

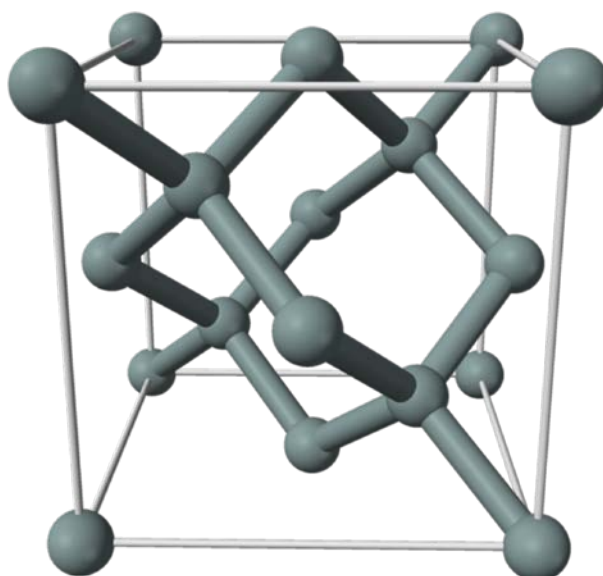
## Pourrions-nous vivre sans silicium ?

Auteur : Paul TRÉGUER

Océanographe biogéochimiste  
Professeur émérite, Institut universitaire européen de la mer,  
Université de Bretagne Occidentale, Brest, France

Le silicium (Si) est né dans l'univers il y a environ 14 milliards d'années par fusion thermonucléaire d'atomes d'oxygène au sein d'étoiles massives, à une température de l'ordre du milliard de kelvins<sup>1</sup>. Caractérisé en 1823 par Jöns Jacob Berzelius, l'élément silicium (Si) abonde dans l'univers (8<sup>e</sup> rang) et plus précisément dans la planète Terre (2<sup>e</sup> rang). Il est situé dans la classification périodique des éléments entre l'aluminium et le phosphore. Les atomes de Si pur s'allient en une structure solide analogue au diamant (figure 1), mais dont l'aspect visuel est proche de l'aluminium pur.

Le silicium présente une structure électronique proche de celle du carbone, élément dont on connaît le rôle crucial pour la biologie de notre planète ; aussi pourrait-on imaginer (science-fiction) une autre biologie basée sur la chimie du silicium et organisée autour de composés organosiliceux.



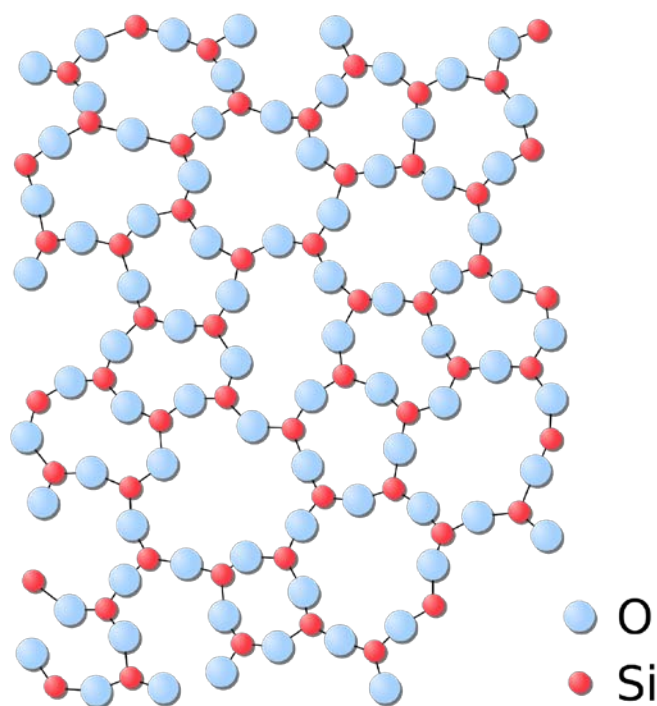
**Figure 1.** Le silicium pur est un solide gris analogue à l'aluminium. Il présente une structure de type diamant. ( <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Silicon-unit-cell-3D-balls.png>).

Cependant, à la différence du carbone, aucun composé gazeux du silicium n'existe dans l'atmosphère et il n'est pas présent dans notre planète à l'état pur. Il se trouve principalement sous forme de silice (SiO<sub>2</sub>), un composé solide très stable. Celle-ci entre dans la composition de nombreux minéraux de la surface des continents (quartz, argiles, micas et, d'une manière générale, les minéraux silicatés). Les verres à base de silice sont devenus d'un usage courant dans les sociétés modernes. Le silicium entre dans la composition de

<sup>1</sup> Le kelvin (symbole K) est l'unité pour la température thermodynamique, du Système international d'unités.

produits ménagers, cosmétiques, et mêmes alimentaires. Pour la production d'énergie, il intervient dans la constitution des capteurs photovoltaïques. Décidément nous aurions du mal à nous en passer...

Mais l'importance du silicium va bien au-delà. Il est l'un des éléments clés impliqués, à l'échelle globale, dans la biosphère terrestre et marine. Le lessivage des minéraux siliceux par les eaux de pluie chargées en  $\text{CO}_2$  donne naissance à un composé soluble dans les eaux douces et marines : l'acide silicique ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$  ou  $\text{Si}(\text{OH})_4$ , souvent appelé silice dissoute et abrégé en DSi). De nombreux organismes vivants sont capables d'absorber DSi pour construire de la silice amorphe (figure 2), par réaction de condensation (élimination d'eau) entre les groupements hydroxyles (OH) d'acides aminés et de l'acide silicique. Bien qu'elle y soit présente à faibles doses (en moyenne 0,32 % en poids), la silice biogène (généralement à l'état hydraté :  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) est un composant structurant de plusieurs biomes terrestres [1], particulièrement des herbacées des steppes tempérées ou des cultures (le dépôt de verre organique rend coupant le bord de nombreuses herbes), mais aussi dans les plantes des savanes et des forêts tropicales, des toundras et des terres humides. La silice protège ces plantes de plusieurs stress biotiques et abiotiques, dont la dessiccation, la prédation, l'attaque par les moisissures, voire la toxicité de métaux lourds. À l'échelle globale, le flux annuel de Si soustrait des sols par les plantes est estimé [1] à 84 millions de millions de moles de silicium par an (84 téramoles ou 84 Tmoles par an), soit 2 350 millions de tonnes de silicium par an.



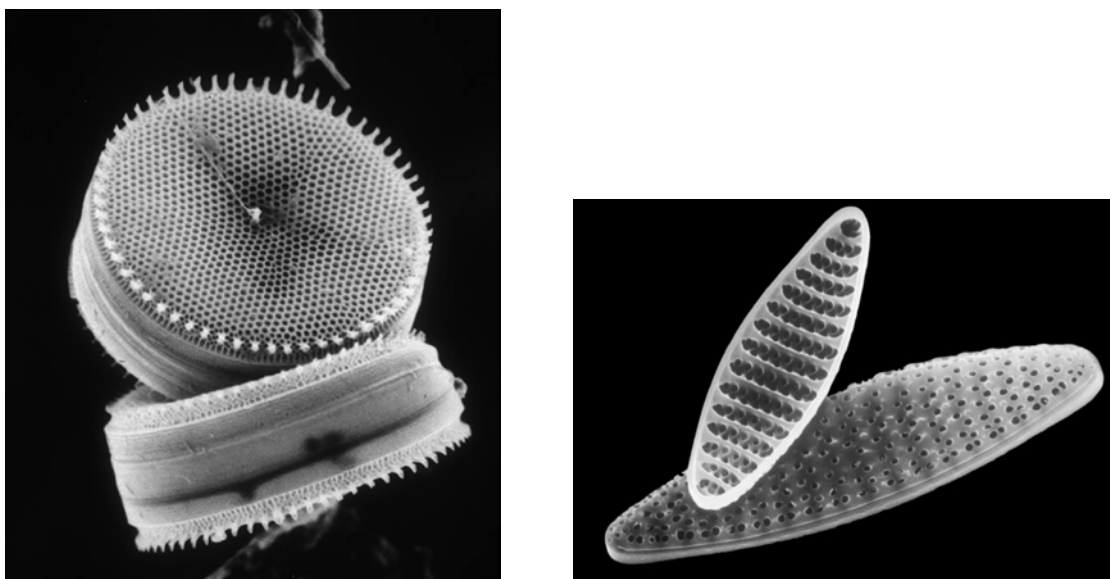
**Figure 2.** Représentation de la silice amorphe ( $\text{SiO}_2$ ) en 2D.

(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4b/Silica.svg/2000px-Silica.svg.png>)

Les bassins-versants concentrent les eaux de lessivage des sols pour alimenter, par voie fluviale, l'océan en DSi. D'autres mécanismes contribuent également à l'enrichissement des eaux de mer en DSi : dans le réservoir de surface de l'océan mondial, les résurgences d'eaux douces en mer ou la dissolution des fines particules siliceuses déposées sur l'océan par les vents qui les arrachent aux déserts, et celle des matériaux silicatés transportés depuis les continents et déposés sur les marges continentales ; dans le réservoir

profond, le lessivage à chaud des matériaux basaltiques au niveau des sources hydrothermales ou des flancs des dorsales océaniques.

Dans un océan à l'état d'équilibre, les apports nets d'éléments (flux sources) sont, à l'échelle annuelle, compensés par des départs nets (flux puits). C'est l'enfouissement de silice biogène accumulée dans les sédiments, qui compense les apports de DSi. Sur le long terme cette silice amorphe alimente la formation de minéraux siliceux (diagenèse). Si les processus géochimiques régissent les apports nets de DSi à l'océan, les processus biologiques contrôlent les départs nets. D'où vient la silice qui s'accumule dans les sédiments côtiers ou abyssaux ? Elle provient de l'export de matériel synthétisé dans la couche de surface par les micro-organismes siliceux, essentiellement des micro-algues : les diatomées (organismes unicellulaires, de taille variant de quelques micromètres à un millimètre, qui peuvent se regrouper sous forme coloniale), dont le squelette externe (frustule) est composé et orné d'arrangements siliceux. Il existe plus de 100 000 espèces de diatomées [2], regroupées en deux ordres : centriques (forme de disque avec symétrie centrale, figure 3 à gauche) et pennées (forme allongée avec symétrie bilatérale, figure 3 à droite). L'absorption de silicium est absolument requise par les diatomées pour leur croissance ; elle l'est aussi par certaines éponges (voir plus loin), ainsi que par les silicoflagellés (algues unicellulaires), les radiolaires (protistes) et par plusieurs espèces de choanoflagellés (protozoaires). Au premier maillon du réseau trophique les diatomées contribuent à près de 50 % de la production primaire de l'océan mondial. Dans les zones de l'océan intensément exploitées pour la pêche, par exemple les résurgences d'eau profonde du bord est des océans Atlantique et Pacifique ou au large de la Somalie, le réseau trophique repose pour une bonne part sur la production photosynthétique due aux diatomées.



**Figure 3.** Exemples de diatomées vues en microscopie électronique.

À gauche : diatomée centrique (*Thalassiosira* sp.).

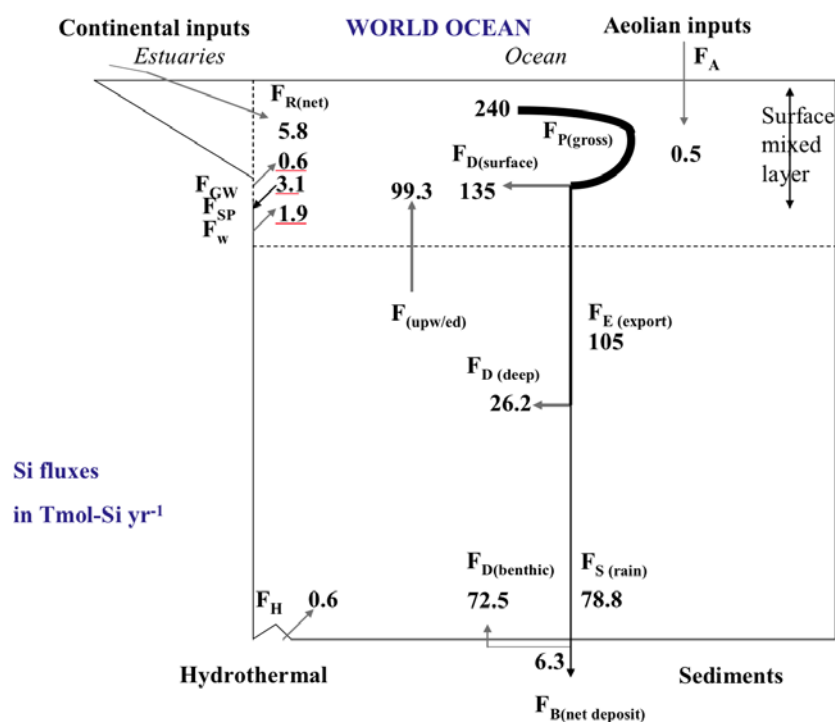
[http://www.google.fr/imgres?imgurl=http://www.awi.de/fileadmin/user\\_upload/News/Press\\_Releases/2004/1\\_Quarter/Thalassiosira\\_w.jpg&imgrefurl=http://www.awi.de/en/news/](http://www.google.fr/imgres?imgurl=http://www.awi.de/fileadmin/user_upload/News/Press_Releases/2004/1_Quarter/Thalassiosira_w.jpg&imgrefurl=http://www.awi.de/en/news/).

À droite: diatomée pennée (*Fragilaria kerguelensis*).

[http://www.google.fr/imgres?imgurl=http://www.awi.de/typo3temp/pics/e20f204722.jpg&imgrefurl=http://www.awi.de/en/news/background/species\\_of\\_the\\_month/august/&h=389&w=560&sz=67&tbnid=TT6-a8BTbEdeQM:&tbnh=90&tbnw=130&zoom=1&usg=\\_\\_1hYru\\_jbWQ-6pRs5bUeChMh4Umc=&docid=DnL34VZC24Z1VM&sa=X&ei=FMP8UY2IE4iZhQey64DQCg&sqi=2&ved=0CDoQ9QEwAg&dur=30](http://www.google.fr/imgres?imgurl=http://www.awi.de/typo3temp/pics/e20f204722.jpg&imgrefurl=http://www.awi.de/en/news/background/species_of_the_month/august/&h=389&w=560&sz=67&tbnid=TT6-a8BTbEdeQM:&tbnh=90&tbnw=130&zoom=1&usg=__1hYru_jbWQ-6pRs5bUeChMh4Umc=&docid=DnL34VZC24Z1VM&sa=X&ei=FMP8UY2IE4iZhQey64DQCg&sqi=2&ved=0CDoQ9QEwAg&dur=30)

Le squelette externe de silice des diatomées pourrait jouer plusieurs rôles : facilitation des échanges entre le tissu cellulaire et l'environnement à travers les pores (taille de 50 à 200 nanomètres), protection contre les prédateurs, conduction de la lumière jusqu'aux pigments photosynthétiques (*cf.* fibres optiques). La silice est plus dense que la matière organique. Ceci fait qu'à la mort des diatomées, le matériel organique et siliceux est rapidement exporté, de la couche de surface de l'océan vers les sédiments abyssaux (temps de transport vertical de la dizaine de jours à un mois). L'assimilation de DSi par les diatomées privilégie l'isotope <sup>28</sup>Si, aux dépens des isotopes <sup>29</sup> et <sup>30</sup>. Plus une diatomée absorbe de DSi, plus elle est riche en <sup>28</sup>Si par rapport à son environnement. Cette signature isotopique est pratiquement préservée quand le matériel siliceux sédimente à travers la colonne d'eau, puis s'enfouit dans le sédiment sur le long terme. En la mesurant, les paléocéanographes estiment l'intensité de la consommation de DSi à l'époque où la diatomée croissait dans la couche de surface, remontant ainsi à la paléoproduction primaire de l'océan.

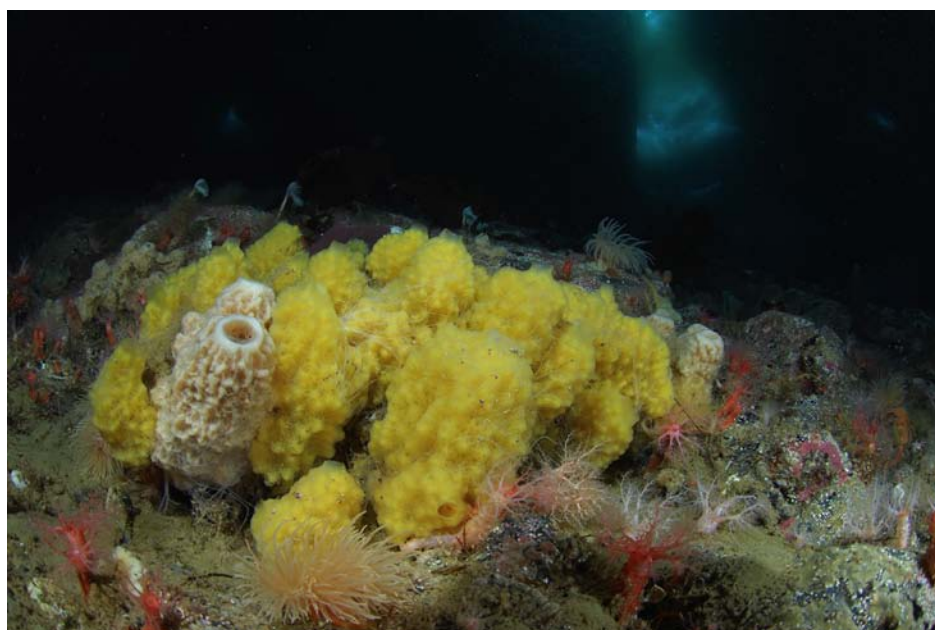
Le cycle du silicium [3] dans l'océan actuel a été récemment revisité par Tréguer et De La Rocha ([4], figure 4). Le temps de résidence du Si dans l'océan est d'environ 10 000 ans (il faut environ 10 000 ans pour constituer le stock d'acide silicique de l'océan à partir des différentes voies d'entrée).



**Figure 4.** Le cycle du silicium dans l'océan mondial (d'après Tréguer & De La Rocha, 2013).

Dans sa représentation la plus simple, l'océan mondial est composé de deux réservoirs : le réservoir de surface (environ 100 m, siège de la photosynthèse) et le réservoir profond (environ 3 700 m). Il reçoit du silicium (flèches grises) sous forme d'acide silicique (DSi) par les fleuves à la sortie des estuaires ( $F_{R(net)}$ ), les apports éoliens ( $F_A$ ), les résurgences d'eau douces ( $F_{GW}$ ), la dissolution des matériaux siliceux entraînés depuis les continents ( $F_W$ ), les apports hydrothermaux ( $F_H$ ). L'océan perd du silicium (flèches noires) sous forme de silice biogène qui s'accumule sur le long terme dans les sédiments ( $F_{B(net deposit)}$ ) et dans les éponges ( $F_{SP}$ ). Les diatomées produisent de la silice biogène ( $F_{P(gross)}$ ). Une partie de la silice produite dans le réservoir de surface est recyclée sur place ( $F_{D(surface)}$ ), le reste est exporté ( $F_{E(export)}$ ) vers le réservoir profond. Une partie du flux qui sédimente se dissout ( $F_{D(deep)}$ ), l'autre parvient aux sédiments ( $F_{S(rain)}$ ). A l'interface eau-sédiment la dissolution se poursuit ( $F_{D(benthic)}$ ), le reste s'accumule sur le long terme ( $F_{B(net deposit)}$ ). L'excès de DSi recyclé dans le réservoir profond est remonté (upwelling) ou diffusé vers le réservoir de surface ( $F_{(upw/ed)}$ ). Les flux sont en millions de millions de moles de Si (teramoles ou Tmole Si) par an.

Dans ce cycle l'équilibre entre flux d'entrée (de DSi) et de sortie (de SiO<sub>2</sub>) est atteint par la prise en compte du flux puits dû aux éponges siliceuses ([5], figure 5), organismes à dynamique lente qui peuvent vivre plusieurs centaines d'années. Ce cycle révèle l'intensité du recyclage de DSi dans le réservoir de surface et à l'interface océan – sédiment (figure 4). Il met en évidence l'importance du pompage de DSi par les diatomées : 240 Tmoles Si par an, soit 3 fois celui des plantes terrestres. Par photosynthèse, elles produisent environ le quart du dioxygène que nous respirons, et décidément nous ne pourrions nous passer des diatomées et donc du silicium !



**Figure 5.** Éponges siliceuses de l'océan Antarctique (courtesy Erwan Amice, CNRS, Brest)

**Pour en savoir plus :**

- [1] Carey J.C. & Fulweiler R.W. (2012). The terrestrial silica pump. *PLOS One*, e52932, 7, 1-4.
- [2] Leblanc K., Aristegui J., Armand L., Assmy P., Beker B., Bode A., Breton E., Cornet V., Gibson J., Gosselin M.-P., Kopczynska E., Marshall H., Peloquin J., Piontkovski S., Poulton A.J., Quéguiner B., Schiebel R., Shipe R., Stefels J., van Leeuwe M.A., Varela M., Widdicombe C. & Yallop M. (2012). A global diatom database – abundance, biovolume and biomass in the world ocean. *Earth Syst. Sci. Data*, 4, 149-165.
- [3] Tréguer P., Nelson D.M., van Bennekom A.J., DeMaster D.J., Leynaert A. & Quéguiner B. (1995). The balance of silica in the world ocean: a re-estimate. *Science*, 268, 375-79.
- [4] Tréguer P. & De La Rocha C.J. (2013). The world ocean silica cycle. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 5, 477-501
- [5] Tréguer P., Chauvaud L. & Amice E. (2013). *La vie sous la glace – une oasis au pôle Sud*. Ed. Quae, pp. 1-122