

LA CAPTURE DU CARBONE PAR LES COQUILLAGES

Présentation par Matthias Heilweck
(France)

À partir de publications libres d'accès et évaluées par des pairs, élaborées avec des chercheurs du Royaume-Uni, de Finlande, d'Italie et des États-Unis.

Notre problème avec le carbone

- Le cycle global du carbone était en équilibre depuis l'aube de l'humanité.
- Depuis la révolution industrielle et l'avènement de l'agriculture intensive, le niveau de dioxyde de carbone dans l'atmosphère a presque doublé, provoquant un déséquilibre, un dérèglement.
- L'impact des GES est déjà une réalité aujourd'hui. Elévation des températures, migration forcée des espèces, évènements climatiques extrêmes plus fréquents, plus longs et plus intenses.
- Une préoccupation majeure sont les fameux **points de basculement**. Des points de non-retour au système climatique actuel: fonte des glaces continentales, dépérissements des forêts, dégel des hydrates de méthane et du permafrost.
- Ceux-ci pourraient provoquer un emballement du dérèglement climatique. Elévation dramatique du niveau des mers, extension des zones non cultivables, extinction de masse d'espèces.
- **Maintenant**, nous devons réduire nos émissions de gaz à effet de serre à zéro avec des énergies renouvelables **ET** retirer du CO₂ de l'atmosphère avec des puits de carbone.

Qu'est-ce qu'un puits de carbone ?

- Les puits de carbone se réfèrent à des flux de carbone atmosphérique séquestrés à long terme dans des réservoirs, idéalement pendant des milliers à des millions d'année. Par extension, on appelle aussi puits de carbone un réservoir à flux de carbone entrant, mais ça porte à confusion.
- Les réservoirs de carbone à long terme interagissent à peine avec l'atmosphère, **à moins d'être perturbés**. Les gisements d'énergies fossiles jusqu'à extraction et combustion, l'humus des sols jusqu'à pratique de l'agriculture intensive, les sédiments marins anoxiques jusqu'au chalutage de fond, les dépôts fossiles de calcaire jusqu'à utilisation dans les cimenteries.
- Les sources de carbone sont des processus qui émettent du carbone vers l'atmosphère. Je viens d'en citer quelques unes, toutes anthropiques.
- Un réservoir donné peut agir en puits de carbone ou en source de carbone, **c'est selon**. Les forêts par exemple sont des puits aussi longtemps qu'elles grandissent et produisent de l'humus. Les forêts deviennent des sources lorsque la photosynthèse s'arrête (la nuit, trop chaud, trop sec) ou qu'elles dépérissent (maladies, parasites, feux).
- L'efficacité d'un puits de carbone est déterminée par la **persistance** du piégeage du carbone (au moins mille ans) et son **ampleur** (par rapport aux centaines de GtC déjà en trop dans l'atmosphère).

Les principales stratégies de piégeage du carbone

- Les stratégies dominantes sont l'**afforestation** et le **captage et stockage** géologique **du carbone** industriel (CSC).
- L'afforestation (carbone bleu compris) se doit d'être promue pour soutenir des biotopes résilients qui sont la base de toute vie, nous compris.
- Mais en tant que puits de carbone, l'afforestation n'est pas une stratégie viable. Pas assez de terres disponibles et pas assez sûr pour le long terme.
- Le CSC a une pénalité énergétique trop handicapante due aux opérations de captage, filtration, compression, transport et injection. 60% à 180% d'énergie supplémentaire est requise selon les techniques! Rien qu'une moyenne basse de 100% implique de devoir doubler l'extraction d'énergies fossiles ou de recourir à des énergies renouvelables pour ce faire. Autant utiliser ces énergies renouvelables directement et laisser les énergies fossiles dans leurs gisements naturels. Cette technologie ne semble être qu'un artefact des industriels concernés pour continuer d'exister.
- Si ni le boisement, ni le CSC ne sont des stratégies fiables, qu'en est-il des **organismes marins calcifiants**? Pour fabriquer leurs coquilles, il leur faut du calcium (c'est le 5^e plus important élément de la croûte terrestre) et du bicarbonate = hydrogénocarbonate (qui constitue 90 % des 38000 GtC dissous dans les océans). La matière première ne va pas manquer.

Les calcifiants comme ingénieurs écosystémiques

- Depuis l'origine de la vie, les cellules utilisent des ions calcium (Ca^{2+}) pour transmettre des signaux dans leurs processus biologiques internes.
- Les mers sont souvent devenues riches en calcium au cours de l'histoire de la Terre, mettant les mécanismes de contrôle (homéostasie) des ions calcium de la cellule en danger de surcharge.
- L'évolution des organismes calcifiants les a conduits à détoxifier l'excès de calcium en le faisant **réagir avec du CO_2** pour fabriquer des coquilles de CaCO_3 . La protection que pouvait offrir la coquille a été un plus.
- Les vastes gisements fossiles de carbonate de calcium témoignent de la capacité des calcifiants à agir comme ingénieurs écosystémiques, même (surtout ?) pendant des périodes géologiques d'acidification des océans et de grands excès de CO_2 atmosphérique causés par des événements volcaniques massifs.
- Aujourd'hui, le même processus primitif de calcification apparaît efficace pour **séquestrer le carbone atmosphérique en excès**. S'ils l'ont déjà fait, nous pouvons leur faire refaire la même chose !

Les coquilles de coquillages sont faites de CO₂ atmosphérique minéralisé

- La coquille des mollusques est un biominéral composé à 95 % de **carbonate de calcium** cristallin (CaCO₃) avec une petite quantité de protéines de matrice incluses. C'est quasi un minéral.
- Les animaux le fabriquent en faisant réagir les **ions calcium** (Ca²⁺) avec les **ions hydrogénocarbonate** (HCO₃⁻) présents par dissociation du CO₂ dans l'eau.
- Les niveaux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et dans les couches supérieures de la mer sont en équilibre.
- Le carbone métabolique des organismes vivants, qui sert à l'élaboration de protéines, de lipides, de carbohydrates ou d'acides nucléiques, provient de la fixation photosynthétique du CO₂ atmosphérique. Il n'y a pas d'autre source notable.
- Comme les coquillages se nourrissent de phytoplancton, le CO₂ utilisé pour la fabrication des coquilles provient en fin de compte de l'atmosphère.

Les coquilles séquestrent le carbone pendant des temps géologiques

- Le carbonate de calcium (CaCO_3) est cristallin, **non digestible et chimiquement stable**.
- Il ne se dissocie qu'à des températures très élevées ou, en mer, en-dessous de la profondeur de compensation des carbonates (CCD en anglais), phénomène dû entre autres aux fortes pressions.
- Ces températures élevées sont générées lors d'éruptions volcaniques après subduction de la couche sédimentaire de carbonate de calcium (rotation de millions d'années) ou par la combustion dans les fours des cimenteries et les incinérateurs de déchets (immédiat).
- Au-dessous de la CCD, les ions calcium et hydrogénocarbonate dissociés sont transportés par la circulation thermohaline globale (rotation de 1000 ans) et sont susceptibles de recristalliser pour un autre millénaire en atteignant de plus faibles profondeurs.
- Excepté dans le cas d'une combustion du CaCO_3 par l'homme, **le CO_2 est (presque) définitivement éliminé** de l'atmosphère.

Les coquillages ne sont pas inclus dans le marché du carbone !

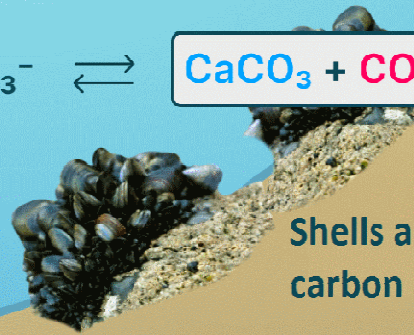
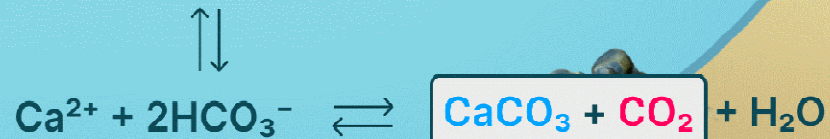
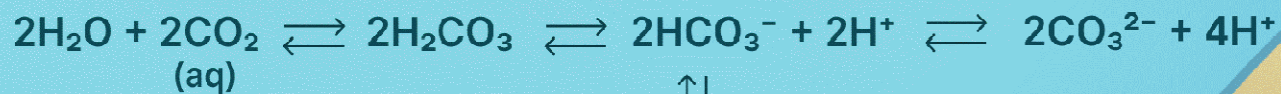
- Il y a une controverse sur l'importance relative des différents flux de carbone au cours de la formation des coquilles.
- Pour l'une des parties, il s'agit d'un puits de carbone en raison de la séquestration évidente du carbone par les coquilles. Il y a 95 % de CaCO_3 dans les coquilles et 12 % de C dans CaCO_3 , soit 11,4 % de carbone dans les coquilles. C'est un fait.
- L'autre camp affirme que le processus de biominéralisation est un producteur net de CO_2 atmosphérique, parce que la réaction de calcification rejette du CO_2 .
- Entre les deux, des analystes stœchiométriques essaient d'y voir plus clair, en évaluant les quantités de CO_2 rejeté par la réaction de calcification, la respiration et tout le métabolisme de l'animal pour les comparer à la quantité de carbone séquestré par la coquille. Comme puits de carbone, leur bilan général est plutôt maigre.

La biominéralisation libère du CO₂ : c'est faux

- **Parce que nous devons considérer le process dans son ensemble, tel qu'il a lieu dans la nature.**
- **La réaction** de biominéralisation libère **une** molécule de gaz carbonique CO₂ pour chaque molécule de carbonate de calcium CaCO₃ produit. C'est exact. L'équation chimique est formelle.
- Mais **deux** ions hydrogénocarbonates HCO₃⁻ provenant de **deux** molécules de gaz carbonique CO₂ sont utilisés pour faire **une** molécule de carbonate de calcium CaCO₃.
- Cela signifie qu'une des deux molécules de gaz carbonique CO₂ utilisées pour faire une molécule de carbonate de calcium CaCO₃ reste simplement dans l'environnement et que l'autre est **réellement séquestrée**.
- Le diagramme qui suit permet de visualiser le phénomène. L'équation du haut est celle qui illustre la dissolution du CO₂ dans l'eau dont chaque élément a été doublé pour que l'élément HCO₃⁻ corresponde en nombre aux besoins de l'équation du bas qui est celle de la formation du carbonate de calcium.

CONCEPTUAL DIAGRAM OF SHELLFISH
CALCIFICATION BEING A CARBON SINK

2CO_2 (gas)



Shells are made of calcium carbonate CaCO_3 whose carbon atom originates from the atmosphere.

Shell calcification uses **2 carbon** atoms from the atmosphere, sequesters **1 carbon** atom in mineral form and returns **1 carbon** atom to the sea. Why isn't this process acknowledged as an effective carbon sink ?

Les valeurs stœchiométriques ne sont pas pertinentes

- **Parce que nous devons considérer le process dans son ensemble, tel qu'il a lieu dans la nature.**
- Le carbone libéré par la respiration de l'animal est presque équivalent au carbone séquestré dans sa coquille. C'est exact. En arrêtant là la réflexion, le puits de carbone est réel, bien que très faible.
- Mais il n'est guère possible d'isoler un organisme d'un réseau dynamique de flux en interaction et espérer en tirer des conclusions pertinentes.
- Chaque organisme libère tout son carbone au cours du cycle de sa **courte vie**.
- Cela ne fait **aucune différence à long terme** que ce carbone soit libéré directement par le phytoplancton ou par un animal qui l'a ingéré.
- Cela ne fait **aucune différence à long terme** que les nutriments et la luminosité disponibles soient utilisés par un phytoplancton non ingéré ou par un phytoplancton né grâce à l'espace vital offert par un phytoplancton ingéré. La dynamique de croissance du phytoplancton n'est pas prise en considération dans ces études stœchiométriques.
- La différence à long terme est obtenue par la minéralisation du CO_2 en **CaCO_3** insoluble et cristallin **qui a quitté la biosphère de façon permanente**.

La biominéralisation acidifie-t-elle l'eau de mer ?

- La **calcification en eau libre** libère un proton (H^+) qui acidifie l'eau de mer, laquelle devient ainsi moins apte à absorber du CO_2 . C'est exact. Elle devient ainsi une source induite de CO_2 .
- Mais les **systèmes biologiques** exécutent leurs processus **en interne** dans des membranes phospholipidiques, spécialement conçues pour protéger les processus vitaux de l'eau environnante externe.
- La **calcification biologique** a lieu à la surface de polypeptides enzymatiques, à l'intérieur d'organites dotés d'une membrane phospholipidique contenus dans une cellule enfermée dans une autre membrane phospholipidique bicouche. En d'autres termes, la biominéralisation s'effectue à l'intérieur des cellules du manteau de l'animal **sans acidifier l'eau libre environnante**.
- Les protons générés lors de la **biominéralisation** sont strictement contrôlés par les cellules du manteau et utilisés pour le métabolisme cellulaire, entre autres pour la synthèse de l'ATP. **C'est ça la vie !**

L'acidification des mers affecte-t-elle les organismes calcifiants ?

- Depuis l'ère industrielle, le pH de l'océan a baissé de 8,2 à 8,1. Cela paraît peu mais c'est important pour une valeur cologarithmique.
- Les expériences de laboratoire qui montrent que l'acidification des océans perturbe la minéralisation des calcifiants ont utilisé les niveaux de **pH prévus pour le siècle prochain**, voire pire.
- À ce jour, les dépôts naturels de coccolithes (plaques externes des coccolithophores, phytoplancton pratiquant la photosynthèse ET la biominéralisation) ont augmenté et les coquillages produisent **davantage de carbonate de calcium** (certes moins cristallin et plus amorphe).
- Cependant, il semble que l'acidification, combinée à des températures plus élevées, contribue au rejet des algues symbiotiques (zooxanthelles) par les coraux et les palourdes géantes.
- La réponse est donc nuancée, mais nous avons **encore le temps**, avant le siècle prochain, de nous servir de la plupart des calcifiants pour séquestrer le carbone atmosphérique en excès.

Le moment est-il venu de reconnaître les coquillages comme puits de carbone ?

- Après le protocole de Kyoto, en l'absence de consensus scientifique et compte tenu de l'autosuffisance économique de la conchyliculture, il a été décidé **empiriquement** de ne pas reconnaître les coquillages comme puits de carbone.
- Mais l'effet le plus néfaste du changement climatique est la détérioration de la base écologique de la production alimentaire et les calcifiants peuvent fournir **des puits de carbone ET de la nourriture** tout en contribuant à la biodiversité par leurs nombreux services écosystémiques.
- La conchyliculture est à la confluence des aspirations du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), du Programme Alimentaire Mondial (PAM) et de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES en anglais).
- Le paradigme actuel de la science établie doit évoluer ! Politiquement, et ceci même sans aboutir à un consensus scientifique, le bénéfice du doute doit cette fois-ci profiter aux coquillages.

Cela pourrait changer la face du monde !

- Le Captage de Dioxyde de Carbone par les coquillages est **massivement extensible**. Le potentiel de la biominéralisation dépasse de loin celui de toute autre solution de captage de carbone envisagée à ce jour.
- Avec des crédits carbone, des **milliers d'entrepreneurs** dans le monde (des familles, des communautés, des associations et d'autres organismes privés ou publics) pourraient commencer à produire demain de la nourriture et du carbonate de calcium tout en préservant leur environnement.
- Les coquillages ne nécessitent pas de terre, d'eau douce, d'engrais ou d'aliments pour croître. Tous des éléments qui vont se raréfier. Ce système de production de protéines animales est **le plus efficace**.
- Les coquillages offrent de nombreux **services écosystémiques** pour l'habitat marin et sa biodiversité.
- Avec des crédits carbone, la conchyliculture pourrait aussi **dépolluer les eaux** de ports, baies et autres côtes menacées.
- Pénétrer le marché des crédits de carbone est **la clé** de cette extensibilité.
- Et pourquoi ne pas voir plus loin et ouvrir notre horizon vers la **Haute Mer** ?

Les limites aux crédits carbone de coquillages, petit bémol pour les conchyliculteurs.

- Seules des **coquilles collectées** vérifiables par une autorité de certification pourraient donner droit à des crédits carbone.
- Les coquilles incinérées avec les déchets ménagers ne sont évidemment pas éligibles, pas plus que celles utilisées par l'agriculture comme compléments de sol ou d'aliments pour animaux.
- Des crédits carbone pour les coquilles utilisées pour la construction des routes (potentiellement un réservoir de longue durée) ou pour l'industrie du ciment (à la place du calcaire fossilifère) pourraient être débattus.
- La meilleure utilisation des coquilles serait de construire/restaurer des récifs sous-marins, améliorant ainsi la biodiversité et le réservoir de carbone de la biosphère tout en protégeant/régénérant les zones côtières. Voir <https://rocsinternational.com>

La conchyliculture en haute mer pour moins de CO₂ et des aliments plus sains pour la pisciculture

- Les **poissons fourrage** sont essentiels pour les biotopes marins, la sécurité alimentaire dans les pays en développement ET pour l'industrie piscicole en plein essor.
- En conséquence, tous trois en manquent et les aliments modernes pour poissons d'élevage sont principalement composés d'**ingrédients terrestres** avec tout le know-how de l'industrie agroalimentaire "moderne".
- L'aliment aquatique ultra-transformé qui en résulte est plus susceptible de provoquer des dysfonctionnements hormonaux chez le consommateur final que de répondre aux avantages historiques des **protéines marines**. Oui, cette remarque est quelque peu violente. C'est un concentré de mon site web.
- L'idée est de prendre le relais du poisson fourrage avec de la **chair de moule**, produite dans d'immenses fermes de haute mer situées au-dessus de monts sous-marins en dehors de ZEE et utilisant des fontaines salines perpétuelles pour fournir les nutriments primaires nécessaires à la croissance du phytoplancton.
- Outre la quantité de coquillages ainsi produite, le puits de carbone induit pourrait encore être massivement étendu de façon originale. Mais il n'y a plus de place ici pour développer.
Voir <https://commonseagood.com>

Open access and peer-reviewed publications

- **Saving the Planet with Appropriate Biotechnology:
1. Diagnosing the Problems**
Moore D., Heilweck M. & Petros, P. (2021).
Mexican Journal of Biotechnology, 6 (1): 1-30.
DOI: <https://doi.org/10.29267/mxjb.2021.6.1.1>.
- **Saving the Planet with Appropriate Biotechnology:
2. Cultivate Shellfish to Remediate the Atmosphere**
Moore D., Heilweck M. & Petros, P. (2021).
Mexican Journal of Biotechnology, 6 (1): 31-91.
DOI: <https://doi.org/10.29267/mxjb.2021.6.1.31>.

Open access and peer-reviewed publications

- **Saving the Planet with Appropriate Biotechnology:
3. The High Seas Solution**
Heilweck M. & Moore D. (2021).
Mexican Journal of Biotechnology, 6 (1): 92-128.
DOI: <https://doi.org/10.29267/mxjb.2021.6.1.92>.
- **Saving the Planet with Appropriate Biotechnology:
4. Coccolithophore cultivation and deployment**
Moore D. (2021).
Mexican Journal of Biotechnology, 6 (1): 129-155.
DOI: <https://doi.org/10.29267/mxjb.2021.6.1.129>.

Open access and peer-reviewed publications

- **Saving the planet with appropriate biotechnology:
5. An action plan.**
Petros, P., Heilweck, M. & Moore, D. (2021).
Mexican Journal of Biotechnology, 6 (2): 1-60.
DOI: <https://doi.org/10.29267/mxjb.2021.6.2.1>.
- **Planetary bioengineering on Earth to return and maintain the atmospheric carbon dioxide to pre-industrial levels: Assessing potential mechanisms.**
Moore, D., Heilweck, M. & Petros, P. (2022).
Frontiers of Astronomy and Space Sciences, 9: article number 797146.
DOI: <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.797146>.

Open access and peer-reviewed publications

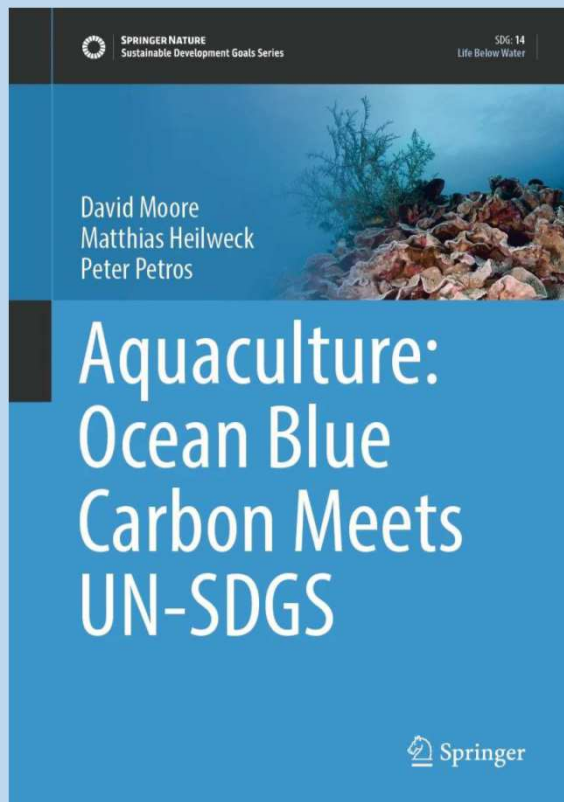
- **Potential of ocean calcifiers to sequester atmospheric carbon in quantity and even reverse climate change.**

Moore, D., Heilweck, M., Fears, W.B., Petros, P., Squires, S.J., Tamburini, E. & Waldron Jr., R.P. (2023).

Journal of Fisheries Research, 7(1): article 132. Publisher's URL:

<https://www.alliedacademies.org/articles/potential-of-ocean-calcifiers-to-sequester-atmospheric-carbon-in-quantity-and-even-reverse-climate-change-23764.html>

Book



Aquaculture: Ocean Blue Carbon Meets UN-SDGS

Springer Nature 2022, ISBN: 978-3-030-94845-0.

Sustainable Development Goals Series.

SDG – 14, Life below water.

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-94846-7>

Web sites

- **Commonseagood**

Edited by Matthias Heilweck.

About investing the High Seas and producing significant amounts of mussel meat for healthy aquafeed and mussel shells for carbon sinks.

<https://commonseagood.com/>

- **Rocsinternational**

Edited by William Fears.

About restoring oyster reefs to provide marine habitat, ecosystem service and carbon sinks.

<https://rocsinternational.com/>

Online press articles

- **Shellfish motivation: the climate crisis could be solved with seas, not trees.**

Dr David Moore

The Fish Site, on 13 February 2020

<https://thefishsite.com/articles/shellfish-motivation-the-climate-crisis-could-be-solved-with-seas-not-trees>

- **Can bivalve aquaculture prevent the “widespread institutional failure” of our attempts to tackle climate change?**

Dr David Moore, Matthias Heilweck and Peter Petros

The Fish Site, on 13 February 2021

<https://thefishsite.com/articles/can-bivalve-aquaculture-prevent-the-widespread-institutional-failure-of-our-attempts-to-tackle-climate-change>