

COMMENT LES ACTIVITÉS HUMAINES PERTURBENT LE CYCLE DU SILICIUM

Zhouling Zhang^{1*} et María López-Acosta^{2*}

¹ GEOMAR Centre Helmholtz pour la recherche océanique de Kiel, Kiel, Allemagne

² Département d'Océanographie, Institut de Recherches marines (IIM), CSIC, Vigo, Espagne

Le silicium en solution est un nutriment indispensable à la croissance de divers organismes océaniques qui en ont besoin pour construire leur squelette de silice. La majeure partie du silicium dissous qui permet à ces organismes de survivre vient de la dégradation des roches terrestres contenant du silicium. Au cours des dernières décennies, les activités humaines ont fortement perturbé le transport du silicium vers l'océan. Par exemple, les barrages construits pour produire de l'électricité peuvent interrompre le transport du silicium dissous et « affamer » les zones situées en aval. Les engrains et autres pollutions humaines ajoutent de grandes quantités de nutriments autres que le silicium dans les rivières, les lacs et les réservoirs, ce qui peut stimuler la croissance d'organismes qui l'utilisent avant qu'il n'atteigne l'océan. Enfin, les conséquences du changement climatique peuvent également avoir un impact sur le cycle du silicium. Dans cet article, nous expliquons comment les activités humaines ont perturbé le cycle du silicium et comment le changement climatique pourrait l'affecter à l'avenir.

POURQUOI SE SOUCIER DU SILICIUM ?

DIATOMÉE. Algue microscopique unicellulaire entourée d'une coque siliceuse.

Les **diatomées** sont de minuscules algues unicellulaires qui jouent un rôle important dans la régulation du climat de la Terre (**Figure 1**). Elles absorbent le dioxyde de carbone (CO_2) et l'utilisent pour produire des

PHOTOSYNTHÈSE.

Processus cellulaire permettant de transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique.

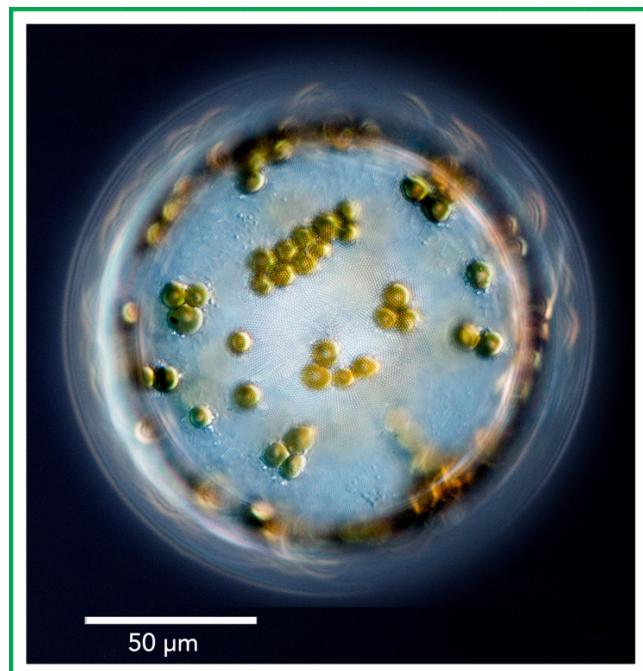
SILICIUM.

Élément chimique (Si)

SILICE. Oxyde de silicium (SiO_2), souvent présent dans les sables (sous forme de quartz).

SILICIEURS. Organismes qui utilisent le silicium dissous dans leur environnement pour construire leur squelette en verre. Les diatomées, les rhizariens (comprenant entre autres les radiolaires) et les éponges en sont des exemples.

sucres afin de se nourrir, grâce à l'énergie du soleil via le processus de **photosynthèse**. Lorsque les diatomées meurent, elles coulent au fond de l'océan, éliminant ainsi le CO_2 capté dans l'atmosphère et le stockant dans l'océan. Le CO_2 étant un important gaz à effet de serre, les variations du nombre de diatomées peuvent avoir un impact significatif sur le climat de la Terre. Le nutriment dont les diatomées ont le plus besoin est le **silicium**, avec lequel elles construisent leur squelette de **silice**. C'est aussi le cas d'autres organismes comme les rhizariens et les éponges. L'ensemble des organismes qui utilisent le silicium pour construire leur squelette sont appelés **silicifieurs** (pour en savoir plus voir [ici](#)). La croissance des silicifieurs dépend de la disponibilité en silicium en solution dans l'eau environnante. Le silicium est donc crucial pour les silicifieurs et la santé des écosystèmes aquatiques [1].



* Figure ajoutée à la version française de l'article

ÉROSION. Processus par lequel les roches, le sol et d'autres matériaux sont brisés et usés par les effets du vent, de l'eau et d'autres forces naturelles au fil du temps.

Figure 1*. Image de la Diatomée *Coscinodiscus*. Crédit photo : C & N [Sardet](#).

Le silicium présent dans l'eau de mer provient de l'altération et de l'**érosion** des roches de la croûte terrestre. Le silicium est ensuite transporté vers l'océan par diverses voies d'eau. Avant d'arriver à l'océan, le silicium traverse les rivières, les lacs et les réservoirs, où il est consommé par des silicifieurs ou incorporé dans les minéraux argileux. Tous les processus qui déplacent le silicium et le modifient, créent un cycle que nous appelons le cycle du silicium. La quantité de silicium arrivant dans l'océan est souvent excédentaire par rapport à d'autres nutriments essentiels à la croissance des silicifieurs, tels que l'azote et le phosphore. Dans le passé, la disponibilité du silicium dissous n'a jamais été un problème, en particulier près des côtes. Cependant, au cours des dernières décennies, les activités humaines ont changé cette situation, en perturbant le transport du silicium de la terre vers l'océan et donc sa disponibilité dans les mers côtières (Figure 1).

BARRAGES ET EUTROPHISATION

BARRAGE. Construction d'une barrière, généralement un mur de béton, en travers d'une rivière pour contrôler le débit de l'eau, souvent pour lutter contre les inondations, produire de l'énergie hydroélectrique ou stocker de l'eau.

Les technologies hydroélectriques, telles que les **barrages**, peuvent interrompre le transport du silicium vers l'océan (**Figure 2**). Les barrages sont des structures construites pour retenir l'eau qui coule dans les rivières et éléver son niveau pour former des réservoirs. Les barrages sont utilisés à diverses fins, comme la production d'électricité et le contrôle du débit des rivières. L'Europe et les États-Unis ont commencé à développer l'hydroélectricité à la fin du XIX^e siècle, tandis que d'autres pays, tels que la Chine, le Brésil et l'Inde, ont développé l'hydroélectricité au XXI^e siècle. Les barrages modifient la façon dont l'eau et les sédiments s'écoulent dans les rivières. Lorsque l'eau traverse un barrage, elle ralentit et les particules de sédiments se déposent, s'accumulant au fond du réservoir. Avec le temps, ces sédiments s'accumulent en amont du barrage, formant une épaisse couche de matériaux pouvant contenir beaucoup de silicium. Les barrages ont également un impact sur le transport du silicium en modifiant le débit et la vitesse de l'eau. En ralentissant l'eau, les barrages augmentent le temps de séjour de l'eau dans les réservoirs, ce qui stimule la croissance des diatomées. Une grande quantité de silicium peut donc être piégée dans les réservoirs et ne jamais atteindre l'océan. Au niveau mondial, les barrages retiennent 5,3 % du silicium dissous dans les rivières par l'érosion des roches [2].

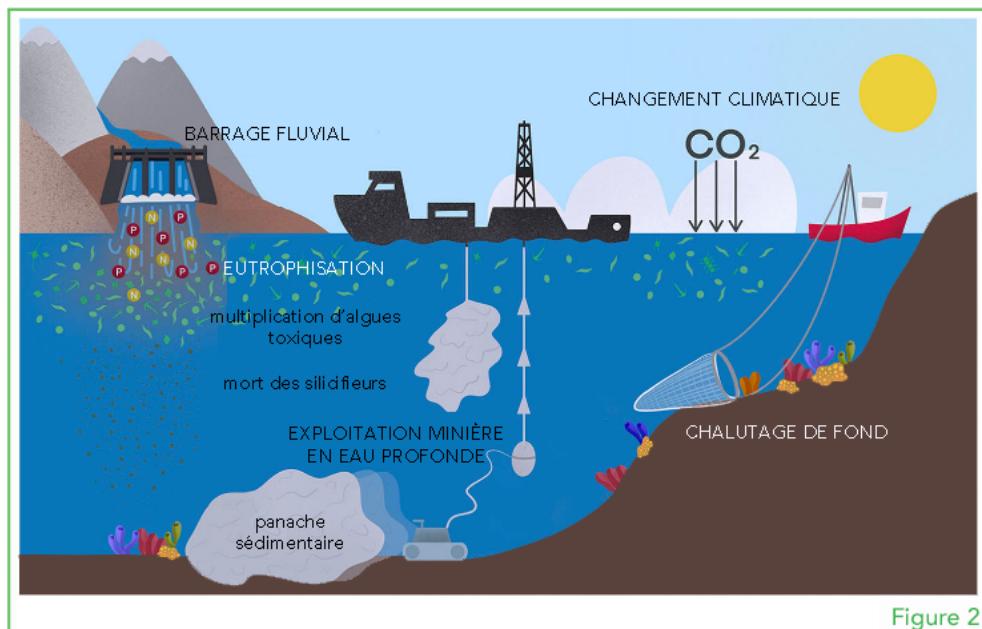


Figure 2

Figure 2. Les activités humaines peuvent perturber les silicifieurs et le cycle du silicium dans l'océan. Certaines activités, (chalutage de fond et exploitation minière en eaux profondes) peuvent avoir un impact négatif sur les silicifieurs et sur le transfert du silicium des sédiments vers les eaux profondes de l'océan. Par exemple, la formation d'un panache sédimentaire (nuage de terre ou de boue) lorsque les sédiments sont remués et mis en suspension dans l'eau, a un impact négatif sur les organismes vivant sur les fonds marins. D'autres activités humaines peuvent entraîner une diminution du taux de silicium dissous dans l'eau de mer (acidification des océans, barrages fluviaux et eutrophisation).

EUTROPHISATION.

Phénomène lié à l'enrichissement excessif de l'eau en nutriments, principalement l'azote et le phosphore, provoquant une croissance excessive d'algues et autres plantes aquatiques et altérant la qualité de l'eau et de l'écosystème.

L'**eutrophisation**, qui se produit lorsqu'une masse d'eau reçoit une quantité excessive de nutriments tels que l'azote et le phosphore, modifie également le transport du silicium vers l'océan. L'agriculture, les usines et les habitants des villes rejettent beaucoup d'azote et de phosphore dans les rivières, les lacs et les réservoirs. L'augmentation des nutriments dans ces eaux peut entraîner la prolifération d'algues qui, en utilisant une grande partie du silicium disponible, l'empêche d'atteindre l'océan. La combinaison de l'eutrophisation dans les retenues d'eau et dans les barrages diminue de près de 30 % le mouvement global de silicium dissous vers l'océan [3].

L'eutrophisation a également lieu dans les océans près des côtes, ce qui augmente le nombre de diatomées dans les régions côtières. Lorsque ces diatomées meurent, leurs squelettes coulent au fond de ces régions côtières, ce qui réduit encore la quantité de silicium dissous pouvant atteindre d'autres zones de l'océan. La réduction globale du silicium dissous peut avoir des effets néfastes sur l'ensemble de la chaîne alimentaire océanique, car les diatomées en sont un maillon essentiel. Lorsqu'il n'y a pas assez de silicium dissous pour que les diatomées se développent, cela déclenche souvent la prolifération d'autres organismes qui n'ont pas besoin de silicium, dont certains peuvent produire des substances toxiques. C'est ce qu'on appelle l'**efflorescence d'algues nuisibles**, qui peut avoir des répercussions importantes sur l'écosystème et la santé humaine [3].

La mer Baltique est un bon exemple de l'impact des barrages et de l'eutrophisation sur l'équilibre du silicium. L'arrivée de silicium dans la mer Baltique est fortement réduite par l'eutrophisation à l'intérieur des terres et la construction de barrages. Le recyclage du silicium dans la mer Baltique est également altéré par l'eutrophisation [4]. En effet, l'augmentation des quantités d'azote et de phosphore, et la diminution des quantités de silicium arrivant dans la mer Baltique, ont entraîné une eutrophisation généralisée, qui réduit encore plus le silicium dissous disponible. Une surveillance régulière des eaux de surface de la mer Baltique a révélé une diminution du silicium dissous entre 1970 et la fin du 20^e siècle (Figure 3). La baisse de disponibilité du silicium et la prolifération d'algues nuisibles qui a en résulté avaient rendu l'eau impropre à la baignade ou à d'autres activités récréatives.

IMPACTS SUR LES FONDS MARINS ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

D'autres activités humaines sur les fonds marins peuvent également avoir un impact sur le cycle du silicium et sur les êtres qui y vivent. Le **chalutage de fond**, qui consiste à traîner de lourds filets sur le plancher océanique pour attraper des poissons, et l'**exploitation minière en eaux profondes**, qui consiste à extraire des minéraux précieux du fond des mers, sont néfastes pour le plancher océanique et les créatures qui

EFFLORESCENCE ALGALE NUISIBLE.

Prolifération rapide et excessive de certaines espèces d'algues dans les milieux aquatiques, entraînant souvent la production de toxines qui peuvent avoir des effets néfastes sur les écosystèmes, la vie marine et la santé humaine.

CHALUTAGE DE FOND.

Méthode de pêche dans laquelle un grand filet, souvent lesté, est traîné sur le fond de l'océan pour capturer des poissons et d'autres organismes marins vivant près du fond de la mer.

EXPLOITATION MINIÈRE EN EAUX PROFONDES.

Activité industrielle visant à extraire des minéraux et des ressources précieuses des fonds marins à de grandes profondeurs.

y vivent. Ces créatures comprennent des organismes silicifieurs tels que les éponges, ainsi que de minuscules annélides (organismes ressemblant à des vers de terre) qui vivent dans les sédiments et aident à remettre le silicium dissous piégé dans les sédiments dans l'eau. Sans ces organismes, le mouvement du silicium dissous dans les eaux profondes de l'océan diminuera et le cycle du silicium sur les fonds marins sera moins actif [5].

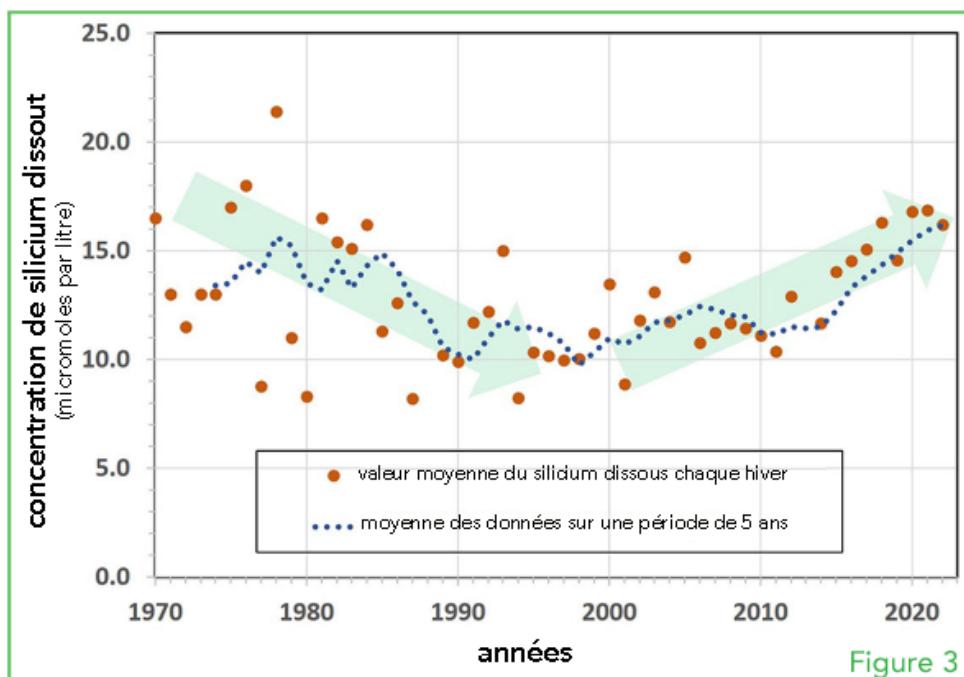


Figure 3

Figure 3. Variations de la quantité de silicium dissous dans les eaux de surface de la partie centrale de la mer Baltique observées depuis 1970. Les flèches vertes indiquent les tendances à la baisse ou à la hausse du silicium dissous. À partir de 1970, la mer Baltique a connu une réduction de la quantité de silicium dissous suite à la construction de barrages et à l'eutrophisation des rivières qui se jettent dans cette mer. Plus récemment, les niveaux de silicium dissous augmentent parce que les pays voisins s'efforcent de réduire l'effet de la rétention d'eau dans les barrages et la pollution des eaux qui pénètrent dans la mer Baltique. Les données utilisées pour créer ce graphique proviennent de <https://sharkweb.smhi.se/hamta-data/>.

Pour ajouter de l'huile sur le feu, le changement climatique affecte également le cycle du silicium dans l'océan. Par exemple, l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère, principalement due à l'utilisation de combustibles fossiles, fait que l'océan dissout de plus en plus de CO₂. Ce CO₂ modifie les propriétés de l'eau des océans, la rendant plus acide. Ce processus, connu sous le nom d'**acidification des océans**, peut modifier le cycle du silicium et avoir un impact sur la croissance des silicifieurs. Les scientifiques ont récemment découvert que l'acidification des océans pourrait entraîner un déclin des diatomées à l'avenir [6]. Lorsque les diatomées meurent, leurs squelettes s'enfoncent dans les profondeurs de l'océan, où ils se dissolvent et libèrent du silicium dans l'eau. Ce silicium régénéré retourne dans les eaux de surface éclairées par le soleil sous l'effet des courants océaniques et des processus de mélange.

ACIDIFICATION DES OCÉANS. Conséquence du changement climatique, qui se produit lorsque l'océan absorbe du dioxyde de carbone, entraînant une augmentation de l'acidité et nuisant aux organismes et écosystèmes marins.

D'autres diatomées utilisent alors le silicium régénéré pour construire leur squelette. Toutefois, à cause de l'acidification des océans, les squelettes des diatomées se dissolvent plus lentement, ce qui réduit en fin de compte la quantité de silicium retournant dans les eaux de surface éclairées par le soleil. Les scientifiques prévoient donc que l'acidification des océans finira par réduire le nombre de diatomées dans les océans. Dans le futur, le monde connaîtra des changements de température, de pluie, de plantes et de courants océaniques dus au changement climatique. Malheureusement, nous ne savons pas encore exactement comment ces changements affecteront la quantité de silicium et le fonctionnement des écosystèmes marins.

AGIR PEUT RÉTABLIR L'ÉQUILIBRE

Les activités humaines affectent le cycle de nutriments essentiels tels que le silicium. Les effets se produisent souvent loin de l'endroit où l'activité humaine a lieu, comme c'est le cas dans les écosystèmes côtiers, par exemple, après la construction d'un barrage en amont. Il est difficile de prédire l'état futur du cycle du silicium. Toutefois, les scientifiques estiment que les modifications continues du cycle du silicium dues aux activités humaines et au changement climatique nuiront certainement aux écosystèmes aquatiques. Il est donc important que les scientifiques et les gouvernements étudient et surveillent le cycle du silicium, pour comprendre les effets des activités humaines et du changement climatique, et pour pouvoir prendre des mesures permettant de réduire ces impacts. Autour de la mer Baltique, les pays limitrophes travaillent ensemble pour réduire la pollution arrivant dans cette mer. Ces efforts ont montré leur efficacité et nous constatons que l'écosystème de la mer Baltique commence à s'améliorer : la quantité de silicium dans les eaux de surface en hiver est nettement plus élevée que celle observée au début du 21^e siècle ([Figure 3](#)). Cela montre que nous pouvons vraiment apporter des changements positifs si nous agissons !

Les jeunes peuvent contribuer de manière significative à la résolution des problèmes environnementaux. Ils peuvent soutenir la gestion durable (respectueuse de l'environnement) de l'eau en plaident pour une construction responsable des barrages et en promouvant des solutions alternatives, comme l'hydroélectricité à faible impact. Ils peuvent également adopter des habitudes respectueuses de l'environnement, telles que la conservation de l'eau, l'utilisation de produits durables et l'économie d'énergie. Soutenir l'agriculture biologique et contribuer à réduire l'utilisation d'engrais chimiques peut également s'avérer utile. En sensibilisant la population, en adhérant à des clubs environnementaux et en participant à des activités communautaires de nettoyage, les jeunes peuvent protéger l'environnement et contribuer à rétablir l'équilibre du cycle du silicium.

REMERCIEMENTS

Cet article fait partie d'une série de six manuscrits sur le cycle du silicium marin réalisés par le groupe ECR SILICAMICS. Nous remercions le consortium SILICAMICS ECRs pour l'enthousiasme dont il a fait preuve dans la réalisation de ce projet. Nous remercions également Natalia Llopis Monferrer pour son travail sur la figure 1. ZZ a reçu un financement du Bundesministerium für Bildung und Forschung (projet SO289 - S Pacific GEOTRACES) et ML-A a reçu un financement de la Xunta de Galicia pour sa bourse postdoctorale (IN606B-2019/002, ARISE) et sa subvention (IN606C-2023/001, SPICA).

RÉFÉRENCES

- [1] Garnier, J., Beusen, A., Thieu, V., Billen, G., and Bouwman, L. 2010. N:P:Si nutrient export ratios and ecological consequences in coastal seas evaluated by the ICEP approach. *Global Biogeochem. Cycles* 24:1–12. doi: 10.1029/2009GB003583
- [2] Maavara, T., Dürr, H. H., and Van Cappellen, P. 2014. Worldwide retention of nutrient silicon by river damming: From sparse data set to global estimate. *Global Biogeochem. Cycles* 28:842–855. doi: 10.1002/2014GB004875
- [3] De La Rocha, C., and Conley, D. J. 2017. *Silica Stories*. Cham: Springer International Publishing..
- [4] Zhang, Z., Sun, X., Dai, M., Cao, Z., Fontorbe, G., and Conley, D. J. 2020. Impact of human disturbance on the biogeochemical silicon cycle in a coastal sea revealed by silicon isotopes. *Limnol. Oceanogr.* 65:515–528. doi: 10.1002/lno.11320
- [5] Olsgard, F., Schaanning, M. T., Widdicombe, S., Kendall, M. A., and Austen, M. C. 2008. Effects of bottom trawling on ecosystem functioning. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 366:123–133. doi: 10.1016/j.jembe.2008.07.036
- [6] Taucher, J., Bach, L. T., Prowe, A. E. F., Boxhammer, T., Kvale, K., and Riebesell, U. Enhanced silica export in a future ocean triggers global diatom decline. *Nature* (2022) 605:696–700. doi: 10.1038/s41586-022-04687-0

VERSION FRANÇAISE

Cet article d'accès libre est une traduction avec modifications d'un article publié par Frontiers for Young Minds (doi : 10.3389/frym.2023.1176391 ; Zhang Z and López-Acosta M (2023) How Human Activities Are Disrupting the Silicon Cycle. *Front. Young Minds.* 11:1176391).

TRADUCTION : Nicole Pasteur, Association Jeunes Francophones et la Science

ÉDITION : Catherine Braun-Breton, Association Jeunes Francophones et la Science.

MENTOR SCIENTIFIQUE : Daniel Breton, Association Jeunes Francophones et la Science.

JEUNES ÉDITEURS :

AYOUB, JAD, 12 ANS

Ayoub et Jad sont collégiens à l'école internationale Eridan à Montpellier, dans le sud de la France. Avec cet article, ils ont découvert l'existence des diatomées et leur rôle dans l'océan. Ayoub est passionné par les avions.

ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)

SOUmis le 28 février 2023 ; **ACCEPTÉ** le 23 novembre 2023.

PUBLIÉ en ligne le 12 décembre 2023.

ÉDITION : Emily King

MENTORS SCIENTIFIQUES : Karen Holmberg , Ramesh T Subramaniam

CITATION : Zhang Z and López-Acosta M (2023) How Human Activities Are Disrupting the Silicon Cycle. *Front. Young Minds.* 11:1176391. doi: 10.3389/frym.2023.1176391

DÉCLARATION DE CONFLIT D'INTÉRÊT

Les auteurs déclarent que les travaux de recherche ont été menés en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêt potentiel.

DROITS D'AUTEURS

Copyright © 2023 Zhang and López-Acosta

Cet article en libre accès est distribué conformément aux conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY). Son utilisation, distribution ou reproduction sont autorisées, à condition que les auteurs d'origine et les détenteurs du droit d'auteur soient crédités et que la publication originale dans cette revue soit citée conformément aux pratiques académiques courantes. Toute utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces conditions est interdite.

JEUNES EXAMINATEURS

MOMO, 11 ANS

Momo adore parcourir le monde et découvrir de nouveaux endroits. Malgré cela, elle s'autoproclame « patate de canapé » lorsqu'elle est à la maison. Les deux extrêmes peuvent coexister dans une même personne ! Son compagnon de canapé préféré est sa chienne Lita, qui est douce et affectueuse.

YUHENDRA, 13 ANS

Bonjour, c'est super d'être jeune examinateur. J'ai 13 ans et j'aime les sciences et les mathématiques. Ce sont mes matières préférées à l'école. Pour mon temps libre, je fais des Lego, je lis des livres et je passe du temps avec ma famille. J'aime aussi jouer aux jeux vidéo.

AUTEURES

ZHOULING ZHANG

En tant que chimiste marin, mes recherches portent sur les cycles (bio)géochimiques et la circulation océanique. Je suis curieux de connaître les origines des éléments essentiels des océans, tels que les rivières, les sédiments, les cheminées hydrothermales chaudes, etc. Mon objectif est de comprendre comment les processus (bio)géochimiques changent ces éléments dans l'océan. J'ai exploré de nombreuses parties de l'océan, des estuaires à la haute mer, comme l'estuaire de l'Amazone, le plateau continental du Congo, la mer Baltique, la mer de Chine méridionale et l'océan Pacifique méridional. [*zzhang@geomar.de](mailto:zzhang@geomar.de)

MARIA LOPEZ-ACOSTA

Je suis une écologue marine qui s'intéresse au rôle des organismes vivant au fond des océans dans le cycle des nutriments, avec un intérêt particulier pour le silicium. Mes organismes modèles sont les éponges, que j'étudie depuis plus de dix ans et que je trouve toujours aussi fascinantes qu'au premier jour. J'ai étudié les éponges dans les eaux peu profondes de l'océan Atlantique Nord et de la mer Méditerranée en plongée, et dans les eaux profondes de la mer de Norvège, de la mer de Barents et de l'océan Atlantique Nord à l'aide de robots sous-marins. J'étudie actuellement les effets de l'impact humain sur le recyclage du silicium dans les éponges et autres organismes benthiques silicifieurs. [*lopezacosta@iim.csic.es](mailto:lopezacosta@iim.csic.es)