=all
2. <https://conseils.hellopro.fr/comment-fonctionne-une-enceinte-climatique-3606.html>
3. <https://www.dellamarca.it/fr/comment-construire-une-chambre-climatique/>
4. https://www.humeau.com/media/blfa_files/CO_Enceintes-climatiques_FR_090118.pdf?srsId=AfmBOorGiEOjxYNIouwpv35brgCh7Czk2qIr-axrtVrd6pIf7M-A-6R3
5. **Energy and Buildings**[Temperature and humidity control of indoor environmental spaces]
6. <https://www.dellamarca.it/fr/comment-fonctionne-le-systeme-de-contrôle-de-lhumidité>
7. <https://www.rechner-sensors.com/fr/documentations/connaissance/le-capteur-de-temperature>
8. <https://www.fujielectric.fr/blog/capteur-de-pression-definition/>
9. <https://fr.rs-online.com/web/c/semi-conducteurs/capteurs/>
10. Morris, A. S., & Langari, R. (2012). "Measurement and Instrumentation: Theory and Application".
11. Lehr, J. H., & Lehr, J. L. (2007). "Environmental Instrumentation and Analysis Handbook".
12. Doebelin, E. O., & Manik, D. N. (2004). "Measurement Systems: Application and Design".
13. Weiss Technik. *SmartControl and WebSeason – Intelligent Control for Environmental Simulation Equipment*. Weiss Technik GmbH, 2022.
14. Thermotron. *Energy-Efficient Environmental Chambers*. Thermotron Industries, 2023.
15. Binder GmbH. *Multi-Zone Environmental Chambers*. Binder GmbH, 2022.
16. Vaisala. *Best Practices for Calibration and Maintenance of Environmental Chambers*. Technical Guide, 2021.
17. Ebel, F. (2018). *Measurement and Instrumentation Principles* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
18. <https://shop.vulcanic.com/fr/2023-resistance-a-ailettes-rectangulaires-40-x-80-en-inox-304l-2000-w-400-v-45-w-cm2.html>
19. <https://www.neptronic.com/humidifiers/SKDEFER.aspx>
20. <https://www.gunt.de/fr/produits/circuit-frigorifique-a-compression-simple/061.10100/et101/glct-1:pa-149:pr-149>
21. https://www.humeau.com/media/blfa_files/CO_Enceintes-climatiques_FR_090118.pdf?srsId=AfmBOorGiEOjxYNIouwpv35brgCh7Czk2qIr-axrtVrd6pIf7M-A-6R3

22. <https://boutique.semageek.com/f>
- 23 <https://instrumentvs.com/produit/>
24. <https://tuni-smart-innovation.com/>
25. <https://www.mytopschool.net/mysti2d/activites/polynesie2/ETT/C044/32/Capteurs1/index.html?Introduction.html>
26. Aosong Electronics. *DHT11 Temperature and Humidity Sensor Datasheet.*
27. <https://powertech-dz.net/products/single/capteur-humidite-temperature-dht11-vente-composants-electronique-blida-algerie-73>
28. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX5100.pdf>
29. <https://fr.rs-online.com/web/p/ci-de-capteur-de-pression/7191080>
30. <https://www.winsen-sensor.com/mq-sensor.html?campaignid=22040137809&adgroupid>
31. https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MQ-135_Hanwei.pdf?srsItd
32. <https://www.orbit-dz.com/product/mq135-module-capteur-de-benzene-amoniaque-sulfure-et-fumee/>
33. <https://www.moussasoft.com/produit/capteur-de-lumiere-a-photoresistance-ldr-10mm/>
34. https://www.isweek.com/product/dust-sensor-module-for-air-quality-monitor-dsm501a_60.html
35. <http://fr.hydzelec.com/hydz-classic-12095-dc-buzzer-product/>
36. <https://www.amazon.fr/Youmile-humidificateur-Atomiseur-ultrasons-coton-tige/dp/B09BTKCTMC>
37. <https://www.amazon.com.be/Ventilateur-Refroidissement-%C3%A9lectrique-Vitesse-Compatible/dp/B08T1Z7D4D>
38. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf
39. <https://www.electronifyindia.com/blogs/news/esp32-wroom-32-features-applications-everything-you-need-to-know>
40. <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>
41. <https://www.amazon.com/HiLetgo-SH1107-128x128-Display-Optinal/dp/B0CFF17DGH?th=1>
42. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds3231.pdf>
43. <http://gilles.thebault.free.fr/spip.php?article53>
44. <https://www.orbit-dz.com/product/produit-433/>
45. <https://www.nitrathor.fr/fiches/ide-arduino>

46. https://www.researchgate.net/figure/nterface-du-logiciel-ISIS-Proteus_fig14_361184747
47. https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/pluginfile.php/45811/mod_resource/content/0/Chap5_realisation_d_un_circuit_imprime.pdf
48. <https://thingspeak.mathworks.com/>
49. <https://web.telegram.org/k/>

Résumé final

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons conçu et réalisé une enceinte climatique intelligente contrôlée par une carte ESP32. Ce système permet la surveillance et la régulation de paramètres environnementaux en temps réel. Les données collectées par les capteurs intégrés sont transmises automatiquement vers la plateforme **ThingSpeak** pour l'analyse et le suivi, ainsi que vers **Telegram**, offrant à l'utilisateur une interface simple et accessible.

L'utilisateur dispose également d'une possibilité de **contrôle à distance** via Telegram, ce qui confère au système une dimension interactive et pratique.

Mots clé : Enciente climatique, Esp32,Telegram, thigspeak,captures

Final Summary

As part of this thesis, we designed and built a smart climate chamber controlled by an ESP32 board. This system enables the monitoring and regulation of environmental parameters in real time. The data collected by the integrated sensors is automatically transmitted to the ThingSpeak platform for analysis and monitoring, as well as to Telegram, providing the user with a simple and accessible interface.

The user also has the option of remote control via Telegram, which gives the system an interactive and practical dimension.

Keywords: Climate chamber, ESP32, Telegram, ThingSpeak, captures