

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجي  
Faculté de Technologie

قسم الآلية و الإلكترونيات  
Département d'Automatique & Electrotechnique



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

Présenté par

MOKHBAT Chakib

Pour l'obtention du diplôme De Master en Automatique et informatique industrielle

# Réalisation et Implémentation d'un Système de contrôle et de surveillance de la Qualité de l'Environnement d'une Salle Blanche Industrielle

Proposé par : BELGROUNE Nadir

Année Universitaire 2024-2025

## Résumé

Ce travail présente la conception et la réalisation d'un système de surveillance environnementale intelligent destiné aux salles blanches. Basé sur le microcontrôleur ESP32, le système intègre le capteur BME680 capable de mesurer la température, l'humidité, la pression atmosphérique et la qualité de l'air. Les données sont affichées localement via un écran OLED et surveillées à distance grâce à l'intégration des plateformes Telegram et Blynk. En cas de dépassement de seuil, des actions automatiques sont déclenchées (activation d'un ventilateur et clignotement d'une LED d'alerte). Des tests unitaires et scénarios expérimentaux ont validé la précision, la stabilité et la réactivité du dispositif. Ce système se distingue par sa connectivité, sa faible consommation énergétique et sa compatibilité avec l'IoT, en phase avec les exigences de l'industrie 4.0. Il offre une solution économique, évolutive et fiable pour la supervision en temps réel d'environnements critiques soumis à des normes strictes.

## Abstract

This work presents the design and implementation of an intelligent environmental monitoring system tailored for cleanrooms. Based on the ESP32 microcontroller, the system integrates the BME680 sensor capable of measuring temperature, humidity, atmospheric pressure, and air quality. Data is displayed locally through an OLED screen and monitored remotely via Telegram and Blynk platforms. When thresholds are exceeded, automatic actions are triggered (fan activation and LED blinking). Unit tests and experimental scenarios confirmed the device's precision, stability, and responsiveness. This system stands out for its wireless connectivity, low power consumption, and Internet of Things (IoT) compatibility, aligning with Industry 4.0 standards. It offers an affordable, scalable, and reliable solution for real-time supervision of critical environments governed by strict regulations.

## الملخص

يعرض هذا العمل تصميم وتنفيذ نظام ذكي لمراقبة البيئة موجه خصيصاً لغرف الأبحاث المعقمة (salles blanches). يعتمد النظام على المتحكم الدقيق ESP32 ويتضمن المستشعر BME680 القادر على قياس درجة الحرارة، الرطوبة، الضغط الجوي، وجودة الهواء. تُعرض البيانات محلياً على شاشة OLED ويتم مراقبتها عن بُعد عبر منصتي Telegram و Blynk في حال تجاوز القيم الحدود المسموح بها، يتم تفعيل إجراءات تلقائية مثل تشغيل مروحة وتحذير مرئي عبر وميض LED. أثبتت الاختبارات الودوية والسيناريوهات التجريبية دقة واستقرار واستجابة النظام. يتميز هذا النظام باتصاله اللاسلكي، استهلاكه المنخفض للطاقة، وتوافقه مع مفاهيم إنترنت الأشياء، مما يجعله مناسباً لمتطلبات الصناعة 4.0. يشكل هذا النظام حلاً فعالاً وذو تكلفة منخفضة وقابل للتوسعة لمراقبة البيانات الحساسة في الوقت الحقيقي وفقاً للمعايير الدولية الصارمة.

# Remerciements

Je tiens tous d'abord à remercier le Bon Dieu tout puissant de nous avoir donné patience, courage et volonté pour réussir ma mémoire.

Je tiens à remercier mes parents pour leurs soutiens et leurs prières au long de nos études.

Ce travail a été réalisé à l'Université Saad Dahleb Blida-1-, sous la direction du Dr.BELGROUNE NADIR, à qui j'exprime ma profonde gratitude pour l'attention portée à l'élaboration de ce mémoire, son aide précieuse, ses conseils, son soutien permanent et pour tous ses efforts.

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous les enseignants de la Faculté de technologie particulièrement le Département d'Automatique et à toutes responsables de l'Université SAAD DAHLEB BLIDA qui m'ont

suivis durant mon cursus, et tous ceux qui ont contribué et collaboré à ma formation depuis mon premier cycle d'étude jusqu'à la fin de mon cycle universitaire.

Je tiens à remercier ceux qui nous ont aidés de près ou de loin et ainsi mes amis de promotion.

# Dédicaces

## Je dédie ce modeste travail

À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre,

À cette source de tendresse, de patience et de générosité,

### À ma mère

À la personne qui m'a toujours donné la volonté

### Mon cher père

À mes frères « **Mohamed Adlane** » et « **Anis** »

À ma grande famille, à mes amis et à tous ceux qui ont su m'apporter soutien aux moments difficiles

À tous les étudiants de ma **promotion 2025**

À mes enseignants et à tous ceux qui ont assisté à ma formation depuis mon premier jour à l'école

À tous les êtres chers qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer.

# Table de matière

|   |     |
|---|-----|
| Résumé .....  | i   |
| Abstract .....  | i   |
| المُلخَص .....  | i   |
| Remerciements .....   | ii  |
| Dédicaces .....   | iii |
| Table de matière .....  | iv  |
| Liste des figures .....   | vii |
| Liste des tableaux .....  | ix  |
| Introduction Générale.....  | 1   |
| Chapitre I : Généralités sur les systèmes de surveillance environnementale des salles blanches<br>..... | 2   |
| I.1 Introduction :.....   | 2   |
| I.2 Introduction aux systèmes de surveillance des salles blanches : .....                               | 3   |
| I.2.2 Définition d'une salle blanche : .....  | 3   |
| I.2.2 Normes et classifications des salles blanches : .....   | 4   |
| I.2.3 Enjeux et risques d'un mauvais contrôle .....   | 5   |
| I.3 Paramètres physiques à surveiller dans une salle blanche : .....                                    | 6   |
| 1.3.1 Température.....  | 7   |
| 1.3.2 Humidité relative.....  | 7   |
| 1.3.3 Pression différentielle.....  | 7   |
| 1.3.4 Qualité et concentration de l'air et gaz (COV, CO <sub>2</sub> ) .....                            | 8   |
| I.4 Évolution des systèmes de surveillance .....  | 8   |
| I.4.1 Historique et méthodes traditionnelles des systèmes de contrôle .....                             | 8   |
| I.4.2 Technologies utilisées dans les systèmes de surveillance en salle blanche .....                   | 9   |
| I.5 Domaines d'application des salles blanches .....  | 10  |

|  |    |
|--|----|
| 1.5.1 Industrie pharmaceutique .....   | 10 |
| 1.5.2 Industrie électronique et microélectronique .....                          | 10 |
| 1.5.3 Biotechnologie et recherche biomédicale .....                              | 11 |
| 1.5.4 Industrie agroalimentaire spécialisée .....                                | 12 |
| 1.5.5 Santé et milieu hospitalier .....  | 12 |
| I.6 Conclusion : .....   | 13 |
| CHAPITRE II : Conception et principe de fonctionnement du système .....          | 14 |
| II.1 Introduction .....  | 14 |
| II.2 Choix et description des dispositifs électroniques du système .....         | 14 |
| II.2.1 Carte de commande et de contrôle embarqué Module ESP32 .....              | 15 |
| II.2.2 Capteur environnemental multifonction : BME680 .....                      | 18 |
| II.2.3 Affichage local : écran OLED SH1106 1.3 pouces : .....                    | 19 |
| II.2.4 Actionneurs de réponse automatique : ventilateur 5V et LED d'alerte ..... | 21 |
| II.3 Architecture générale du système : .....                                    | 23 |
| II.3.1 Composants matériels et architecture de câblage .....                     | 23 |
| II.3.2 Organisation fonctionnelle du système de surveillance.....                | 25 |
| II.4 Principe de fonctionnement du système .....                                 | 27 |
| II.4.1 Description générale du fonctionnement.....                               | 27 |
| II.4.2 Logique de décision.....  | 29 |
| II.5 Composants logiciels et environnement de développement.....                 | 29 |
| II.5.1 Environnement de développement : Arduino IDE .....                        | 29 |
| II.5.2 Plateforme mobile Blynk : supervision IoT .....                           | 31 |
| II.5.3 Bibliothèques utilisées .....   | 33 |
| II.5.4 Structure fonctionnelle du code .....                                     | 33 |
| II.6 Conclusion .....  | 34 |
| Chapitre III : Réalisation expérimentale et validation du système.....           | 36 |
| III.1 Introduction .....   | 36 |

|  |    |
|--|----|
| III.2 Tests unitaires des composants .....                                     | 36 |
| III.2.1 Test du capteur BME680 .....   | 36 |
| III.2.2 Test de l'écran OLED SH1106 .....                                      | 37 |
| III.2.3 Test des actionneurs la LED d'alerte et ventilateur.....               | 38 |
| III.2.4 Test de la communication avec Telegram.....                            | 39 |
| III.2.5 Test de la communication avec l'application mobile Blynk .....         | 40 |
| III.3 Présentation du prototype final.....                                     | 41 |
| III.3.1 Vue d'ensemble du montage .....  | 42 |
| III.3.2 Description des fonctionnalités visibles .....                         | 43 |
| III.4 Scénarios de test et résultats expérimentaux .....                       | 44 |
| III.3.2 Comportement en cas de dépassement des seuils .....                    | 46 |
| III.3.3 Importance et apport du système de surveillance environnementale ..... | 48 |
| III.5 Conclusion.....  | 51 |
| Conclusion Générale .....  | 52 |
| Bibliographie :.....   | 53 |

# Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure I. 1: Vue intérieure d'une salle blanche ISO .....   | 2  |
| Figure I. 2: Vues représentatives de différentes configurations de salles blanches industrielles    | 3  |
| Figure I. 3: Contamination microbienne d'un produit .....   | 5  |
| Figure I. 4: Diagramme représentant les conséquences économiques .....                              | 6  |
| Figure I. 5: Photo de Thermo-hygromètre numérique .....   | 7  |
| Figure I. 6: Schéma de pression différentielle entre deux pièces .....                              | 8  |
| Figure I. 7: Production pharmaceutique en salle blanche .....                                       | 10 |
| Figure I. 8: Fabrication de composants électroniques en salle blanche .....                         | 11 |
| Figure I. 9: Photo de Laboratoire biotechnologie.....   | 11 |
| Figure I. 10: Photo de Ligne de production agroalimentaire .....                                    | 12 |
| Figure I. 11: Salle d'opération en environnement stérile .....                                      | 13 |
| Figure II. 1: Module NodeMCUESP32.....  | 15 |
| Figure II. 2: Description du Module NodeMCU ESP32.....  | 17 |
| Figure II. 3: Photo de capteur BME680 .....   | 18 |
| Figure II. 4 : Photo Écran OLED SH1106 1.3 pouces .....   | 20 |
| Figure II. 5 : Photo de LED d'alerte.....   | 22 |
| Figure II. 6: logigramme d'organisation fonctionnelle du système .....                              | 27 |
| Figure II. 7: logigramme sur le Principe de fonctionnement du système .....                         | 28 |
| Figure II. 8: Environnement logiciel ARDUINOIDE .....   | 30 |
| Figure II. 9: Les différentes instructions pour Installation de la carte ESP32.....                 | 31 |
| Figure II. 10 : Photo du fonctionnement du Blynk sur le système.....                                | 32 |
| Figure III. 1 : montage du capteur BME680 et affichage sur moniteur serie.....                      | 37 |
| Figure III. 2: L'affichage sur l'écran OLED 1.3.....  | 38 |
| Figure III. 3: Clignotement du LED.....   | 39 |
| Figure III. 4: photo de test telegram.....  | 40 |
| Figure III. 5 : Affichage des parametres capteur BME680 sur Blynk.....                              | 41 |
| Figure III. 6 : Montage du prototype final .....  | 42 |
| Figure III. 7: Visualisation des données environnementales sur OLED et affichage mobile Blynk.....  | 45 |
| Figure III. 8 : Réception des données environnementales via la commande `/status` sur Telegram..... | 46 |

|   |    |
|---|----|
| Figure III. 9: Comportement du système en situation d’alerte – Vue globale..... | 47 |
| Figure III. 10: Visualisation en temps réel des paramètres via Blynk.....       | 49 |
| Figure III. 11: Réception de messages d’alerte et de statut via Telegram .....  | 50 |

# Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau I. 1: Tableau des classes ISO 14644-1 .....                                | 4  |
| Tableau II. 1: Caractéristiques de la carte NodeMCU ESP32.....                     | 16 |
| Tableau II. 2: Les Spécifications de l'alimentation.....                           | 16 |
| Tableau II. 3: Les Spécifications du logiciel de la carte NodeMCU ESP32 .....      | 17 |
| Tableau II. 4: Caractéristiques techniques du capteur BME 680 .....                | 19 |
| Tableau II. 5: Caractéristiques techniques de l'Écran OLED SH1106 1.3 pouces ..... | 20 |
| Tableau II. 6: Caractéristiques techniques LED .....                               | 22 |
| Tableau II. 7: Résumé fonctionnel des composants .....                             | 24 |
| Tableau II. 8: Tableau récapitulatif du câblage général.....                       | 25 |
| Tableau II. 9: Avantages de Blynk dans ce projet .....                             | 32 |
| Tableau II. 10 : Bibliothèques logicielles utilisées dans le système embarqué..... | 33 |

# Introduction Générale

Dans les secteurs industriels critiques comme la microélectronique, la pharmacie, la biotechnologie ou l'agroalimentaire, la qualité et la sécurité des produits dépendent en grande partie de la stabilité de l'environnement dans lequel ils sont fabriqués ou manipulés. C'est dans ce cadre que les salles blanches, ou environnements à contamination contrôlée, jouent un rôle central. Ces environnements doivent maintenir des conditions très strictes en termes de température, d'humidité, de pression atmosphérique et de qualité de l'air.

La surveillance de ces paramètres ne peut reposer uniquement sur des méthodes classiques. Elle doit aujourd'hui intégrer des technologies modernes, capables d'assurer une mesure continue, une réaction immédiate et une traçabilité sans faille. C'est pourquoi les systèmes de surveillance automatisés, embarqués et connectés prennent de plus en plus d'ampleur, notamment grâce à l'émergence des microcontrôleurs intelligents et des plateformes de supervision à distance.

Ce mémoire présente le développement et la mise en œuvre d'un système de surveillance environnementale pour salles blanches, basé sur l'ESP32, le capteur BME680, un écran OLED pour l'affichage local, et les plateformes Telegram et Blynk pour le suivi et les alertes à distance. L'objectif est de concevoir une solution efficace, évolutive, connectée et peu coûteuse, capable de répondre aux exigences strictes imposées par les normes des environnements contrôlés.

Le travail est structuré en trois chapitres : le premier expose les concepts fondamentaux et les normes des salles blanches ; le deuxième détaille la conception du système, ses composants matériels et logiciels, ainsi que son principe de fonctionnement ; le troisième enfin présente les tests effectués, les résultats obtenus, et les possibilités d'évolution.

# Chapitre I : Généralités sur les systèmes de surveillance environnementale des salles blanches

## I.1 Introduction :

Dans de nombreux secteurs industriels sensibles tels que la microélectronique, la pharmaceutique ou l'agroalimentaire, il est crucial de maintenir des conditions environnementales strictement contrôlées pour assurer la qualité de production et la sécurité des produits. C'est dans ce contexte que les salles blanches, ou cleanrooms, sont conçues pour offrir un environnement ultra-propre, avec un contrôle rigoureux des paramètres tels que la température, l'humidité, la pression atmosphérique et la qualité de l'air.

La surveillance continue de ces paramètres est essentielle pour détecter toute déviation pouvant compromettre la conformité du processus. Les systèmes de surveillance environnementale jouent alors un rôle central en permettant une détection rapide des anomalies, une alerte immédiate des opérateurs, ainsi qu'un enregistrement des données pour le suivi et la traçabilité.



*Figure I. 1: Vue intérieure d'une salle blanche ISO*

La **Figure I.1** illustre l'intérieur typique d'une salle blanche conforme aux normes ISO, mettant en évidence les équipements et les tenues spécifiques portées par les opérateurs. Cette configuration vise à réduire au minimum toute contamination particulaire. Elle met en lumière l'importance de l'aménagement physique (surfaces lisses, flux d'air contrôlé, sas d'entrée) et des protocoles humains (tenues, procédures de nettoyage) dans le maintien des conditions de stérilité. Ce chapitre présente un état de l'art sur les systèmes de surveillance utilisés dans les salles blanches, en abordant l'évolution des méthodes, les technologies déployées et les exigences spécifiques.

## I.2 Introduction aux systèmes de surveillance des salles blanches :

Pour assurer un environnement stable et conforme dans une salle blanche, il est essentiel de comprendre les caractéristiques fondamentales des salles blanches ainsi que les exigences qui encadrent leur conception et leur exploitation. Cette section présente d'abord une définition des salles blanches, puis détaille les normes internationales qui en déterminent le niveau de propreté, avant d'examiner les risques et enjeux associés à un contrôle environnemental insuffisant. Ces éléments sont indispensables pour justifier l'importance des solutions de surveillance automatisée qui seront développées dans les chapitres suivants.

### I.2.2 Définition d'une salle blanche :

Une salle blanche (cleanroom) est un environnement à contamination et atmosphère contrôlée. Il s'agit d'un espace où la concentration particulaire est strictement maîtrisée. Elle vise à minimiser l'introduction, la génération et la rétention de particules à l'intérieur de celui-ci, afin de garantir des conditions de propreté constantes. Outre les particules, les paramètres tels que la température, l'humidité relative et la pression différentielle sont également contrôlés avec rigueur, selon des normes strictes. Ces salles blanches apportent des solutions essentielles à de multiples secteurs où la présence de particules, poussières, virus, bactéries... peut compromettre la qualité des produits ou des procédés de fabrication.

La Figure I.2 illustre différentes configurations de salles blanches dans un environnement industriel. On y observe les exigences strictes en matière d'architecture, d'équipements et de comportements du personnel. Ces éléments visent à limiter les risques de contamination et à garantir la conformité aux normes ISO et GMP. Elle met également en évidence l'importance de l'automatisation dans les environnements contrôlés, où la précision et la régularité des opérations sont primordiales.



Figure I. 2: Vues représentatives de différentes configurations de salles blanches industrielles

## I.2.2 Normes et classifications des salles blanches :

Les salles blanches sont des environnements soumis à des réglementations strictes visant à garantir un niveau de propreté défini. Ces normes déterminent les limites admissibles de particules en suspension dans l'air, ainsi que d'autres paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité et la pression. Leur respect est essentiel pour assurer la conformité, la sécurité des processus, et la qualité des produits.

### a. Norme ISO 14644-1

La norme internationale ISO 14644-1 est la référence principale en matière de classification des salles blanches. Elle définit les classes de propreté de l'air en fonction du nombre maximal de particules par mètre cube d'air, selon leur taille.

Tableau I. 1: Tableau des classes ISO 14644-1

| Classe ISO | 0.1 µm  | 0.2 µm | 0.3 µm | 0.5 µm    | 1 µm    | 5 µm   |
|------------|---------|--------|--------|-----------|---------|--------|
| ISO 1      | 10      | 2      | -      | -         | -       | -      |
| ISO 5      | 100,000 | 23,700 | 10,200 | 3,520     | 832     | 29     |
| ISO 8      | -       | -      | -      | 3,520,000 | 832,000 | 29,000 |

Plus la classe est basse, plus le niveau de propreté est élevé. Par exemple, une salle ISO 5 est bien plus propre qu'une salle ISO 8.

### b. Autres normes

D'autres référentiels peuvent également être utilisés, comme :

- Les normes GMP (Good Manufacturing Practices) : Utilisées dans l'industrie pharmaceutique, elles introduisent les classes A, B, C, et D, qui correspondent à différents niveaux de stérilité selon les étapes de production.
- les standards USP <797> et <800> : Normes utilisées dans les environnements médicaux pour les préparations stériles.
- NF EN 17141 : Norme européenne sur la biocontamination dans les salles propres.

### c. Autres critères de classification

Le respect de ces normes nécessite l'utilisation de systèmes de surveillance environnementale automatisés, fiables et en temps réel. En complément des particules, les normes imposent des plages acceptables pour :

- L'humidité relative (souvent entre 30 % et 60 %),
- La température (en général 18–24 °C),
- La pression différentielle (pour éviter l'entrée d'air non filtré),
- La qualité de l'air (gaz, COV, CO<sub>2</sub>, gaz spécifiques...).

### **I.2.3 Enjeux et risques d'un mauvais contrôle**

L'environnement de salle blanche est un hautement contrôlé dans lequel les paramètres doivent être rigoureusement maintenus dans des plages définies. Le non-respect de ces paramètres, même minime, peut entraîner des conséquences graves, aussi bien sur le produit que sur la sécurité du personnel et la conformité réglementaire.

#### **a. Risque de contamination**

Une mauvaise régulation de la température, de l'humidité ou de la pression peut favoriser la prolifération microbienne, le dépôt de particules, de moisissures ou de bactéries sur des surfaces sensibles. Cela compromet directement la stérilité des produits dans les secteurs pharmaceutique, biomédical ou alimentaire, ainsi il peut entraîner leur rejet ou leur rappel.

La Figure I.3 illustre ce phénomène à travers une boîte de Pétri montrant une contamination massive du milieu de culture, probablement issue d'un environnement non maîtrisé. Cette situation, fréquente en cas de défaillance du système de surveillance, peut entraîner des rejets de lots, des rappels de produits, voire une suspension de la production.



*Figure I. 3: Contamination microbienne d'un produit*

#### **b. Altération de la qualité des produits**

Des fluctuations non maîtrisées de variations thermiques ou hygrométriques peuvent perturber les processus de fabrication. Par exemple, dans l'industrie des semi-conducteurs, une température instable peut causer des défauts microscopiques invisibles à l'œil nu mais critiques à l'échelle des circuits intégrés.

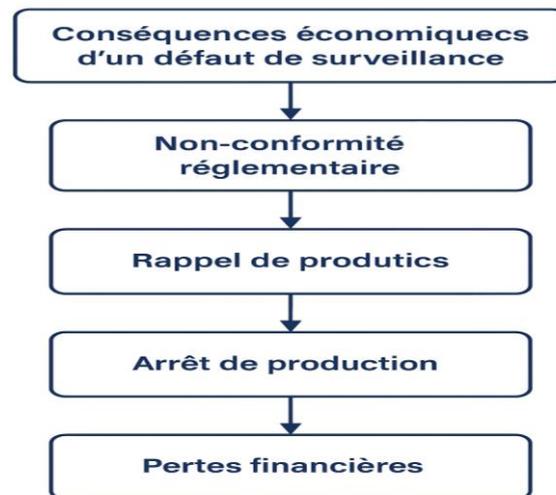
#### **c. Non-conformité réglementaire**

Le non-respect des normes strictes comme l'ISO 14644-1 dans les salles blanches ainsi que tout dépassement des seuils fixés risque de sanctions, retrait de lots, déclassement de la salle voire même une fermeture temporaire des installations lors d'audits qualité.

#### **d. Perte et conséquences économiques**

Une panne ou un dysfonctionnement dans le système environnemental peut conduire à des conséquences économiques graves tel que l'arrêts de production, la perte de lots entiers de produits, ou à des coûts de requalification. Un système de surveillance efficace évite ces pertes en intervenant rapidement dès qu'un dépassement de seuil est détecté.

La Figure I.4 illustre clairement cette chaîne de conséquences en cascade, soulignant l'importance d'un système de surveillance capable d'intervenir de manière autonome et immédiate dès qu'un paramètre critique est dépassé.



*Figure I. 4: Diagramme représentant les conséquences économiques*

#### **e. Risque et Impact pour le personnel humain**

Dans certaines industries, notamment les laboratoires biologiques ou les zones sensibles, un mauvais contrôle de la qualité de l'air peut mettre en danger le personnel ou l'environnement extérieur.

Un système de surveillance intelligent permet non seulement de prévenir ces risques, mais également d'assurer une traçabilité des conditions environnementales tout au long du processus de production. C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet de surveillance environnementale automatisée de salle blanche, présenté dans ce mémoire.

### **I.3 Paramètres physiques à surveiller dans une salle blanche :**

Le bon fonctionnement d'une salle blanche repose sur le contrôle rigoureux de plusieurs paramètres physiques. Ces variables doivent rester dans des plages spécifiques selon le type d'activité et la classe de la salle. Leur surveillance continue permet d'assurer la conformité, la qualité de production et la sécurité du personnel.

### 1.3.1 Température

La température doit être stable pour garantir des conditions de travail confortables et éviter les variations thermiques qui peuvent affecter les matériaux ou les réactions chimiques. Une température trop élevée peut favoriser la prolifération microbienne. Trop basse, elle peut nuire au confort des opérateurs et à certains processus sensibles.

- Valeur de la plage typique : entre 18°C et 24°C
- Risques : surchauffe, condensation, baisse d'efficacité des équipements sensibles



*Figure I. 5: Photo de Thermo-hygromètre numérique*

La Figure I.5 présente un thermo-hygromètre numérique, utilisé pour mesurer ponctuellement la température et l'humidité dans une zone donnée. Bien qu'utile pour une vérification locale, cet appareil reste limité : il ne permet ni surveillance en continu, ni transmission à distance, ni déclenchement d'alertes automatiques.

### 1.3.2 Humidité relative

L'humidité a un impact direct sur l'électricité statique, la croissance microbienne, et les propriétés de certains produits.

- Plage recommandée : entre 40 % et 60 %
- Trop d'humidité peut entraîner de la condensation. Un air trop sec favorise l'accumulation de charges électrostatiques.

### 1.3.3 Pression différentielle

La pression de la salle blanche doit être plus élevée que celle des zones adjacentes (surpression), pour empêcher l'entrée des particules extérieures et d'air contaminé.

- Pression typique : de +10 à +15 Pa par rapport aux zones voisines.
- En cas de pression insuffisante, des polluants peuvent entrer dans la salle.

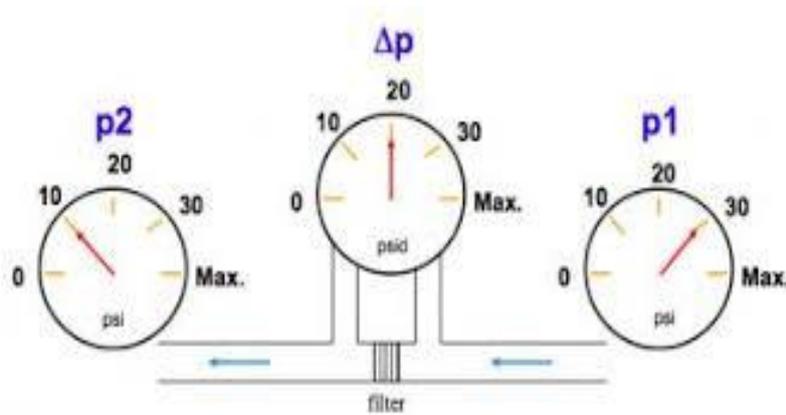


Figure I. 6: Schéma de pression différentielle entre deux pièces

La Figure I.6 illustre un schéma typique de mesure de pression différentielle à travers un filtre. Le manomètre central calcule la différence entre la pression amont ( $p_1$ ) et aval ( $p_2$ ), notée  $\Delta p$ . Un écart trop faible signale une perte de confinement potentielle, tandis qu'un  $\Delta p$  excessif peut indiquer un colmatage du filtre. Une surveillance continue de  $\Delta p$  permet donc de garantir la protection de la zone propre et de déclencher des interventions en cas de dérive.

### 1.3.4 Qualité et concentration de l'air et gaz (COV, CO<sub>2</sub>)

Certains environnements exigent un contrôle des gaz présents dans l'air (comme les COV, CO<sub>2</sub> ou les gaz organiques). Les capteurs mesurent souvent la résistance des gaz (en ohms ou kilo-ohms), utilisée comme indicateur de la qualité de l'air. Un seuil de 25 000 ohms est souvent considéré comme limite pour un air propre. La mesure de la qualité d'air à travers la concentration des particules en suspension dans l'air est fondamentale pour la classification des salles. Elles sont contrôlées via des filtres HEPA et des flux d'air laminaire.

## I.4 Évolution des systèmes de surveillance

### I.4.1 Historique et méthodes traditionnelles des systèmes de contrôle

Les premières salles blanches utilisaient des systèmes de surveillance manuels, basés sur des relevés réguliers effectués par des opérateurs. Avec l'évolution des technologies, ces méthodes ont été progressivement remplacées par des dispositifs automatisés capables de mesurer en temps réel les paramètres critiques de l'environnement.

L'intégration des capteurs numériques, des microcontrôleurs et des solutions connectées via Wi-Fi a permis l'émergence de systèmes intelligents, autonomes et souvent accessibles à distance. Ces solutions permettent désormais une réaction immédiate en cas de dépassement des seuils, ainsi qu'une gestion efficace des alertes.

#### **I.4.2 Technologies utilisées dans les systèmes de surveillance en salle blanche**

Le contrôle strict des paramètres environnementaux dans une salle blanche nécessite des technologies de surveillance avancées, capables de garantir une précision, une continuité et une fiabilité maximales. Traditionnellement, ces salles faisaient appel à des systèmes de mesure séparés pour chaque grandeur physique, utilisant des instruments analogiques ou des capteurs simples non connectés. Les relevés étaient effectués manuellement ou enregistrés sur papier, ce qui augmentait les risques d'erreur humaine et de délais dans la détection d'anomalies. Les limitations des anciennes méthodes :

- ✓ Pas de centralisation des données : chaque capteur fonctionnait indépendamment, sans communication avec un système unifié.
- ✓ Aucune alerte en temps réel : en cas de dépassement des seuils, aucune réaction automatique n'était déclenchée.
- ✓ Enregistrement manuel : les techniciens notaient les valeurs à intervalles réguliers, ce qui ne permettait pas une surveillance continue.
- ✓ Peu de traçabilité : difficile d'assurer un historique fiable des conditions environnementales en cas d'audit ou de dysfonctionnement.

Ces limites ont conduit à l'émergence de nouvelles solutions basées sur l'électronique embarquée et les objets connectés (IoT). Le projet de surveillance environnementale développé dans ce travail s'inscrit précisément dans cette dynamique, grâce à une intégration efficace de plusieurs technologies modernes que nous présentons ci-après.

- Capteurs intelligents multifonctions
- Microcontrôleurs avec connectivité sans fil
- Interfaces d'affichage local
- Plateformes de supervision à distance
- Systèmes d'action automatiques

Grâce à l'intégration de ces technologies modernes, le système de surveillance proposé surpasse largement les méthodes classiques. Il garantit une mesure fiable, une réaction rapide aux anomalies et une traçabilité complète, autant d'éléments essentiels dans le maintien des normes strictes exigées par les environnements en salle blanche. Ces évolutions s'inscrivent dans la logique de l'Industrie 4.0, où les objets connectés et la gestion intelligente des données sont au cœur des processus industriels.

## I.5 Domaines d'application des salles blanches

Les salles blanches sont utilisées dans de nombreux secteurs industriels, scientifiques et médicaux. Leur point commun est la nécessité d'un environnement maîtrisé, exempt de toute contamination particulaire, chimique ou biologique. Voici les principaux domaines d'application :

### 1.5.1 Industrie pharmaceutique

L'industrie pharmaceutique est sans doute le secteur où les exigences en matière de salle blanche sont les plus strictes. Leurs objectifs est de garantir la stérilité, éviter les contaminations croisées, respecter les normes GMP. Ces espaces sont utilisés pour :

- La fabrication de médicaments stériles (injectables, ophtalmiques...),
- Le conditionnement de dispositifs médicaux,
- Les laboratoires de microbiologie ou de contrôle qualité.



*Figure I. 7: Production pharmaceutique en salle blanche*

La Figure I.7 montre une salle blanche pharmaceutique typique, où deux opérateurs effectuent des manipulations sous atmosphère contrôlée. Les tenues stériles, l'aménagement épuré, les plafonds filtrants et les surfaces lisses illustrent les mesures mises en œuvre pour respecter les normes GMP, garantir la stérilité et éviter toute contamination croisée.

### 1.5.2 Industrie électronique et microélectronique

L'industrie électronique et microélectronique est particulièrement sensible à la contamination particulaire, même à des niveaux imperceptibles à l'œil nu. La **fabrication de composants miniaturisés** – tels que les **semi-conducteurs**, **circuits intégrés**, **capteurs MEMS**, ou **cartes électroniques** – nécessite un environnement d'une propreté extrême, souvent classé **ISO 5 à ISO 7** selon la norme ISO 14644-1.

Une particule de quelques microns peut suffire à altérer le fonctionnement d'un transistor, perturber la lithographie d'un wafer ou provoquer un court-circuit invisible sur un circuit imprimé.



*Figure I. 8: Fabrication de composants électroniques en salle blanche*

La Figure I.8 montre une ligne de production de composants électroniques en salle blanche. Les opérateurs portent des tenues antistatiques intégrales, et les équipements sont conçus pour minimiser les risques de contamination et de décharge électrostatique. Ce niveau d'exigence est indispensable pour garantir la fiabilité et la longévité des composants électroniques miniaturisés.

### **1.5.3 Biotechnologie et recherche biomédicale**

Les laboratoires de biotechnologie et en recherche biomédicale doivent garantir un environnement extrêmement stable et sécurisé, où la stabilité de l'atmosphère est un facteur déterminant. La culture de cellules humaines ou animales, la manipulation de matériel génétique ou la production de substances biologiques actives nécessitent un contrôle précis de la température, de l'humidité et des gaz spécifiques (comme le CO<sub>2</sub>).



*Figure I. 9: Photo de Laboratoire biotechnologie*

La Figure I.9 montre un chercheur en pleine manipulation dans un laboratoire de biotechnologie. La configuration du poste de travail, les équipements stériles et la tenue du personnel illustrent les exigences de confinement et de rigueur dans ces environnements. Le moindre écart dans les conditions de travail pourrait compromettre la viabilité d'une culture ou la reproductibilité d'un protocole expérimental.

#### **1.5.4 Industrie agroalimentaire spécialisée**

Certaines lignes de l'industrie de production agroalimentaire de produits à haute valeur ajoutée (aliments pour bébé, produits diététiques, compléments alimentaires...) nécessitent un environnement contrôlé :

- Éviter la contamination microbienne,
- Garantir une longue durée de conservation.



*Figure I. 10: Photo de Ligne de production agroalimentaire*

La Figure I.10 illustre une ligne de production automatisée en environnement contrôlé. Les équipements sont conçus pour limiter toute contamination, assurer une manipulation sans contact et permettre un nettoyage optimal. Ce type de configuration s'inspire largement des protocoles de l'industrie pharmaceutique, avec une intégration croissante de systèmes de surveillance continue pour garantir la traçabilité et la conformité.

#### **1.5.5 Santé et milieu hospitalier**

Dans le domaine de la santé et hospitalier, les environnements contrôlés jouent un rôle central pour garantir la sécurité des patients et du personnel soignant. Dans un tel contexte, un système de surveillance automatisé est essentiel pour détecter en temps réel toute dérive et réagir sans délai. Les salles blanches hospitalières sont essentielles dans :

- les blocs opératoires (chirurgie conventionnelle, implantologie, orthopédie lourde),
- les chambres d'isolement (infectiologie, greffes, hématologie),

- les zones de préparation et de stérilisation du matériel médical (pharmacies hospitalières, stérilisation centrale).



*Figure I. 11: Salle d'opération en environnement stérile*

La Figure I.11 présente une salle d'opération stérile moderne, dotée d'équipements médicaux suspendus, de surfaces faciles à désinfecter et d'une configuration conforme aux exigences d'asepsie. Le personnel porte une tenue complète, et l'agencement de l'espace vise à limiter les flux de contamination.

## **I.6 Conclusion :**

Ce chapitre a présenté les éléments fondamentaux relatifs aux salles blanches, en insistant sur leur rôle critique dans les environnements industriels sensibles. Il a décrit les normes applicables, les paramètres à surveiller, les risques encourus en cas de dérive, et l'évolution des technologies de surveillance.

Le contrôle environnemental en temps réel constitue désormais une exigence incontournable. Les technologies modernes, combinant capteurs multifonctions, électronique embarquée et plateformes connectées, permettent d'atteindre un niveau de fiabilité et de réactivité élevé.

Le chapitre suivant portera sur la conception du système de surveillance automatisé proposé dans ce travail, avec une description détaillée de ses composants, son principe de fonctionnement, et son intégration dans une architecture IoT.

# **CHAPITRE II : Conception et principe de fonctionnement du système**

## **II.1 Introduction**

Dans les environnements à atmosphère contrôlée, tels que les salles blanches, le respect strict des conditions environnementales est crucial pour garantir la qualité des produits et la sécurité des processus. Pour répondre à ces exigences, la conception, le développement et la mise en place d'un système de surveillance environnementale vise à garantir des conditions optimales de fonctionnement en mesurant en temps réel les paramètres environnementaux critiques d'une salle blanche les afficher localement, les transmettre à distance, et réagir automatiquement en cas de dépassement de seuils. Ces environnements, soumis à des normes strictes, nécessitent un contrôle permanent de paramètres tels que la température, l'humidité relative, la pression et la qualité de l'air.

Ce chapitre détaille les choix techniques réalisés pour construire ce système. Il décrit dans un premier temps les composants électroniques retenus (capteurs, microcontrôleur, interfaces, actionneurs), puis présente l'architecture générale du dispositif, suivie du principe de fonctionnement global. Enfin, une conclusion synthétise les éléments clés du processus de conception.

## **II.2 Choix et description des dispositifs électroniques du système**

Le contrôle environnemental en temps réel constitue désormais une exigence incontournable. Les technologies modernes, combinant capteurs multifonctions, électronique embarquée et plateformes connectées, permettent d'atteindre un niveau de fiabilité et de réactivité élevé.

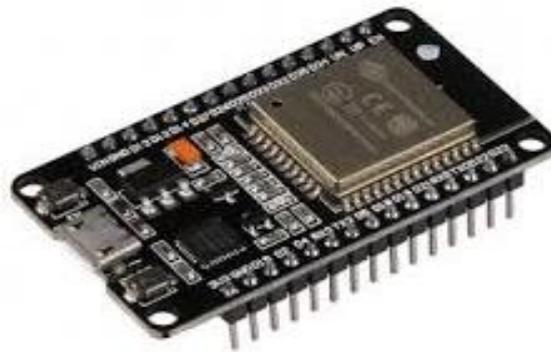
Le chapitre suivant portera sur la conception du système de surveillance automatisé proposé dans ce travail, avec une description détaillée de ses composants, son principe de fonctionnement, et son intégration dans une architecture IoT.

Dans cette section, nous présentons de manière approfondie les éléments matériels qui constituent le prototype de surveillance environnementale de la salle blanche. Chaque composant est décrit selon sa fonction, ses spécifications techniques, ainsi que les raisons de son intégration dans l'architecture du système.

### II.2.1 Carte de commande et de contrôle embarqué Module ESP32

Le système de surveillance environnementale développé repose sur le module NodeMCU ESP32, une carte de développement embarquée performante et très utilisée dans les projets liés à l'Internet des objets (IoT). Ce module constitue le cœur du système de traitement, de gestion des capteurs, de communication réseau et de commande des actionneurs.

Le ESP32 a un microcontrôleur de nouvelle génération conçu par Espressif Systems. Il intègre un processeur double cœur Xtensa® LX6 cadencé jusqu'à 240 MHz, avec 520 Ko de SRAM et jusqu'à 8 Mo de mémoire PSRAM, ce qui lui permet de gérer plusieurs tâches simultanément : acquisition des mesures, affichage en temps réel, transmission des données via Wi-Fi, déclenchement de réactions automatiques, etc. La carte embarque également : un module Wi-Fi 802.11 b/g/n et Bluetooth (BLE), une interface USB de type micro-USB (ou Type-C selon les versions), et de nombreuses broches GPIO multifonction programmables (UART, SPI, I2C, PWM...). Elle est programmable à l'aide de l'IDE Arduino, et compatible avec les bibliothèques standard, ce qui facilite son intégration rapide dans des prototypes fonctionnels.



*Figure II. 1: Module NodeMCUESP32*

La Figure II.1 illustre le module ESP32 utilisé dans ce projet. On y reconnaît la puce ESP32 soudée sur une carte de développement standard, équipée de connecteurs latéraux (headers) mâles, permettant une intégration rapide sur breadboard ou carte de prototypage. Cette carte est compacte, légère, économique et conçue pour être facilement interfacée avec d'autres composants. Elle permet, via sa connexion Wi-Fi, de créer un point d'accès, de se connecter à un réseau local, ou encore d'envoyer des données vers un serveur distant ou une application mobile. C'est une fonctionnalité essentielle pour toute application de surveillance à distance.

Ce tableau II.1 présente les caractéristiques techniques essentielles du module ESP32 utilisé comme carte de commande principale. On y retrouve les spécifications du processeur, de la mémoire, de l'interface USB, de l'alimentation, ainsi que la température de fonctionnement et

les types d'interfaces disponibles. Ces spécifications démontrent que l'ESP32 est un microcontrôleur puissant et polyvalent, adapté aux environnements industriels légers.

Tableau II. 1: Caractéristiques de la carte NodeMCU ESP32.

|  |  |
|--|--|
| Chipset                                | ESPRESSIF-ESP32240MHz<br>Xtensa®Microprocesseur LX632bits simple/double cœur.                                  |
| Mémoire FLASH                          | Flash QSPI4Mo/PS RAM 8Mo.  |
| Fiche USB                              | USB Type-c.  |
| Tension de fonctionnement              | 2.7V-3.6V.   |
| Courant de travail                     | Environ 70mA   |
| Courant de veille                      | Environ 300uA  |
| Horloge embarquée                      | Oscillateur à cristal de 40MHz   |
| Plage de température de Fonctionnement | -40°C~+85°C.   |
| Interface modulaire                    | UART, SPI, SDIO, I2C, LEDPWM, TVPWM, I2S, IRGPIO, Capteur tactile à condensateur, ADC, préamplificateur ACLNA. |

Le tableau II.2 indique les modalités d'alimentation du module ESP32, notamment le type de connexion (port USB 5V), le courant maximal de charge, et la compatibilité avec les batteries lithium 3,7 V. Ces caractéristiques montrent que le système est **facilement alimentable** à partir de sources standards (port USB ou batterie), ce qui est un **atout majeur pour la portabilité ou les tests sur banc**. Le courant de charge de 500 mA est adapté aux capteurs basse consommation et aux petits actionneurs comme les ventilateurs 5V ou les LED.

Tableau II. 2: Les Spécifications de l'alimentation.

|                   |                           |
|-------------------|---------------------------|
| Alimentation      | USB 5V/1A.                |
| Courant de charge | 500mA.                    |
| Batterie          | Batterie au lithium 3,7V. |

ce tableau II.3 résume les capacités logicielles et de communication du module ESP32, notamment les modes de fonctionnement du Wi-Fi, les protocoles de sécurité, les types de cryptage, les modes de mise à jour firmware, et les environnements de développement compatibles. L'ESP32 est une plateforme sécurisée et évolutive. Il prend en charge les principaux standards de sécurité réseau (WPA2, WPS, etc.) et les méthodes de cryptage avancées (AES, RSA). Grâce à la possibilité de mise à jour OTA (*Over The Air*), le système

peut être maintenu ou corrigé à distance, ce qui est fondamental pour une application connectée comme la surveillance environnementale d'une salle blanche.

Tableau II. 3: Les Spécifications du logiciel de la carte NodeMCU ESP32

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Mode Wi-Fi                      | station/SoftAP/SoftAP+Station/P2P   |
| Mécanisme de sécurité           | WPA/WPA2/WPA2-Enterprise/WPS  |
| Type de cryptage                | AES/RSA/ECC/SHA   |
| Mise à niveau du micro-logiciel | Téléchargement UART/OTA (via réseau/hôte pour télécharger et écrire le micro-logiciel)              |
| Développement du logiciels      | Support de développement de serveur cloud/SDK pour le développement de micro-logiciels utilisateur. |
| Système d'exploitation          | FreeRTOS  |

La figure II.2 donne la description du Module NodeMCU ESP32 ainsi que le brochage de différents pins. Les Pins ou GPIO (Les ports GPIO (anglais : General Purpose Input/Output, littéralement Entrée-sortie à usage général) sont des ports d'entrées sorties très utilisés dans le monde des microcontrôleurs. On peut assigner plusieurs fonctions au même pin, grâce au circuit de multiplexage de la carte ESP32. On peut choisir le rôle d'un pin (UART, I2C, SPI) par programmation. Cette polyvalence facilite l'adaptation du microcontrôleur aux exigences de différentes architectures.

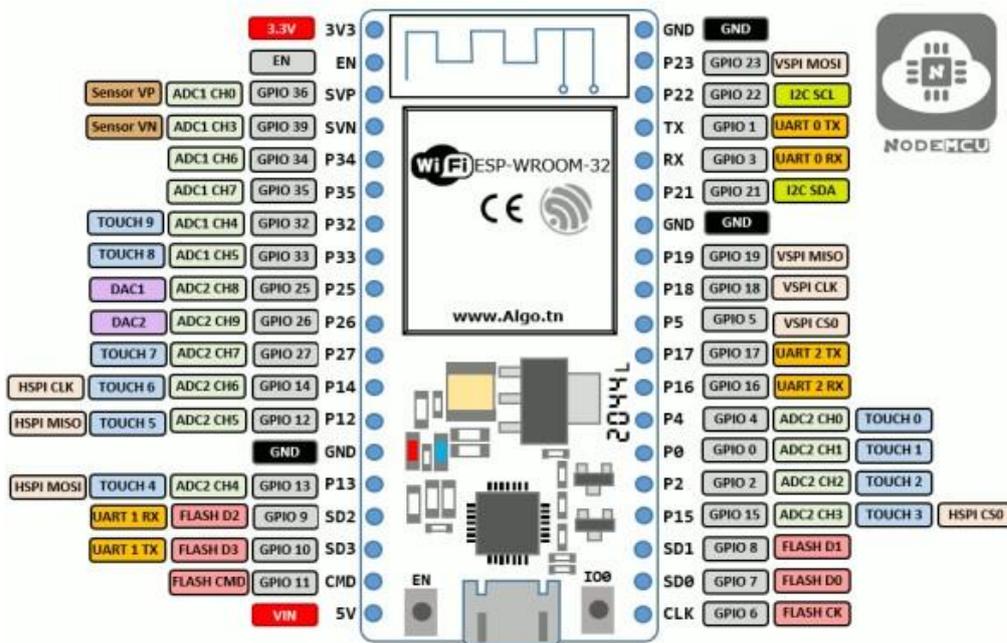


Figure II. 2: Description du Module NodeMCU ESP32

Le choix du module ESP32 s'explique par ses atouts techniques et pratiques :

- Il centralise toutes les fonctions clés du système (lecture capteurs, traitement, communication, commande).
- Il est compatible avec une large variété de capteurs industriels.
- Il prend en charge la connectivité réseau sans ajout de module externe.
- Son coût abordable et sa facilité de programmation le rendent idéal pour des projets industriels légers.

## II.2.2 Capteur environnemental multifonction : BME680

### a. Présentation générale :

Le BME680 est un capteur environnemental numérique développé par Bosch Sensortec, conçu pour mesurer de manière simultanée quatre paramètres physiques essentiels la température, l'humidité relative, la pression atmosphérique, ainsi que la qualité de l'air à travers la détection de composés organiques volatils (COV). Il est principalement utilisé dans les systèmes de surveillance de l'environnement intérieur, les applications domotiques, et les projets IoT.

Figure II.3 présente le module BME680 utilisé dans ce projet. Il s'agit d'une version montée sur carte, avec des broches standards (VCC, GND, SCL, SDA, etc.), compatible à la fois avec les protocoles I2C et SPI, facilitant son interfaçage avec des microcontrôleurs comme l'ESP32.

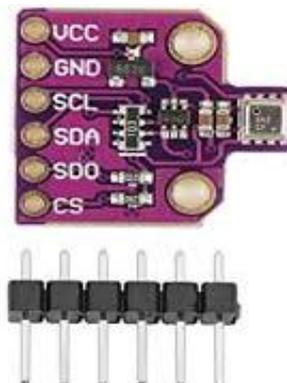


Figure II. 3: Photo de capteur BME680

### b. Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement du BME680 repose sur l'intégration de plusieurs technologies de capteurs miniaturisés au sein d'un même boîtier :

- Une thermistance intégrée mesure la température ambiante.
- Un capteur capacitif détecte l'humidité relative.
- Un capteur piézorésistif mesure la pression atmosphérique.
- Un capteur à oxyde métallique chauffé (MOX) détecte les gaz volatils (COV), en mesurant la variation de résistance liée à la concentration de gaz présents dans l'air.

Lorsqu'il est alimenté et initialisé via une interface I2C ou SPI, le capteur mesure en continu les paramètres et transmet les valeurs numériques au microcontrôleur ESP32. Les algorithmes intégrés assurent la compensation des mesures pour une précision optimale.

Le tableau II.4 met en évidence la polyvalence du capteur BME680. Il couvre une plage de température et d'humidité compatible avec les environnements industriels classiques, y compris les salles blanches. Sa précision est adaptée aux applications de contrôle sans exigence métrologique extrême. La mesure des gaz COV, exprimée sous forme de résistance variable, permet de détecter indirectement la pollution de l'air intérieur (fumées, solvants, éthanol, etc.), et d'en dériver des indices de qualité de l'air (*air quality index – AQI*).

Tableau II. 4: Caractéristiques techniques du capteur BME 680

| Paramètre                  | Valeur                            |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Tension d'alimentation     | 1.8 V – 3.6 V                     |
| Interface de communication | I2C (adresse 0x76 ou 0x77) ou SPI |
| Température mesurable      | -40 à +85 °C                      |
| Précision température      | ±1.0 °C                           |
| Humidité relative          | 0 à 100 % HR                      |
| Précision humidité         | ±3 % HR                           |
| Plage de pression          | 300 hPa à 1100 hPa                |
| Précision pression         | ±1 hPa                            |
| Détection de gaz (COV)     | Résistance gaz de 0.1 KΩ à 500 KΩ |
| Temps de réponse           | ~1 seconde (configurable)         |
| Dimensions                 | 3.0 × 3.0 × 0.93 mm               |

### II.2.3 Affichage local : écran OLED SH1106 1.3 pouces :

#### a. Présentation générale

L'affichage local des données mesurées constitue un élément essentiel pour le contrôle immédiat de l'environnement surveillé. Dans le système proposé, cette fonction est assurée par un écran OLED de 1.3 pouces, équipé du contrôleur SH1106. Contrairement aux écrans LCD classiques, il n'a pas besoin de rétroéclairage, ce qui lui confère un excellent contraste et une faible consommation. Ce type d'afficheur est particulièrement apprécié dans les systèmes embarqués pour sa compacité, sa lisibilité élevée ainsi que sa compatibilité avec les microcontrôleurs via le protocole I2C.



Figure II. 4 : Photo Écran OLED SH1106 1.3 pouces

La Figure II.4 montre un module OLED SH1106 utilisé dans notre applications. Il présente une matrice de 128 x 64 pixels monochromes et communique via une interface I2C, identifiable par ses deux broches principales : SDA (données) et SCL (horloge). La petite taille du module (environ 35 mm de côté) permet une intégration facile dans les systèmes embarqués tout en offrant une surface d’affichage suffisante pour des données textuelles ou graphiques.

#### **b. Principe de fonctionnement :**

L’écran utilise le contrôleur SH1106, qui pilote une matrice de pixels 128x64 OLED. Chaque pixel est une LED organique individuelle, capable de s’allumer indépendamment. Cela permet un affichage précis, net et économe en énergie. Lorsqu’il est connecté à un microcontrôleur (comme l’ESP32), les données d’affichage sont envoyées via les broches SDA/SCL (I2C). Des bibliothèques comme SH1106Wire ou U8g2 permettent de dessiner du texte, des icônes, ou encore de courbes de suivi très facilement et en temps réel.

Le tableau II.5 présente les caractéristiques techniques du module OLED SH1106 qui est parfaitement adapté à un système embarqué à faible consommation. Grâce à sa compatibilité avec l’ESP32, il peut être connecté directement sans adaptation matérielle. Sa résolution de 128x64 pixels est suffisante pour afficher plusieurs lignes d’informations (température, humidité, etc.), tout en restant lisible sur un petit écran.

Tableau II. 5: Caractéristiques techniques de l’Écran OLED SH1106 1.3 pouces

| Paramètre   | Valeur                      |
|-------------|-----------------------------|
| Technologie | OLED (affichage monochrome) |
| Contrôleur  | SH1106                      |
| Interface   | I2C (SDA/SCL) – parfois SPI |
| Résolution  | 128 x 64 pixels             |

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Taille                  | 1.3 pouces (environ 33 mm en diagonale)     |
| Couleur d'affichage     | Blanc (parfois bleu ou jaune selon version) |
| Tension d'alimentation  | 3.3 V à 5 V                                 |
| Consommation électrique | Très faible (< 20 mA typique)               |
| Adresse I2C par défaut  | 0x3C  |
| Dimensions du module    | Environ 35 × 35 mm                          |

## II.2.4 Actionneurs de réponse automatique : ventilateur 5V et LED d'alerte

### a. Rôle des actionneurs dans le système

Les actionneurs jouent un rôle essentiel dans la réponse autonome du système aux anomalies environnementales. Une fois qu'un dépassement de seuil est détecté par le capteur BME680 (température, humidité, pression ou gaz), le système déclenche automatiquement des éléments matériels correctifs ou signalétiques. Dans cette application, deux actionneurs ont été retenus :

- un ventilateur 5V pour corriger localement une élévation de température ou d'humidité,
- une LED d'alerte rouge, utilisée comme indicateur visuel de dysfonctionnement.

Ces deux dispositifs sont pilotés directement par des broches GPIO de l'ESP32, avec activation ou modulation en fonction de la gravité ou de la persistance de l'anomalie détectée.

### b. Ventilateur 5V – Mécanisme de régulation

Le ventilateur 5V utilisé est un actionneur électromécanique à moteur à courant continu permettant de déplacer l'air afin d'assurer une ventilation ponctuelle dans un environnement donné. Il est alimenté via une ligne 5 V mais commandé numériquement par la broche GPIO15 de l'ESP32 à travers un transistor NPN 2N2222, qui joue le rôle d'interrupteur électronique. Cette architecture protège le microcontrôleur et permet un contrôle fiable à faible consommation.

Lorsque l'un des paramètres environnementaux dépasse le seuil critique, le microcontrôleur active la broche GPIO, le transistor conduit, et le ventilateur entre en fonctionnement. Il continue de tourner tant que les valeurs restent anormales, puis s'éteint automatiquement dès que les conditions redeviennent conformes. Ce ventilateur permet de restaurer un équilibre thermique ou hygrométrique dans une petite zone, simulant une intervention corrective locale.

### c. LED d'alerte – Indication lumineuse d'anomalie

Une LED (Light Emitting Diode) est un composant électronique qui émet de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. Dans ce projet, la LED est utilisée comme indicateur visuel pour signaler un dépassement de seuil environnemental. La LED (diode électroluminescente) est connectée à la broche GPIO2 de l'ESP32. En cas de dépassement de seuil, le microcontrôleur active cette broche en alternant rapidement les états logiques (HIGH / LOW), ce qui génère un clignotement automatique visible tant que l'anomalie est présente et s'éteint dès que les conditions redeviennent normales. Le rythme du clignotement peut être configuré pour signaler l'intensité ou l'urgence de l'anomalie. Une résistance de limitation de 220  $\Omega$  est placée en série avec la LED pour éviter la surtension et limiter le courant à un niveau sûr ( $\sim 10\text{--}20$  mA).



Figure II. 5 : Photo de LED d'alerte

La Figure II.5 illustre la LED rouge utilisée comme indicateur visuel de dépassement de seuil. Installée sur la plaque de test, elle constitue un signal de sécurité immédiat, visible par les opérateurs en cas d'anomalie.

Le tableau II.6 présente les spécifications électriques et fonctionnelles de la LED utilisée dans le système comme indicateur visuel d'alerte. Il précise les valeurs typiques de tension de seuil, de courant nominal, ainsi que les conditions de commande par le microcontrôleur ESP32.

Tableau II. 6: Caractéristiques techniques LED

| Paramètre                 | Valeur typique                                    |
|---------------------------|---|
| Tension de fonctionnement | 2V environ (LED rouge), 3V (LED blanche ou bleue) |
| Courant nominal           | 10 à 20 mA  |
| Résistance de limitation  | 220 à 330 $\Omega$                                |
| Commande                  | Par GPIO2 ESP32                                   |
| Mode                      | Clignotement automatique                          |
| Couleur                   | Rouge (pour signaler un danger)                   |

## **II.3 Architecture générale du système :**

Le système de surveillance environnementale mis en œuvre dans le cadre de ce projet repose sur une architecture modulaire et évolutive, répartie en plusieurs sous-systèmes interconnectés. Cette organisation permet d'assurer la fiabilité de la collecte des données, la rapidité de traitement, la clarté de l'affichage, ainsi que la réactivité des alertes transmises à distance.

### **II.3.1 Composants matériels et architecture de câblage**

#### **a. Description fonctionnelle des composants**

Le système de surveillance embarqué conçu pour un environnement contrôlé (comme une salle blanche) repose sur un ensemble de composants matériels sélectionnés de manière rigoureuse. Chaque élément physique a été intégré pour répondre à une fonction spécifique dans la chaîne de fonctionnement globale : mesure, traitement, signalisation, action et communication. Le cœur du système est le microcontrôleur ESP32, qui centralise les tâches de lecture capteur, d'analyse locale, de commande d'actionneurs, d'affichage et d'émission de notifications à distance. Les mesures environnementales sont assurées par le capteur BME680, capable de détecter plusieurs variables critiques (température, humidité, pression, gaz).

Pour permettre une visualisation immédiate des données, un écran OLED SH1106 est utilisé, tandis que les anomalies sont signalées visuellement par une LED clignotante. En parallèle, un ventilateur joue le rôle d'actionneur correctif en cas de dépassement de seuils, assurant la régulation thermique ou la circulation de l'air. Les transistors servent à piloter les composants de puissance, comme le ventilateur, en évitant toute surcharge du microcontrôleur. Enfin, des résistances de protection sont utilisées pour sécuriser les composants les plus sensibles, notamment les LEDs, garantissant la durabilité du système. Cette organisation matérielle permet un fonctionnement autonome, fiable, et en temps réel.

Ce tableau II.7 résume l'organisation fonctionnelle du matériel embarqué. On y distingue trois grandes catégories :

1. Unité centrale (ESP32) : C'est le processeur embarqué du système. Il assure le contrôle, la coordination et la communication des autres composants.
2. Capteurs et afficheurs : Le capteur BME680 remplit une double fonction de multimesure environnementale, tandis que l'écran OLED fournit une interface utilisateur locale simple et efficace.
3. Actionneurs et protections : La LED signale immédiatement un dysfonctionnement, le ventilateur intervient physiquement, et les résistances + transistors assurent la protection électrique du système.

Cette structuration garantit que chaque composant apporte une **valeur ajoutée concrète**, sans redondance ni surcharge inutile, ce qui est essentiel pour un système embarqué en environnement critique (stérilité, fiabilité, encombrement minimal).

Tableau II. 7: Résumé fonctionnel des composants

| <b>Composant</b>                 | <b>Fonction principale</b>  |
|----------------------------------|---|
| <b>ESP32 (NodeMCU)</b>           | Carte de commande centrale : acquisition des données, traitement, communication, commande |
| <b>Capteur BME680</b>            | Mesure des paramètres environnementaux (température, humidité, pression, gaz COV).        |
| <b>Écran OLED SH1106</b>         | Affichage local en temps réel des données mesurées  |
| <b>LED d'alerte</b>              | Indication visuelle (clignotement) en cas de dépassement de seuils.                       |
| <b>Ventilateur 5V</b>            | Actionneur de régulation thermique activé en cas d'anomalie.                              |
| <b>Transistors de commande</b>   | Commutation électronique (commande du ventilateur à partir du GPIO ESP32)                 |
| <b>Résistances de protection</b> | Sécurisation des circuits LED et base du transistor.                                      |

## **b. Architecture de câblage des composants**

Dans ce système dédié à la surveillance d'environnement critique comme une salle blanche, l'architecture de câblage joue un rôle essentiel dans la fiabilité, la lisibilité et la sécurité du fonctionnement global. Tous les composants matériels ont été câblés de manière à optimiser l'utilisation des broches du microcontrôleur ESP32, tout en assurant une alimentation stable, une protection électronique adaptée et une réactivité maximale en cas d'alerte.

Le bus I<sup>2</sup>C, commun au capteur BME680 et à l'écran OLED SH1106, permet une communication bidirectionnelle efficace tout en utilisant seulement deux broches du microcontrôleur (GPIO 21 pour SDA, GPIO 22 pour SCL). Cela réduit le nombre de connexions physiques nécessaires, tout en garantissant une synchronisation correcte des données.

Les actionneurs (LED d'alerte et ventilateur 5V) sont quant à eux pilotés via des sorties numériques spécifiques. Le ventilateur est activé à travers un transistor NPN (2N2222) jouant le rôle d'interrupteur électronique, permettant de commander un courant plus élevé que celui toléré directement par l'ESP32. Une diode de roue libre (1N4007) est également ajoutée pour protéger le circuit contre les surtensions générées lors de l'arrêt du moteur (effet d'induction).

La LED rouge d’alerte est connectée en série avec une résistance de 220  $\Omega$  pour limiter le courant. Elle est pilotée par la broche GPIO 2 de l’ESP32 en mode PWM, ce qui permet d’obtenir un clignotement rythmique et visible, indiquant en temps réel toute anomalie détectée. Ce câblage structuré permet une intégration efficace sur plaque de prototypage rapide, tout en respectant les standards de sécurité électrique pour les composants basse tension.

Ce tableau II.8 synthétise les liaisons électroniques logiques et physiques entre les composants du système embarqué et le microcontrôleur ESP32. Cette architecture de câblage a été pensée pour offrir simplicité, sécurité et efficacité, des qualités indispensables dans le cadre d’un système autonome destiné à un environnement de haute exigence comme les salles blanches industrielles.

*Tableau II. 8: Tableau récapitulatif du câblage général*

| Composant          | Broche ESP32       | Description                          |
|--------------------|--------------------|--------------------------------------|
| BME680 - SDA       | GPIO 21            | Données I2C                          |
| BME680 - SCL       | GPIO 22            | Horloge I2C                          |
| BME680 - VCC       | 3.3V               | Alimentation                         |
| BME680 - GND       | GND                | Masse                                |
| OLED - SDA         | GPIO 21            | Données I2C (partagé avec BME680)    |
| OLED - SCL         | GPIO 22            | Horloge I2C (partagé avec BME680)    |
| OLED - VCC         | 3.3V               | Alimentation                         |
| OLED - GND         | GND                | Masse                                |
| Ventilateur - Ctrl | GPIO 15            | Commande de la base du transistor    |
| Ventilateur - VCC  | 5V                 | Alimentation moteur                  |
| Ventilateur - GND  | GND via transistor | Masse via transistor NPN             |
| LED d’alerte - +   | GPIO 2             | Commande via résistance 220 $\Omega$ |
| LED d’alerte - -   | GND                | Masse                                |

### **II.3.2 Organisation fonctionnelle du système de surveillance**

Cette section présente le schéma d’ensemble du système embarqué, illustrant les interconnexions logiques entre capteurs, processeur, actionneurs, et interfaces de communication. Ce schéma met en évidence la centralisation du traitement dans l’ESP32, qui coordonne à la fois la lecture des données, leur affichage local, l’alerte à distance, et l’activation automatique des réponses correctives. Il reflète l’intégration harmonieuse entre les composants physiques et les flux d’informations numériques, assurant une supervision autonome fiable et évolutive adaptée aux environnements critiques comme les salles blanches.

### **i. Système d'acquisition**

Le système d'acquisition constitue l'étape initiale de la chaîne de mesure. Il est chargé de collecter en continu les données environnementales à l'aide du capteur BME680. Ce capteur multifonction mesure simultanément la température, l'humidité relative, la pression atmosphérique et la qualité de l'air (via la résistance de gaz). Il communique avec le microcontrôleur ESP32 via le bus I2C, garantissant un transfert rapide et fiable des données. Cette première étape est cruciale pour assurer une surveillance précise et réactive des conditions de la salle blanche.

### **ii. Système de traitement**

Une fois les données acquises, le système de traitement les analyse localement à l'aide de l'ESP32. Ce microcontrôleur évalue en temps réel si les mesures respectent les seuils prédéfinis. En cas de dépassement, il déclenche automatiquement des actions comme l'activation du ventilateur ou l'envoi d'alertes. Grâce à sa capacité de traitement embarquée, l'ESP32 réduit la latence entre la détection et la réaction, assurant un fonctionnement autonome, rapide et fiable.

### **iii. Système de transmission**

Le système de transmission repose sur la connectivité Wi-Fi de l'ESP32. Il permet d'envoyer les données environnementales vers deux plateformes de supervision : Telegram, pour les alertes critiques, et Blynk, pour une visualisation en temps réel via smartphone. L'ESP32 utilise un client HTTPS sécurisé pour interagir avec les serveurs, garantissant la sécurité des échanges. Ce système assure une communication efficace entre le dispositif local et l'utilisateur distant.

### **iv. Système d'affichage**

Le système d'affichage local repose sur un écran OLED 1.3 pouces (SH1106) connecté en I2C. Il affiche en temps réel les valeurs de température, humidité, pression et gaz sous forme compacte et lisible. En cas d'alerte, l'écran affiche un message "ALERTE" clignotant, accompagné des valeurs hors normes. Ce retour visuel immédiat permet à l'utilisateur sur place de réagir rapidement, même sans accès à l'interface distante.

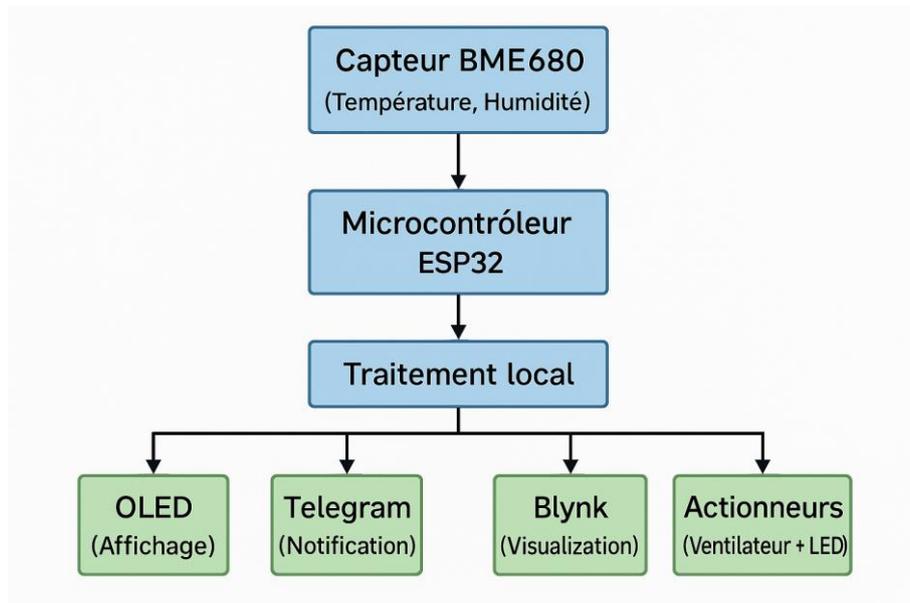


Figure II. 6: logigramme d'organisation fonctionnelle du système

La Figure II.8 présente le schéma fonctionnel simplifié du système embarqué développé. Il illustre le flux de données et le rôle central du microcontrôleur ESP32 dans la gestion des différentes tâches du système. Ce schéma démontre l'architecture distribuée du système, articulée autour d'un traitement centralisé, mais avec des réactions locales et distantes combinées, assurant ainsi un suivi intelligent, temps réel et multipoint de l'environnement surveillé.

#### II.4 Principe de fonctionnement du système

Le principe de fonctionnement du système de surveillance environnementale développé repose sur une succession logique d'étapes, allant de la collecte des données environnementales jusqu'à leur analyse, affichage et notification. Le microcontrôleur ESP32 joue un rôle central dans l'orchestration de l'ensemble des opérations.

##### II.4.1 Description générale du fonctionnement

Le système démarre par l'initialisation de tous les composants : le capteur BME680, l'écran OLED, la communication WiFi, et les plateformes de transmission (Telegram, Blynk). Une fois initialisé, le système entre dans un cycle de surveillance continue, effectué en boucle dans le programme `loop()`.

À chaque itération :

- i. Le capteur BME680 effectue une lecture des valeurs : température, humidité, pression atmosphérique, et qualité de l'air (gaz).

- ii. Ces valeurs sont comparées à des seuils prédéfinis selon les exigences d'une salle blanche.
- iii. En cas de dépassement de seuil, plusieurs actions sont déclenchées:
  - Une alerte est envoyée automatiquement via Telegram.
  - Une LED clignotante s'active pour signaler visuellement le danger.
  - Le ventilateur se met en marche pour rétablir les conditions normales.
- iv. Les données sont envoyées à la plateforme Blynk, permettant une visualisation à distance en temps réel.
- v. Les valeurs sont affichées localement sur l'écran OLED.
- vi. En l'absence de dépassement, l'écran continue l'affichage normal, le ventilateur reste éteint et la LED ne clignote pas.

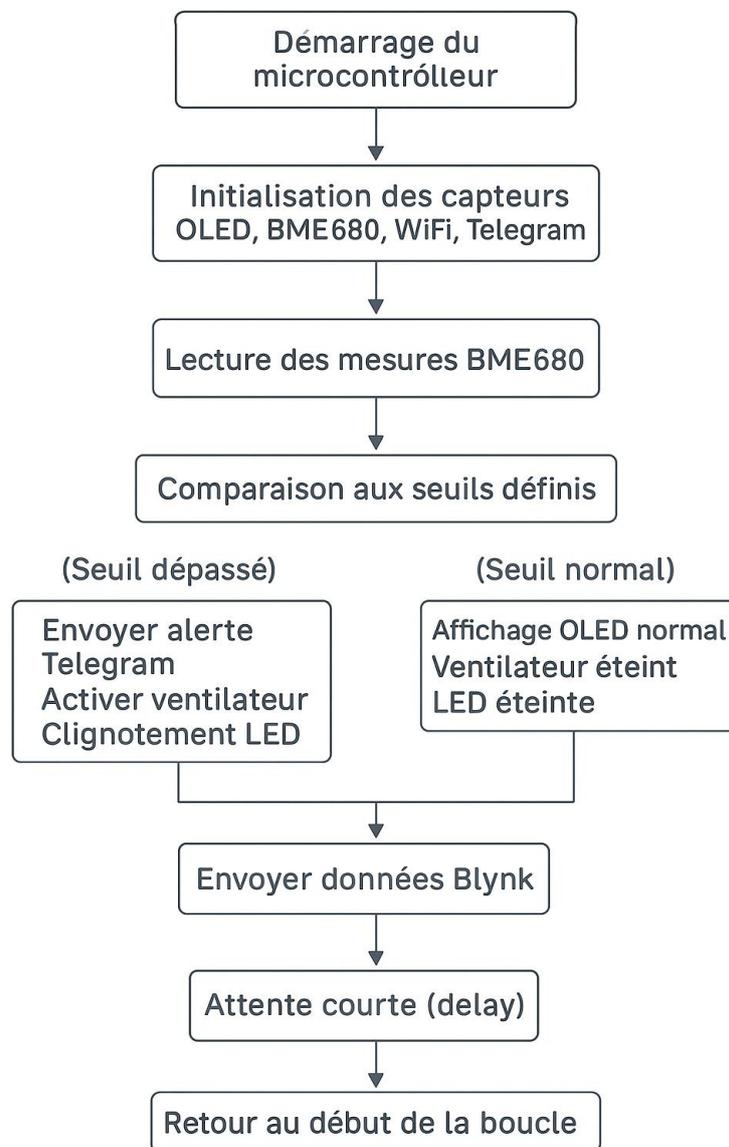


Figure II. 7: logigramme sur le Principe de fonctionnement du système

La figure II.7 illustre le schéma décisionnel du fonctionnement en boucle du système. On observe les principales étapes du traitement embarqué : initialisation, lecture, comparaison, décision, action, envoi des données, puis retour en boucle. Ce diagramme représente la logique centrale de l'algorithme :

- La détection d'un dépassement de seuil active une réponse immédiate multicanal : actionneurs locaux + notifications distantes.
- En l'absence d'anomalie, le système continue l'affichage normal et conserve ses composants inactifs.
- Le cycle est rapide, léger, et optimisé pour être non-bloquant, ce qui garantit une fluidité d'exécution, essentielle pour une surveillance continue.

#### **II.4.2 Logique de décision**

Le cœur du traitement conditionnel du système est basé sur la fonction `checkThresholds()` intégrée dans le code. Cette fonction :

- Compare chaque valeur mesurée aux seuils critiques définis,
- Active automatiquement les dispositifs d'alerte si une condition anormale est détectée :
  - Envoi d'un message Telegram via API,
  - Affichage du message "ALERTE" sur l'écran OLED,
  - Activation de la LED clignotante et du ventilateur via les broches GPIO.

Une temporisation interne est prévue (ex. : 10 secondes) pour éviter l'envoi d'alertes multiples inutiles, garantissant ainsi une utilisation efficace du canal de notification.

### **II.5 Composants logiciels et environnement de développement**

Le bon fonctionnement du système embarqué repose sur une infrastructure logicielle bien structurée, permettant la gestion efficace des capteurs, des actionneurs, des interfaces d'affichage et des canaux de communication. Le microcontrôleur ESP32 est programmé dans un environnement open-source à l'aide de l'IDE Arduino, combiné avec un ensemble de bibliothèques logicielles spécialisées. À cela s'ajoutent des plateformes IoT telles que Blynk et Telegram, qui assurent la supervision à distance et la notification en temps réel des anomalies.

#### **II.5.1 Environnement de développement : Arduino IDE**

L'environnement de programmation utilisé est **Arduino IDE**, un outil largement adopté dans le domaine de l'électronique embarquée pour sa simplicité, sa modularité et son écosystème riche. Il permet de rédiger le code en langage Arduino (proche du C++), de compiler et téléverser le programme sur l'ESP32, installer et gérer des bibliothèques spécifiques (capteurs,

communication, affichage, etc.) ainsi que de superviser l'exécution via le moniteur série intégré. Grâce à l'IDE, il est possible d'écrire, de modifier et de compiler le programme pour le rendre exécutable par la carte. L'interface du logiciel se compose de boutons de commande en haut, d'une page vierge pour écrire le code et d'une bande noire en bas, comme illustré sur la Figure II.8.

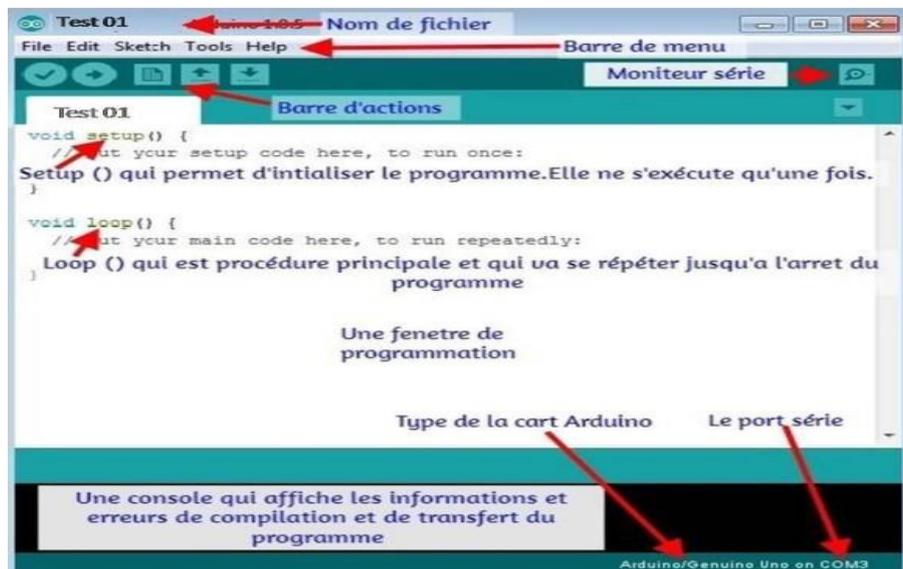


Figure II. 8: Environnement logiciel ARDUINOIDE

En combinant la programmation et l'électronique, le système Arduino offre la possibilité de concevoir des systèmes électroniques plus simples et moins coûteux que les schémas électroniques traditionnels, tout en réduisant la charge de travail nécessaire à la conception d'une carte électronique. Cet IDE dédié au langage Arduino comporte de nombreux outils et fonctionnalités, et permet de programmer des cartes Arduino pour réaliser diverses tâches en électronique. Cet espace de développement intégré (IDE) dédié au langage Arduino et à la programmation des cartes Arduino comporte :

- Une BARRE DE MENUS comme pour tout logiciel ayant une interface graphique.
- Une BARRE DE BOUTONS qui donne un accès direct aux fonctions essentielles du logiciel et qui fait toute sa simplicité d'utilisation.
- Un EDITEUR pour écrire le code du programme, avec onglets de navigation.
- Une ZONE DE MESSAGES qui affiche et indique l'état des actions en cours.
- Une CONSOLE TEXTE qui affiche les messages concernant le résultat de la compilation du programme.

Un module complémentaire permet de programmer l'ESP32 avec l'IDE Arduino. L'installation du support ESP32 se fait via le **gestionnaire de cartes**, en ajoutant le lien

[https://dl.espressif.com/dl/package\\_esp32\\_index.json](https://dl.espressif.com/dl/package_esp32_index.json) dans les préférences. Cela permet de développer facilement des applications IoT en quelques clics. L'installation de la carte ESP32 dans l'IDE se fait en suivant les étapes illustrées à la figure II.9.

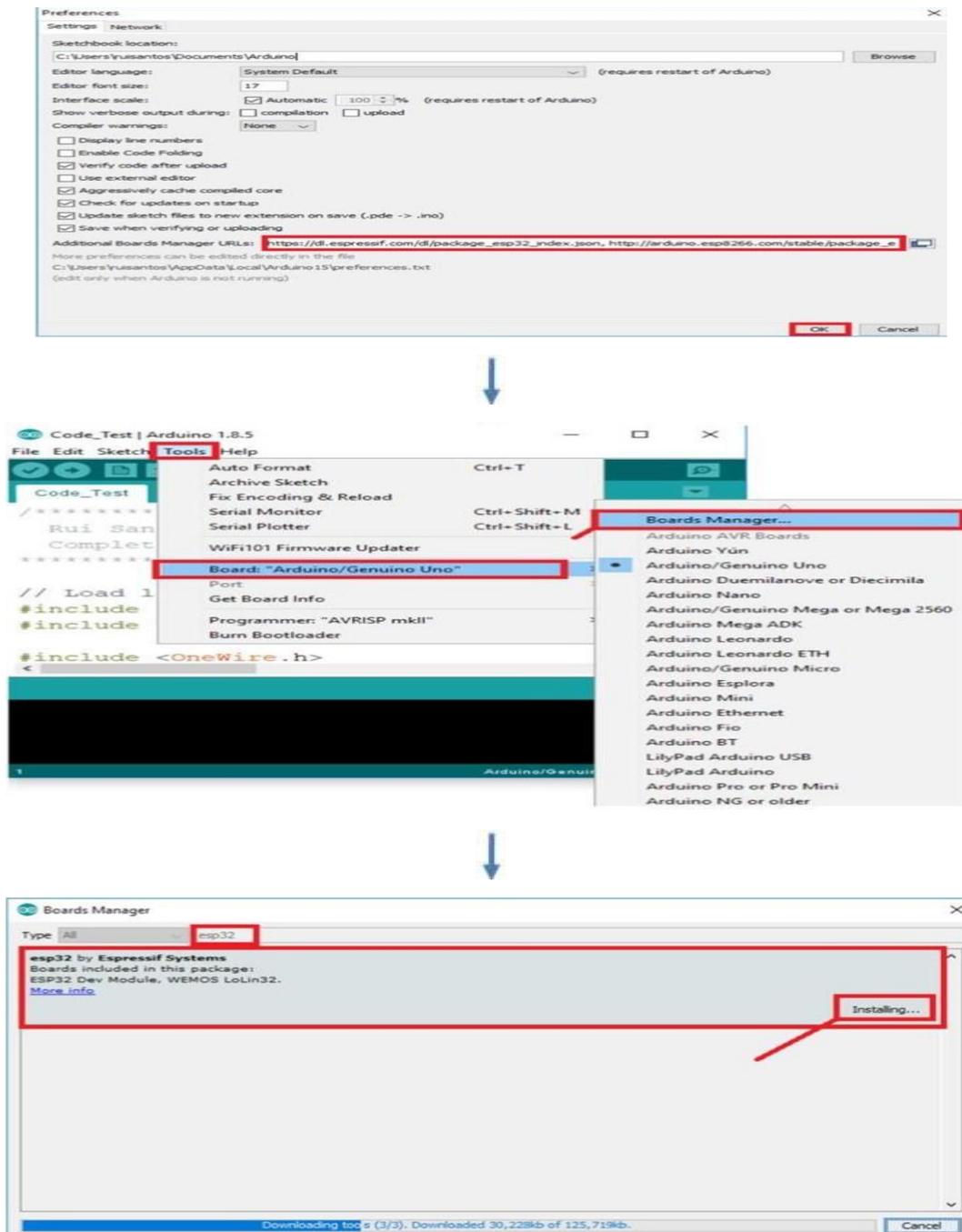


Figure II. 9: Les différentes instructions pour Installation de la carte ESP32

## II.5.2 Plateforme mobile Blynk : supervision IoT

Le système intègre également la plateforme Blynk, qui permet de créer une interface mobile et de superviser en temps réel les mesures environnementales et de recevoir des alertes ou

déclencher des actions à distance. sans avoir à coder une application dédiée. Elle repose sur une architecture client-serveur, où :

- L'ESP32 communique avec le cloud Blynk,
- L'utilisateur consulte les mesures ou déclenche des actions via l'application mobile.

L'architecture de Blynk repose sur une communication bidirectionnelle sécurisée entre : L'ESP32, qui lit les données du capteur (BME680), le cloud Blynk, qui agit comme passerelle centrale et l'application mobile, qui affiche les données en temps réel et permet de commander des dispositifs (ventilateur, LED, etc.).

Tableau II. 9: Avantages de Blynk dans ce projet

| Avantage             | Description  |
|----------------------|--|
| Accessibilité mobile | Suivi à distance depuis n'importe quel smartphone                                |
| Interface intuitive  | Création rapide d'un tableau de bord sans codage complexe                        |
| Widgets variés       | Mesures affichées via graphes, jauges, labels, boutons, etc                      |
| Réactivité           | Affichage quasi instantané des mesures en temps réel                             |
| Personnalisation     | Chaque donnée (Température, Gaz...) est associée à un widget virtuel (V0, V1...) |

L'ESP32 mesure température, humidité, pression et gaz. Ces données sont envoyées au cloud Blynk via WiFi. L'utilisateur visualise ces paramètres sur son téléphone via des widgets Blynk. Grâce à la bibliothèque BlynkSimpleEsp32.h, les données mesurées (température, humidité, etc.) sont envoyées aux widgets Blynk à travers des canaux virtuels (V0, V1...). L'utilisateur peut visualiser ces données via des jauges, graphiques ou boutons en temps réel. Le tableau II9 résume les avantages majeurs dans ce projet.

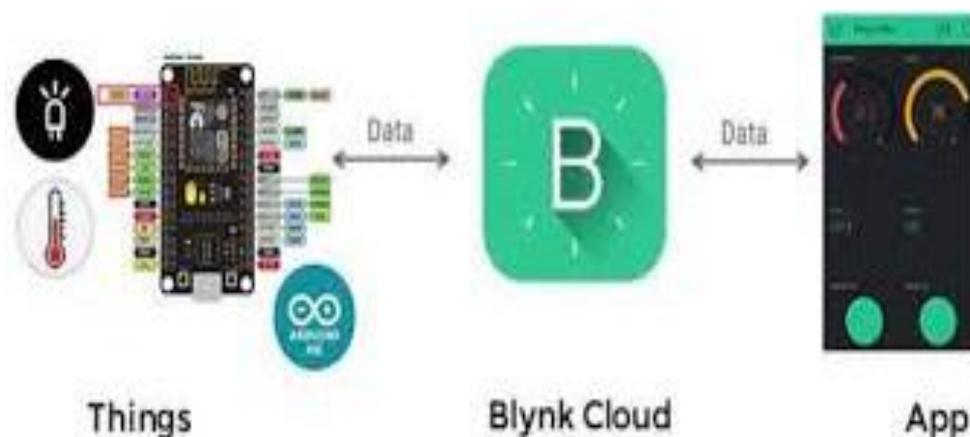


Figure II. 10 : Photo du fonctionnement du Blynk sur le système

L'intégration de Blynk dans ce projet a permis de transformer un simple dispositif embarqué en un système intelligent connecté, accessible à distance et facilement contrôlable. Blynk renforce ainsi l'aspect IoT du projet en offrant une supervision en temps réel conviviale et efficace, essentielle dans le contexte exigeant des salles blanches et un affichage des paramètres et retour visuel sur application Blynk montrés dans la figure II.10..

### II.5.3 Bibliothèques utilisées

L'implémentation du système repose sur des bibliothèques spécifiques intégrées dans Arduino IDE. Chaque bibliothèque joue un rôle bien défini qui a été choisie pour sa stabilité, sa documentation et sa compatibilité avec l'ESP32, garantissant une intégration fluide dans le système. Ce tableau II.10 recense l'ensemble des bibliothèques logicielles essentielles intégrées dans le projet, chacune remplissant un rôle précis dans la chaîne fonctionnelle du système. Ainsi, l'intégration de ces bibliothèques offre au système une architecture logicielle robuste, réactive et évolutive, parfaitement adaptée aux exigences d'un environnement industriel sensible comme celui des salles blanches.

Tableau II. 10 : Bibliothèques logicielles utilisées dans le système embarqué

| Bibliothèque           | Fonction principale  |
|------------------------|--|
| Adafruit_BME680.h      | Lecture des mesures capteurs (T, H, P, gaz)                |
| SH1106Wire.h           | Affichage graphique sur OLED 1.3" via I <sup>2</sup> C     |
| Wire.h                 | Communication I <sup>2</sup> C (bus partagé OLED + BME680) |
| BlynkSimpleEsp32.h     | Connexion ESP32 au cloud Blynk                             |
| WiFi.h                 | Connexion au réseau Wi-Fi local                            |
| UniversalTelegramBot.h | Envoi de messages Telegram via bot                         |
| WiFiClientSecure.h     | Connexion HTTPS sécurisée pour Telegram                    |
| Ticker.h               | Génération d'interruptions logicielles (clignotement LED)  |

### II.5.4 Structure fonctionnelle du code

Ce programme assure la surveillance automatisée des paramètres critiques dans une salle blanche en utilisant une carte ESP32, un capteur environnemental BME680, un écran OLED SH1106, et des services Telegram et Blynk IoT pour l'envoi d'alertes et la supervision à distance. Il inclut également l'activation automatique d'un ventilateur et d'une LED d'alerte clignotante en cas de dépassement de seuils. Le code source développé pour l'ESP32 suit une architecture modulaire, structurée en trois blocs principaux :

1. Initialisation (dans setup()):
  - Configuration des broches, initialisation du capteur BME680, de l'écran OLED, du Wi-Fi, et des services Blynk/Telegram.
2. Boucle principale (loop()) :
  - Lecture périodique des données environnementales,
  - Affichage OLED des valeurs mesurées,
  - Vérification des seuils critiques,
  - Activation/désactivation des actionneurs (LED, ventilateur),
  - Envoi des alertes Telegram si nécessaire,
  - Mise à jour des widgets Blynk en temps réel.
3. Fonctions secondaires :
  - Routines d'affichage,
  - Envoi de messages,
  - Mise à jour des variables virtuelles,
  - Gestion du clignotement non bloquant de la LED.

Cette structuration permet un fonctionnement fluide, réactif, et non bloquant, garantissant que le système reste stable même en cas de surcharge ou d'événement simultané.

## **II.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons défini l'architecture générale de notre système de surveillance environnementale d'une salle blanche, en détaillant ses différents sous-systèmes fonctionnels : acquisition, traitement, transmission, et affichage. L'approche adoptée repose sur l'intégration de composants électroniques modernes et fiables, comme le capteur BME680, l'écran OLED, le microcontrôleur ESP32 et des modules logiciels tels que Blynk et Telegram.

Chaque sous-système a été conçu de manière à assurer une surveillance en temps réel des paramètres critiques (température, humidité, pression et qualité de l'air), avec une réponse automatique en cas de dépassement des seuils définis, notamment par l'activation d'un ventilateur ou d'une LED clignotante.

Ce choix technologique et fonctionnel permet d'assurer non seulement la conformité aux exigences des salles blanches, mais aussi une souplesse et une évolutivité dans l'utilisation du système. L'interface utilisateur, qu'elle soit locale via OLED ou distante via Blynk/Telegram, garantit une accessibilité continue et une gestion réactive des alertes.

Le chapitre suivant portera sur la réalisation concrète du prototype, depuis l'implémentation matérielle jusqu'aux essais fonctionnels, en passant par les tests de chaque composant, l'intégration du système, et l'analyse des résultats obtenus.

# Chapitre III : Réalisation expérimentale et validation du système

## III.1 Introduction

La mise en œuvre d'un système de surveillance environnementale dans une salle blanche impose des exigences élevées en matière de précision, de fiabilité et de réactivité. Après avoir conçu et développé une solution intégrant des capteurs, des actionneurs, un microcontrôleur ESP32, des interfaces de visualisation (OLED, Telegram, Blynk) et un système d'alerte automatique, il est essentiel de procéder à une phase rigoureuse de la réalisation expérimentale, tests et la validation du système développé pour la surveillance des salles blanches. Ce chapitre vise à valider chaque composant individuellement, puis démontrer le **bon fonctionnement du prototype** dans un environnement réel ou simulé, en reproduisant des conditions susceptibles de survenir dans un contexte industriel.

Ce chapitre est structuré autour de l'environnement de test, du montage expérimental, des résultats observés dans différents cas (état normal, alerte), et d'une analyse critique des performances du système. Les tests unitaires permettent d'évaluer le bon fonctionnement de chaque module (capteur BME680, écran OLED, ventilateur, LED d'alerte, plateforme Telegram, Blynk). Ensuite, des simulations de dépassement de seuils ont été réalisées pour analyser les réactions automatiques du système. Enfin, une réflexion est menée sur les possibilités d'extension pour améliorer encore les performances et la portée du dispositif.

## III.2 Tests unitaires des composants

Cette section présente les essais individuels réalisés sur chacun des modules avant l'intégration finale. Chaque composant a été testé de manière autonome pour garantir son bon fonctionnement, sa compatibilité avec l'ESP32 et sa stabilité dans le temps.

### III.2.1 Test du capteur BME680

Le capteur BME680 est un composant multifonction permettant la mesure de la température, de l'humidité relative, de la pression atmosphérique et de la qualité de l'air (gaz COV). Avant son intégration dans le système global, un test unitaire a été effectué pour valider son bon fonctionnement et assurer la fiabilité des données environnementales mesurées. Ce test vise à :

- Vérifier la communication I<sup>2</sup>C entre le BME680 et l'ESP32,
- Lire et afficher en temps réel les quatre paramètres environnementaux,
- Évaluer la cohérence et la stabilité des données obtenues.

Le capteur a été câblé au microcontrôleur selon le protocole I<sup>2</sup>C et et monter dans la figure III.1:

- **SDA** → GPIO 21
- **SCL** → GPIO 22
- **VCC** → 3.3 V
- **GND** → GND

Un programme de test a été téléversé via l'IDE Arduino, utilisant la bibliothèque Adafruit\_BME680.h. Ce code effectue une lecture périodique des données du capteur. Les valeurs mesurées ont été affichées en temps réel sur le moniteur série de l'IDE.



Figure III. 1 : montage du capteur BME680 et affichage sur moniteur serie

La figure III.1 ci-dessus présente à gauche le montage de test du capteur connecté à l'ESP32, et à droite l'affichage des mesures environnementales telles qu'obtenues via le moniteur série. Ce test valide pleinement la capacité du capteur à fournir des données précises et fiables, base indispensable pour la suite du système. Les données de température, humidité, pression et gaz ont été correctement affichées sans erreurs de communication. Les valeurs observées dans le moniteur série étaient cohérentes avec les conditions ambiantes de la pièce. Le capteur a montré un comportement stable avec des variations progressives et réalistes, confirmant sa bonne calibration et l'efficacité de la communication avec l'ESP32.

### III.2.2 Test de l'écran OLED SH1106

L'écran OLED SH1106 est un module d'affichage compact permettant de visualiser localement les données environnementales en temps réel. Avant son intégration dans l'architecture complète du système, un test unitaire a été effectué afin de valider son bon fonctionnement, sa compatibilité avec l'ESP32, ainsi que la lisibilité des informations projetées. L'écran a été câblé au microcontrôleur selon l'interface I<sup>2</sup>C, et son montage est illustré dans la figure III.2 :

Un programme de test a été téléversé via l'IDE Arduino, en utilisant la bibliothèque SH1106Wire.h. Ce code permet l'affichage cyclique des valeurs environnementales : température, humidité, pression et qualité de l'air, mesurées par le capteur BME680. Un message dynamique de type « **ALERT** » s'affiche dès qu'une variable dépasse un seuil critique.



Figure III. 2: L'affichage sur l'écran OLED 1.3

La figure III.2 ci-dessus montre le fonctionnement de l'écran OLED en situation d'alerte. On y observe les valeurs mesurées simulées ou réelles. Ce test valide pleinement la capacité de l'écran OLED SH1106 à restituer de manière claire, stable et rapide les mesures captées, et à notifier visuellement un dépassement de seuil. Il constitue un élément essentiel pour la supervision locale des données environnementales dans un contexte de salle blanche.

### III.2.3 Test des actionneurs la LED d'alerte et ventilateur

Les actionneurs jouent un rôle essentiel dans la réactivité du système embarqué. La LED d'alerte permet une notification visuelle locale en cas de dépassement de seuil, tandis que le ventilateur agit comme mécanisme correctif en cas de conditions environnementales critiques (ex. : température excessive). Ce test unitaire a pour objectif de valider le bon fonctionnement de ces deux éléments avant leur intégration dans le circuit global. Ce test vise à vérifier le fonctionnement du clignotement automatique de la LED en cas d'alerte, et contrôler l'activation du ventilateur via un transistor en réponse à une anomalie détectée. Les actionneurs ont été câblé au microcontrôleur suivant le brochage suivant pour la LED d'alerte Anode → GPIO 2 (via résistance de 220  $\Omega$ ) et Cathode → GND et pour le ventilateur 5V (commandé) le fil négatif → Collecteur du transistor, l'Émetteur → GND, la Base → GPIO 15 (via résistance de 1 k $\Omega$ ) et le VCC du ventilateur → 5 V.

Une Simulation d'un dépassement de seuil (ex. température > 28 °C) via code ou condition réelle a été effectuée pour observer les réactions des actionneurs : activation de la LED et du ventilateur, et après le retour aux valeurs normales pour vérifier l'extinction automatique.



Figure III. 3: Clignotement du LED

La figure III. 3 ci-dessus montre le système embarqué réagissant à une situation critique. On y voit la LED rouge activée, signalant visuellement le dépassement de seuil (ici, température élevée). Ce test valide l'efficacité du système à déclencher des réponses physiques immédiates et visibles, renforçant ainsi la sécurité et la fiabilité d'un environnement sous surveillance.

#### III.2.4 Test de la communication avec Telegram

L'intégration de la messagerie Telegram dans le système embarqué permet d'assurer une notification en temps réel des anomalies environnementales vers l'utilisateur distant. Ce test vise à valider la réactivité et la fiabilité de l'envoi de messages via le bot Telegram, en utilisant le protocole sécurisé HTTPS à travers l'ESP32. Ce test a pour objectifs de vérifier la réception des messages via la commande /status et tester l'envoi automatique d'alertes en cas de dépassement de seuil,

Procédure de test est la suivante

1. Envoi manuel de la commande /status depuis l'application Telegram au bot nommé S.blanche.
2. Attente de la réponse contenant les valeurs instantanées mesurées par le capteur BME680.
3. Simulation d'une anomalie (dépassement de température > 28 °C) pour déclencher l'envoi automatique d'une alerte.

À chaque envoi de la commande /status, le système a répondu avec les mesures précises des paramètres environnementaux, présentées de façon lisible de Température, humidité, pression, et gaz. En cas de dépassement de seuil critique (ex. température > 30 °C), une alerte automatique a été générée. Le message transmis incluait le texte : ALERTE SALLE BLANCHE, suivi de la valeur concernée. Les messages ont été reçus en quelques secondes, sans perte de données ni latence excessive. Cela confirme la robustesse du système en conditions réelles.



Figure III. 4: photo de test telegram

La figure III.4 ci-dessus présente à gauche la réponse du système à la commande /status, et à droite l'envoi automatique de plusieurs messages d'alerte liés à une série de dépassements de température. On y constate la précision des messages, leur lisibilité et la pertinence du déclenchement. Ce test valide pleinement l'utilisation de Telegram comme canal de surveillance distant, accessible en tout lieu et en temps réel, renforçant ainsi la sécurité de la salle blanche surveillée.

### III.2.5 Test de la communication avec l'application mobile Blynk

L'intégration de l'application Blynk permet d'assurer une supervision mobile en temps réel des données environnementales mesurées par le système. Grâce à une interface graphique conviviale, l'utilisateur peut visualiser à distance les valeurs de température, d'humidité, de pression et de gaz, sans nécessiter d'interaction directe avec le dispositif physique. Ce test a pour objectif d'assurer la transmission correcte des données du capteur BME680 vers l'application mobile Blynk via Wi-Fi, et observer la fluidité d'actualisation des widgets Blynk,

On téléverse le code complet sur l'ESP32 incluant la lecture des mesures environnementales via le capteur BME680, la transmission des données aux widgets Blynk (V0 à V3), la connexion du microcontrôleur au réseau Wi-Fi local et le lancement de l'application mobile Blynk et observation de la mise à jour des valeurs dans l'interface graphique. En retour, toutes les valeurs captées (température, humidité, pression, qualité de l'air) ont été affichées en temps réel sur l'écran du smartphone, et les widgets virtuels configurés dans l'application ont réagi instantanément aux données envoyées par l'ESP32. La transmission est restée stable et continue, sans latence notable, confirmant une bonne synchronisation avec le cloud Blynk.



Figure III. 5 : Affichage des paramètres capteur BME680 sur Blynk

L'image ci-dessus montre le tableau de bord mobile de Blynk, intitulé ESP32 BME680, où chaque paramètre est représenté sous forme de jauge colorée pour une lecture intuitive. Ce mode de visualisation améliore l'interprétation immédiate des données critiques, même à distance. Ce test confirme que Blynk constitue une solution fiable et ergonomique pour la supervision des environnements sensibles. Il complète efficacement l'affichage local et la notification Telegram dans l'architecture du système.

### III.3 Présentation du prototype final

Cette section montre le montage physique complet, l'intégration matérielle, l'esthétique du boîtier, et les composants visibles en fonctionnement. C'est une vue système, centrée sur l'intégration physique.

### III.3.1 Vue d'ensemble du montage

La figure III.6 ci-dessous présente une vue d'ensemble du prototype final du système de surveillance environnementale, conçu pour les environnements sensibles tels que les salles blanches. Tous les composants matériels, testés et validés individuellement lors des phases précédentes, sont ici intégrés dans une configuration compacte et fonctionnelle.



*Figure III. 6 : Montage du prototype final*

Le système est monté dans un boîtier de protection noir, qui renferme le cœur de l'architecture embarquée, notamment :

- le microcontrôleur ESP32,
- le capteur BME680,
- les éléments de câblage interne (résistances, transistors, etc.).

Sur la façade du boîtier, on distingue clairement un écran OLED 1.3" affichant en temps réel les valeurs mesurées : température, humidité, pression, qualité de gaz, une LED rouge intégrée visible en cas d'alerte et un port micro-USB pour l'alimentation et la programmation. À gauche du boîtier, est fixé un ventilateur 5V de type radial, relié au microcontrôleur via un transistor NPN. Il est déclenché automatiquement dès qu'un seuil environnemental critique est détecté. Sa présence assure la correction active des conditions internes. Le prototype repose sur une base souple pour amortir les vibrations du ventilateur et améliorer la stabilité de l'ensemble. Ce

montage démontre la transition réussie entre la phase de prototypage électronique sur breadboard et l'implémentation physique dans un boîtier prêt à l'usage, répondant aux contraintes d'ergonomie, de fiabilité et de compacité.

### **III.3.2 Description des fonctionnalités visibles**

Le prototype final de surveillance environnementale a été conçu pour être à la fois compact, fonctionnel et ergonomique. Plusieurs éléments matériels essentiels sont directement visibles et accessibles, traduisant de manière tangible le bon fonctionnement du système.

#### **a. Écran OLED (Affichage temps réel)**

L'écran OLED 1.3", monté en façade du boîtier, offre un affichage permanent et dynamique des données environnementales mesurées. Il présente successivement :

- la température ambiante (en °C),
- le taux d'humidité relative (% HR),
- la pression atmosphérique (en hPa),
- la valeur de la résistance des gaz COV (en kΩ),
- un message d'état : "ALERT" ou "OK" selon les seuils.

Grâce à sa technologie OLED, l'affichage est net, lisible même à faible luminosité, avec une consommation énergétique minimale.

#### **b. LED d'alerte (Signal lumineux)**

Une diode électroluminescente rouge, intégrée à l'avant du boîtier, clignote en cas d'anomalie. Elle est contrôlée par le microcontrôleur via une broche GPIO, avec une résistance de limitation pour protection. Ce signal visuel immédiat permet d'alerter l'opérateur sur site sans avoir besoin d'ouvrir le boîtier ni consulter une application externe.

#### **c. Ventilateur de régulation (Actionneur physique)**

Fixé à l'extérieur du boîtier, un ventilateur 5V se déclenche automatiquement lorsque les seuils de température, d'humidité ou de gaz sont dépassés. Il est piloté par un transistor NPN 2N2222, lui-même commandé par l'ESP32. Il assure une action corrective rapide, favorisant le retour à des conditions normales dans la zone surveillée (circulation d'air, abaissement thermique, extraction de gaz).

#### **d. Boîtier et ergonomie**

L'ensemble des composants internes est protégé par un boîtier plastique compact, assurant :

- une isolation physique des composants sensibles,
- une protection contre les poussières et les interférences mécaniques,
- une esthétique soignée adaptée à un usage semi-industriel ou pédagogique.

Le boîtier est alimenté via un câble micro-USB standard, ce qui le rend compatible avec des chargeurs USB classiques ou des batteries externes pour usage mobile.

Ce design démontre l'attention portée à l'intégration fonctionnelle et à la facilité d'utilisation. Il permet à la fois un usage autonome et une visualisation locale directe, complétée par la supervision mobile (Telegram et Blynk).

### **III.4 Scénarios de test et résultats expérimentaux**

À l'issue de la phase de test, une analyse approfondie du système a été menée afin d'évaluer son comportement, sa réactivité, sa précision de mesure et la cohérence des actions déclenchées. Cette analyse est divisée en deux axes principaux : le comportement du système dans des conditions environnementales normales et son comportement en cas de dépassement de seuils, correspondant à des situations d'anomalies dans une salle blanche.

#### **III.4.1 Comportement en conditions normales**

Dans le cadre de la validation fonctionnelle du système de surveillance, un premier scénario expérimental a été mené en environnement stable, simulant les conditions standards d'une salle blanche. L'objectif était d'évaluer la stabilité du système en fonctionnement normal, sans déclenchement d'alerte.

##### **a. Conditions de test**

Le dispositif a été placé dans un environnement intérieur dont les paramètres physiques (température, humidité, pression, qualité de l'air) étaient compatibles avec les seuils prédéfinis. Les limites critiques programmées n'ont pas été atteintes durant cette phase.

##### **b. Comportement du système**

Les observations effectuées sur l'ensemble des modules du système sont les suivantes :

- Capteur BME680 : lecture stable et précise des quatre paramètres environnementaux, avec des mises à jour toutes les 2 secondes.
- Écran OLED : affichage continu et lisible des données, avec rafraîchissement fluide. Aucun message d'alerte ne s'affiche.
- Ventilateur : reste désactivé, confirmant que les conditions ambiantes ne nécessitent pas de régulation active.
- LED d'alerte : éteinte, signalant l'absence de toute anomalie détectée.
- Telegram : aucune alerte automatique générée. La commande /status peut être envoyée manuellement par l'utilisateur, déclenchant la réception d'un message contenant les mesures instantanées.

- Application Blynk : réception en temps réel des valeurs mesurées via les widgets de jauge, confirmant la synchronisation correcte avec l'ESP32.

### c. Illustration expérimentale

La Figure III.7 présente le montage fonctionnel du prototype dans un état de fonctionnement normal. On y distingue le boîtier principal intégrant l'écran OLED, à côté du ventilateur inactif. Sur l'écran, les valeurs de température (27.97 °C), d'humidité (45.27 %), de pression (987.28 hPa) et de gaz (66.41 K $\Omega$ ) sont clairement lisibles. Ces valeurs confirment un environnement stable, ne nécessitant aucune intervention corrective.



Figure III. 7: Visualisation des données environnementales sur OLED et affichage mobile Blynk

La Figure III.8 illustre quant à elle une interaction manuelle via Telegram. L'utilisateur a envoyé la commande /status, ce qui a déclenché l'envoi automatique par le bot des mesures actuelles : température, humidité, pression, gaz. L'absence d'alerte en parallèle confirme que les seuils critiques n'ont pas été franchis. Cela met en évidence la fiabilité de la communication avec Telegram et la disponibilité des données en temps réel à distance.



Figure III. 8 : Réception des données environnementales via la commande `/status` sur Telegram

Ce scénario démontre la bonne réactivité du système en l'absence d'anomalie. Les modules d'acquisition, de traitement et d'affichage opèrent de manière fluide, sans consommation énergétique superflue. Le système reste prêt à intervenir à la moindre déviation, tout en garantissant une supervision continue locale et distante.

### III.3.2 Comportement en cas de dépassement des seuils

Lorsque l'un des paramètres environnementaux mesurés (température, humidité, pression ou gaz) dépasse les seuils critiques définis dans le système, le dispositif bascule immédiatement en mode alerte active. Ce mécanisme repose sur une logique de traitement embarquée rapide, exécutée en moins de deux secondes. Il illustre parfaitement la capacité du microcontrôleur ESP32 à réagir de manière autonome et intelligente en situation de risque. Le comportement observé dans ce mode de fonctionnement sera :

- La détection instantanée : Le capteur BME680 identifie les écarts anormaux, comme une température excessive ( $>28^{\circ}\text{C}$ ) ou une élévation du niveau de gaz.
- La notification distante : Un message automatique est envoyé via l'API Telegram. Ce message contient les valeurs précises du paramètre hors seuil, précédé du message d'alerte "**🚨 ALERTE SALLE BLANCHE**".
- Affichage visuel : Sur l'écran OLED, la mention **"ALERT"** s'affiche en caractères visibles, accompagnée des paramètres concernés.

- Signal local : Une LED rouge, reliée à la broche GPIO 2, se met à clignoter automatiquement pour attirer l'attention immédiate sur site.
- Correction active : Le ventilateur est activé via la broche GPIO 15 et le transistor NPN, favorisant la régulation de l'air et le retour à des conditions normales.
- Supervision mobile : Sur l'application Blynk, les jauges affichent en temps réel les valeurs critiques, synchronisées avec les mesures issues du capteur.



*Figure III. 9: Comportement du système en situation d'alerte – Vue globale*

La figure III.9 montre un aperçu en conditions réelles du prototype en fonctionnement en mode d'alerte et illustre clairement une situation d'anomalie. On y distingue trois éléments principaux:

- À gauche, le ventilateur est en rotation et la LED rouge est allumée, confirmant l'activation des actionneurs en réponse au dépassement de seuil.
- Sur l'écran OLED intégré au boîtier, on peut lire les valeurs :
  - Température : 28.38 °C (hors seuil)
  - Humidité : 44.74 %
  - Pression : 987.28 hPa
  - Gaz : 0.27 kΩ ainsi que le mot-clé “ALERT”.
- À droite, le téléphone portable connecté à l'application Telegram. Il affiche une série de messages d'alerte automatiques successifs. Chaque message contient :
  - Une mention d'alerte claire : **ALERTE SALLE BLANCHE**
  - Une indication du paramètre concerné : Température hors seuil
  - La valeur précise mesurée, ex. : 28.14 °C, 28.37 °C, etc.

Ce scénario illustre l'efficacité du système de surveillance environnementale en mode d'urgence à travers le capteur BME680, l'ESP32, l'activation d'actionneurs physiques (ventilateur + LED) ainsi que l'envoi automatique d'une alerte distante à l'utilisateur via Telegram et l'affichage OLED renforce la lisibilité locale du diagnostic, tandis que la LED attire visuellement l'attention sur site. Cette figure confirme le comportement cohérent et fiable du système embarqué face à un événement critique. Elle met en lumière l'interconnexion efficace entre les capteurs, l'unité de traitement, les interfaces de notification et les dispositifs physiques de réaction.

### III.3.3 Importance et apport du système de surveillance environnementale

Dans un contexte de salles blanches, où la maîtrise de l'environnement est un impératif de qualité et de sécurité, l'intégration de solutions connectées dans les systèmes de surveillance représente une avancée déterminante. Le système proposé dans ce projet repose sur deux piliers essentiels de la supervision à distance : la visualisation mobile via la plateforme Blynk et la réception d'alertes instantanées via Telegram.

#### a. Supervision mobile par Blynk

L'application Blynk permet de suivre en temps réel l'évolution des paramètres environnementaux depuis un smartphone ou une interface web. Elle transforme le système

embarqué en une plateforme de monitoring mobile, accessible de n'importe où. À travers des widgets personnalisés, les mesures de température, d'humidité, de pression et de gaz sont affichées sous forme de jauges, de graphiques ou de valeurs numériques.



Figure III. 10: Visualisation en temps réel des paramètres via Blynk

L'interface Blynk affichée dans cette figure III.10 montre la réception en temps réel des données environnementales provenant du capteur BME680. Chaque paramètre est lié à un widget virtuel, configuré pour restituer visuellement les informations de température, humidité, pression et qualité de l'air. La clarté de l'affichage, l'actualisation continue et la mobilité de l'application confèrent à l'utilisateur un contrôle permanent sur l'état de la salle blanche, renforçant la capacité de supervision sans contrainte de présence physique.

#### **b. Alertes automatisées via Telegram**

La plateforme Telegram constitue le second axe de supervision. Grâce à un bot préconfiguré, deux types de communications sont rendues possibles :

- Alertes automatiques en cas de dépassement de seuils (température élevée, mauvaise qualité de l'air...), contenant les détails des anomalies détectées ;
- Commandes manuelles comme /status, permettant à l'utilisateur de solliciter à distance une lecture instantanée des mesures, à tout moment.

À gauche, une réponse au message /status affiche les valeurs actuelles mesurées par le capteur (ex. : Température : 27.07 °C). À droite, des alertes automatiques sont envoyées lors de la

détection d'un seuil critique dépassé. La rapidité d'envoi des messages, leur clarté, ainsi que la possibilité d'interagir avec le bot via des commandes simples offrent à l'utilisateur une interface de veille environnementale efficace et intuitive, en parfaite adéquation avec les exigences industrielles modernes.



Figure III. 11: Réception de messages d'alerte et de statut via Telegram

### c. Apport global du système de surveillance

Ce projet propose une solution complète et modulaire répondant à un besoin réel dans les environnements critiques tels que les salles blanches industrielles, médicales ou alimentaires.

En alliant :

- un capteur multifonction (BME680),
- un microcontrôleur connecté (ESP32),
- un affichage local (écran OLED),
- une supervision mobile (Blynk),
- et une messagerie instantanée (Telegram),

le système offre un outil fiable, économique, évolutif et accessible, capable d'assurer un suivi rigoureux des conditions atmosphériques. Il représente une avancée concrète dans le domaine de l'IoT industriel (Industrie 4.0), en facilitant l'automatisation, la réactivité, la supervision en temps réel et la traçabilité des anomalies.

### **III.5 Conclusion**

À travers cette phase de tests, le système de surveillance environnementale développé a démontré sa fonctionnalité, sa stabilité et sa réactivité face aux variations des conditions atmosphériques. Les résultats obtenus montrent une excellente synchronisation entre la détection par le capteur BME680, l'affichage en temps réel (écran OLED), la remontée des alertes via Telegram, l'actualisation des données sur Blynk, et le déclenchement automatique du ventilateur et de la LED d'alerte.

Ce chapitre a permis de valider la fiabilité globale de l'architecture mise en place, tout en identifiant des pistes d'amélioration comme l'ajout de nouveaux capteurs. Le système peut donc être envisagé comme une solution évolutive, adaptée aux exigences strictes des environnements contrôlés tels que les salles blanches. Il offre un cadre solide pour une supervision continue, automatisée et connectée, en accord avec les standards de l'Industrie 4.0.

## Conclusion Générale

Ce travail a permis de concevoir et de mettre en œuvre un système de surveillance environnementale automatisé adapté aux exigences des salles blanches. Grâce à l'intégration du capteur multifonction BME680, du microcontrôleur ESP32, d'un écran OLED, et des plateformes IoT Blynk et Telegram, le système permet une supervision en temps réel, aussi bien localement qu'à distance.

Les tests effectués ont démontré la fiabilité des mesures, la réactivité du système en cas d'anomalie, et la cohérence des actions déclenchées (ventilation, alerte visuelle, notifications mobiles). Le système est non seulement fonctionnel et performant, mais également évolutif : l'ajout de capteurs supplémentaires ou de nouvelles fonctions de supervision permettrait de l'adapter à des environnements industriels encore plus complexes.

Au-delà de sa valeur technique, ce projet illustre l'importance de l'intégration des technologies embarquées et de l'IoT dans le contexte de l'Industrie 4.0. Il répond à un besoin croissant de surveillance intelligente, connectée et automatisée dans les environnements à haute exigence de contrôle.

L'aboutissement de ce travail ouvre la voie à de nombreuses perspectives d'amélioration, que ce soit en matière de précision, d'ergonomie ou de cybersécurité, et constitue une base solide pour le développement de solutions plus avancées dans le domaine des salles blanches et des environnements sensibles.

## **Bibliographie :**

- [1] ISO 14644-1, Cleanrooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration, ISO, 2015.
- [2] ISO 14644-2, Monitoring to provide evidence of cleanroom performance related to air cleanliness by particle concentration, ISO, 2015.
- [3] Whyte, W., Cleanroom Technology: Fundamentals of Design, Testing and Operation, 2nd Edition, Wiley, 2010.
- [4] J. G. Webster, Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, CRC Press, 2017.
- [5] A. Bahga, V. Madiseti, Internet of Things: A Hands-on Approach, Universities Press, 2014.
- [6] Espressif Systems, ESP32 Technical Reference Manual, Version 4.9, Espressif, 2022.
- [7] Adafruit, BME680 Environmental Sensor Guide, Adafruit Learning System, <https://learn.adafruit.com/adafruit-bme680>
- [8] Arduino.cc, Arduino IDE Official Documentation, <https://www.arduino.cc/en/Guide>
- [9] SH1106 OLED Datasheet, Waveshare, 2020.
- [10] Blynk Inc., Documentation Blynk IoT Platform, <https://docs.blynk.io>
- [11] M. Koubâa, Robotics and Internet of Things: Applications and Future Challenges, Springer, 2021.
- [12] L. Da Xu, W. He, S. Li, Internet of Things in Industries: A Survey, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 10, No. 4, 2014.
- [13] A. Khandani, IoT: Architecture, Applications, Security Issues and Future Trends, IJCA, Vol. 179(10), 2018.
- [14] Y. Wang, Embedded System Design: A Unified Hardware/Software Introduction, John Wiley & Sons, 2006.
- [15] F. Leens, An Introduction to I2C and SPI Protocols, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Vol. 12(1), 2009.
- [16] M. Collotta et al., A ZigBee-Based Smart Monitoring System for Indoor Air Quality, IEEE Sensors Journal, Vol. 15, No. 12, 2015.

- [17] Y. Yang et al., A Survey on Sensor Calibration in Air Pollution Monitoring Deployments, ACM Transactions on Sensor Networks, 2020.
- [18] Universal Telegram Bot Library for Arduino, GitHub Repository, <https://github.com/witnessmenow/Universal-Arduino-Telegram-Bot>
- [19] J. F. Kaiser, Data Transmission in Embedded Sensor Networks, Sensors and Actuators A: Physical, Elsevier, 2013.
- [20] H. Karl, A. Willig, Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks, Wiley, 2005.