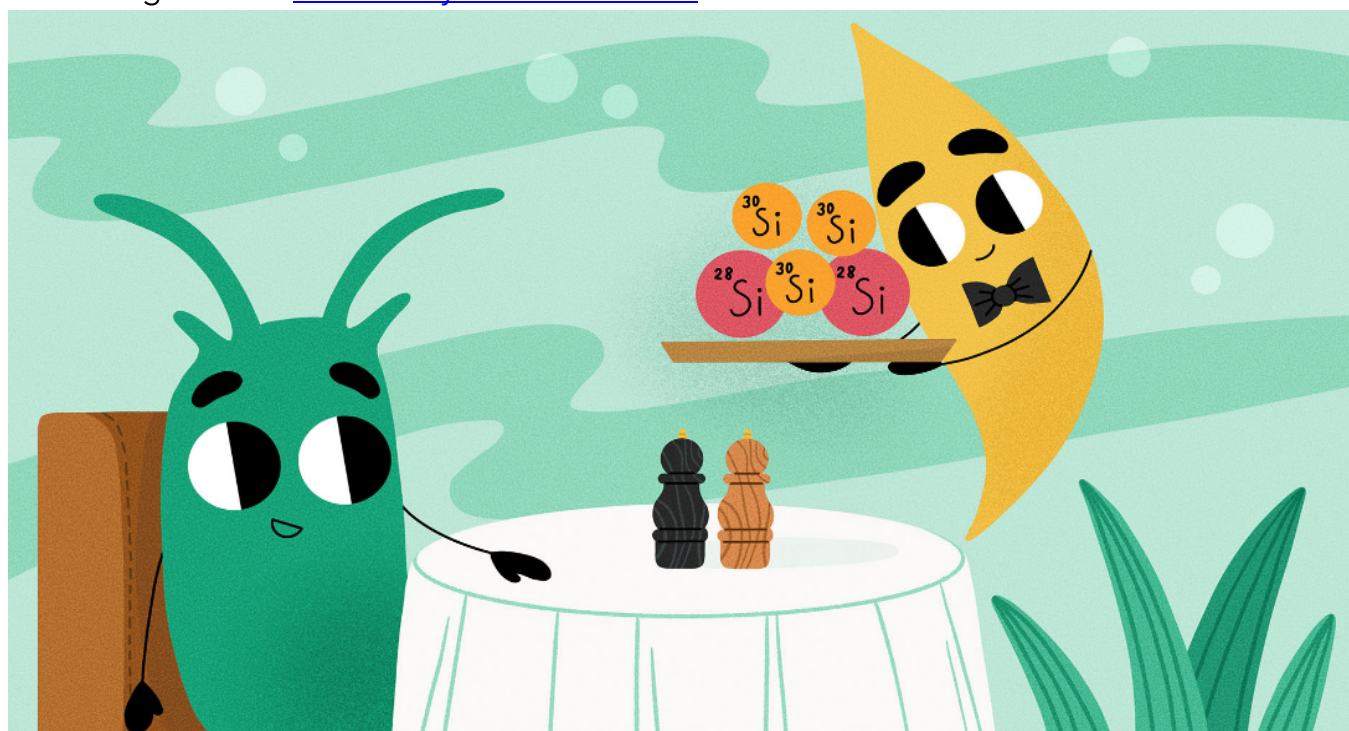




LES DIATOMÉES L'AIMENT LÉGER ! LEURS HABITUDES ALIMENTAIRES NOUS AIDENT À COMPRENDRE L'OCÉAN DU PASSÉ

Ivia Closset^{1,2*†}, Kristin Doering^{3*†} et Bianca T. P. Liguori^{4†}

¹ Observatoires marins et de mesures techniques, Institut météorologique finlandais, Helsinki, Finlande

² Institut des Sciences de la mer, Université de Californie à Santa Barbara, Santa Barbara, CA, États-Unis

³ Département de géologie, Université de Lund, Lund, Suède

⁴ Géochimie isotopique marine, Institut de chimie et de biologie de l'environnement marin (ICBM), Université d'Oldenburg, Oldenburg, Allemagne

†Ces auteurs ont contribué de manière égale à cet article

T'es-tu déjà demandé si les océans d'aujourd'hui étaient différents il y a des millions d'années ? Un groupe de petites algues appelées diatomées peut nous aider à le découvrir. Les diatomées fabriquent un squelette solide qui peut subsister des milliers, voire des millions d'années après leur mort. Pour cela, elles absorbent le silicium de l'eau de mer en utilisant de préférence un certain type de silicium dans leur menu, laissant de côté celui qu'elles n'aiment pas. Les chercheurs peuvent suivre cette habitude alimentaire en mesurant la proportion des deux types de silicium stockés dans les diatomées. En utilisant cette empreinte de silicium comme une empreinte digitale, les scientifiques peuvent étudier l'état de la surface des océans, la quantité de silicium consommée par les diatomées et l'influence que ces organismes ont eu sur le climat de la Terre dans le passé.

QUI SONT LES DIATOMÉES ET POURQUOI SONT-ELLES IMPORTANTES POUR LE CLIMAT ?

Les diatomées sont de minuscules algues qui vivent presque partout à la surface des océans, des lacs et des rivières. Elles restent près de

PHOTOSYNTHÈSE.

Processus par lequel les plantes/algues produisent de l'oxygène et de la nourriture pour elles-mêmes et pour d'autres organismes en utilisant la lumière du soleil et le CO_2 .

SILICE. Oxyde de silicium (SiO_2) qui peut être cristallisé (comme dans le quartz), amorphe (comme dans l'opale), ou un mélange des deux formes (comme dans le sable). La silice du squelette des diatomées est faiblement cristallisée.

*** note de l'éditeur :** La majorité du carbone des diatomées est libéré dans l'eau avant 1000 mètres de profondeur mais pour certaines diatomées, il est piégé avec le squelette de silice au fond des océans pendant plus d'un siècle.

CLIMAT. Moyenne des conditions météorologiques dans une région de la Terre sur le long terme.

*** note de l'éditeur :** on estime à plus de 100 000 le nombre d'espèces différentes de diatomées sur Terre dont environ 5 000 espèces océaniques.

la surface parce que, comme toute plante, elles ont besoin de lumière pour produire de l'énergie grâce au processus de **photosynthèse**. Pour se développer, les diatomées ont également besoin de nutriments, qui sont l'équivalent de la nourriture que nous mangeons.

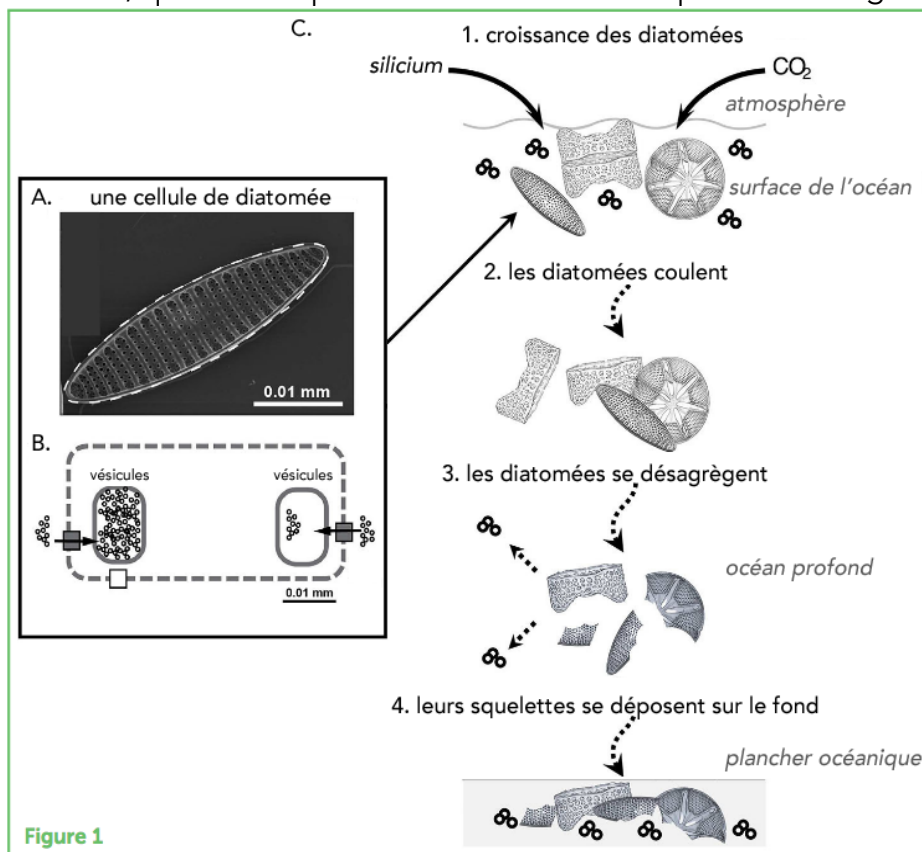


Figure 1. (A) Une diatomée vue au microscope. (B) Schéma d'une diatomée montrant l'absorption du silicium et son stockage dans des vésicules, où il est transformé en silice. La silice est utilisée pour construire le squelette de la diatomée (ligne pointillée grise). (C) À la surface de l'océan, les diatomées absorbent le CO_2 de l'atmosphère et le silicium dissous dans l'eau. Elles utilisent la lumière pour se développer. Lorsqu'elles meurent, elles coulent dans les profondeurs de l'océan et emportent avec elles le carbone et le silicium. Des parties du squelette se désagrègent, libérant le carbone et le silicium dans l'eau. Les parties non dissoutes restent sur le fond marin, stockant du carbone (venant du CO_2 de l'atmosphère) et du silicium, éventuellement pendant très longtemps.

Contrairement à nos os, le squelette des diatomées se trouve à l'extérieur de leur corps, comme une coquille. Il est transparent et fait de **silice**, le même matériau que celui que nous utilisons pour fabriquer le verre. Lorsque les diatomées meurent, elles coulent au fond de l'océan, emportant avec elles une partie du carbone qu'elles ont utilisé pour croître* (Figure 1C) [1]. Elles sont des acteurs importants du **climat** car au niveau mondial, elles absorbent près de 40 % du dioxyde de carbone (CO_2 , connu comme gaz à effet de serre) de l'atmosphère et libèrent 60% du dioxygène (O_2), au moins autant si ce n'est plus que les forêts tropicales. Les diatomées contribuent donc à réduire le changement climatique en éliminant le CO_2 de l'air et en en piégeant une partie sous forme de carbone organique avec leurs squelettes de silice au fond des océans*.

PALÉO-OCÉANOGRAPHIE.
Étude des conditions océaniques passées.

SILICIUM. Élément chimique (Si).

VÉSICULE. Structure à l'intérieur d'une cellule, constituée d'un liquide entouré d'une membrane. Les vésicules transportent et stockent des matériaux à l'intérieur de la cellule.

ISOTOPE. Atome d'un même élément ayant le même nombre de protons mais un nombre différent de neutrons et, par conséquent, un nombre de masse différent.

Sur le fond marin, les squelettes de silice ne se désagrègent pas facilement et peuvent rester enfouis pendant des millions d'années. Les diatomées sont si minuscules qu'il faut un microscope pour les voir (**Figure 1A**). Seules les plus grosses peuvent atteindre 0,5 mm de longueur et sont à peu près aussi larges qu'un cheveu. En prélevant des échantillons sur le fond de l'océan, les scientifiques y trouvent des squelettes de diatomées et les utilisent pour obtenir des informations sur les conditions océaniques passées et présentes. Ce domaine de recherche s'appelle la **paléo-océanographie**.

COMMENT LES DIATOMÉES CONSTRUISENT-ELLES LEUR SQUELETTE DE SILICE ?

Pour construire leur squelette, les diatomées ont besoin de **silicium**, qu'elles trouvent dissous dans l'eau de mer. Elles stockent ce silicium à l'intérieur de leur corps, dans de petites poches appelées **vésicules** où elles le transforment en silice (**Figure 1**) [2]. Elles utilisent cette silice pour construire leur squelette, qui est orné d'épines et de trous. À certains endroits, les diatomées utilisent tout le silicium des eaux de surface et ne laissent rien derrière elles. Nous savons qu'elles agissent ainsi parce que les scientifiques ont trouvé un moyen de suivre leurs empreintes digitales (ou plutôt leurs empreintes de silicium) dans l'océan et sur les fonds marins. Pour cela, les scientifiques mesurent les **isotopes** du silicium, ce qui constitue un moyen puissant de comprendre ce que faisaient les diatomées dans le passé, ainsi que les conditions dans lesquelles elles évoluaient.

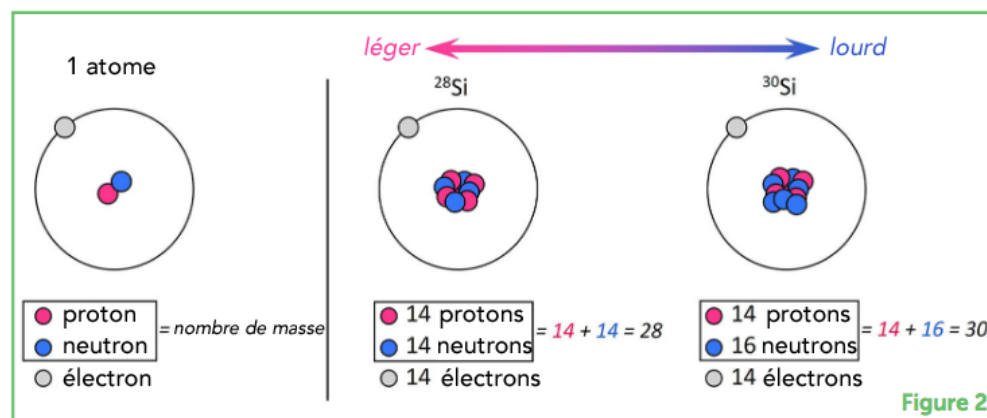


Figure 2. Un atome contient des protons et des neutrons dans son noyau et des électrons qui tournent autour d'eux. Le nombre de protons définit l'élément. La somme des neutrons et des protons donne le nombre de masse de l'élément. Le nombre de neutrons peut varier, ce qui ne change pas le type d'élément mais modifie son nombre de masse. Un atome de silicium a 14 protons (cercles roses) et peut avoir 14 ou 16 neutrons (cercles bleus), ce qui fait passer son nombre de masse de 28 à 30. Les atomes d'éléments ayant un nombre différent de neutrons sont appelés isotopes. Ici, tu peux voir les isotopes ^{28}Si et ^{30}Si .

AS-TU DIT ISOTOPE ?

Les atomes sont les principaux éléments constitutifs de tout ce qui

NOMBRE DE MASSE. C'est le nombre de protons plus le nombre de neutrons d'un atome.

FRACTIONNEMENT.

Capacité de séparer deux substances, qui est utilisée par les diatomées pour n'absorber que l'isotope de silicium qu'elles préfèrent.

existe. Les atomes sont constitués de petits éléments appelés protons, électrons et neutrons (**Figure 2**). Un atome est identifié par le nombre de protons qu'il contient. Un atome de silicium, par exemple, contient 14 protons. Dans la plupart des cas, un atome contient le même nombre de neutrons que de protons, soit 14 neutrons pour le silicium. Le nombre de protons plus le nombre de neutrons donne le **nombre de masse** de l'atome. Par exemple, la plupart des atomes de silicium ont un nombre de masse de 28. Cependant, dans de rares cas, le silicium peut avoir 16 neutrons au lieu de 14, et son nombre de masse est alors de 30 au lieu de 28. Ces petites variations dans le nombre de neutrons produisent des atomes de silicium "légers" (avec un nombre de masse de 28) et des atomes de silicium "lourds" (avec un nombre de masse de 30). Ces atomes de silicium plus légers et plus lourds sont appelés isotopes. Dans la nature, l'isotope du silicium le plus abondant a un nombre de masse de 28 et est appelé ^{28}Si , et le moins abondant a un nombre de masse de 30 et est appelé ^{30}Si .

POURQUOI LES DIATOMÉES S'INTÉRESSENT-ELLES AUX ISOTOPES DU SILICIUM ?

Les diatomées préfèrent utiliser l'isotope du silicium le plus léger (^{28}Si) lorsqu'elles construisent leur squelette. En termes scientifiques, elles **fractionnent** les isotopes du silicium, ce qui signifie qu'elles absorbent de préférence l'isotope le plus léger (^{28}Si) jusqu'à une certaine quantité [3]. Cela peut sembler compliqué, mais voici un exemple qui peut t'aider à comprendre.

Les diatomées sont comme toi et moi : elles préfèrent certains aliments. Imagine que tu as un sac rempli de bonbons roses et bleus en proportions égales. Tu aimes les deux, mais tu as une petite préférence pour les bonbons roses. Parce que tu es sage, tu décides de ne pas manger tout le sac d'un coup, mais de ne manger qu'une petite fraction de bonbons chaque jour. Le premier jour, tu prends évidemment plus de bonbons roses que de bonbons bleus, car le rose est ton préféré. Le deuxième jour, tu fais la même chose, mais tu remarques qu'il y a maintenant plus de bonbons bleus que de bonbons roses dans ton sac. Le dernier jour, il est difficile de trouver des bonbons roses dans ton sac et tu te retrouves avec plus de bonbons bleus que de bonbons roses dans ta main. En mangeant de préférence des bonbons roses, tu as modifié la proportion des bonbons des deux couleurs dans ton sac et dans ta main : tu as augmenté la proportion de bonbons bleus (que tu aimes moins) dans ton sac et dans ta main. Les diatomées font la même chose avec les isotopes du silicium dans l'océan (**Figure 3**). Elles préfèrent utiliser l'isotope ^{28}Si et, en continuant à prélever leur isotope de silicium préféré dans l'eau, elles augmentent la proportion de ^{30}Si qui reste dans l'eau. Cela signifie que les diatomées qui se développent après elles devront former de la silice avec plus de ^{30}Si [4].

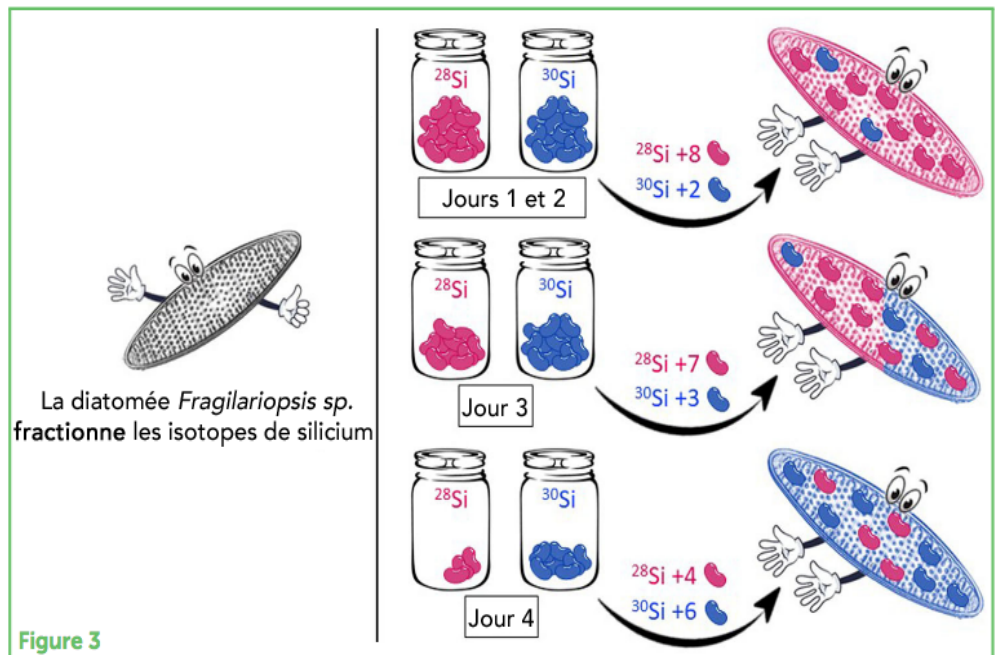


Figure 3. Les diatomées de l'espèce *Fragilariopsis* sp. fractionnent (ou favorisent) l'isotope le plus léger (^{28}Si , bonbons roses). En choisissant plus de ^{28}Si que d'isotope plus lourd ^{30}Si (bonbons bleus), les diatomées modifient la proportion des isotopes du silicium disponibles dans l'eau de mer (les bocaux) et dans leur squelette. Avec le temps, l'eau de mer et les diatomées s'enrichissent en ^{30}Si car la majeure partie du ^{28}Si a été utilisée.

RECONSTITUER LE PASSÉ AVEC L'EMPREINTE DE SILICIUM

En raison du fractionnement, l'activité des diatomées laisse une empreinte de silicium à la fois dans l'eau de mer et dans leurs squelettes de silice. Si les diatomées absorbent beaucoup de silicium, elles devront à un moment incorporer plus de ^{30}Si dans leur squelette, car c'est l'isotope qui restera quand elles auront utilisé celui qu'elles préfèrent, le ^{28}Si . Au contraire, si les diatomées absorbent moins de silicium, elles utiliseront moins de ^{30}Si . Lorsque les diatomées meurent, elles coulent au fond de la mer où elles sont enfouies, conservant ainsi cette empreinte de silicium. En mesurant la proportion des deux isotopes du silicium dans ces vieux squelettes de diatomées du fond marin, les paléo-océanographes peuvent étudier l'activité qu'avaient les diatomées dans les eaux de surface dans le passé.

Pour faire cela, les paléo-océanographes utilisent des navires équipés de dispositifs qui prélèvent des échantillons dans l'eau et sur le fond de l'océan. Ensuite, les scientifiques isolent le silicium de chaque échantillon dans leurs laboratoires et ils utilisent des instruments qui mesurent le rapport entre les deux isotopes du silicium. Nous appelons ce rapport $\delta^{30}\text{Si}$ (prononcé "delta-30-silicium"). Un $\delta^{30}\text{Si}$ élevé signifie qu'il y a plus de ^{30}Si dans l'échantillon, et un $\delta^{30}\text{Si}$ faible, qu'il y a plus de ^{28}Si dans l'échantillon [4, 5].

En mesurant le $\delta^{30}\text{Si}$ dans l'eau de mer, les scientifiques peuvent calculer la quantité de silicium que les diatomées ont absorbée au cours

* note de l'éditeur : ils peuvent ainsi relier ce rapport au rapport $\delta^{30}\text{Si}$ des diatomées vivantes et à leur abondance à un moment donné.

de la dernière semaine ou du dernier mois*. En mesurant le $\delta^{30}\text{Si}$ dans les diatomées préservées sur le fond marin, les paléo-océanographes peuvent savoir la quantité de silicium utilisée par les diatomées qui vivaient dans l'océan il y a des milliers d'années. Les scientifiques peuvent ainsi déterminer si les diatomées étaient abondantes et en bonne santé et donc si elles pouvaient absorber une grande quantité de CO_2 de l'atmosphère par photosynthèse dans le passé.

SAVONS-NOUS TOUT SUR LES HABITUDES ALIMENTAIRES DES DIATOMÉES EN MATIÈRE D'ISOTOPES DU SILICIUM ?

L'étude des empreintes de silicium par la mesure des isotopes du silicium dans les squelettes de diatomées fonctionne très bien. Mais les scientifiques se posent encore de nombreuses questions sur le fractionnement des isotopes du silicium par les diatomées. Par exemple, nous supposons que si elles disposent d'assez de ^{28}Si , les diatomées utilisent toujours les deux isotopes du silicium dans le même rapport. Cela signifie que la proportion de ^{30}Si par rapport à ^{28}Si qu'elles absorbent ne change pas. Pour reprendre l'exemple des bonbons, cela revient à supposer que l'on prend toujours la même proportion de bonbons roses et bleus. Aujourd'hui, nous commençons à penser que ce rapport peut changer, mais nous ne savons pas pourquoi. Peut-être que les différents types de diatomées ont des préférences différentes et fractionnent les isotopes du silicium différemment. Les diatomées pourraient également modifier le rapport entre les deux isotopes du silicium qu'elles utilisent normalement en fonction des conditions environnantes, telles que la disponibilité d'autres nutriments et la lumière. Il faut répondre à ces questions importantes, car nous utilisons les isotopes du silicium pour reconstituer l'influence des diatomées sur la chimie des océans et leur interaction avec le climat dans le passé. Nous devons comprendre parfaitement comment les choses fonctionnent à l'époque moderne pour évaluer avec précision ce qui s'est produit dans le passé.

Malgré toutes les inconnues qui restent à explorer, les isotopes du silicium sont un outil puissant qui nous aide à suivre l'activité des diatomées dans le passé et dans les océans d'aujourd'hui, et à mieux comprendre le rôle de l'océan dans la régulation du climat de la Terre. À terme, ces informations permettront aux chercheurs de mieux prévoir comment l'environnement réagira au changement climatique et comment les conséquences des activités humaines affecteront la santé des écosystèmes océaniques.

REMERCIEMENTS

Ce manuscrit fait partie d'une série de 6 manuscrits sur le cycle du silicium marin réalisés par le groupe de chercheurs en début de carrière de SILICAMICS. Nous remercions le consortium SILICAMICS ECRs pour son enthousiasme dans la mise en place de ce projet. Nous remercions

chaleureusement les quatre jeunes examinateurs et leurs mentors pour leurs commentaires judicieux qui ont grandement amélioré ce manuscrit. Ce travail a été soutenu par des subventions de la National Science Foundation #OCE-2048998 (IC).

RÉFÉRENCES

- [1] Tréguer, P., Bowler, C., Moriceau, B., Dutkiewicz, S., Gehlen, M., Aumont, O., et al. 2018. Influence of diatom diversity on the ocean biological carbon pump. *Nat. Geosci.* 11:27-37. doi: 10.1038/s41561-017-0028-x
- [2] Martin-Jézéquel, V., Hildebrand, M., and Brzezinski, M. A. 2000. Silicon metabolism in diatoms: implications for growth. *J. Phycol.* 36:821-40. doi: 10.1046/j.1529-8817.2000.00019.x
- [3] Fry, B. 2006. *Stable Isotope Ecology*. New York, NY: Springer.
- [4] De La Rocha, C. L., Brzezinski, M. A., and DeNiro, M. J. 1997. Fractionation of silicon isotopes by marine diatoms during biogenic silica formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 61:5051-6. doi: 10.1016/S0016-7037(97)00300-1
- [5] De La Rocha, C. L., Brzezinski, M. A., DeNiro, M. J., and Shemesh, A. 1998. Silicon-isotope composition of diatoms as an indicator of past oceanic change. *Nature* 395:680-3. doi: 10.1038/27174

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.2023.1176653 ; Closset I, Doering K and Liguori BTP (2023) Diatoms Like It Light! How Diatom Eating Habits Help Us Understand the Past Ocean. *Front. Young Minds.* 11:1176653).

TRADUCTION : Nicole Pasteur, Association Jeunes Francophones et la Science

ÉDITION : Ula Hibner & Catherine Braun-Breton, Association Jeunes Francophones et la Science

MENTORS SCIENTIFIQUES : Ula Hibner & Catherine Braun-Breton

REMERCIEMENTS : « Jeunes Francophones et la Science » remercie Marianne Entrevan et Mohamed Bensmili pour leur accueil et leur implication dans l'édition de cet article par leurs élèves.

JEUNES ÉDITRICES ET ÉDITEURS :

MARIUS, ALWENA, CAPUCINE, RONAN-JULES, 16-17 ANS

Nous sommes en première générale scientifique. Nous aimons la musique, la mode, le sport, la nature ou encore le cinéma. Nous avons beaucoup aimé travailler sur ce sujet qui nous a apporté quelque chose de nouveau et très concret. Nous sommes fiers d'avoir participé à cette aventure.

JADE, ELSA, ELÉA, 16-17 ANS

Nous sommes trois lycéennes passionnées de sciences et nous aimons



comprendre le monde qui nous entoure. Jade apprécie aussi le sport, et particulièrement les arts martiaux. Elsa est profondément intéressée par tout ce qui touche à l'aviation, et Eléa s'épanouit en nageant et en jouant de la musique. Nous sommes ravies d'avoir pu participer à l'édition de cet article fort enrichissant :)

ÉLISE, LILY, ADAME, DJÉNAÉ, 16-17 ANS

Nous sommes en classe de première avec les spécialités mathématiques, physique et chimie. Lily et Djénaé ont également choisi la spécialité Sciences de la Vie et de la Terre et Adame Histoire-Géographie, Géopolitique et sciences politiques. Élise aime la physique. La science et la recherche sont des domaines qui ont toujours intéressé Lily qui envisage d'entreprendre des études de médecine pour en apprendre davantage sur le corps humain. Adame est passionné d'aviation et d'armement militaire ; il aime énormément l'innovation et la physique au service du sport, notamment la boxe et le foot. Djénaé est passionnée par la musique, la photographie, la danse et la médecine.

ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)

SOU MIS le 28 février 2023. **ACCEPTÉ** le 23 novembre 2023.

PUBLIÉ en ligne le 14 décembre 2023.

ÉDITION : Carolyn Scheurle

MENTORS SCIENTIFIQUES : Karen Holmberg , Catherine Walsh

CITATION : Closset I, Doering K and Liguori BTP (2023) Diatoms Like It Light! How Diatom Eating Habits Help Us Understand the Past Ocean. Front. Young Minds. 11:1176653. doi: 10.3389/frym.2023.1176653

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 Closset, Doering and Liguori

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

HELENA, MOMO, TATI, 11-12 ANS

Ce trio sympathique s'intéresse aux sciences et à l'écriture. Il adore explorer de nouveaux sujets et s'intéresse particulièrement aux moyens

écologiques de lutter contre les crises climatiques afin de créer un avenir plus agréable pour notre planète. Helena aime faire de la randonnée et jouer au football. Elle adore également ses trois chats. Momo aime être dans la nature, en particulier dans les parcs urbains, car l'écologie urbaine lui montre à quel point la nature peut être forte. Elle cultive toutes sortes de plantes dans son jardin hydroponique à l'intérieur de son appartement en ville. Tati adore les chiens. C'est une couturière et une constructrice hors pair.

JUDE, 15 ANS

J'aime beaucoup les chiens et les chats. J'ai appris à mon chat à marcher en laisse, ce qui nous permet de nous promener ensemble pendant mon temps libre. J'aime aussi la musique et je passe beaucoup de temps à jouer de la guitare. J'aime lire sur la biochimie (en particulier sur les plantes) et j'aimerais un jour étudier ce sujet à l'université.

AUTEURES

IVIA CLOSSET

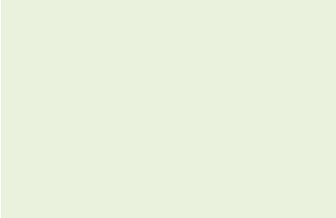
Je suis biogéochimiste marin et j'ai toujours été obsédée par les mystères de la partie invisible et la plus sauvage de l'océan. La science est rapidement devenue pour moi un moyen d'expérimenter et de comprendre l'équilibre du monde qui nous entoure. J'utilise des isotopes stables pour suivre les processus océaniques actuels et passés, tels que l'activité du phytoplancton, en mettant l'accent sur le cycle du silicium et l'océan Austral. Je travaille à partir de différents types d'échantillons : eau de mer, diatomées délicates, banquise et sédiments boueux des grands fonds marins. *ivia@ucsb.edu

KRISTIN DOERING

Je suis biogéochimiste marin et micropaléontologue. Mon travail consiste à découvrir comment le cycle des nutriments de l'océan a évolué dans le passé. Pour ce faire, j'étudie différents microfossiles, tels que les diatomées, les radiolaires et les spicules d'éponges. Les propriétés chimiques de ces organismes, comparées à celles de l'eau de mer actuelle, m'indiquent la quantité de nutriments présents dans l'océan du passé et la quantité utilisée. L'étude des microfossiles me fascine, car ils peuvent nous apprendre beaucoup sur le passé, et je m'efforce constamment d'améliorer notre compréhension de ces organismes. *kristin.doering@geol.lu.se

BIANCA T. P. LIGUORI

Mes recherches portent sur le cycle biogéochimique du silicium (Si) en utilisant les isotopes stables comme outil. La composition en isotopes stables du Si de différents réservoirs tels que l'eau de mer, l'eau interstitielle ou les diatomées fournit des informations sur les voies et processus dominants par lesquels le Si est transporté et recyclé dans l'océan. Par conséquent, la compréhension de ces facteurs est d'une



importance vitale pour notre compréhension générale du cycle global du Si. Pour ce faire, je travaille avec des échantillons d'eau de mer, de particules, d'eaux interstitielles marines et de sédiments provenant des océans Arctique et Pacifique.