



Energy Flow In Ecosystem



Co-funded by
the European Union

Guide de l'enseignant STEAM4Climate à l'éducation climatique basée sur les projets

**Projet : Des mesures au sens – étudier les écosystèmes à la manière
STEAM**

Créateur(s) : Dariusz Aksamit (POLITECHNIKA WARSZAWSKA)

Contributeurs et critiques : Thomas Jörg (KGP), René Alimisi (Edumotiva)

Version : v.2.2, 2025.12.31

Statut : final - affiné après les pilotes, publié sur le site du projet

Consortium de projets de l'UE

Le projet STEAM4Climate a reçu un financement du programme Erasmus+ de l'Union européenne dans le cadre de l'accord de subvention n°2023-1-PL01-KA220-SCH-000158670. Les auteurs crédités dans ce manuel font partie du consortium STEAM4Climate. Le projet implique 6 partenaires et est coordonné par POLITECHNIKA WARSZAWSKA. Plus d'informations sur le projet sont disponibles sur le [site web du projet](#).

Avertissement

Le soutien de la Commission européenne à la production de cette publication ne constitue pas une approbation du contenu, qui reflète uniquement les opinions des auteurs, et la Commission ne peut être tenue responsable de toute utilisation des informations qu'il contient.

Licence Creative Commons :

Ce document est sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International ([CC BY 4.0](#))



Table des matières

Introduction	4
1. Aperçu de l'apprentissage	4
2. Objectifs d'apprentissage et méthodologie	5
3. Une approche « plancher bas, plafond haut, murs larges »	7
Matériaux	8
4. Matériaux inclus dans la boîte à outils pour la version de base	8
5. Autres composants pour la version de base	10
6. Composants de la version étendue	10
Instructions d'activité	11
7. Préparation préalable à l'activité	11
7.1 Équipements de connexion	11
7.2 Datalogging	12
8. Exécution des activités	14
8.1 Comprendre le ppm	14
8.2 Production chimique de CO ₂	16
8.3 Production biologique de CO ₂ : la levure et le rôle de la température	18
8.4 Production biologique de CO ₂ : le sol	22
8.5 Introduction à l'agriculture intelligente	24
8.6 Construire un écosystème scellé auto-entretenu : Défi PBL	26
Suivi et résumé après la leçon	28
9. Sujets de discussion	28
10. Évaluation	29
11. Extensions	30

Introduction

Objectifs de développement durable des Nations Unies



1. Aperçu de l'apprentissage

Ce projet invite les étudiants à explorer la biodiversité et les écosystèmes à travers une approche STEAM interactive et pratique. En concevant et en surveillant des « écosystèmes dans un pot » autonomes, les participants combinent la recherche scientifique avec la créativité en ingénierie, la technologie numérique et l'analyse des données pour mieux comprendre comment la vie interagit avec son environnement.

À l'aide d'un ensemble de capteurs avec un module d'acquisition de données, les étudiants mesurent des paramètres environnementaux clés tels que la température, l'humidité, les niveaux de CO₂, l'intensité lumineuse ou l'humidité du sol. Ils construisent une base dans des méthodes scientifiques en calibrant les capteurs, en formulant des hypothèses et en analysant des données en temps réel. Le projet explore les dynamiques invisibles de la vie, y compris la réponse aux intrusions d'origine humaine.

Des terrariums scellés et écosystèmes aquatiques aux microhabitats fongiques et systèmes hydroponiques, chaque bocal conçu par les élèves devient un laboratoire vivant. En reliant les disciplines, ce projet nourrit la curiosité, la pensée systémique et la conscience environnementale.

Concept clé : Se familiariser avec l'enregistrement des données d'un ensemble de paramètres environnementaux et développer la confiance nécessaire dans l'interprétation.

Durée : 2h pour l'introduction, le reste dépend du projet en question.

Nombre de séances : au moins deux, pour installer l'équipement et effectuer des mesures plus longues (analyse des données collectées au cours de la semaine)

Groupe d'âge cible : lycée, 15+

2. Objectifs d'apprentissage et méthodologie

Les élèves participant à ce projet vont :

- apprendre comment les paramètres environnementaux (par exemple, la concentration de CO₂, la température, l'humidité, la lumière) sont mesurés et enregistrés en pratique ;
- acquérir de l'expérience avec les capteurs et les systèmes d'acquisition de données (DAQ) ;
- comprendre la différence entre les relevés instantanés et les données de séries temporelles ;
- reconnaître les limites pratiques des mesures, telles que le temps de réchauffement du capteur, l'inertie de réponse et l'incertitude ;
- interpréter les données à l'aide de graphiques simples et relier les résultats numériques aux processus physiques, chimiques et biologiques observés ;
- Expliquez comment les processus à petite échelle observés lors d'expériences se rapportent à la dynamique climatique et aux écosystèmes à grande échelle.

Méthodologie

Le projet adopte une approche d'**apprentissage par enquête et basée sur les projets (PBL)**.

L'enseignement est structuré autour de trois éléments récurrents :

1. **Mesure pratique** : Les élèves collectent des données réelles à l'aide de capteurs, en se concentrant sur la bonne configuration, la calibration et l'observation.

2. **Interprétation des données** : Les données enregistrées sont visualisées et discutées en lien avec des événements expérimentaux, aidant les élèves à relier les mesures aux relations de cause à effet.
3. **Investigation ouverte** : Dans les activités étendues et de fin d'études, les élèves conçoivent leurs propres expériences (par exemple, écosystèmes scellés, scénarios d'agriculture intelligente), formulent des hypothèses et évaluent les résultats.

L'accent est mis sur **l'interprétation des mesures**, pas seulement sur leur collecte, mais sur la manière dont la recherche environnementale et climatique est menée dans des contextes réels.

3. Une approche « plancher bas, plafond haut, murs larges »

Dans STEAM4Climate, nous avons adopté une approche qui permet aux élèves d'explorer les écosystèmes et la biodiversité grâce à divers capteurs, indépendamment de leurs compétences techniques.

- **Plancher bas** : Les débutants peuvent facilement commencer avec des outils basiques comme un kit de capteurs Arduino préassemblé, des bocaux simples et des matériaux du quotidien (terre, mousse, eau). Aucune expérience préalable en codage ou en électronique n'est requise dans ce scénario si *le kit environnemental STEAM4Climate* est utilisé. Les observations quantitatives offriront aux élèves un aperçu des dynamiques des écosystèmes. De plus, pour chaque scénario, le code est disponible afin d'être copié.
- **Plafond haut** : Les apprenants au niveau avancé peuvent intégrer des capteurs plus sophistiqués (par exemple NO₂, CH₄ et capteurs d'éthanol, en plus du CO₂) pour des scénarios appropriés et s'auto-programmer sur leurs projets. Pour les étudiants de premier plan, une analyse qualitative est possible. Ils peuvent être encouragés à mener des expériences supplémentaires, comme observer l'effet de la surfertilisation du sol entraînant l'émission de composés azotés ou étudier la durabilité à long terme des biosphères scellées.
- **Murs larges** : Les possibilités sont vastes : les élèves peuvent choisir de modéliser différents écosystèmes (écosystèmes basés sur le sol, systèmes hydroponiques, environnements aquatiques), scellés ou ouverts, aérobies ou anaérobies. Chaque bocal devient une composition scientifique et créative unique, encourageant l'expérimentation avec plusieurs itérations. Au final, pourquoi rester sur le bocal si les mesures peuvent se faire à l'extérieur, dans votre compost de jardin ou dans les zones humides voisines ?

Que ce soit en intérieur ou sur le terrain, le parcours de chaque apprenant est différent et chaque bocal avec un écosystème raconte sa propre histoire. Nous espérons que cette expérience immersive favorise la curiosité et une appréciation durable de la complexité de la vie et de l'environnement.

Matériaux

4. Matériaux inclus dans la boîte à outils pour la version de base

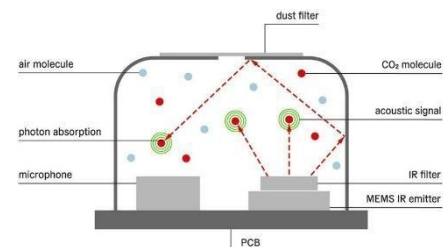
- Capteur de CO2 (Gravité : SEN0536)
- Module DAQ (Gravity : Module DAQ SCI)
- Amplificateur de batterie
- Deux batteries
- Fils : PH2.0-4P à double tête, entrée batterie (auto-fabriquée)

Capteurs de base – température, humidité, concentration en CO2

Les capteurs de température et d'humidité sont généralement des unités intégrées (comme DHT11 ou DHT22). Même s'ils peuvent être achetés et connectés séparément, utiliser une carte avec des détecteurs intégrés est plus pratique, réduisant ainsi le besoin de gestion des fils. Le capteur de base pour la concentration en CO₂ que nous recommandons pour son rapport coût-efficacité est **le SCD41** :

« Le SCD4x est la deuxième génération de capteurs optiques CO2 de Sensirion. La série de capteurs s'appuie sur le principe de détection photoacoustique NDIR¹ et la technologie brevetée PASens® et CMOSens® de Sensirion pour offrir une précision à un prix attractif et un format réduit. L'assemblage SMD permet une intégration du capteur à la fois économique et compacte avec une liberté maximale de conception. La compensation du signal intégrée est réalisée grâce au capteur d'humidité et de température intégré SHT4x. »²

« Le capteur SCD41 détecte la quantité d'énergie absorbée par les molécules de CO2. Lors de l'impulsion de l'émetteur infrarouge, les molécules de CO2 absorbent périodiquement la lumière infrarouge. Cela provoque des vibrations moléculaires supplémentaires entraînant une onde de pression à l'intérieur de la chambre de mesure. Plus la



¹ NDIR – Infrarouge non dispersif

² <https://sensirion.com/products/catalog/SCD41>

concentration de CO2 est élevée, plus la lumière est absorbée, et donc plus l'amplitude de cette onde acoustique augmente. Un microphone à l'intérieur de la chambre à gaz mesure cela, à partir duquel la concentration de CO2 peut ensuite être calculée. »³

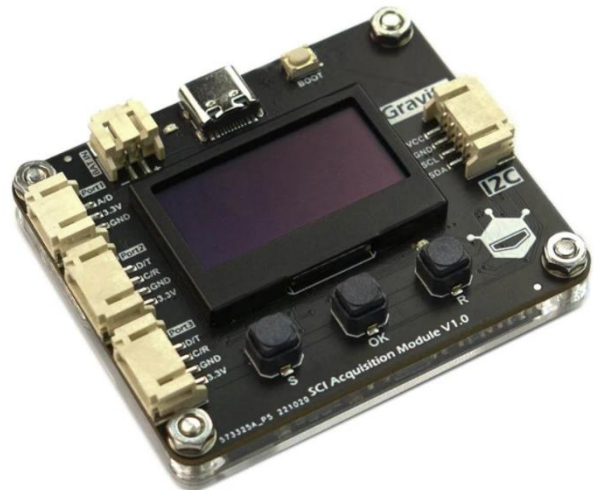
Divers fabricants vendent ce capteur en utilisant des conceptions légèrement différentes de cartes de circuits imprimés. Pour éviter la soudure et utiliser un ensemble cohérent de capteurs, nous avons décidé d'utiliser la **plateforme Gravity conçue par la société DFRobot**. Nous avons ainsi décidé de mettre en œuvre le projet en utilisant le **module DFRobot SEN0536**.



Gravité : Module d'acquisition de données scientifiques (SCI DAQ)

Spécification 4:

- Tension de fonctionnement : 3,3-5,5V DC
- Courant de fonctionnement : 40 mA
- Signal de sortie : I2C (0x21-0x23)
- Interface d'entrée : 1 x Digital/Analogique, 2 x I2C/UART
- Stockage embarqué : 16M
- Batterie RTC : CR1220
- Infos de l'écran : 1,3 pouce OLED
- Dimensions du produit : 62×52×13 mm



³ https://wiki.dfrobot.com/SKU_SEN0536_Gravity_SCD41_Infrared_CO2_Sensor

⁴ <https://www.dfrobot.com/product-2655.html>

5. Autres composants pour la version de base

- Contenant scellé (bocal ou bouteille en plastique de 1 litre)
- Pack de levure sèche (5g)
- Un paquet de bicarbonate de soude
- Un paquet d'acide citrique ou de vinaigre
- Sucre
- Eau du robinet
- Morceau de terre

6. Composants de la version étendue

Selon l'approche des « murs larges », de nombreuses options sont proposées pour étendre le projet grâce au module DAQ SCI fourni, car il prend en charge divers capteurs pertinents pour les environnements d'étude :

- Humidité analogique du sol, capteur de lumière ambiante
- Capteur de température IR sans contact,
- Qualité de l'eau : pH, conductivité électrique, TDS, thermomètre étanche
- Détecteurs de gaz (électrochimiques)

En cas d'utilisation simultanée de nombreux capteurs, un « hub I2C » supplémentaire est nécessaire. Cependant, il existe quelques difficultés techniques, pour cette raison, nous recommandons d'utiliser un DAQ séparé à la place. La liste complète des équipements pris en charge est disponible sur le site web du fabricant :

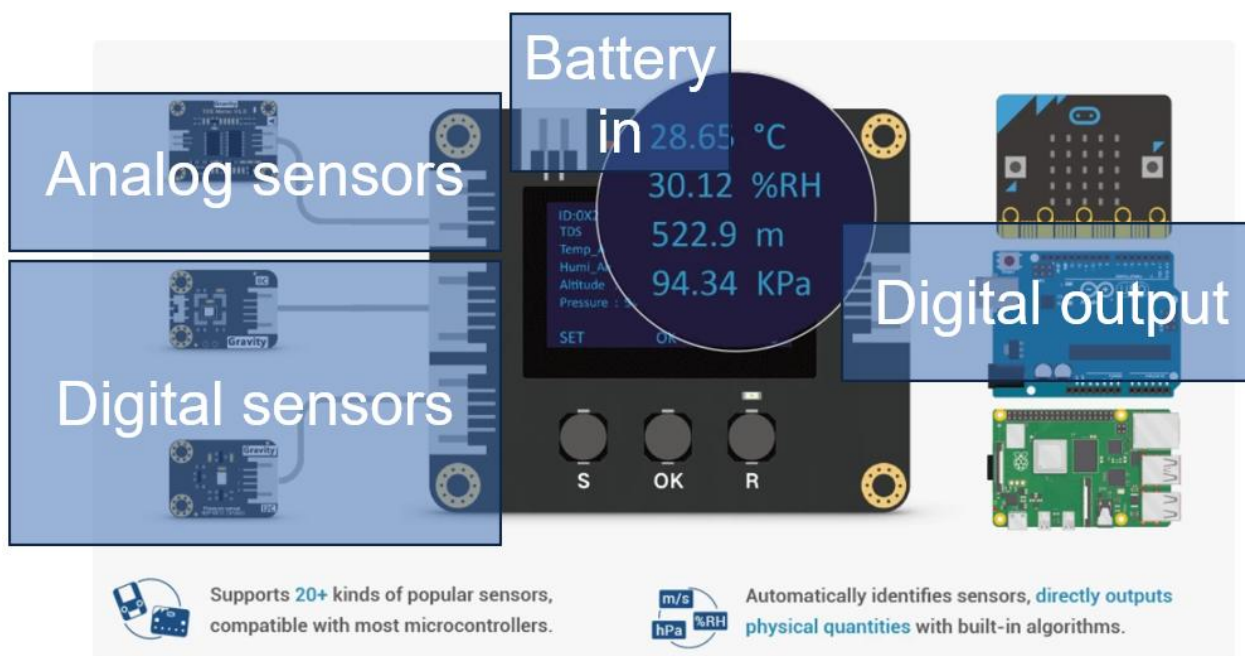
<https://www.dfrobot.com/product-2655.html>

Instructions d'activité

7. Préparation préalable à l'activité

7.1 Équipements de connexion

Le module DAQ SCI doit être alimenté. Dans notre configuration, nous utilisons une batterie avec un amplificateur surélevé ; par conséquent, deux piles AA suffisent à alimenter le DAQ. La prise de batterie à 2 broches est située au-dessus de l'écran, tandis que notre capteur devrait être connecté via une prise à 4 broches à gauche de l'écran. Sinon, il peut être alimenté via un câble USB-C (connecté à une batterie externe non inclus) :⁵



Activité pour les élèves :

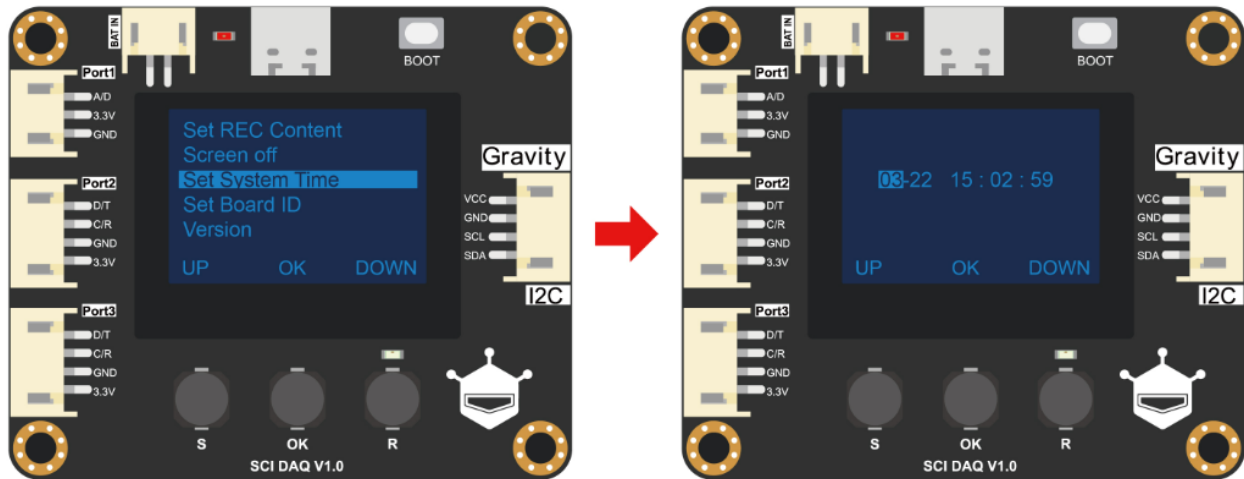
- Connecte et lis la concentration de CO2 (en ppm, parties par million)
- Compare les valeurs affichées en intérieur et en extérieur
- Vérifie comment le capteur réagit à ta respiration

⁵ Photo à l'arrière – site du fabricant : <https://www.dfrobot.com/product-2724.html>

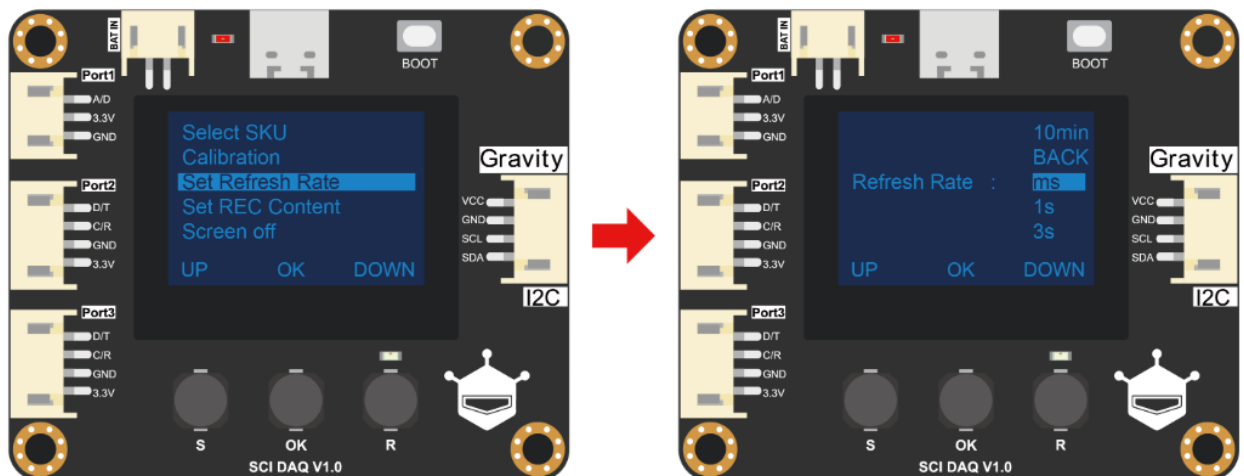
7.2 Datalogging

Pour enregistrer les mesures, deux configurations sont attendues :

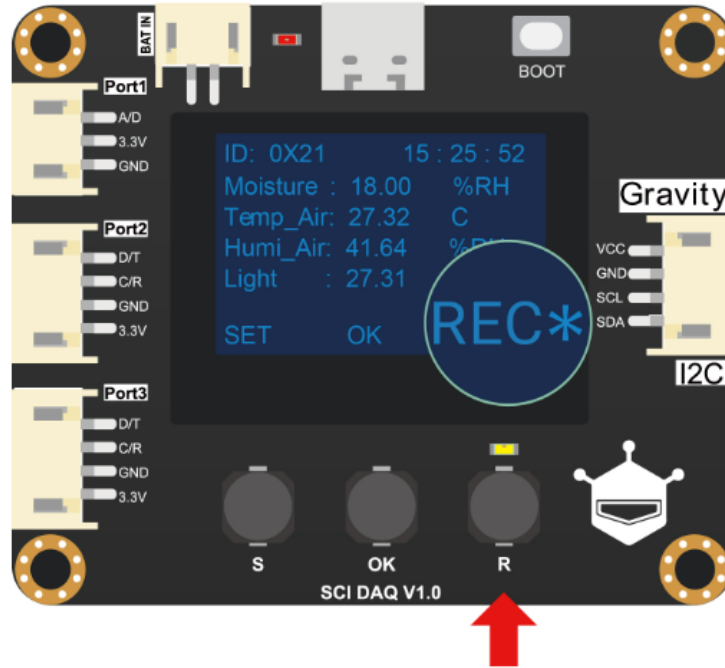
Temps de réglage du système :



Réglage du taux de rafraîchissement :

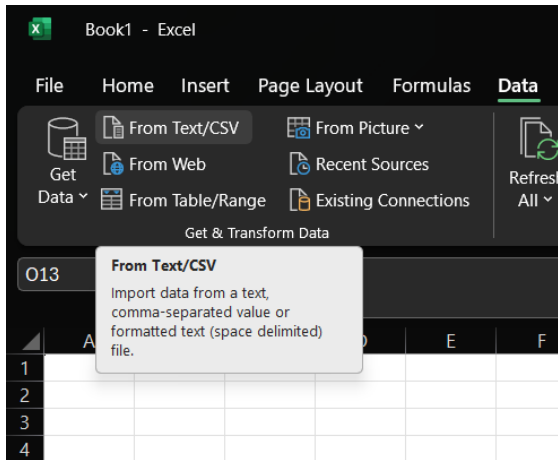


Avec le bon bouton, le datalogging peut commencer.



Le clignotement de la diode jaune indique que l'enregistrement est en cours.

Après avoir enregistré les données, le fichier CSV est créé avec « » comme séparateur. Pour lire le fichier, nous recommandons d'utiliser Excel (ou un logiciel similaire), en suivant les étapes : Données -> Lecture à partir de CSV -> Chargement.



8. Exécution des activités

Voici une liste d'exercices à un niveau de complexité différent. C'est à l'enseignant de choisir quels exercices faire avec un groupe particulier d'élèves.

8.1 Comprendre le ppm

Objectif :

Comprendre ce que signifie « ppm », mesurer les niveaux de CO₂ dans différents environnements et analyser comment la concentration évolue au fil du temps.

Procédure :

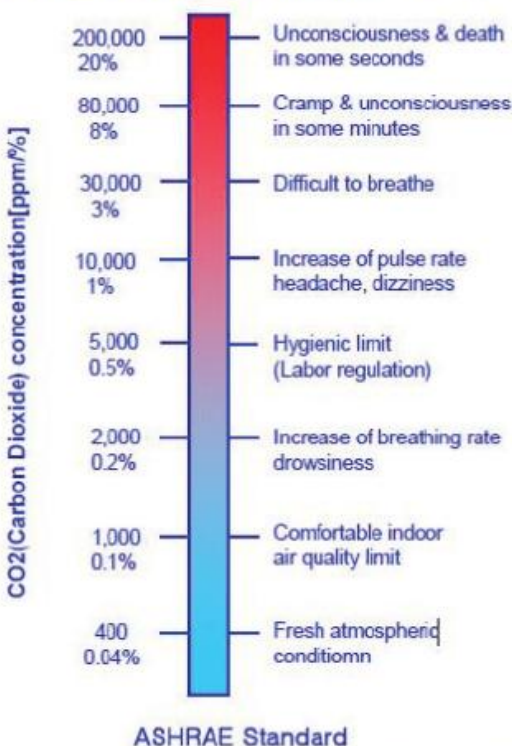
1. Allumez le capteur de CO₂ et attendez quelques minutes jusqu'à ce que les relevés se stabilisent (échauffement).
2. Commencez à enregistrer les données avec le détecteur. Pendant qu'il fonctionne, observez les valeurs en direct sur l'écran.
3. Faites circuler le capteur :
 - Mesurez en classe.
 - Sortez et comparez les valeurs en extérieur.
 - Respirez brièvement sur le capteur à l'air libre (notez le pic rapide).
 - Placez-le dans un bocal ou une boîte fermée, expirez à l'intérieur, puis couvrez-le (notez combien de temps les valeurs restent élevées).
4. Après avoir terminé la promenade/les expériences, arrêtez l'enregistrement.
5. Connectez le capteur à un ordinateur via USB-C. Localisez le dernier fichier CSV (séparateur = « , »), copiez-le sur votre appareil, et libérez la mémoire du logger.
6. Réalisez un nuage de points : concentration de CO₂ (ppm) vs. temps (s).
7. Comparez le graphique avec vos notes d'observation :
 - Quand vous êtes passé de l'intérieur à l'extérieur,
 - Quand vous respirez sur le capteur,

- La rapidité avec laquelle les valeurs montaient et diminuaient (inertie du détecteur).

Quel rapport cela a-t-il avec le climat ?

- L'air extérieur contient normalement entre 400 à 450 ppm de CO₂, tandis que les espaces intérieurs peuvent atteindre 1000 à 2000 ppm sans ventilation.
- À l'échelle mondiale, les niveaux de CO₂ avant la Révolution industrielle étaient d'environ **280 ppm**. Aujourd'hui, ils dépassent **420 ppm**, soit une augmentation d'environ 50 % en seulement 200 ans : la plus rapide hausse de l'histoire récente de la Terre. Ce CO₂ supplémentaire retient davantage de chaleur dans l'atmosphère, amplifiant l'effet de serre et provoquant le changement climatique.
- L'haleine humaine contient environ 40 000 ppm de CO₂, ce qui montre comment même de petites émissions dans un espace confiné s'accumulent rapidement.
- En enregistrant, traçant et reliant les mesures aux observations, les étudiants découvrent comment les gaz invisibles peuvent être suivis. Exactement comme les climatologues surveillent l'évolution de l'atmosphère de la planète.

How does CO₂ affect the human body?



ASHRAE : American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers

6

8.2 Production chimique de CO₂

Objectif :

Démontrer comment les réactions chimiques peuvent produire de grandes quantités de CO₂, et mesurer ce gaz à la fois en utilisant des variations de masse et des capteurs directs.

Procédure :

1. Préparez 5 g de bicarbonate de soude (NaHCO₃) et 3,8 g d'acide citrique (C₆H₈O₇) dissous dans 30 à 50 ml d'eau (le vinaigre peut être utilisé en alternative).
2. Placez le récipient avec la solution acide sur une balance électronique et ajustez la mesure (réglé à zéro).

⁶ <https://gasalarm.com.au/importance-of-co2-measurement-inside-meeting-rooms-classrooms-offices-etc/>

3. Ajoutez le bicarbonate de soude et observez : le liquide boue et la masse affichée sur l'écran diminue. Notez les changements au fil du temps.
4. Répétez l'expérience dans un bocal avec un couvercle :
 - Fixez le capteur de CO₂ sous le couvercle (au-dessus du liquide).
 - Commencez l'enregistrement des données, ajoutez le bicarbonate de soude et fermez le bocal (laissez un petit espace pour la sécurité).
 - Enregistrez l'augmentation rapide de la concentration de CO₂ pendant au moins plusieurs dizaines de secondes.
5. Exportez le fichier de données (CSV) et réalisez un nuage de points de la concentration de CO₂ (ppm) par rapport au temps (s). Comparez avec vos notes issues des observations directes (bulles, changement de masse).

Quel rapport cela a-t-il avec le climat ?

- La réaction montre clairement la libération de gaz CO₂. La masse « disparue » sur la balance et la montée des relevés des capteurs sont deux perspectives sur le même processus : un gaz invisible quittant le liquide dans l'air.
- À l'échelle mondiale, les procédés chimiques industriels sont des sources majeures de CO₂. La combustion de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ajoute 35 à 37 milliards de tonnes de CO₂ chaque année. La production de ciment ajoute encore entre 2,5 à 3 milliards de tonnes (≈7 à 8 % des émissions mondiales).
- Tout comme dans le bocal, l'atmosphère terrestre est un espace fermé : le CO₂ que nous émettons s'accumule.

Calculs optionnels :

Étape 1 : Masses molaires

Composant	Formule	Masse molaire (g/mol)
Bicarbonate de soude	NaHCO ₃	84.01
Acide citrique	C ₆ H ₈ O ₇	192.12

Dioxyde de carbone	CO ₂	44.01
--------------------	-----------------	-------

Étape 2 : Grains de bicarbonate de soude (donné)

$$n_{\text{NaHCO}_3} = \frac{5 \text{ g}}{84.01 \text{ g/mol}} \approx 0.0595 \text{ mol}$$

Étape 3 : Stoechiométrie

D'après la réaction équilibrée :

- 1 mol d'acide citrique réagit avec **3 mol de NaHCO₃**, donc :

$$n_{\text{citric acid}} = \frac{1}{3} \times 0.0595 \text{ mol} \approx 0.01983 \text{ mol}$$

Étape 4 : masse d'acide citrique nécessaire

$$m_{\text{citric acid}} = n_{\text{citric acid}} \times M_{\text{citric acid}} = 0.01983 \text{ mol} \times 192.12 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \approx 3.81 \text{ g}$$

Étape 5 : CO₂ produit

D'après la réaction équilibrée :

- La réaction produit **3 mol CO₂ pour 3 mol de NaHCO₃**, donc :

$$n_{\text{CO}_2} = 0.0595 \text{ mol}$$

$$m_{\text{CO}_2} = 0.0595 \text{ mol} \times 44.01 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \approx 2.62 \text{ g}$$

Résumé :

- Il faut **3,81 g d'acide citrique** pour réagir avec **5 g de bicarbonate de soude**.
- L'un d'eux produira environ **2,62 g de gaz CO₂**.

8.3 Production biologique de CO₂ : la levure et le rôle de la température

Objectif :

Observer la production de CO₂ lors de la fermentation par la levure et relier les processus biologiques aux émissions de gaz à effet de serre.

Procédure :

1. Préparez-vous :

- 1 sachet de levure sèche (~7 g),
- 1 cuillère à café de sucre,
- eau tiède (30 à 40 °C), environ 100 ml
- une bouteille ou un pot en plastique,
- un ballon pour bouteille ou un couvercle pour un bocal,
- un capteur de CO₂ avec DAQ,
- thermomètre pour mesurer la température de l'eau.

2. Ajoutez la levure et le sucre dans le récipient, versez de l'eau tiède (mesurez la température initiale), puis remuez.

3. Fermez le contenant :

- Si vous utilisez un ballon, placez-le sur l'ouverture du contenant pour qu'il puisse se gonfler avec du gaz (c'est une démonstration qualitative de la production de gaz pour les plus jeunes).
- Si vous utilisez un couvercle, branchez le capteur de CO₂ sous le couvercle (au-dessus du liquide) et commencez à enregistrer les données.

4. Observez pendant 15 à 30 minutes :

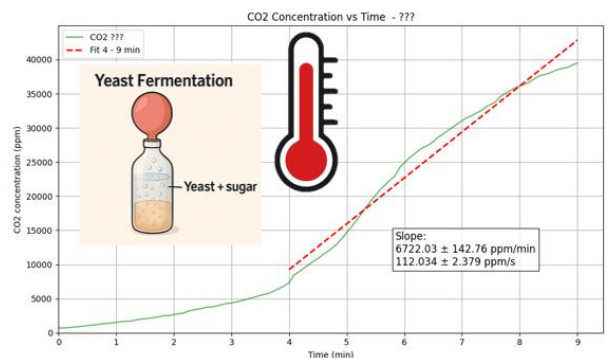
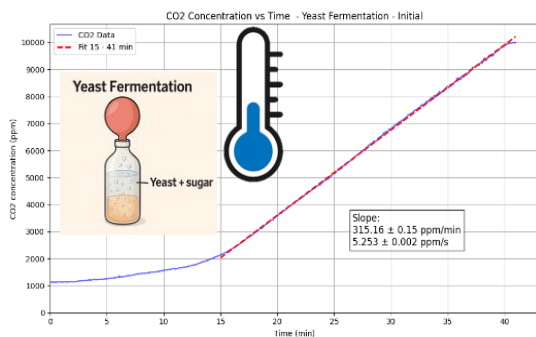
- De la mousse apparaît à la surface,
- Le ballon se gonfle,
- Le capteur de CO₂ montre une montée progressive (souvent plusieurs milliers de ppm).

5. Exportez les données (CSV) et réalisez un nuage de points : concentration de CO₂ (ppm) vs. temps (s). Comparez le graphique avec les notes de ce que vous avez vu se passer (mousse, ballon qui gonfle).

Version étendue :

Demandez aux élèves de préparer plusieurs contenants contenant d'eau à différentes températures (par exemple froid $\sim 10^\circ\text{C}$, température ambiante $\sim 20^\circ\text{C}$, chaud $\sim 30\text{--}40^\circ\text{C}$, chaud $\sim 50^\circ\text{C}$). Ajoutez la même quantité de levure et de sucre à chacun. Enregistrez la concentration de CO_2 dans le temps avec le capteur (ou comparez le gonflement du ballon). Cette extension permet aux étudiants de tester comment la température affecte le taux de production biologique de CO_2 et d'identifier la « plage optimale » d'activité des levures. Elle est directement liée à la science du climat, puisque la température régule fortement les processus biologiques tels que la respiration, la décomposition et l'activité microbienne des sols.

Dans l'exemple ci-dessous, le taux de libération de CO_2 change plus de 20 fois en raison de la modification de la température de l'eau :



Quel rapport cela a-t-il avec le climat ?

- La fermentation est un processus biologique où la levure décompose le sucre en alcool et CO_2 . L'expérience montre que les organismes vivants peuvent être des sources importantes de CO_2 .
- À l'échelle mondiale, des processus biologiques similaires contribuent aux émissions de gaz à effet de serre dans l'agriculture et la production alimentaire. L'agriculture, l'élevage et les changements d'utilisation des terres émettent environ **6 milliards de tonnes d'équivalent CO_2 par an** (~ 15 à 20% des gaz à effet de serre sont d'origine humaine). L'agriculture est l'un des secteurs majeurs responsables du réchauffement climatique.

- Des événements écologiques spectaculaires nous rappellent la fragilité des écosystèmes : par exemple, la **mortalité massive des antilopes saïgas au Kazakhstan**⁷ en 2015, où les conditions climatiques ont permis une infection bactérienne ayant tué plus de 200 000 animaux. De tels cas illustrent comment des variations subtiles de température et d'humidité peuvent déclencher de grandes rétroactions biologiques, tout comme de petits processus microbiens dans cette expérience s'étendent pour affecter le climat mondial.

⁷<https://www.theguardian.com/science/animal-magic/2016/apr/14/mass-death-saiga-antelope-kazakhstan-bacterial-infection>

8.4 Production biologique de CO₂ : le sol

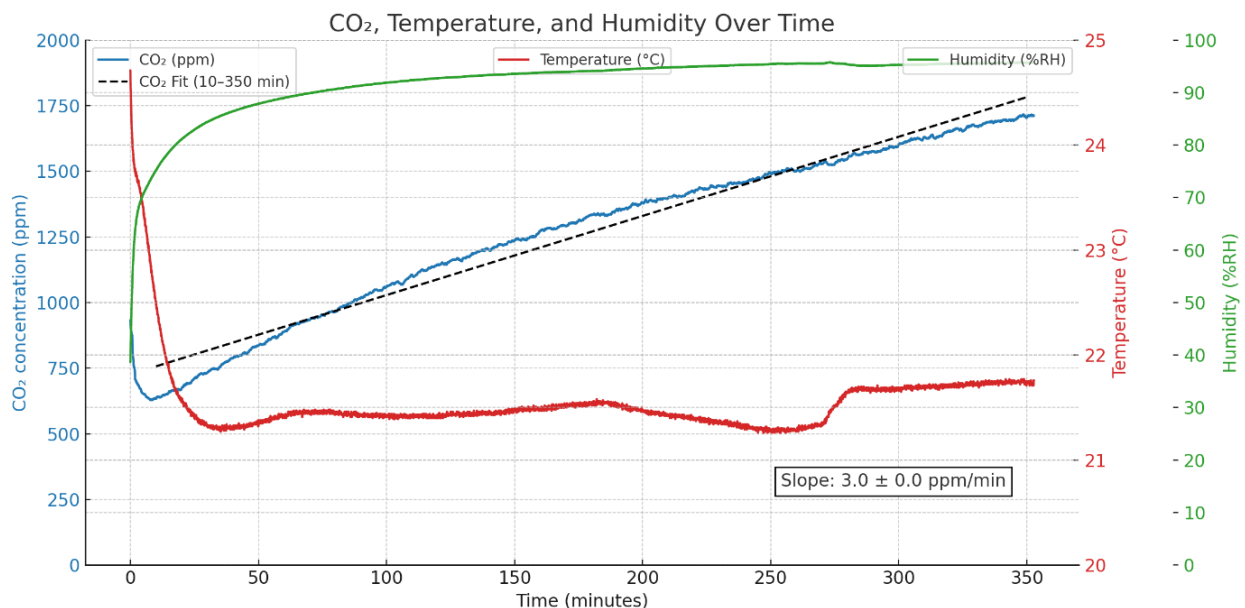
Objectif :

Démontrer que le sol est un système biologique actif et peut être une source de CO₂ en raison de la respiration microbienne et de la décomposition de la matière organique.

Procédure :

1. Préparez un bocal propre et placez une portion de terre humide à l'intérieur (ne le compactez pas).
2. Fixez le capteur de CO₂ sous le couvercle afin qu'il ne touche pas la surface du sol.
3. Fermez le bocal et commencez à enregistrer les données.
4. Laissez l'installation intacte pendant 10 à 20 minutes.
5. Observez comment la concentration en CO₂ évolue au fil du temps.
6. Répétez la mesure avec un bocal vide (expérience témoin) et comparez les résultats.
7. Tracez la concentration de CO₂ (ppm) par rapport au temps (s) et reliez la courbe à ce qui se passe à l'intérieur du sol.

Le graphique ci-dessous présente les changements des paramètres environnementaux sur quelques heures



Quel rapport cela a-t-il avec le climat ?

- Le sol contient un grand nombre de micro-organismes qui respirent et décomposent la matière organique, libérant du CO₂ comme une partie naturelle du cycle du carbone.
- À l'échelle mondiale, les sols stockent plus de carbone que l'atmosphère et la végétation réunies. De petits changements dans les conditions du sol (humidité, température, matière organique) peuvent donc fortement influencer les émissions de CO₂.
- Les pratiques agricoles telles que le travail du sol, l'irrigation et la fertilisation influencent l'activité microbienne du sol et peuvent augmenter les émissions non seulement de CO₂, mais aussi d'autres gaz à effet de serre comme le protoxyde d'azote (N₂O) et l'ammoniac (NH₃).
- Cette expérience montre que les sols ne sont pas des surfaces passives mais des écosystèmes dynamiques dont la gestion joue un rôle clé dans l'atténuation et l'adaptation au changement climatique.

8.5 Introduction à l'agriculture intelligente

Objectif :

Introduire le concept d'agriculture intelligente en utilisant les données des capteurs pour soutenir les décisions concernant l'arrosage des plantes, au lieu de s'appuyer sur des horaires fixes ou par intuition.

Procédure :

1. Préparez une plante en pot ou un contenant avec de la terre et une plante en croissance.
2. Insérez un capteur d'humidité du sol près des racines de la plante.
3. Connectez le capteur au module DAQ et commencez l'enregistrement des données.
4. Observez les valeurs d'humidité du sol sur le long terme dans des conditions normales (sans arrosage).
5. Arrosez la plante et observez comment la lecture de l'humidité du sol évolue.
6. Continuez à surveiller pendant plusieurs heures ou jours pour voir à quelle vitesse le sol sèche.
7. Discutez ou définissez une **valeur seuil** en dessous de laquelle l'arrosage est nécessaire.

Version étendue :

L'activité d'agriculture intelligente peut être étendue en introduisant **une irrigation automatisée**, où les données d'humidité du sol sont utilisées pour déclencher l'arrosage automatique (par exemple via une pompe ou une vanne contrôlée par relais). Les élèves peuvent définir des valeurs seuils et tester comment différentes stratégies influencent la croissance des plantes et l'utilisation de l'eau.

Une extension supplémentaire consiste à réaliser l'expérience à l'intérieur d'une **chambre de culture** ou d'une mini-serre, où des paramètres supplémentaires tels que l'intensité lumineuse, la température et l'humidité sont contrôlés ou surveillés. Cela permet aux élèves de comparer des environnements ouverts et contrôlés, d'explorer les boucles de rétroaction entre les conditions climatiques et les besoins des plantes, et de discuter de la manière dont l'agriculture contrôlée (par exemple, serres, agriculture verticale) peut aider à adapter la production alimentaire au changement climatique tout en réduisant la consommation des ressources.

Quel rapport cela a-t-il avec le climat ?

- L'agriculture est très sensible au changement climatique, notamment à la fréquence croissante des sécheresses, aux vagues de chaleur et aux précipitations irrégulières.
- L'irrigation traditionnelle gaspille souvent de l'eau en arrosant trop tôt ou trop tard, tandis que l'agriculture intelligente utilise des données en temps réel pour optimiser l'utilisation des ressources.
- L'irrigation par capteurs réduit la consommation d'eau, la consommation d'énergie et le ruissellement des engrais, diminuant ainsi les émissions de gaz à effet de serre associées à l'agriculture.
- Cette activité initie les élèves aux **stratégies d'adaptation climatique**, montrant comment la technologie peut aider les écosystèmes et les systèmes de production alimentaire à faire face à l'évolution des conditions environnementales.
- La même logique basée sur les données est utilisée dans l'agriculture à grande échelle, où des capteurs, des satellites et des modèles guident les décisions qui affectent la sécurité alimentaire mondiale et la résilience climatique.

8.6 Construire un écosystème scellé auto-entretenu : Défi PBL

Objectif :

Concevoir, construire et surveiller un petit écosystème scellé pouvant fonctionner dans le temps sans interventions externes, et comprendre les boucles de rétroaction, les limites et les équilibres dans les systèmes environnementaux fermés.

Procédure :

1. Divisez les élèves en petits groupes et présentez le défi :
Construisez un écosystème fermé qui puisse se maintenir le plus longtemps possible.
2. Demandez aux élèves d'apporter des matériaux de rechange tels qu'un bocal ou un contenant transparent, de la terre, de petites plantes ou de la mousse, de l'eau, et des éléments naturels optionnels (pierres, litière de feuilles).
3. Demandez aux élèves de planifier leur écosystème avant de le construire, en tenant compte de :
 - La quantité d'eau,
 - Le type et nombre de plantes,
 - La présence de sol et de matière organique,
 - La lumière disponible.
4. Placez les capteurs de CO₂ de température et d'humidité connectés au DAQ à l'intérieur du bocal, fixés au couvercle.
5. Commencez la journalisation des données et scellez le conteneur.
6. Surveillez les changements dans le temps (heures, jours ou semaines). Comparez les relevés de données aux changements visibles de l'état des plantes (croissance, flétrissement, condensation).

Quel rapport cela a-t-il avec le climat ?

- Un écosystème scellé est un modèle puissant du système terrestre : l'énergie entre principalement sous forme de lumière solaire, tandis que la matière circule à l'intérieur.
- De petits déséquilibres dans le carbone, l'eau ou l'énergie peuvent entraîner d'importants changements au fil du temps, tout comme dans le système climatique réel.
- L'augmentation des niveaux de CO₂, la surchauffe ou le déséquilibre de l'eau à l'intérieur du pot reflètent des défis mondiaux tels que le changement climatique, la sécheresse ou l'effondrement des écosystèmes.
- Cette activité met en lumière les boucles de rétroaction (par exemple, la photosynthèse des plantes vs. la respiration), les délais et les points de bascule : des concepts clés en science du climat.
- En concevant et testant leurs propres écosystèmes, les étudiants découvrent comment les décisions humaines influencent la stabilité environnementale, renforçant l'idée que le climat terrestre n'est pas infiniment résilient.

Questions de réflexion optionnelles :

- Qu'est-ce qui rend certains écosystèmes plus stables que d'autres ?
- Le système a-t-il atteint un équilibre, ou a-t-il dérivé vers l'échec ?
- Quels processus étaient rapides, et lesquels étaient lents ?
- En quoi la Terre est-elle *similaire et différente d'*un écosystème de jarres ?

Suivi et résumé après la leçon

9. Sujets de discussion

Les sujets de discussion suivants aident les élèves à réfléchir à leurs mesures et à relier les résultats expérimentaux aux processus plus larges des écosystèmes et du climat :

- **Différentes sources de CO₂** : En quoi la production de CO₂ différait-elle entre les réactions chimiques, les processus biologiques (levure, sol) et la respiration à l'intérieur d'écosystèmes fermés ? Quelles sources étaient rapides et lesquelles étaient progressives ?
- **Systemes fermés vs. ouverts** : Comment le CO₂ se comportait-il dans les espaces extérieurs, ventilés, bocaux et écosystèmes scellés ? Comment cela nous aide-t-il à comprendre l'atmosphère terrestre en tant que système ? La Terre est-elle un système ouvert ou fermé ?
- **Du ppm au changement climatique** : Comment une hausse ponctuelle de la concentration de CO₂ se compare-t-elle à l'augmentation à long terme observée depuis l'ère préindustrielle ? Pourquoi un changement apparemment minime de ppm est-il important à l'échelle mondiale ?
- **Boucles de rétroaction et points de bascule** : Quelles expériences ont montré des rétroactions stabilisatrices (par exemple, la croissance des plantes) ? Quelles expériences ont montré des effets de incontrôlés ou une défaillance système ? Quel est le lien avec les véritables points de basculement climatique ?
- **Mesure et incertitude** : Quelles limitations avez-vous observées dans les capteurs et la journalisation des données (temps de chauffe, inertie, bruit) ? Comment les scientifiques expliquent-ils des problèmes similaires dans la recherche climatique ?
- **Prise de décision basée sur les données** : Comment les mesures ont-elles guidé les actions en agriculture intelligente et en conception d'écosystèmes ?

Pourquoi la prise de décision basée sur les données est-elle essentielle pour l'atténuation et l'adaptation au climat ?

- **Responsabilité humaine** : Quelles interventions expérimentales ressemblent aux actions humaines dans de véritables écosystèmes ? Quelles leçons ces expériences apportent-elles pour gérer durablement les terres, l'agriculture et les émissions ?

10. Évaluation

L'évaluation se concentre sur **le processus, la compréhension et la réflexion**, plutôt que sur des résultats numériques corrects. L'objectif est d'évaluer comment les élèves utilisent les mesures pour raisonner sur les écosystèmes et le climat.

Évaluation formative (pendant les activités)

Les enseignants peuvent observer et évaluer la capacité des élèves à :

- correctement configurer les capteurs et la journalisation des données ;
- enregistrer les observations en parallèle des données numériques ;
- reconnaître les limites de mesure (réchauffement du capteur, inertie, bruit) ;
- relier les changements de graphes aux actions expérimentales et aux processus environnementaux ;
- collaborer efficacement lors des tâches en groupe.

Évaluation basée sur la réflexion

Pour privilégier la compréhension plutôt que la mémorisation, les élèves peuvent répondre à des questions ouvertes telles que :

- Qu'ont révélé les mesures qui n'étaient pas visibles au premier abord ?
- Quelle expérience a le plus modifié votre compréhension du CO₂ et des écosystèmes, et pourquoi ?
- Comment mesurer un petit système nous aide-t-elle à comprendre les processus climatiques mondiaux ?

11. Extensions

Les enseignants et les élèves sont encouragés à concevoir leurs propres extensions en utilisant le matériel fourni dans la boîte à outils ou en étendant ses capacités. Le module DAQ prend en charge plusieurs types de capteurs, tandis que des plateformes telles que micro:bit permettent une programmation et une personnalisation supplémentaire.

1. Contrôle du compost et des déchets organiques

Mesurez le CO₂ (et éventuellement d'autres gaz) libérés lors du compostage ou de la décomposition des déchets organiques, ainsi que le changement de température du tas. Cette activité relie la gestion des déchets, l'activité biologique et les émissions de gaz à effet de serre.

2. Mesures réelles de l'écosystème

Effectuez des mesures en dehors de la salle de classe, comme dans un jardin d'école, un parc, une lisière de forêt ou une zone humide. Emmenez DAQ lors de sorties et de vacances, construisez une « culture de l'enquête ».

3. Projets de suivi à long terme

Répétez les mesures pendant des semaines ou des mois pour observer des changements lents dans les écosystèmes. Cela aide les élèves à comprendre les tendances à long terme, les effets saisonniers et la différence entre les fluctuations à court terme et les changements soutenus.

4. Comparaison des différents types d'écosystèmes

Concevoir et surveiller plusieurs écosystèmes (par exemple basés sur le sol, aquatiques, à base de mousse, hydroponiques) et comparer leurs échanges gazeux, leur stabilité et leur résilience.

5. Relier les mesures au sol avec des données externes

Combinez les données des capteurs avec les relevés météorologiques locaux, les données de qualité de l'air ou les observations satellites. Cela initie les étudiants

à l'analyse environnementale multi-sources utilisée dans la recherche climatique réelle.

6. **Construire des systèmes IoT pour la surveillance environnementale**

Prolongez le projet en connectant des capteurs et des modules DAQ à Internet, permettant un accès à distance aux données, des tableaux de bord ou des alertes.