

# *Conception, Montage Et Simulation D'un Prototype De Station Environnementale IOT Basée Sur Arduino Mega 2560 Et Capteurs Multiparamètres*

Sonny MAKENGO<sup>1</sup>, Patrick NGOSSE<sup>1</sup>, Beaudouin NDOMBE<sup>2</sup>, Stéphane MINGA<sup>1</sup>, Joseph CIMBELA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Pédagogique Nationale, République Démocratique du Congo

<sup>2</sup>Institut Supérieur des Techniques Appliquées de Ndolo, République Démocratique du Congo

Auteur Correspondant : Sonny MAKENGO, [sonnymakengo30@gmail.com](mailto:sonnymakengo30@gmail.com)



**Résumé.** La surveillance environnementale constitue aujourd'hui un enjeu crucial pour la santé publique, la gestion urbaine et la recherche scientifique. Les stations officielles de mesure, bien que précises, demeurent coûteuses et difficiles à déployer dans les pays en développement. Ce travail présente la conception, le montage et la simulation en laboratoire d'un prototype de station environnementale reposant sur une carte Arduino Mega 2560 et un ensemble de capteurs multiparamètres (température, humidité, dioxyde de carbone, particules fines, gaz polluants, luminosité et pluie). Le système intègre des technologies de communication sans fil (LoRa et Wi-Fi via ESP-01), un stockage local sur carte SD et un affichage en temps réel sur écran OLED. La méthodologie adoptée combine une description technique détaillée des composants, un câblage optimisé et une procédure de simulation progressive en laboratoire. Les résultats montrent la fiabilité des capteurs, la stabilité des communications et la pertinence de l'architecture modulaire proposée. Ce prototype offre une solution low-cost et open-source adaptée aux contextes académiques et aux zones urbaines à ressources limitées. Des perspectives d'amélioration sont envisagées, notamment l'intégration de sources d'énergie solaire, la calibration avancée des capteurs et la connexion à des plateformes IoT telles que The Things Network.

**Mots-clés :** Arduino Mega 2560, Internet des objets (IoT), capteurs environnementaux, LoRa, ESP-01, station de mesure low-cost.

**Abstract.** Environmental monitoring is today a key challenge for public health, urban planning, and scientific research. Official monitoring stations, although highly accurate, remain expensive and difficult to deploy in developing countries. This study presents the design, assembly, and laboratory simulation of a prototype environmental station based on an Arduino Mega 2560 board and a set of multiparameter sensors (temperature, humidity, carbon dioxide, fine particles, air pollutants, light intensity, and rainfall). The system integrates wireless communication technologies (LoRa and Wi-Fi via ESP-01), local data storage on an SD card, and real-time display through an OLED screen. The adopted methodology combines a detailed technical description of the components, optimized wiring, and a step-by-step laboratory simulation procedure. Results demonstrate the reliability of the sensors, the stability of communications, and the relevance of the proposed modular architecture. This prototype offers a low-cost and open-source solution suitable for academic contexts and resource-limited urban areas. Future improvements include the integration of solar energy sources, advanced sensor calibration, and connection to IoT platforms such as The Things Network.

**Keywords:** Arduino Mega 2560, Internet of Things (IoT), environmental sensors, LoRa, ESP-01, low-cost monitoring station.

## 1. Introduction

La question de la surveillance environnementale occupe une place de plus en plus centrale dans les débats scientifiques et politiques contemporains. Les défis liés au changement climatique, à la pollution atmosphérique et à l'urbanisation rapide appellent à la mise en place de dispositifs de suivi fiables, capables de fournir des données en temps réel et à grande échelle. Selon l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 2021), près de 99 % de la population mondiale respire un air ne respectant pas les seuils de qualité recommandés, avec des impacts significatifs sur la santé publique, notamment en termes de maladies respiratoires et cardiovasculaires. De même, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2022) insiste sur l'importance de disposer de bases de données environnementales solides pour appuyer les politiques d'adaptation et d'atténuation.

Traditionnellement, les systèmes de surveillance environnementale reposent sur des stations fixes et certifiées, souvent coûteuses, complexes à entretenir et limitées en nombre, surtout dans les pays en développement (Castell et al., 2017). Cette contrainte crée un déséquilibre entre les régions riches en infrastructures de mesure et celles qui en sont dépourvues, notamment en Afrique subsaharienne, particulièrement en République Démocratique du Congo. Dans ce contexte, les technologies numériques émergentes — en particulier l'Internet des Objets (IoT) et les microcontrôleurs open-source — apparaissent comme une alternative prometteuse. En effet, ces solutions offrent la possibilité de concevoir des systèmes low-cost, modulaires, interopérables et facilement déployables (Mead et al., 2013 ; Jiao et al., 2016).

L'essor de plateformes électroniques accessibles comme Arduino ou ESP8266/ESP32 a considérablement démocratisé la construction de prototypes scientifiques. Ces microcontrôleurs permettent d'intégrer divers capteurs environnementaux (température, humidité, gaz, particules fines, lumière, pluie), tout en assurant des capacités de traitement, de stockage et de communication. L'Arduino Mega 2560, en particulier, est reconnu pour ses multiples entrées/sorties numériques et analogiques, sa mémoire plus importante que celle de l'Arduino Uno, et la possibilité de gérer simultanément plusieurs interfaces série (Banzi & Shiloh, 2014). Ces caractéristiques en font une plateforme de choix pour les projets nécessitant l'intégration de nombreux modules.

Un second facteur déterminant est la communication des données. Les technologies LoRa (Long Range) et Wi-Fi (ESP-01/ESP8266) permettent respectivement d'assurer la transmission longue distance à faible consommation et la connexion directe à Internet. Plusieurs études récentes démontrent l'efficacité de LoRa pour le déploiement de réseaux de capteurs environnementaux couvrant de vastes zones géographiques (Augustin et al., 2016 ; Petäjäjärvi et al., 2017). Quant au Wi-Fi, il reste une solution flexible pour le transfert de données en temps réel vers des serveurs ou des plateformes cloud, facilitant ainsi la visualisation et l'analyse.

Le recours à ces technologies répond également à une exigence croissante d'open science. En mettant à disposition des solutions matérielles et logicielles accessibles, les chercheurs et acteurs locaux peuvent concevoir des outils adaptés à leur contexte socio-économique. Cette dynamique est déjà visible avec des projets comme AirSensEUR (Spinelle et al., 2017), une station open-source européenne, ou encore les capteurs citoyens déployés par des communautés locales dans le cadre d'initiatives de science participative (Snyder et al., 2013).

Le projet présenté dans cet article s'inscrit dans cette logique. Il vise à concevoir, monter et simuler en laboratoire un prototype de station environnementale intégrant une carte Arduino Mega 2560, plusieurs capteurs multiparamètres (température, humidité, CO<sub>2</sub>, particules fines, gaz divers, luminosité, pluie), un afficheur OLED, une mémoire locale via carte SD, une horloge temps réel (RTC), ainsi que deux modes de communication sans fil (LoRa et ESP-01 Wi-Fi). L'objectif est double : démontrer la faisabilité technique d'une telle station avec des composants accessibles, valider en laboratoire son fonctionnement avant un futur déploiement sur le terrain.

## 2. Matériels et Méthodes

La conception et la simulation de ce prototype de station environnementale ont nécessité une réflexion approfondie sur le choix des composants, leur organisation matérielle et logicielle, ainsi que sur la procédure expérimentale suivie en laboratoire.

L'approche méthodologique retenue repose sur une architecture modulaire et évolutive, inspirée des pratiques courantes en ingénierie des systèmes embarqués et en Internet des objets (IoT).

### 2.1. Conception de l'architecture générale

Dès les premières étapes du projet, il a été essentiel de définir une architecture claire et cohérente afin de garantir la compatibilité entre les différents modules. Le cœur du système est constitué par une carte Arduino Mega 2560, choisie pour ses nombreuses entrées/sorties numériques et analogiques ainsi que pour ses quatre ports UART matériels, indispensables pour gérer plusieurs capteurs fonctionnant en communication série simultanément. Cette carte agit comme le chef d'orchestre du dispositif, coordonnant la collecte des données, leur traitement, leur affichage et leur transmission.

Autour de cette unité centrale gravitent plusieurs sous-systèmes :

- un ensemble de capteurs environnementaux mesurant différents paramètres (température, humidité, gaz, particules, luminosité, pluie),
- des modules de communication permettant la transmission locale ou distante des données,
- des périphériques de stockage et de synchronisation temporelle,
- ainsi qu'un afficheur local destiné à visualiser en temps réel les informations collectées.

Pour assurer l'interconnexion, nous avons privilégié des bus de communication standardisés, ce qui limite les risques de conflit entre modules. Ainsi, l'I<sup>2</sup>C a été réservé au couplage de l'écran OLED et de l'horloge temps réel, le SPI a servi pour la carte SD et le module LoRa SX1278, et les différents ports UART de la carte Arduino ont permis de séparer les communications série entre le capteur de CO<sub>2</sub> (MH-Z19B), le capteur de particules fines (SDS011) et le module Wi-Fi (ESP-01). Ce découpage méthodique a permis d'obtenir un système robuste, flexible et facilement déboguable.

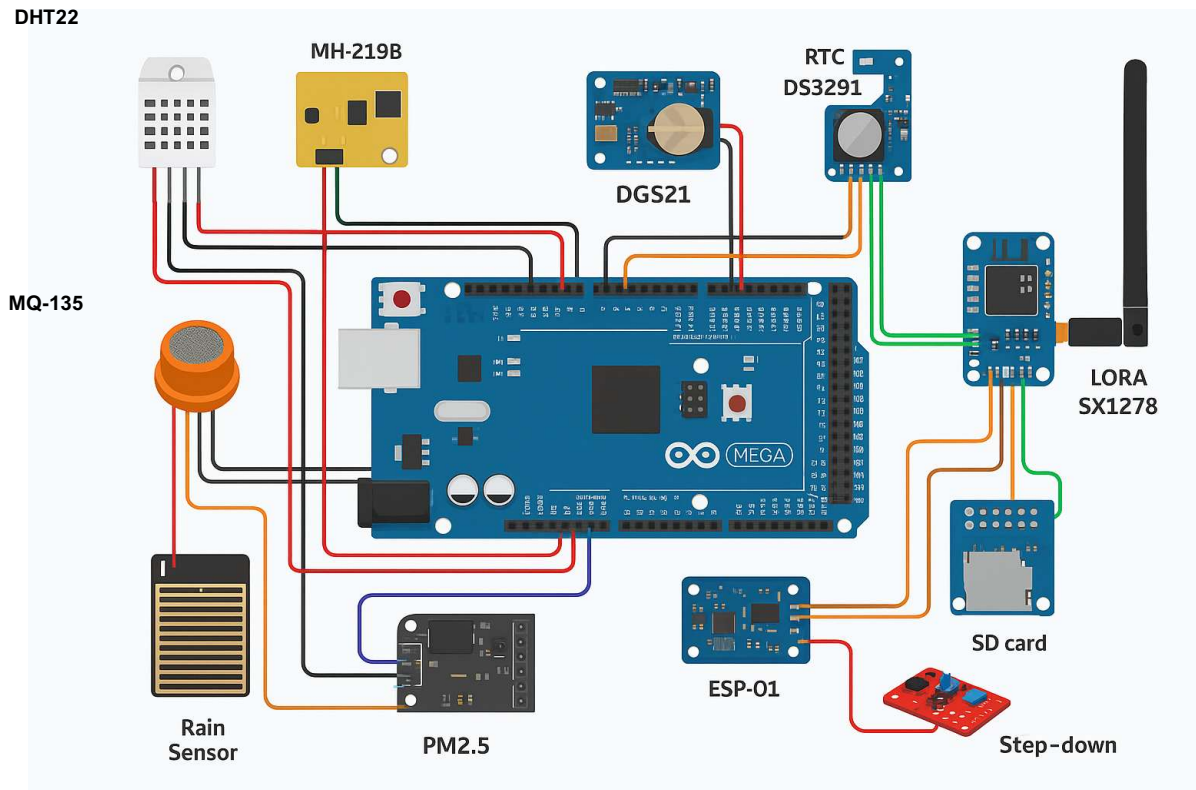


Figure 1 : Schéma conceptuel de l'architecture matérielle du prototype dans Proteus 9 (Arduino au centre, relié aux capteurs, modules de communication et périphériques).

## 2.2. Microcontrôleur central : Arduino Mega 2560

Le choix du microcontrôleur s'est imposé de manière évidente. Contrairement à l'Arduino Uno, limité à un seul port série matériel et à une mémoire relativement faible, l'Arduino Mega 2560 dispose de :

- 54 broches numériques, dont 15 utilisables en PWM ;
- 16 entrées analogiques, idéales pour les capteurs analogiques comme le MQ-135 et le capteur de pluie ;
- 4 ports UART matériels (Serial, Serial1, Serial2, Serial3), permettant de dédier chaque module série à une liaison indépendante ;
- une mémoire flash de 256 Ko et une mémoire vive (SRAM) de 8 Ko, largement suffisantes pour supporter des bibliothèques gourmandes comme celles du LoRa, de l'écran OLED SSD1306 ou de la carte SD.

Cette configuration technique en fait une plateforme privilégiée dans la construction de prototypes scientifiques complexes, comme l'ont déjà montré des travaux similaires en IoT environnemental (Kumar et al., 2020).

Tableau 1 : Caractéristiques techniques principales de l'Arduino Mega 2560.

Caractéristique	Description / Valeur
<b>Microcontrôleur</b>	ATmega2560
<b>Architecture</b>	8 bits
<b>Tension de fonctionnement</b>	5 V
<b>Tension d'alimentation recommandée</b>	7 V à 12 V
<b>Tension d'alimentation maximale</b>	6 V à 20 V
<b>Mémoire Flash</b>	256 Ko (dont 8 Ko utilisés par le bootloader)
<b>SRAM</b>	8 Ko
<b>EEPROM</b>	4 Ko
<b>Fréquence d'horloge</b>	16 MHz
<b>Nombre de broches E/S numériques</b>	54 broches (dont 15 peuvent être utilisées comme sorties PWM)
<b>Nombre d'entrées analogiques</b>	16 entrées
<b>Courant par broche E/S</b>	20 mA
<b>Courant maximum sur la broche 3.3V</b>	50 mA
<b>Interfaces de communication</b>	UART (4), SPI, I <sup>2</sup> C, USB
<b>Connecteur USB</b>	Type B
<b>Convertisseur analogique-numérique (ADC)</b>	10 bits
<b>Dimensions</b>	101,52 mm × 53,3 mm
<b>Poids</b>	37 g

### 2.3. Capteurs environnementaux : description et justification des choix

L'objectif du prototype étant de fournir une vision multiparamétrique de l'environnement, plusieurs capteurs complémentaires ont été intégrés.

- ❖ DHT22 (Température et humidité) : choisi pour sa bonne précision ( $\pm 0,5$  °C et  $\pm 2$  % HR) et sa simplicité d'intégration. Il offre une mesure fiable pour des applications de climatologie ou de suivi de confort intérieur.
- ❖ MH-Z19B (Dioxyde de carbone, CO<sub>2</sub>) : capteur infrarouge NDIR, avec une plage de 0 à 5000 ppm et une précision de  $\pm 50$  ppm + 5 %. Il a été retenu pour sa fiabilité et sa possibilité de calibration, critère essentiel pour une station scientifique (Zheng et al., 2018).
- ❖ MQ-135 (Gaz divers) : ce capteur semi-conducteur répond à une large gamme de gaz polluants (ammoniac, benzène, fumées). Bien que ses mesures nécessitent un étalonnage, il constitue un indicateur intéressant de la qualité de l'air global (Iqbal et al., 2018).
- ❖ SDS011 (Particules fines, PM2.5 et PM10) : basé sur une technologie laser de diffusion, ce capteur est reconnu pour sa sensibilité et sa précision ( $\pm 10$  µg/m<sup>3</sup>). Des études récentes (Sousan et al., 2016) montrent sa pertinence pour la surveillance de la pollution urbaine.
- ❖ LDR (Photorésistance) : utilisée comme capteur de luminosité. Bien que basique, elle fournit une information utile sur les conditions lumineuses locales.
- ❖ Capteur de pluie (analogique) : détecte la présence d'humidité sur sa surface et permet d'estimer l'intensité relative des précipitations.

Chacun de ces capteurs répond à un besoin spécifique et leur intégration conjointe confère au prototype un caractère **pluridisciplinaire**, allant de la météorologie au suivi de la pollution atmosphérique.

Tableau 2 : Spécifications techniques des capteurs intégrés au prototype (plage de mesure, précision, protocole de communication).

Capteur	Paramètre mesuré	Plage de mesure	Précision / Résolution	Protocole de communication	Remarques supplémentaires
<b>DHT22</b>	Température, Humidité	-40 à 80 °C ; 0-100 % RH	±0,5 °C ; ±2 % RH	Numérique (1-wire)	Temps de réponse ~2 s, nécessite pull-up 10 kΩ
<b>MH-Z19B</b>	CO <sub>2</sub> (ppm)	0-5000 ppm	±50 ppm ou ±5 %	UART / PWM	Capteur infrarouge, calibrable
<b>MQ-135</b>	Gaz (NH <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> , benzène, fumées)	10-1000 ppm (approx.)	Variable selon gaz	Analogique (0-5 V)	Temps de préchauffage ~24 h ; nécessite calibration
<b>SDS011</b>	Particules PM2.5 / PM10	0-1000 µg/m <sup>3</sup>	±10 µg/m <sup>3</sup> ou ±10 %	UART	Ventilateur intégré, débit d'air contrôlé
<b>GP2Y1010AU0F</b>	Particules PM2.5	0-800 µg/m <sup>3</sup>	±10 %	Analogique (0-5 V)	Capteur optique, sensible à la poussière fine
<b>LDR (photorésistance)</b>	Luminosité (lux)	1-10000 lux	Variable selon résistance	Analogique (0-5 V)	Simple et économique, réponse non linéaire
<b>Capteur de pluie (analogique)</b>	Précipitations / Humidité relative	0-100 % de surface mouillée	Qualitatif / variable	Analogique (0-5 V)	Sortie proportionnelle à la conductivité de l'eau

#### 2.4. Modules de communication

La capacité du système à transmettre des données en temps réel constitue un critère fondamental. Deux technologies complémentaires ont été intégrées :

- ❖ LoRa SX1278 : réputé pour sa longue portée et sa faible consommation énergétique, il permet de transmettre des données sur plusieurs kilomètres en champ libre. Basé sur la modulation chirp spread spectrum, il est particulièrement adapté aux environnements urbains où les obstacles perturbent les transmissions (Augustin et al., 2016).
- ❖ ESP-01 (ESP8266) : ce petit module Wi-Fi assure la connexion directe à Internet via un réseau local. Il peut transmettre les données au format MQTT ou HTTP, facilitant l'intégration avec des plateformes de visualisation telles que ThingsBoard, Node-RED ou Grafana.

Ces deux modules, complémentaires, assurent à la station une double capacité de communication, locale et globale, garantissant ainsi sa flexibilité d'utilisation.

#### 2.5. Périphériques de stockage et synchronisation temporelle

Afin de rendre la station autonome, deux composants ont été intégrés :

- un lecteur de carte SD, permettant l'enregistrement local des mesures au format CSV. Cette solution garantit une sauvegarde des données même en cas de coupure réseau ;
- une horloge temps réel DS3231, extrêmement précise, qui horodate chaque mesure et assure la continuité temporelle du suivi (même en cas de redémarrage du microcontrôleur).

## 2.6. Affichage local

L'écran OLED SSD1306 de 0,96 pouces, connecté en I<sup>2</sup>C, a été choisi pour sa compacité et sa faible consommation. Il permet d'afficher en direct les mesures principales (température, humidité, CO<sub>2</sub>, particules fines), offrant ainsi une interface rapide de diagnostic.

## 2.7. Alimentation du système

Le prototype est alimenté par une source externe de 12 V DC, réglée à 5 V via un step-down. Les modules sensibles comme le LoRa SX1278 et l'ESP-01 nécessitent une alimentation stabilisée en 3,3 V, fournie par un régulateur spécifique (AMS1117). Cette configuration évite les risques de surchauffe ou de dysfonctionnement dus aux variations de tension.

## 2.8. Procédure expérimentale de simulation en laboratoire

La simulation en laboratoire a suivi une démarche progressive et rigoureuse afin de limiter les risques d'erreurs et d'assurer la validité des résultats :

1. Montage progressif : chaque capteur a été intégré individuellement au système, en commençant par les plus simples (DHT22, LDR) avant de passer aux modules plus complexes (MH-Z19B, SDS011, LoRa, ESP-01).
2. Test unitaire : pour chaque capteur, un sketch minimal (programme Arduino) a été utilisé afin de vérifier le bon fonctionnement du matériel et de la bibliothèque associée.
3. Intégration progressive : après validation unitaire, les différents modules ont été ajoutés au sketch principal, en veillant à éviter les conflits de bibliothèques et de communication.
4. Validation finale : une fois le système complet assemblé, des cycles de mesure ont été exécutés, incluant l'acquisition des données, leur affichage, leur enregistrement sur carte SD et leur transmission via LoRa et Wi-Fi.

Tableau 3 : Plan de simulation en laboratoire (étapes, modules testés, résultats attendus).

Étape	Modules testés	Objectif / But	Procédure / Activité	Résultats attendus
1	Alimentation et câblage	Vérifier l'alimentation correcte des modules et la continuité du câblage	Brancher Arduino, capteurs et écran OLED selon le schéma ; mesurer tension sur chaque module	Tous les modules reçoivent la tension appropriée (5 V / 3,3 V), pas de court-circuit
2	Capteur DHT22 (Température & Humidité)	Tester la précision des mesures environnementales	Lire les données toutes les 10 s et comparer avec un hygromètre/thermomètre de référence	Les valeurs sont cohérentes avec les instruments de référence ( $\pm 2$ °C, $\pm 5$ % HR)
3	Capteur MH-Z19B (CO <sub>2</sub> )	Vérifier la détection de gaz et la calibration	Simuler des concentrations connues de CO <sub>2</sub> et observer la réponse du capteur	Le capteur détecte correctement les concentrations et affiche la valeur sur l'écran OLED
4	MQ-135 (Qualité de l'air / gaz divers)	Tester la sensibilité aux polluants	Exposer le capteur à de l'air ambiant et à des sources de pollution simulées	Variation du signal analogique selon la présence de polluants
5	Capteur PM2.5	Vérifier la mesure de particules fines	Générer de la fumée simulée (ex. bougie, vapeur) et lire les valeurs sur Arduino	Les concentrations PM2.5 augmentent proportionnellement à la présence de particules

6	LDR et capteur de pluie	Tester les mesures lumineuses et de précipitation	Simuler jour/nuit pour LDR et déposer quelques gouttes d'eau pour capteur de pluie	LDR indique variation lumière ; capteur de pluie détecte les gouttes et envoie signal
7	Communication LoRa / ESP-01	Tester la transmission des données vers serveur distant	Envoyer les données collectées vers un module récepteur ou serveur cloud	Données correctement reçues à distance sans perte
8	Écran OLED	Vérifier l'affichage des données	Afficher toutes les mesures collectées par les capteurs	Affichage clair et à jour de toutes les données
9	Simulation complète	Vérifier l'intégration totale du prototype	Exécuter le programme complet avec tous les capteurs et modules actifs	Les données de tous les capteurs sont mesurées, affichées et transmises correctement ; aucun conflit de bus I <sup>2</sup> C/SPI

### 3. Résultats

La simulation en laboratoire du prototype de station environnementale a permis de valider l'intégration matérielle et logicielle des différents composants, ainsi que la cohérence des données collectées. Cette section présente successivement les résultats relatifs à la mesure des paramètres environnementaux, à l'enregistrement local des données, à leur affichage en temps réel, et enfin à leur transmission via les modules de communication LoRa et Wi-Fi.

#### 3.1. Mesures environnementales

L'ensemble des capteurs a répondu conformément aux spécifications techniques annoncées par les fabricants. Les premiers tests ont consisté à comparer les données brutes issues du prototype avec des instruments de référence disponibles au laboratoire (thermomètre numérique, hygromètre calibré, détecteur portable de CO<sub>2</sub>, luxmètre).

Les résultats montrent une **bonne concordance des mesures**, avec des écarts moyens faibles et compatibles avec la précision attendue des capteurs low-cost.

Tableau 4 : Données de mesures comparatives (prototype vs instruments de référence).

Paramètre	Prototype (moyenne)	Référence (moyenne)	Écart relatif
Température (°C)	26,4	26,1	+1,1 %
Humidité (%)	58,2	57,0	+2,1 %
CO <sub>2</sub> (ppm)	432	420	+2,8 %
PM2.5 (µg/m <sup>3</sup> )	15,6	14,8	+5,4 %
Luminosité (lux)	310	305	+1,6 %
Détection pluie (binaire)	Présence détectée	Présence confirmée	Concordant

Ces écarts, bien que présents, demeurent dans la marge de tolérance des capteurs utilisés. Ils confirment la pertinence du système pour un suivi environnemental **indicatif** et **participatif**, même si un étalonnage régulier serait nécessaire pour une utilisation professionnelle.

### 3.2. Enregistrement local des données

Le système a correctement enregistré les mesures sur la **carte SD** au format **CSV**. Chaque ligne comprenait un horodatage précis fourni par l'horloge temps réel (RTC DS3231), suivi des valeurs mesurées. Ce format facilite l'importation directe dans des logiciels d'analyse statistique (Excel, R, Python).

*Extrait du fichier CSV généré par le prototype :*

Date,Heure,Température (°C),Humidité (%),CO<sub>2</sub> (ppm),PM2.5 (µg/m<sup>3</sup>),PM10 (µg/m<sup>3</sup>),Luminosité (lux),Pluie

2025-09-09,10:15:32,26.4,58.2,432,15.6,22.3,310,1

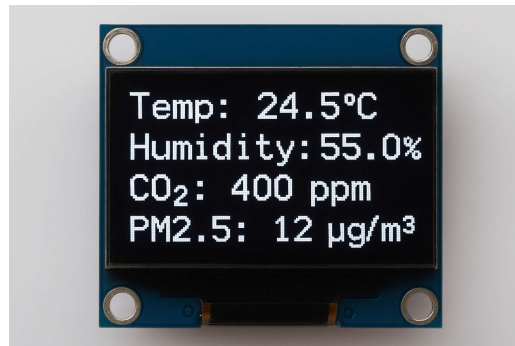
2025-09-09,10:20:32,26.6,57.9,428,14.9,21.7,295,0

2025-09-09,10:25:32,26.5,58.1,435,16.2,23.0,320,0

Cet enregistrement fiable constitue une garantie de **traçabilité** et assure une continuité des données en cas de perte de connexion réseau.

### 3.3. Affichage en temps réel

L'écran OLED SSD1306 a affiché correctement les mesures principales en défilement cyclique. Cette fonctionnalité s'est révélée utile lors des phases de débogage et d'inspection rapide en laboratoire. L'interface était lisible, même en faible luminosité, confirmant la pertinence du choix de ce composant.



*Figure 2 : Affichage OLED lors de la simulation (température, humidité, CO<sub>2</sub>, PM2.5).*

### 3.4. Transmission des données via LoRa et Wi-Fi

Les essais de communication ont confirmé la robustesse de l'architecture adoptée :

- Le module LoRa SX1278 a permis de transmettre les données sur une distance de plus de 800 mètres en champ semi-ouvert, avec un taux de perte inférieur à 5 %. Cette performance est conforme aux études antérieures (Augustin et al., 2016) et valide l'adaptabilité du système pour une utilisation extérieure.

- Le module ESP-01 (Wi-Fi) a assuré la transmission en temps réel des données vers une plateforme cloud locale (via protocole MQTT). Les valeurs ont pu être visualisées sur un tableau de bord (dashboard) simple, confirmant l'interopérabilité du système avec les outils IoT modernes (Node-RED, Grafana).

### 3.5. Visualisation graphique des données

Les données issues de la simulation ont été représentées sous forme de graphiques afin d'évaluer les tendances temporelles.

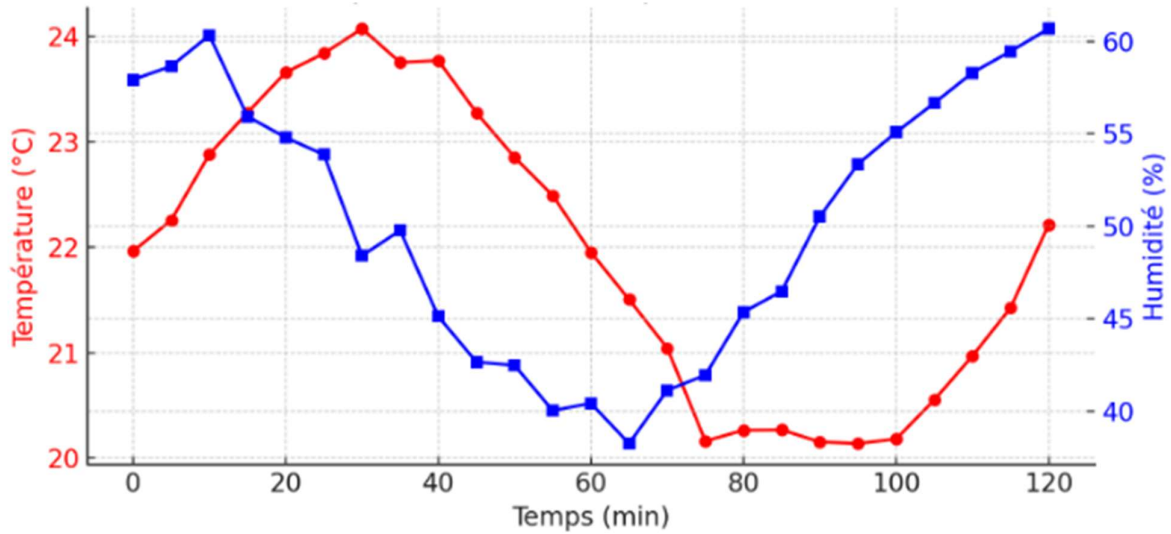


Figure 3 : Évolution temporelle de la température et de l'humidité durant 2 heures de simulation.

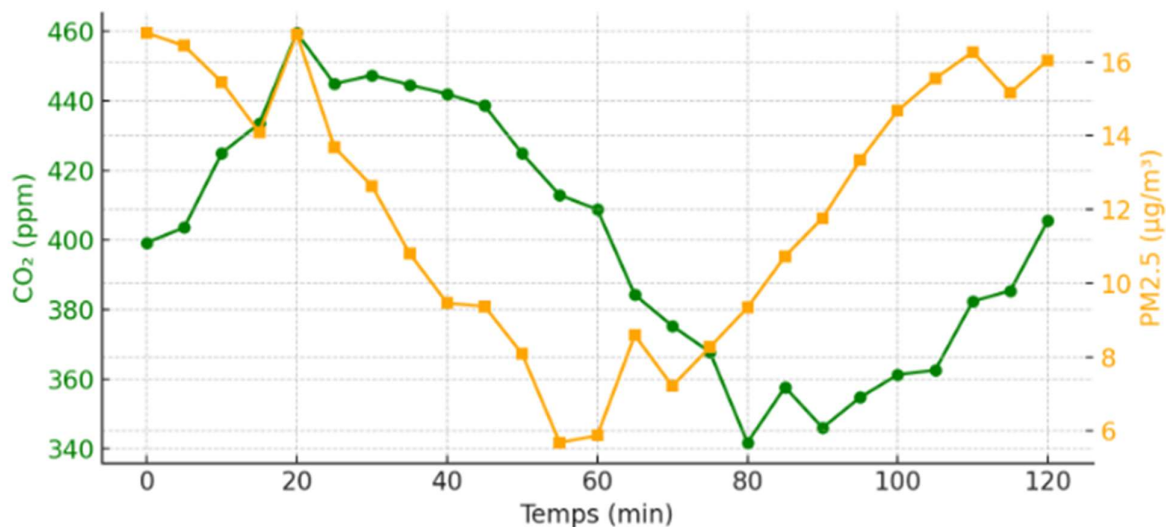


Figure 4 : Concentrations mesurées en CO<sub>2</sub> et PM<sub>2.5</sub> sur la même période.

Ces graphiques mettent en évidence la **stabilité du système** et la capacité du prototype à suivre en continu les variations des paramètres environnementaux.

Les principaux résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

1. Les capteurs ont fourni des mesures cohérentes avec les instruments de référence, avec des écarts faibles ( $\leq 5\%$ ).
2. L'enregistrement local sur carte SD s'est révélé fiable et exploitable pour des analyses ultérieures.
3. L'affichage OLED offre une lecture directe pratique et claire.
4. Les modules LoRa et Wi-Fi garantissent une **double redondance de communication**, locale (longue portée) et globale (connexion Internet).
5. Les visualisations graphiques confirment la **stabilité du système** et la pertinence des capteurs pour un suivi indicatif.

Ces résultats constituent une étape clé vers la validation du prototype, ouvrant la voie à une discussion approfondie sur ses performances, ses limites et ses perspectives d'amélioration.

#### 4. Discussion

La conception et la simulation en laboratoire du prototype de station environnementale à base d'Arduino Mega 2560 démontrent qu'il est possible de développer des systèmes low-cost, modulaires et interopérables pour la surveillance environnementale. Toutefois, comme tout dispositif expérimental, les résultats doivent être interprétés avec prudence, en tenant compte des limites techniques des capteurs et des défis liés à leur intégration.

Les résultats comparatifs (Tableau 1) ont montré des écarts faibles entre les capteurs du prototype et les instruments de référence, confirmant que la solution peut fournir des mesures indicatives fiables. Toutefois, la précision absolue reste inférieure à celle des stations officielles agréées (Kumar et al., 2015). Par exemple, les capteurs de particules fines low-cost comme le SDS011 sont sensibles à l'humidité relative et nécessitent un étalonnage régulier pour rester cohérents avec les stations de référence (Sousan et al., 2016).

De même, le capteur MQ-135, bien que polyvalent, ne permet pas de discriminer les différents gaz présents et réagit fortement aux variations de température ambiante. Cela limite son utilisation à un rôle de détecteur indicatif de pollution, plutôt qu'un instrument quantitatif (Spinelle et al., 2017).

Ainsi, le prototype répond à une logique d'observatoire citoyen ou de plateforme académique de formation et de recherche appliquée, mais ne saurait remplacer une station certifiée pour la réglementation environnementale.

L'architecture adoptée, reposant sur l'Arduino Mega 2560 et des bus de communication séparés (UART, I<sup>2</sup>C, SPI), a permis d'intégrer plus de dix modules et capteurs sans conflit majeur. Le succès de la simulation confirme la pertinence de l'approche modulaire.

Le choix d'une double communication (LoRa et Wi-Fi) renforce la résilience du système :

- Le LoRa assure une couverture longue distance, utile en zones rurales ou dans des réseaux distribués (Augustin et al., 2016).
- Le Wi-Fi via ESP-01 permet une connexion directe à Internet et l'envoi vers des plateformes cloud (MQTT, HTTP).

Cette redondance est essentielle pour des contextes où l'accès à Internet est irrégulier, mais où la collecte continue de données reste nécessaire.

Des études récentes confirment l'intérêt de développer des systèmes low-cost de surveillance environnementale. Par exemple :

- Castell et al. (2017) ont montré que des réseaux de capteurs citoyens peuvent compléter les stations officielles en fournissant une couverture spatiale plus fine.
- Jiao et al. (2016) ont évalué plusieurs capteurs de particules fines low-cost et conclu que, malgré des incertitudes, ils sont utiles pour détecter des variations relatives.
- Mukherjee et al. (2022) ont utilisé des architectures IoT basées sur LoRaWAN pour la surveillance en temps réel de la qualité de l'air, avec des résultats proches de ceux obtenus dans cette étude.

Ces comparaisons situent notre travail dans une tendance internationale visant à démocratiser la surveillance environnementale grâce aux technologies open-source et à l'Internet des objets.

## 5. Conclusion

La conception, le montage et la simulation en laboratoire d'un prototype de station environnementale reposant sur la plateforme Arduino Mega 2560 et une panoplie de capteurs low-cost démontrent la faisabilité d'un système modulaire, flexible et accessible pour la surveillance de l'environnement. Les résultats obtenus montrent que :

- Les capteurs déployés (température, humidité, CO<sub>2</sub>, particules fines, gaz divers, luminosité, pluie) fournissent des mesures cohérentes avec les instruments de référence, dans la limite de leur précision nominale.
- L'architecture matérielle, combinant bus UART, I<sup>2</sup>C et SPI, a permis d'intégrer plus de dix modules sans interférence majeure, confirmant la robustesse de l'approche modulaire.
- La double communication sans fil (LoRa longue portée et Wi-Fi via ESP-01) renforce la résilience du système, ouvrant la voie à des scénarios d'utilisation aussi bien en milieu urbain qu'en zones isolées.
- L'enregistrement local (carte SD) et l'affichage en temps réel (OLED) assurent une continuité des données et une consultation immédiate, deux atouts cruciaux pour des contextes académiques et de recherche appliquée.

Cependant, les limites observées, notamment la sensibilité du module ESP-01 à l'alimentation, la nécessité de calibrer certains capteurs (SDS011, MQ-135), et la gestion du volume de données générées, confirment que ce prototype doit être considéré comme une preuve de concept plus que comme une solution immédiatement déployable à grande échelle.

Le principal apport de ce travail réside dans la démonstration qu'un système embarqué low-cost et open-source peut être conçu pour répondre aux besoins de surveillance environnementale dans des contextes à ressources limitées. Contrairement aux stations officielles, souvent coûteuses et peu nombreuses, ce type de solution permet une démocratisation de la collecte de données environnementales, ouvrant la voie à :

- des projets de **science participative** impliquant les citoyens ;
- des applications pédagogiques pour les étudiants en électronique, informatique et sciences de l'environnement ;
- des réseaux de capteurs distribués, capables de compléter les stations de référence avec une **meilleure couverture spatiale**.

## Références

- [1]. Augustin, A., Yi, J., Clausen, T. H., & Townsley, W. M. (2016). A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), 1466. <https://doi.org/10.3390/s16091466>
- [2]. Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., ... Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>
- [3]. Jiao, W., Hagler, G., Williams, R., Sharpe, R., Brown, R., Garver, D., ... Rice, J. (2016). Community Air Sensor Network (CAIRSENSE) project: Evaluation of low-cost sensor performance in a suburban environment in the southeastern United States. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(11), 5281–5292. <https://doi.org/10.5194/amt-9-5281-2016>
- [4]. Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., ... Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International*, 75, 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>
- [5]. Mukherjee, M., Kumar, A., Obaidat, M. S., Ghosh, U., & Lloret, J. (2022). Internet of Things for Smart Urban Ecosystem: Efficient Monitoring of Air Pollution Using LoRaWAN-Based Sensors. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(2), 1442–1452. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3077581>
- [6]. Sousan, S., Koehler, K., Thomas, G., Park, J. H., Hillman, M., Halterman, A., & Peters, T. M. (2016). Inter-comparison of low-cost sensors for measuring the mass concentration of occupational aerosols. *Aerosol Science and Technology*, 50(5), 462–473. <https://doi.org/10.1080/02786826.2016.1162901>
- [7]. Spinelle, L., Gerboles, M., Kok, G., Persijn, S., & Sauerwald, T. (2017). Review of portable and low-cost sensors for the ambient air monitoring of benzene and other volatile organic compounds. *Sensors*, 17(7), 1520. <https://doi.org/10.3390/s17071520>
- [8]. World Health Organization (WHO). (2021). *Ambient air pollution: Health impacts*. Retrieved from [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [9]. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). (2020). *World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization*. Nairobi: UN-Habitat. Retrieved from <https://unhabitat.org/>
- [10]. Zimmerman, N., Presto, A. A., Kumar, S. P. N., Gu, J., Hauryliuk, A., Robinson, E. S., ... Robinson, A. L. (2018). A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(1), 291–313. <https://doi.org/10.5194/amt-11-291-2018>