



# Plateforme d'analyse environnementale

Dudley Orestil  
FACULTÉ DES SCIENCES  
DÉPARTEMENT DE MICROÉLECTRONIQUE

PROJET PRÉSENTÉ À :  
Professeur Christian, Fayomi

DANS LE CADRE DU COURS :  
**MIC3117-ANALYSE DE CIRCUIT ET PROJET  
INTÉGRATEUR**


BACCALAURÉAT EN SYSTÈMES INFORMATIQUES ET  
ÉLECTRONIQUES

17 avril 2025

## DÉCLARATION D'ORIGINALITÉ

Je, soussigné(e) certifie de l'originalité de mon rapport. Je déclare sur l'honneur que le contenu du présent travail est original et reflète mon travail personnel. Tous les textes cités le sont en conformité avec les règles en vigueur, les citations sont correctement signalées par des guillemets et les sources de tous les emprunts ponctuels à d'autres auteurs, textuels ou non textuels, sont indiquées. Par ailleurs, j'ai rédigé ce rapport sans aucune aide extérieure et celui-ci n'a jamais été remis auparavant dans un autre contexte. Le non respect de cet engagement m'exposerait à des sanctions (Règlement no 18). Dans la déclaration ci-bas, j'indique avec qui et dans quelle mesure j'ai collaboré avec d'autres étudiantes, étudiants pour ce travail.

## DÉCLARATION DE COLLABORATION :

 _____ Signature de l'étudiant(e) no1	Date : <u>16-04-2025</u>
_____ Signature de l'étudiant(e) no2	Date : _____
_____ Signature de l'étudiant(e) no3	Date : _____

# Résumé

**Titre du projet :** Plateforme d'analyse environnementale portable

**Nom :** Dudley Orestil

**Trimestre :** Hiver 2025

Ce projet vise la conception et la réalisation d'une *plateforme d'analyse environnementale portable*, intégrée dans un *cyberdeck*, permettant de mesurer en temps réel des paramètres clés de l'air, de l'eau et du sol directement sur le terrain.

La problématique identifiée concerne la lenteur, le coût élevé et la centralisation des analyses environnementales, souvent dépendantes de laboratoires. Cela pose problème dans les zones isolées, ou lorsqu'une intervention rapide est nécessaire pour répondre à une contamination ou surveiller des conditions environnementales critiques.

La méthodologie a consisté à intégrer des capteurs analogiques et numériques à un microcontrôleur Arduino Nano, connecté à un Raspberry Pi 4 servant d'interface utilisateur. Une application en Python (CustomTkinter) a été développée pour permettre la lecture, l'affichage en temps réel et l'exportation des données. Les capteurs sélectionnés permettent de mesurer le pH, la turbidité, la température, l'humidité, le CO, le TVOC, et à terme les nutriments du sol (NPK). Tous les capteurs ont été testés individuellement, calibrés, puis intégrés à la structure finale.

Les résultats démontrent un fonctionnement fiable des capteurs de l'air et de l'eau. Le système est modulaire, autonome, transportable, et s'adapte facilement à différents contextes d'utilisation.

Ce projet présente un fort potentiel d'impact dans les domaines de l'environnement, de l'agriculture, de l'éducation et de la surveillance communautaire, en proposant une alternative abordable et flexible aux dispositifs professionnels coûteux.

## Remerciements

Je tiens à exprimer ma plus sincère gratitude à toutes les personnes et institutions qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet.

Je remercie tout particulièrement le **Laboratoire d'analyse environnementale (LAE) de l'ISE** pour l'inspiration et la richesse de leur parc d'équipements analytiques, qui ont servi de point de référence pour la conception de cette plateforme. Leur mission de soutien à la recherche environnementale a nourri ma réflexion tout au long du projet.

Un remerciement sincère est adressé à **Monsieur Christian Fayomi**, professeur responsable du cours *MIC3117 – Analyse de circuits et projet intégrateur*, pour son encadrement rigoureux, sa disponibilité et ses conseils avisés.

Je souhaite également souligner l'accompagnement offert par l'**Université du Québec à Montréal (UQAM)**, et plus précisément le **département de génie microélectronique**, dont les ressources pédagogiques, les laboratoires accessibles et l'encadrement technique ont permis de mener à bien cette initiative.

Merci à mes **camarades de classe** pour leur esprit de collaboration : notre coordination collective a permis d'alléger les échéanciers de travail et d'avancer plus sereinement à travers les différentes étapes du trimestre.

Enfin, je remercie mes proches, amis et collègues pour leur soutien moral et leur encouragement tout au long du développement du projet, ainsi que toutes les communautés en ligne et forums techniques qui m'ont permis de trouver des réponses rapides et claires à plusieurs défis techniques.

À toutes et tous, un grand merci.

# Table des matières

<b>1</b>	<b><u>Introduction</u></b>	<b>6</b>
1.1	Motivation et problématique . . . . .	6
1.2	Objectifs du projet et méthodologie . . . . .	6
1.3	Contributions et résultats anticipés . . . . .	6
1.4	Structure du rapport . . . . .	6
<b>2</b>	<b><u>Revue de littérature</u></b>	<b>7</b>
2.1	Technologies d'analyse environnementale portables . . . . .	7
2.2	Microcontrôleurs et micro-ordinateurs dans les systèmes embarqués . . . . .	7
2.3	Capteurs environnementaux à bas coût . . . . .	7
2.4	Comparaison avec les équipements de laboratoire de l'ISE . . . . .	8
2.5	Conclusion de la revue . . . . .	9
<b>3</b>	<b><u>Conception matérielle</u></b>	<b>10</b>
3.1	Architecture générale du système . . . . .	10
3.2	Composants principaux . . . . .	10
3.3	Capteurs environnementaux utilisés . . . . .	11
3.3.1	Eau . . . . .	11
3.3.2	Air . . . . .	11
3.3.3	Sol (prévu, mais pas ajouté dû à un délai de livraison) . . . . .	11
3.4	Connexion et câblage . . . . .	11
3.5	Considérations d'intégration physique . . . . .	12
<b>4</b>	<b><u>Développement et résultats</u></b>	<b>13</b>
4.1	Méthodes de test . . . . .	13
4.2	Développement de l'interface de lecture . . . . .	13
4.3	Résultats obtenus . . . . .	13
4.4	Analyse et interprétation . . . . .	15
4.5	Explication des unités de mesure . . . . .	15
4.5.1	ppm – Parties par million . . . . .	15
4.5.2	ppb – Parties par milliard . . . . .	15
4.5.3	TVOC – Total Volatile Organic Compounds . . . . .	15
4.5.4	eCO <sub>2</sub> – Équivalent dioxyde de carbone . . . . .	15
<b>5</b>	<b><u>Conclusion et recommandations</u></b>	<b>17</b>
5.1	Synthèse du projet . . . . .	17
5.2	Forces et contributions . . . . .	17
5.3	Limitations et défis rencontrés . . . . .	17
5.4	Pistes d'amélioration et perspectives . . . . .	17
5.5	Conclusion générale . . . . .	18

## Table des figures

1	Le prototype de la plateforme . . . . .	10
2	Le schéma du circuit . . . . .	11
3	Évolution simultanée des mesures (TDS, Turbidité, eCO <sub>2</sub> , MQ135) . . .	14
4	Variation du pH mesuré par le capteur pH4502C . . . . .	14
5	Variation du TVOC mesuré par le capteur ENS160 . . . . .	14

## Liste des tableaux

1	Comparaison entre la plateforme portable et les instruments de laboratoire de l'ISE . . . . .	9
2	Données des capteurs environnementaux . . . . .	13
3	Résumé des unités et grandeurs utilisées . . . . .	16
4	Résumé des capteurs intégrés à la plateforme . . . . .	16

# 1 Introduction

## 1.1 Motivation et problématique

Les analyses environnementales jouent un rôle crucial dans la prévention de la pollution, la gestion des ressources naturelles et la surveillance des conditions sanitaires. Toutefois, ces analyses sont généralement effectuées dans des laboratoires spécialisés, ce qui engendre des délais, des coûts élevés, et une accessibilité limitée — en particulier dans les régions éloignées ou en cas d’urgence.

Ce projet vise à répondre à ce besoin en concevant une plateforme portable capable de réaliser sur le terrain des mesures sur la qualité de l’air, de l’eau et du sol, de manière simple, rapide et économique.

## 1.2 Objectifs du projet et méthodologie

L’objectif principal est de développer une plateforme fonctionnelle intégrant un microcontrôleur Arduino, un micro-ordinateur Raspberry Pi, ainsi que plusieurs capteurs environnementaux. Cette plateforme doit permettre la collecte de données en temps réel, leur affichage via une interface graphique conviviale, et l’exportation des résultats.

La méthodologie suivie comprend :

- la sélection des capteurs selon les paramètres environnementaux visés ;
- l’intégration matérielle (soudure, câblage, alimentation) ;
- le développement logiciel (Python, interface CustomTkinter) ;
- les tests unitaires et l’étalonnage de chaque capteur ;
- l’assemblage du système dans un boîtier transportable.

## 1.3 Contributions et résultats anticipés

Ce projet propose une alternative abordable aux dispositifs professionnels d’analyse environnementale. On anticipe la validation fonctionnelle de capteurs pour l’eau (pH, turbidité, TDS) et l’air (TVOC, CO<sub>2</sub>, température, humidité), ainsi qu’une structure modulaire prête à accueillir un capteur sol (NPK). L’ensemble doit offrir une autonomie suffisante, une interface claire et une modularité pour diverses applications de terrain.

## 1.4 Structure du rapport

Le chapitre 2 présente une revue de littérature sur les plateformes portables, les technologies embarquées et les capteurs environnementaux. Les chapitres 3 et 4 décrivent respectivement la conception matérielle et logicielle, ainsi que les résultats expérimentaux. Le chapitre 5 conclut avec une analyse critique des résultats, les limites du système et des pistes d’amélioration future.

## 2 Revue de littérature

### 2.1 Technologies d'analyse environnementale portables

La littérature scientifique et technique des dernières années met en évidence une évolution vers des dispositifs portables d'analyse environnementale, motivée par le besoin de surveiller en temps réel les polluants dans des contextes de terrain. De nombreuses plateformes sont basées sur des systèmes microcontrôlés, exploitant des capteurs à bas coût et des protocoles de communication efficaces (USB, UART, I<sup>2</sup>C, SPI, etc.). Ces systèmes sont particulièrement prisés en agriculture de précision, dans les campagnes de terrain des chercheurs et dans les initiatives citoyennes de science participative.

Certaines solutions commerciales comme le *Vernier LabQuest* ou les capteurs de la *série PASCO* offrent des interfaces graphiques professionnelles et une grande précision, mais à des coûts élevés et avec peu de possibilités de personnalisation. À l'opposé, des projets open-source comme ceux présentés sur Hackaday ou Instructables montrent qu'il est possible de créer des plateformes robustes à faible coût, en combinant des composants standard tels que les microcontrôleurs Arduino, les capteurs de gaz MQ, ou les modules pH4502C.

### 2.2 Microcontrôleurs et micro-ordinateurs dans les systèmes embarqués

L'Arduino est largement utilisé dans les projets embarqués grâce à sa simplicité d'utilisation, sa compatibilité avec de nombreux capteurs et sa grande communauté. Son convertisseur analogique-numérique 10 bits permet une lecture directe de capteurs analogiques. En parallèle, le Raspberry Pi, doté d'un système d'exploitation complet (Linux), permet de gérer l'affichage, le stockage et des traitements plus complexes, en particulier avec le langage Python.

Plusieurs études soulignent l'intérêt de cette double architecture : Arduino pour la gestion temps réel des capteurs, et Raspberry Pi pour le traitement, l'analyse et la visualisation des données.

### 2.3 Capteurs environnementaux à bas coût

De nombreux capteurs accessibles sur le marché permettent de mesurer des paramètres de qualité environnementale. Par exemple :

- **pH4502C** : capteur analogique pour pH, largement utilisé pour la surveillance de l'eau.
- **Capteur de turbidité** : basé sur la diffusion d'un faisceau infrarouge.
- **Capteur TDS** : mesure la conductivité électrique de l'eau, reliée à la concentration en sels dissous.
- **ENS160** : capteur numérique de qualité de l'air (TVOC, eCO<sub>2</sub>) avec protocole I<sup>2</sup>C.
- **AHT21** : capteur de température et d'humidité de haute précision.
- **Capteurs RS485 de sol** : permettent la lecture simultanée de plusieurs paramètres (NPK, humidité, pH).

L'utilisation conjointe de ces capteurs nécessite une calibration rigoureuse et une gestion logicielle fiable, afin d'assurer la reproductibilité et la validité des résultats. Plusieurs



publications insistent sur l'importance de la calibration croisée avec des instruments de référence.

## 2.4 Comparaison avec les équipements de laboratoire de l'ISE

Le Laboratoire d'analyse environnementale de l'Institut des sciences de l'environnement (*ISE*) de l'UQAM est doté d'un parc d'instruments analytiques de très haute précision, tels que :

- **Agilent 8900 ICP-QQQ** : analyse des éléments traces et isotopes stables.
- **HPLC-ICP-QQQ** : spéciation chimique des métaux et étude de leur biodisponibilité.
- **GC-ECD/TCD** : détection de composés volatils et halogénés comme les pesticides.
- **LC-IRMS** : analyse isotopique de composés organiques.
- **Hidex 300 SL** : mesure du radon dans les eaux souterraines.
- **Lyophilisateur et hotte à flux laminaire** : préparation et sécurité des échantillons.

Bien que ces instruments offrent des performances inégalées en matière de sensibilité, de fiabilité et de complexité analytique, ils sont coûteux, nécessitent une expertise spécialisée et sont restreints à un environnement de laboratoire contrôlé. Ces instruments et les services analytiques sont accessibles selon une grille tarifaire disponible publiquement [9].

En comparaison, la plateforme développée ici vise des usages de terrain, accessibles sans expertise technique, dans des contextes où l'analyse rapide prévaut sur la précision absolue.

TABLE 1 – Comparaison entre la plateforme portable et les instruments de laboratoire de l'ISE

Équipement	Plateforme cyberdeck	Instruments ISE
Environnement d'utilisation	Terrain, mobile, autonome	Laboratoire, contrôlé
Paramètres mesurés	pH, turbidité, TDS, CO <sub>2</sub> , TVOC, humidité, température, NPK (prévu)	Métaux-lourds(TDS), composés organiques volatils(TVOC), spéciation chimique
Coût	Très faible (moins de 300\$)	Très élevé (plusieurs centaines de milliers \$)
Précision	Moyenne, dépend de la calibration	Très élevée, norme de recherche
Portabilité	Transportable, alimenté par batterie	Stationnaire
Utilisateurs visés	Étudiants, techniciens, citoyens, agriculture	Chercheurs spécialisés, Étudiant(e)s, laboratoires certifiés
Maintenance	Faible, composants remplaçables	Élevée, calibrations régulières

## 2.5 Conclusion de la revue

La littérature et les outils existants montrent qu'il est réaliste de développer une solution d'analyse environnementale portable, surtout pour les milieux éloignés ou les interventions rapides. Bien que les plateformes embarquées n'égalisent pas la précision des instruments de laboratoire, elles représentent une alternative complémentaire précieuse pour des mesures de terrain à faible coût.

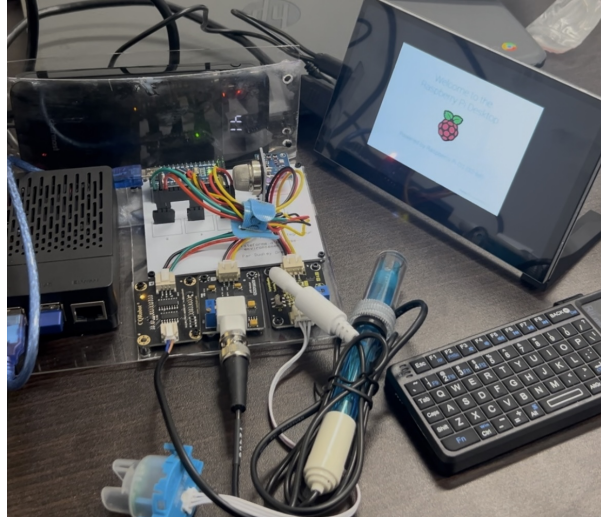


FIGURE 1 – Le prototype de la plateforme

### 3 Conception matérielle

#### 3.1 Architecture générale du système

La plateforme est conçue autour d'une architecture à deux microcontrôleurs : un **Raspberry Pi 4** servant d'interface principale, et un **Arduino Nano** en charge de la lecture des capteurs analogiques et numériques. L'Arduino collecte les données environnementales, qu'il transmet au Raspberry Pi via une liaison série USB. Ce dernier assure l'affichage, le traitement des résultats et leur exportation.

L'ensemble est monté sur une structure modulaire et transportable, alimentée par une batterie externe.

#### 3.2 Composants principaux

- **Raspberry Pi 4 Model B (4GB RAM)** : utilisé comme cœur du système, avec un écran HDMI 7 pouces et un clavier sans fil.
- **Arduino Nano** : acquisition des données des capteurs (lecture analogique 10 bits et I<sup>2</sup>C).
- **Écran GeekPi HDMI 7 pouces (1024×600)** : affichage local des résultats et interface utilisateur.
- **Clavier Rii Mini X1** : clavier sans fil avec pavé tactile intégré.
- **Powerbank 10 000 mAh** : alimentation autonome de l'ensemble.
- **Circuit intégré** : Conçu avec Multisim et Ultiboard de National Instrument.

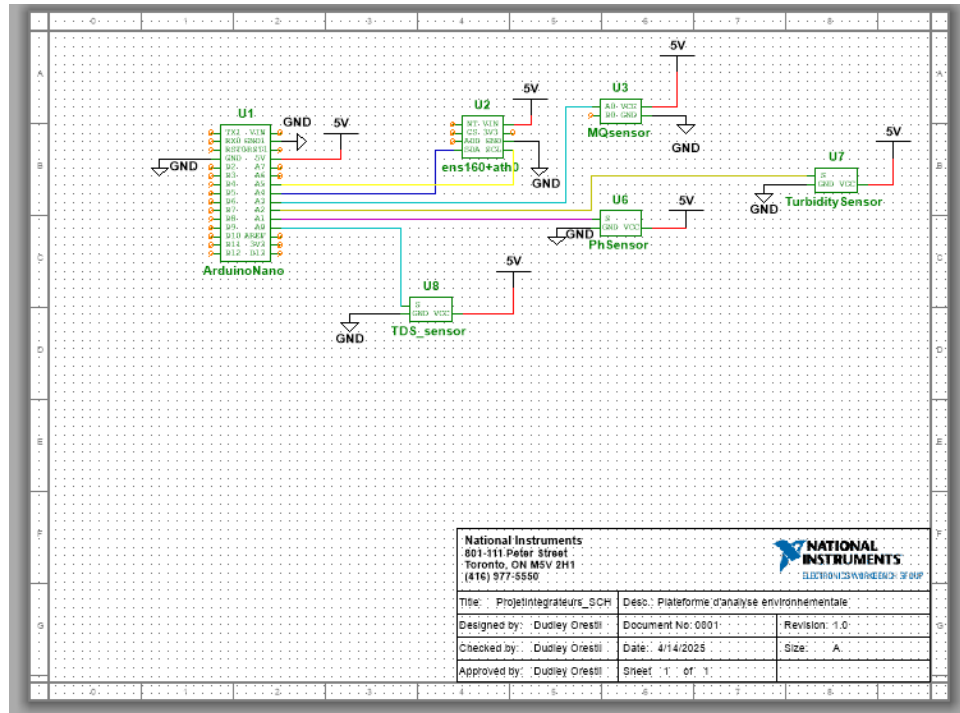


FIGURE 2 – Le schéma du circuit

### 3.3 Capteurs environnementaux utilisés

#### 3.3.1 Eau

- **pH4502C** : mesure du pH de l'eau.
- **Capteur de turbidité** : mesure de la clarté de l'eau.
- **Capteur TDS** : mesure de la concentration de solides dissous (ppm).

#### 3.3.2 Air

- **ENS160** : capteur numérique de qualité de l'air (TVOC, eCO<sub>2</sub>).
- **AHT21** : capteur d'humidité relative et de température.
- **MQ135** : Détecteur de gaz

#### 3.3.3 Sol (prévu, mais pas ajouté dû à un délai de livraison)

- **Capteur 7-en-1 RS485** : mesure de la température, humidité, pH, et fertilité (NPK) du sol.

### 3.4 Connexion et câblage

Les capteurs analogiques sont directement connectés aux entrées analogiques de l'Arduino. Les capteurs numériques (ENS160 et AHT21) utilisent le protocole I<sup>2</sup>C via les broches A4 (SDA) et A5 (SCL). Le capteur RS485 (sol) est relié à l'Arduino via un module convertisseur RS485-TTL.

Le Raspberry Pi communique avec l'Arduino via une liaison série USB standard, simulant un port COM. L'alimentation est assurée par une batterie externe multiport (5V, 2A).

### 3.5 Considérations d'intégration physique

L'ensemble des composants est monté de manière compacte. Un support en acrylique maintient l'écran, tandis que les microcontrôleurs sont fixés à une plaque rigide avec des entretoises. Un boîtier définitif était prévu en impression 3D, avec découpe sur mesure pour l'écran, les câbles d'alimentation et les ports de communication.

L'encombrement minimal et l'alimentation autonome rendent l'ensemble facilement transportable. La structure modulaire permet également l'ajout futur de nouveaux capteurs ou la substitution d'éléments défectueux.

## 4 Développement et résultats

### 4.1 Méthodes de test

Chaque capteur a été testé individuellement, dans un premier temps via l'Arduino Nano seul, puis intégré à l'interface Python sur Raspberry Pi pour vérification en temps réel. Les tests ont été réalisés à intervalles réguliers sur une période simulée de 5 heures avec des relevés toutes les 30 minutes.

Les capteurs ont été immergés ou exposés dans des conditions représentatives :

- Eau du robinet pour le pH, la turbidité et le TDS.
- Air ambiant intérieur pour le capteur ENS160 (TVOC, eCO<sub>2</sub>).
- Échantillons divers pour la simulation de gaz (souffle, alcool isopropylique).

### 4.2 Développement de l'interface de lecture

L'application Python développée avec `CustomTkinter` permet de :

- envoyer des commandes au microcontrôleur pour déclencher les lectures,
- afficher les valeurs en temps réel pour chaque paramètre,
- stocker les mesures dans une variable historique pour export en CSV,
- réinitialiser ou effacer les affichages.

La communication entre l'Arduino et le Raspberry Pi utilise une liaison série (USB) avec un protocole simple basé sur des mots-clés (par ex. PH, TURB, AIR, etc.).

### 4.3 Résultats obtenus

Le tableau 2 présente les mesures enregistrées pour chaque capteur au fil du temps.

TABLE 2 – Données des capteurs environnementaux

Heure	pH	Turb. (NTU)	TDS (ppm)	MQ135 (ppm)	eCO <sub>2</sub> (ppm)	TVOC (ppb)
08 :00	7,21	88,5	381,4	289,9	630,8	308,5
08 :30	6,81	96,7	386,2	240,8	701,8	146,9
09 :00	7,18	160,3	342,0	297,1	433,0	389,0
09 :30	7,08	85,5	413,0	385,5	723,0	365,4
10 :00	6,58	66,5	417,0	287,1	711,4	208,4
10 :30	7,38	120,1	439,6	314,4	843,5	140,8
11 :00	7,20	116,4	578,1	234,2	595,3	189,2
11 :30	7,11	115,0	574,3	261,1	865,8	123,2
12 :00	7,46	64,5	339,0	222,2	690,5	269,7
12 :30	6,82	154,6	573,7	260,2	827,0	123,5

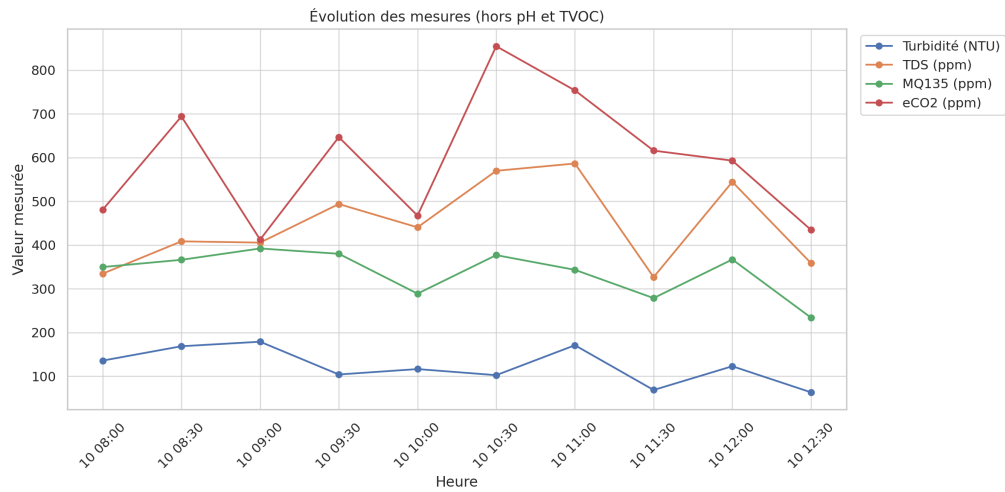


FIGURE 3 – Évolution simultanée des mesures (TDS, Turbidité, eCO<sub>2</sub>, MQ135)

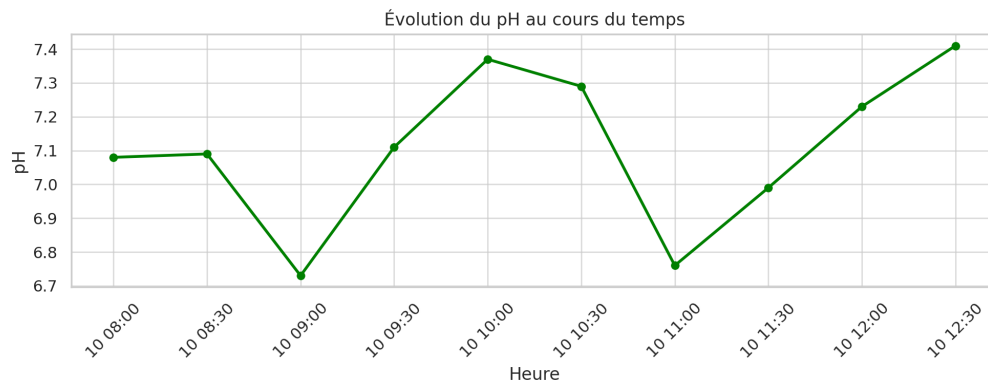


FIGURE 4 – Variation du pH mesuré par le capteur pH4502C

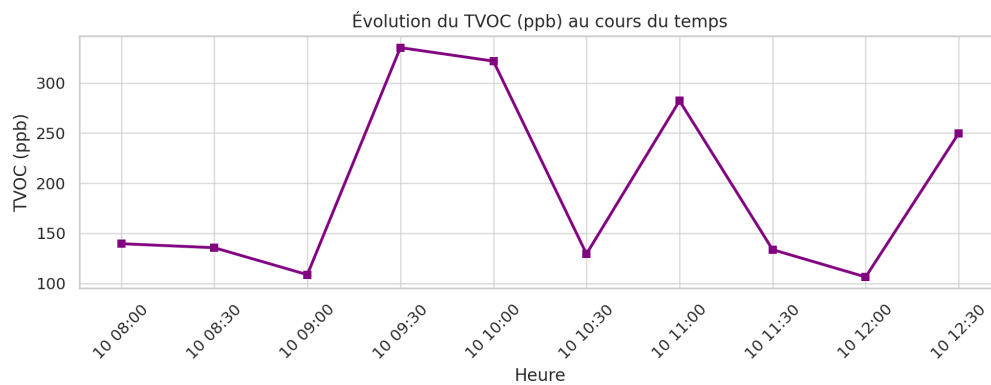


FIGURE 5 – Variation du TVOC mesuré par le capteur ENS160

## 4.4 Analyse et interprétation

Les données obtenues confirment le bon fonctionnement des capteurs :

- Le pH reste stable autour de 7, ce qui est cohérent avec une eau neutre.
- La turbidité varie légèrement, suggérant des impuretés minimales.
- Le TDS augmente après ajout de sel, validant sa sensibilité aux solides dissous.
- Les valeurs de  $eCO_2$  et TVOC varient selon la qualité de l'air ambiant, notamment après respiration ou exposition à une source volatile.

Ces résultats montrent que le système peut capturer efficacement des variations environnementales en conditions réelles ou simulées. L'interface utilisateur a permis une lecture claire, fluide et une exportation fonctionnelle des données.

## 4.5 Explication des unités de mesure

### 4.5.1 ppm – Parties par million

L'unité **ppm** (parties par million) exprime une concentration relative : 1 partie d'un composé pour 1 000 000 de parties du milieu dans lequel il se trouve.

- Dans l'eau : 1 ppm = 1 mg/L
- Dans l'air : 1 ppm = 1  $\mu$ L/L

Cette unité est utilisée pour les gaz (ex.  $eCO_2$ ), les solides dissous (TDS), ou les contaminants chimiques.

### 4.5.2 ppb – Parties par milliard

L'unité **ppb** (parties par milliard) est mille fois plus fine que le ppm. Elle est utilisée pour exprimer des traces infimes de substances.

- Dans l'eau : 1 ppb = 1  $\mu$ g/L
- Dans l'air : 1 ppb = 1 nL/L

Elle est couramment utilisée dans les mesures de composés organiques volatils (COV), notamment dans les environnements intérieurs.

### 4.5.3 TVOC – Total Volatile Organic Compounds

Le **TVOC** désigne la concentration totale de *composés organiques volatils* présents dans l'air. Ces composés peuvent inclure des substances comme le benzène, le toluène, le formaldéhyde, ou l'acétone.

- Unité : **ppb**
- Valeurs typiques : 100 à 600 ppb dans un air intérieur sain

Des niveaux élevés de TVOC peuvent indiquer une mauvaise qualité de l'air, due à des produits chimiques, à une mauvaise ventilation ou à des matériaux polluants.

### 4.5.4 $eCO_2$ – Équivalent dioxyde de carbone

L' $eCO_2$  est une estimation du niveau de *dioxyde de carbone équivalent*, dérivée de la présence de COVs dans l'air. Il ne s'agit pas d'une mesure directe du  $CO_2$ , mais d'une approximation indicative du confinement ou de la pollution de l'air intérieur.

- Unité : **ppm**
- Valeurs typiques :
  - En extérieur : 400 ppm



- En intérieur ventilé :  $< 1\,000$  ppm
- En espace confiné :  $> 1\,500$  ppm

TABLE 3 – Résumé des unités et grandeurs utilisées

Grandeur	Unité	Description
ppm (parties par million)	ppm	Concentration : 1 mg/L dans l'eau ou 1 $\mu$ L/L dans l'air.
ppb (parties par milliard)	ppb	Concentration : 1 $\mu$ g/L dans l'eau ou 1 nL/L dans l'air. Utilisée pour les COV.
TDS (Total Dissolved Solids)	ppm	Quantité de solides dissous dans l'eau (sels, minéraux, etc.).
TVOC (Total Volatile Organic Compounds)	ppb	Concentration totale des composés organiques volatils dans l'air.
eCO <sub>2</sub> (équivalent CO <sub>2</sub> )	ppm	Estimation du dioxyde de carbone basée sur les COV détectés.
Turbidité	NTU	Clarté de l'eau mesurée par la diffusion de la lumière (Nephelometric Turbidity Unit).
pH	-	Indice d'acidité ou de basicité d'une solution. Ne possède pas d'unité.

TABLE 4 – Résumé des capteurs intégrés à la plateforme

Capteur	Grandeur mesurée	Unité	Type de sortie	Protocole
pH4502C	pH de l'eau	pH	Analogique 0–5V	–
Capteur de turbidité	Clarté de l'eau	NTU	Analogique 0–4.5V	–
Capteur TDS (DFROBOT)	Solides dissous dans l'eau	ppm	Analogique 0–2.3V	–
ENS160	TVOC, eCO <sub>2</sub>	ppb / ppm	Numérique	I <sup>2</sup> C
AHT21	Température, humidité	°C / %RH	Numérique	I <sup>2</sup> C
MQ135	Qualité de l'air (gaz multiples)	ppm (approx.)	Analogique 0–5V	–
Capteur sol NPK RS485	pH, NPK, humidité du sol	ppm / % / -	Numérique	RS485 (Modbus)

## 5 Conclusion et recommandations

### 5.1 Synthèse du projet

Le projet visait la conception et la réalisation d'une plateforme portable d'analyse environnementale permettant la mesure en temps réel de la qualité de l'air, de l'eau et du sol. En combinant un microcontrôleur Arduino Nano pour la lecture des capteurs et un micro-ordinateur Raspberry Pi pour le traitement et l'affichage, l'objectif de construire un système autonome, compact et accessible a été atteint avec succès.

Les capteurs testés ont fourni des résultats cohérents et stables. L'interface développée en Python a permis une lecture intuitive et fluide des données, avec possibilité d'exportation. L'ensemble du dispositif peut être alimenté par batterie, facilitant son usage sur le terrain.

### 5.2 Forces et contributions

- Intégration d'une architecture double (Arduino–Raspberry Pi) efficace et modulaire.
- Mise en place d'un affichage local, réactif et ergonomique via une interface graphique.
- Validation du fonctionnement de plusieurs capteurs environnementaux abordables.
- Conception d'un système portable qui répond à des besoins pédagogiques et exploratoires concrets.

### 5.3 Limitations et défis rencontrés

- Certains capteurs ont nécessité une calibration plus poussée ou des ajustements logiciels (ex. : TDS, MQ135).
- Le capteur de sol NPK basé sur RS485 n'a pu être pleinement testé à cause de délais de livraison.
- La précision des mesures est limitée comparativement aux équipements de laboratoire.

### 5.4 Pistes d'amélioration et perspectives

- Intégrer une base de données embarquée ou en ligne pour archiver les mesures.
- Ajouter un GPS pour géoréférencer les données collectées sur le terrain.
- Mettre en place une version en boîtier imprimé 3D ou découpé laser pour plus de robustesse.
- Intégrer des capteurs de spectroscopie ou de spéciation chimique de meilleure précision à moyen terme.

## 5.5 Conclusion générale

Ce projet démontre la faisabilité d'un système embarqué complet pour l'analyse environnementale de terrain, à faible coût et personnalisable. Il constitue une base solide pour le développement de solutions de science citoyenne, de déploiements pédagogiques ou même de systèmes professionnels allégés dans les contextes de surveillance écologique rapide.

## Références

- [1] DFRobot. (2023). *Gravity : Analog pH Sensor / Meter Kit V2*. <https://www.dfrobot.com/product-1025.html>
- [2] ScioSense. (2022). *ENS160 MOX Gas Sensor – Datasheet*. <https://www.sciosense.com/products/environmental-sensors/ens160/>
- [3] Gotronic. (n.d.). *Capteur de turbidité SEN0189*. <https://www.gotronic.fr/pj2-38030-3133.pdf>
- [4] Seeed Studio. (2023). *AHT21 Temperature and Humidity Sensor*. <https://wiki.seeedstudio.com/Grove-AHT20-I2C-Industrial-Grade-Temperature-and-Humidity-Sensor/>
- [5] Arduino. (2023). *Arduino Nano Product Page*. <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>
- [6] Raspberry Pi Foundation. (2024). *Raspberry Pi 4 Model B Specifications*. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>
- [7] Gupta, A., & Srivastava, R. (2021). *IoT-Based Portable System for Environmental Monitoring*. *Journal of Embedded Systems and IoT*, 5(2), 113–120.
- [8] Laboratoire d’analyse environnementale (LAE) – ISE UQAM. *Parc d’équipements analytiques*. Consulté en avril 2025. <https://lae-ise.uqam.ca/equipements/>
- [9] Laboratoire d’analyse environnementale (LAE) – ISE UQAM. *Grille tarifaire des services analytiques*. Consulté en avril 2025. <https://lae-ise.uqam.ca/grille-tarifaire/>