

Nom du candidat : VIOLAIN-JOUVENE

Prénoms : Jade

N° Candidat : A BCPST -34034

Noms des auteurs en cas de travail commun

Ugo Lessire
Carla Vanseveren
Angel Harivel

Dominante BIOLOGIE

Dominante GÉOLOGIE

MIXTE

Surligner la dominante du TIPE

BANQUE AGRO-VETO – Session 2025

T.I.P.E.

Maximum 8 pages (illustrations comprises), Times New Roman 12 ou Arial 10, interligne simple.

20 000 caractères maximum

IMPORTANT : *n'inscrire sur cette couverture aucune référence à l'établissement scolaire*

RÉSUMÉ (en six lignes) :

Le taux de dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique n'a cessé d'augmenter depuis la révolution industrielle or c'est un gaz à effet de serre entraînant le dérèglement climatique, néfaste pour les écosystèmes. Une solution pour diminuer ce taux est la culture d'algues. Or l'absorption est d'autant plus efficace dans des milieux très concentrés en CO₂, comme les salles de classe. Nous voulons alors vérifier que les salles de classe sont riches en CO₂, y mettre des algues en culture, quantifier le carbone qu'elles ont fixés et déterminer les conditions l'optimisant comme la densité.

Nombre de caractères (espaces compris) :584

TITRE : Fixer du carbone grâce à des cultures d'algues

Le document doit être constitué au format A4 avec en couverture cette présentation.

Depuis la révolution industrielle les activités anthropiques et les pollutions associées n'ont cessé de croître causant une augmentation du carbone atmosphérique. L'atmosphère est un réservoir de carbone comptant jusqu'à 425 ppm de dioxyde de carbone (CO₂) aujourd'hui. Ce phénomène est en partie responsable de l'effet de serre, causant l'augmentation des températures ce qui perturbe alors tout notre écosystème [1]. Une des solutions proposées pour baisser ce taux est d'utiliser des algues comme puits de CO₂, en particulier les coccolithophoridés [2]. Ce sont des unicellulaires marins apparus il y a 200 millions d'années. Ils sont autotrophes au carbone, c'est-à-dire capables de fixer le carbone minéral atmosphérique (CO₂) en carbone organique ((CH₂O)_n) grâce à la réalisation de la photosynthèse. Ils sont également des organismes calcifiants: ils synthétisent des coccosphères composées d'un assemblage de coccolithes lors de la bio-précipitation. La calcification du CO₂ correspond à la **transformation** d'ions calcium (Ca²⁺) et d'ions carbonates (CO₃²⁻) en carbonate de calcium, CaCO₃. Les coccolithophoridés sont le principal puits de carbone dans l'océan de surface et sont responsables de la moitié de la production des carbonates [3]. Afin d'augmenter la fixation de carbone, on envisage des systèmes de culture de coccolithophoridés en domaine continental : Pierre Calleja a réalisé des lampes composées d'une solution de coccolithophoridés qu'il a positionné dans des parking et en centre ville [4] ayant ainsi pour but de fixer le carbone atmosphérique et de diminuer l'effet de serre. Or nous avons à notre disposition des bâtiments qui sont potentiellement des milieux chargés en CO₂ car ils sont fermés et plus ce taux est élevé plus l'absorption est efficace [5]. **Nous nous sommes demandé si des cultures d'algues à l'intérieur des bâtiments pourraient constituer une solution efficace dans la fixation du CO₂ atmosphérique ?**

Pour cela nous souhaitons montrer qu'une salle de classe est un milieu chargé en CO₂ afin de pouvoir y mettre en culture des algues et mesurer la quantité de carbone qu'elles fixent en un temps donné. Nous cultivons des coccolithophoridés de l'espèce *Emiliana huxleyi* et on les compare à d'autres algues photosynthétiques, les algues *Dunaliella salina*, afin d'estimer la quantité de carbone fixé par ces algues.

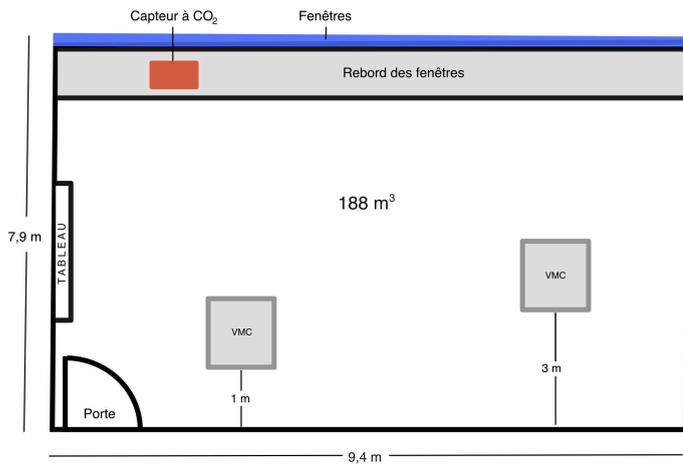
I) Évolution de la concentration du CO₂ dans une salle de classe

Dans un bâtiment, le CO₂ produit par les individus est partiellement évacué par le système de ventilation et il est conseillé aussi d'aérer régulièrement les pièces occupées. Mais certaines d'entre elles, comme les salles de classe, peuvent réunir une forte densité d'individus, et leur aération peut être limitée pour des raisons d'isolation thermique ou phonique. Or la fixation de dioxyde de carbone est favorisée par des milieux riches en celui-ci, donc nous souhaitons dans cette partie vérifier qu'une salle de classe est un milieu enrichi en CO₂.

A-Procédure :

Nous mesurons toutes les 30 secondes pendant 55 min (durée d'une séance moyenne) la concentration en dioxyde de carbone grâce à un montage arduino équipé d'une sonde à CO₂. Cette mesure est faite dans une salle de classe de 188 m³ fermée contenant 31 personnes, en condition de cours, en présence d'une ventilation mécanique fonctionnelle (VMC) active. Le capteur est positionné au devant de la classe éloignée de la porte (figure 1) .

Figure 1: Photo et schéma de la salle de classe

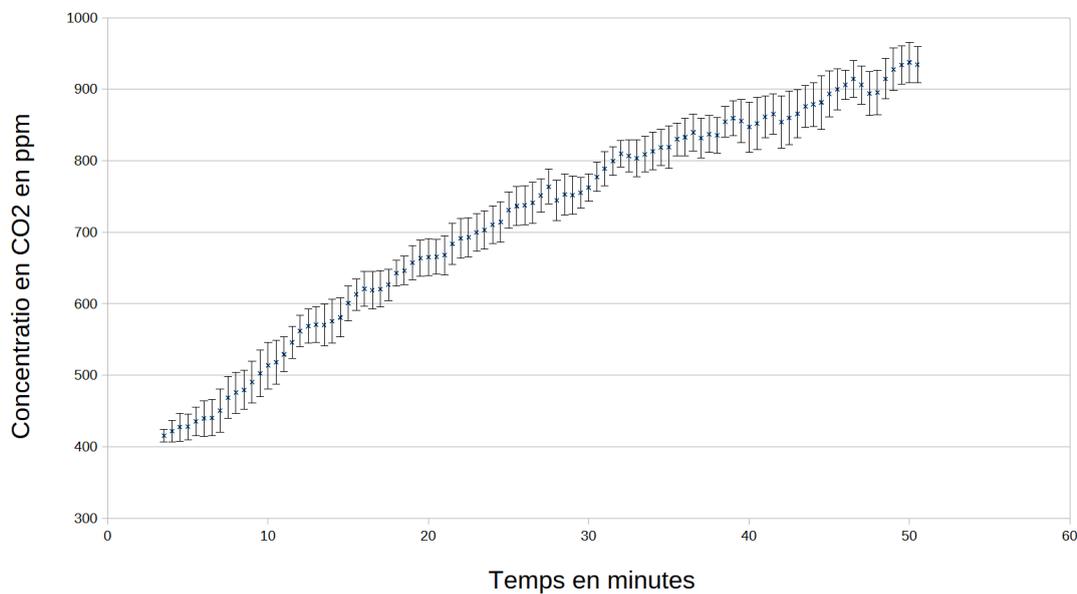


La manipulation est réalisée 6 fois, la salle de classe est aérée avant le début de la mesure de façon à atteindre une concentration initiale de CO₂ de 425 ± 5 ppm. La moyenne des concentrations relevées à un même temps donné, ainsi que son erreur standard à la moyenne, sont calculées.

B-Résultats et interprétations:

Figure 2: Évolution de la concentration en CO₂ dans une salle de classe au cours du temps.

Les barres correspondent aux erreurs standards sur la moyenne de 6 mesures de concentration.



La concentration en CO₂ dans nos conditions d'étude, augmente pendant la durée d'un cours et dépasse 900 ppm au bout de 50 min. La valeur moyenne pendant un cours est ainsi de 716 ± 16 ppm. On suppose que cette valeur peut varier en fonction du volume de la salle, de la densité et de l'activité des élèves, ainsi que de l'efficacité de la VMC, mais cela montre que certaines salles de classe sont effectivement des milieux enrichis en CO₂ et peuvent donc constituer un environnement favorisant la productivité des végétaux. Nous cherchons à présent à vérifier si un système de culture simple d'algues marines est capable de se développer dans une salle de classe.

II) Suivi de la population d'algues marines dans une salle de classe

A-Protocole

A1-algues et conditions de conservation des populations

Nous cultivons l'espèce de coccolithophoridés *Emiliana huxleyi* fournie par l'université de Roscoff via l'intermédiaire de Monsieur M.Gachenot dans un milieu de culture K2L [6] également fourni par l'université de Roscoff. Pour conserver cette population, les algues sont multipliées dans un erlenmeyer placé sous une lampe horticoles pendant 12h.

Nous voulons comparer la productivité de cette algue avec une autre algue marine disponible dans notre établissement, *Dunaliella salina*. Cette algue colonise dans la nature les milieux hypersalés et tolère une large gamme de salinité. Nous l'avons cultivé dans un milieu liquide avec 33 g/L de sels marins pour aquarium (marque Instant Ocean) additionnées à des vitamines utilisées pour le milieu K2L. Les algues sont conservées dans des bouteilles en verre avec un bulleur, placées sous une lampe horticoles.

Dans le cas des coccolithophoridés, nos conditions de culture n'ont pas permis d'entretenir notre population. Nous n'avons pas pu mener à bien notre comparaison, mais nous avons pu tester nos expériences sur *D.salina* et présentons ici les résultats sur cette algue.

A2-détermination de la densité des algues par spectrophotométrie

Une courbe étalon (figure 3) est réalisée en mesurant l'absorbance à 680 nm [7] à partir de différentes dilutions de culture et en quantifiant à l'aide d'une lame de Kova la concentration en algue dans ces dilutions.

Nous déterminons l'absorbance de chaque solution grâce au logiciel *LatiSpec* puis nous traçons $C = f(A)$ selon la loi de Beer Lambert.

Loi de Beer Lambert :

$$A = k.C$$

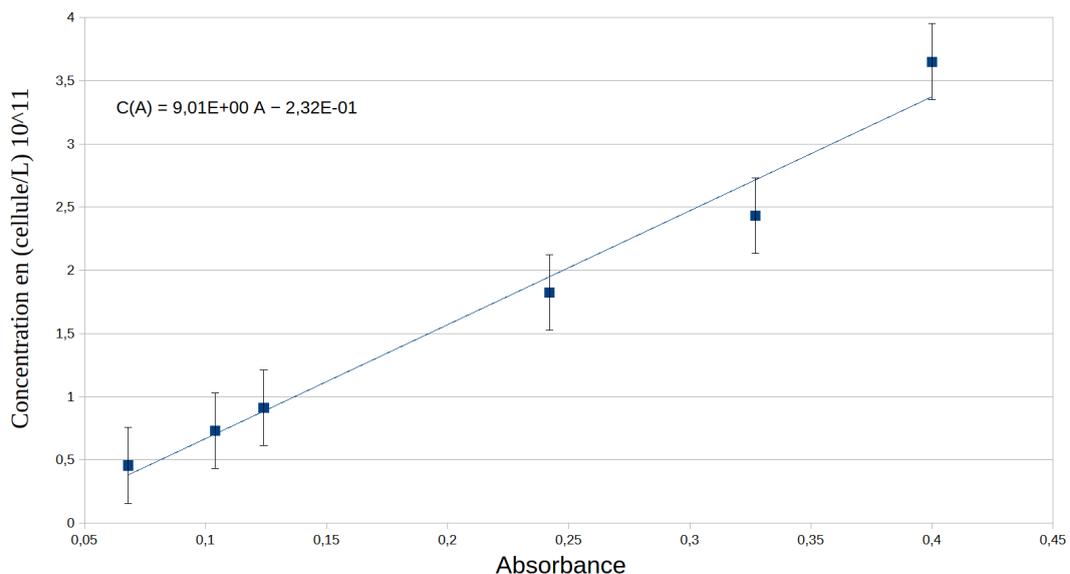
A : Absorbance

C : Concentration en mol/L

k : Coefficient d'extinction molaire

Figure 3 : Droite étalon de la concentration d'algues en fonction de l'absorbance.

Les barres représentent les incertitudes sur la concentration en algue



Le coefficient directeur de cette droite nous permet de relier absorbance et concentration.

A3-Condition de culture dans la salle de classe

100 mL de cultures à $0,18 \cdot 10^{11}$ algues/L sont placés dans un erlenmeyer de 250mL contre une fenêtre au second étage, exposition Nord-Est dans le Loiret (figure 4). La température de la classe varie en journée de 18 à 22 °C. La salle est occupée en moyenne 40h/semaine entre 8h et 17h (nous négligeons le temps où la salle est occupée par moins de 5 personnes).

Le béccher est remué avant chaque mesure d'absorbance, soit 1 fois par jour, en fin de journée. La densité de population est mesurée tous les jours jusqu'à ce qu'elle se stabilise aux environs de $1,1 \cdot 10^{11}$ algues/L. 3 erlenmeyers ont été suivis en parallèle. Une première expérience est réalisée le 26 février et une seconde le 6 mars.

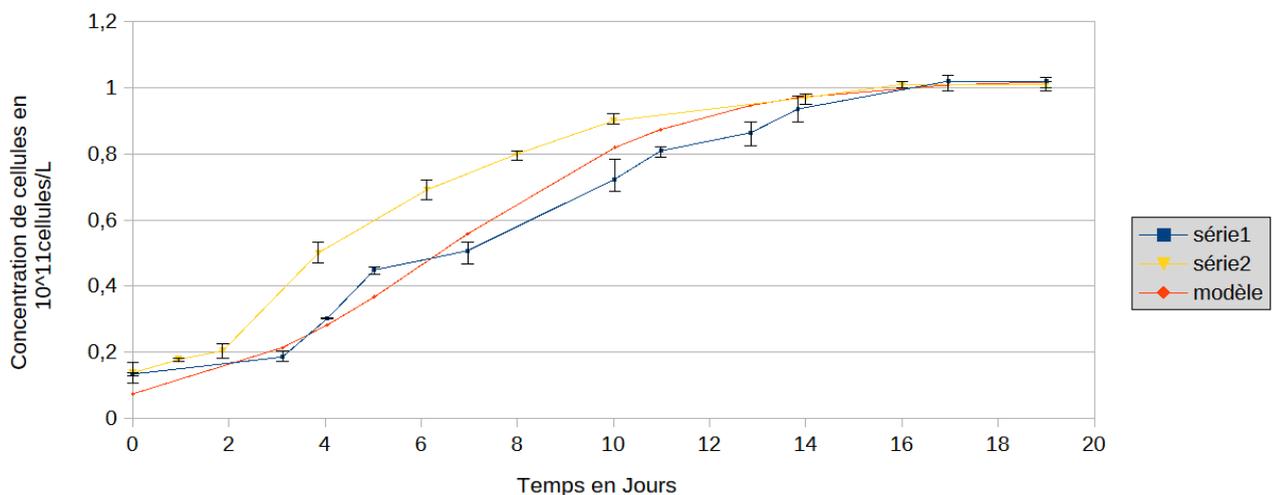
Figure 4 : culture d'algues dans la classe exposition Nord-Est (6 ième jour de culture)



B-Résultats et présentations :

Figure 5 : Évolution de la population d'algues dans la salle de classe.

Les barres représentent les valeurs minimales et maximales



Nos résultats confirment qu'il est possible de cultiver des *D. Salina* dans le contexte d'une salle de classe. La croissance de la population dépend de la photopériode: on s'attend à ce que cette croissance soit plus faible en plein hiver et plus importante au début de l'été. L'influence de la remise en suspension des algues devrait être étudiée pour évaluer si il est nécessaire et rentable de mettre au point un système automatisé.

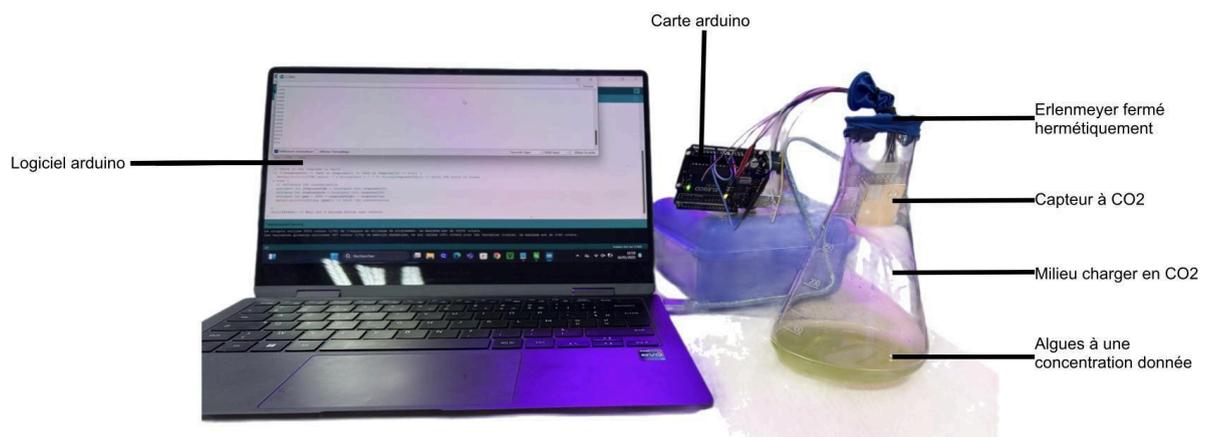
Lorsque la densité de la population augmente, la lumière pénètre plus difficilement à l'intérieur du milieu de culture ce qui peut limiter la fixation de CO₂. Nous souhaitons donc vérifier dans la partie suivante si la fixation du carbone atmosphérique varie selon la densité des algues.

III) Détermination de la densité d'algue optimisant l'absorption de CO₂

A-Protocole :

À partir d'une culture de densité connue conservée dans les conditions présentées dans la partie II.A1, nous réalisons 7 dilutions où 100mL de chaque dilution est placée dans un erlenmeyer de 200 mL. L'erlenmeyer est recouvert d'un couvercle hermétique muni d'une paille et d'un capteur à CO₂ relié à une carte Arduino (figure 6). Le milieu intérieur de l'erlenmeyer est enrichi jusqu'à 1000 ppm en CO₂ en soufflant dans la paille, puis celle-ci est retirée pour assurer l'herméticité du système. Cette mesure est réalisée à une température de 20°C sous une lampe horticole

Figure 6 : montage de la mesure de l'absorption du CO₂



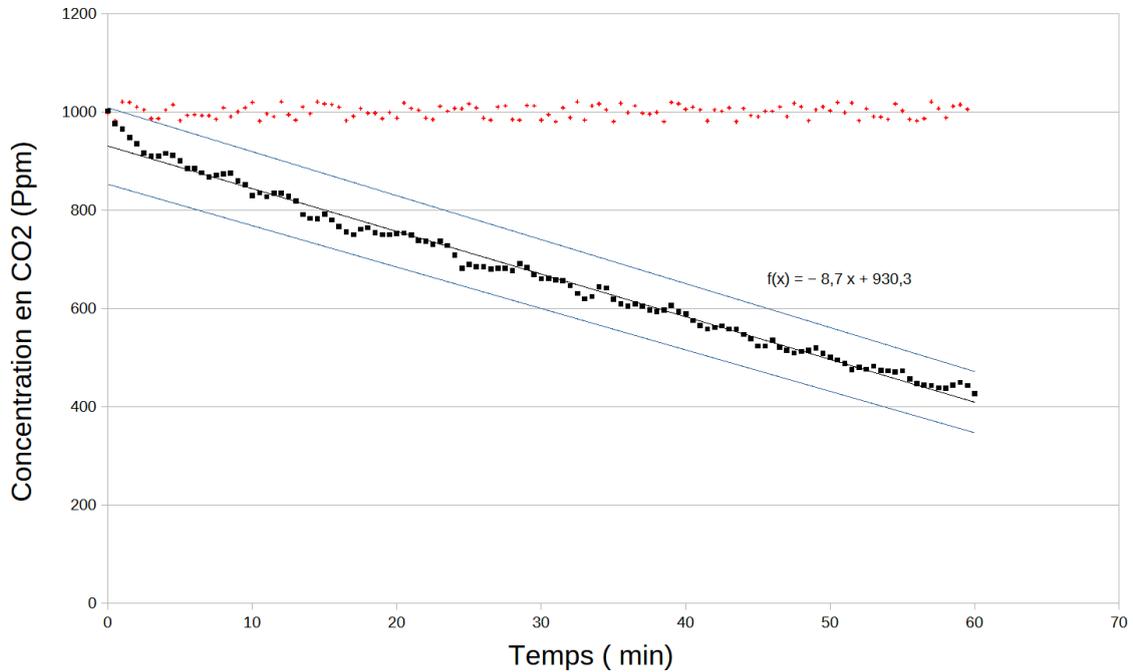
La concentration en CO₂ est suivie pendant une heure. Le coefficient directeur est calculé pour déterminer la vitesse d'absorption du CO₂ par les algues en ppm/h (figure 7). Nous calculons l'incertitude de type B de la mesure grâce aux informations constructeurs du capteur à savoir $u(\text{valeur})=50+\text{valeur} \cdot 3/100$.

B-Résultats et interprétations:

Une régression affine de la baisse de concentration de CO₂ au sein du milieu contenant les algues nous donne le coefficient directeur de la droite correspondant à la vitesse d'absorption du CO₂ par les algues en ppm/h (figure 7).

Figure 7 : Concentration en CO₂ en fonction du temps pour une densité d'algues de $0,54 \cdot 10^{11}$ cellules/L.

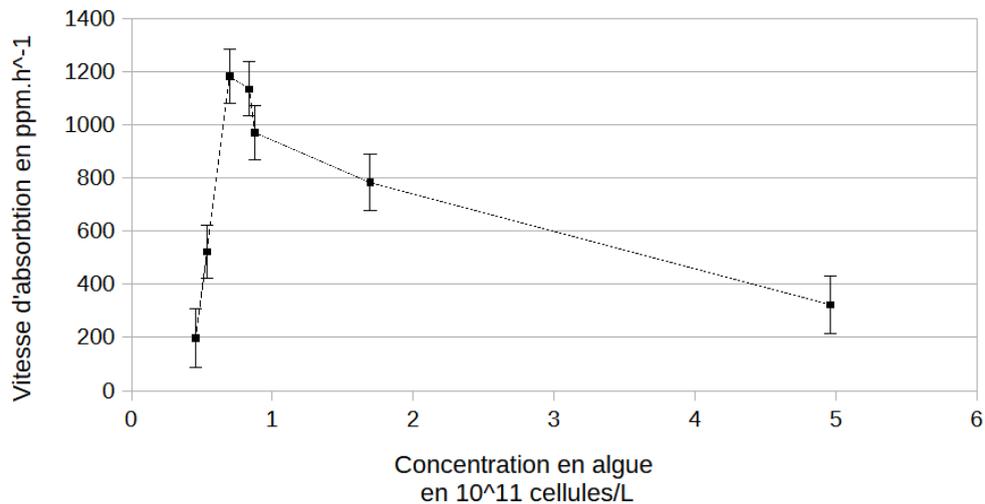
Les courbes bleues représentent l'incertitude sur la mesure de concentration en CO₂



En prenant le coefficient directeur de chaque droite des 7 dilutions réalisées, on obtient la vitesse d'absorption en fonction de la densité en algues (figure 8).

Figure 8 : Vitesse d'absorption en fonction du nombre de cellules.

Les barres représentent les incertitudes sur la vitesse d'absorption du CO₂



La fixation de CO₂ semble être maximale pour des concentrations de l'ordre de $0,8 \cdot 10^{11}$ algues/L. Si nous pouvons vérifier ce résultat dans les conditions de culture de la classe, nous suggérons de maintenir la densité des algues entre $0,6$ et $0,9 \cdot 10^{11}$ algues/L ce qui permettrait une

vitesse de fixation supérieure ou égale à 70% de la vitesse maximale dans ces conditions, ce qui revient à diluer la culture tous les 7 jours d'après la figure 4.

La culture des algues dans une salle de classe nécessite tout de même un minimum d'entretien. Pour évaluer si cette méthode est efficace, nous cherchons à quantifier la quantité de carbone qui peut être fixé dans ces conditions.

IV) Évaluation de la quantité de carbone fixée par les algues.

A-détermination de la masse de carbone fixée par les algues.

a-Protocole :

La culture est bouillie pendant 1 min au micro-ondes puis centrifugée à 3000 g pendant 22 minutes [8], le surnageant est retiré et le culot est séché à l'étuve à 50°C pendant 7 jours (figure 9). Le tube de centrifugation est pesé avant et après séchage avec une balance de précision de 0,001g. Nous avons réitéré ce protocole pour les 3 béchers de la population 1 afin d'obtenir une moyenne de la masse sèche.

Une algue est composée de 50 % de carbone [9], nous pouvons donc tirer la masse de carbone de la masse sèche trouvée précédemment. Nous effectuons une mesure du nombre d'algues avant centrifugation dans la culture et après centrifugation dans le surnageant. Nous obtenons alors le nombre d'algues se trouvant dans le culot après centrifugation, ce qui nous permet de calculer la masse de carbone fixé par une algue. Par la suite, nous calculons la masse de carbone fixé par unité de temps entre nos deux densités limites permettant l'optimisation de la fixation du CO₂ (figure 8)

b-Résultats et interprétations :

Figure 9 : tableau des résultats de la quantité de carbone fixé

Erlenmeyer	1	2
Masse sèche (g)	0,055+/- 0,001	0,051+/- 0,001
Masse de carbone (g)	0,275 +/- 0,001	0,255+/-0,001
Densité d'algue	9,83.10 ¹⁰	9,79.10 ¹⁰
Masse de C par algue	2,7.10 ⁻¹²	2,6.10 ⁻¹²
Masse de C dans 100 mL d'une pop de densité 0,6.10 ¹¹ (t0)	1,62.10 ⁻¹	1,50.10 ⁻¹
Masse de C dans 100 mL d'une pop de densité 0,9.10 ¹¹ (tf)	2,43.10 ⁻¹	2,25.10 ⁻¹
Masse de C fixée entre tf et t0	8,1.10 ⁻²	7,5.10 ⁻²

Nous obtenons alors 0,78.10⁻² g de carbone fixé dans 100 mL de culture en 7 jours. Or nous avons dénombré 380 fenêtres et on estime que l'on peut y mettre à chaque fenêtre 30 erlenmeyers de 200 mL contenant 100 mL d'algues. Après calculs, la quantité de carbone fixée par notre établissement en un an est estimée à 1 tonne. D'après [10], DAC (Direct Air Captur), une autre méthode pour piéger du carbone permettrait de piéger 500 tonnes de carbone, mais cette méthode est coûteuse en énergie.

V) Conclusion.

A-Conclusion :

Nous avons montré qu'une salle de classe est un milieu susceptible de s'enrichir en CO₂. Nous n'avons pas pu tester si les coccolithophoridés pouvaient constituer un puits de carbone dans cet environnement et les difficultés que nous avons rencontrées pour mettre en culture cette algue nous rendent sceptique à ce sujet. Mais nous avons montré que *Dunaliella salina* peut fixer du carbone à hauteur de 1 t C/an pour un site comme un lycée. De plus, les algues peuvent être stockées [9] ce qui permet de piéger le carbone et de ne pas le relâcher dans l'atmosphère. Elles peuvent également être utilisées en bio carburant ce qui permettrait d'utiliser du carbone déjà dégagé pour éviter d'avoir à en extraire d'un composé hydrocarbures stockés dans le sol.

Cela constitue une solution peu efficace pour fixer du carbone atmosphérique puisque en comparaison une technologie comme DAC fixe 500 t C/an [10]. Cependant cela représente tout de même une possibilité pour atteindre les objectifs de la transition écologique

B-Perspective

Nous proposons de reproduire cette étude sur les coccolithophoridés qui présentent deux modalités de fixation du carbone et qui pourraient présenter une efficacité supérieure à *D. salina*.

Afin d'optimiser l'absorption de CO₂, nous suggérons de limiter la densité des algues. Il faut ainsi récupérer l'excès d'algue et éviter leur décomposition qui restituera le CO₂ fixé. Or *Dunaliella salina* est une algue valorisable, utilisable notamment pour la synthèse de biocarburant [11] plus neutre en émission que les hydrocarbures car le carbone relâché par combustion est réutilisé par les algues lors de la photosynthèse ce qui forme ainsi un cycle.

La salle de classe est un milieu enrichie en CO₂, ce qui peut avoir des impacts sur les capacités des élèves [12], c'est pourquoi il serait intéressant de vérifier si nos cultures permettent une diminution significative du CO₂ dans la classe. Ainsi nous pourrions bénéficier du double rôle des algues, c'est-à-dire la fixation du CO₂ atmosphérique et la purification de l'air d'une salle de classe.

Sources :

- [1] Lee, H., Romero, J., eds. *Climate Change 2023: synthesis report*. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).
- [2] Hiault, R. Les algues à l'assaut du réchauffement climatique. (2019).
- [3] Vu, B. L. La biocalcification dans l'océan actuel à travers l'organisme modèle *Emiliania huxleyi*. (Université Paris VI - Pierre et Marie Curie, 2005).
- [4] Le lampadaire mangeur de CO₂. Tela Botanica <https://www.tela-botanica.org/2012/03/article4975/> (2012).
- [5] Huang, B., Qu, G., He, Y., Zhang, J., Fan, J., Tang, T. Study on high-CO₂ tolerant *Dunaliella salina* and its mechanism via transcriptomic analysis. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 10, 1086357 (2022). <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1086357>
- [6] Keller et al. Milieu K/L. (1987).
- [7] Burak, H., Dunbar, A., Gilmour, D. J. Enhancement of *Dunaliella salina* growth by using wavelength shifting dyes. *J. Appl. Phycol.* 31, 2791–2796 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10811-019-01819-4>
- [8] Najjar, Y. S. H., Abu-Shamleh, A. Harvesting of microalgae by centrifugation for biodiesel production: A review. *Algal Res.* 51, 102046 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102046>
- [9] Xi, Y., Wang, J., Xue, S., Chi, Z. β -Carotene Production from *Dunaliella salina* Cultivated with Bicarbonate as Carbon Source. *J. Microbiol. Biotechnol.* 30, 868–877 (2020). <https://doi.org/10.4014/jmb.1910.10035>
- [10] Chowdhury, S., Kumar, Y., Shrivastava, S., Patel, S. K., Sangwai, J. S. A Review on the Recent Scientific and Commercial Progress on the Direct Air Capture Technology to Manage Atmospheric CO₂ Concentrations and Future Perspectives. *Energy Fuels* 37, 10733–10757 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c03971>
- [11] Li, G., Yao, J. A Review of Algae-Based Carbon Capture, Utilization, and Storage (Algae-Based CCUS). *Gases* 4, 468–503 (2024). <https://doi.org/10.3390/gases4040024>
- [12] Haverinen-Shaughnessy, U., Shaughnessy, R. J. Effects of Classroom Ventilation Rate and Temperature on Students' Test Scores. *PloS One* 10, e0136165 (2015). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136165>