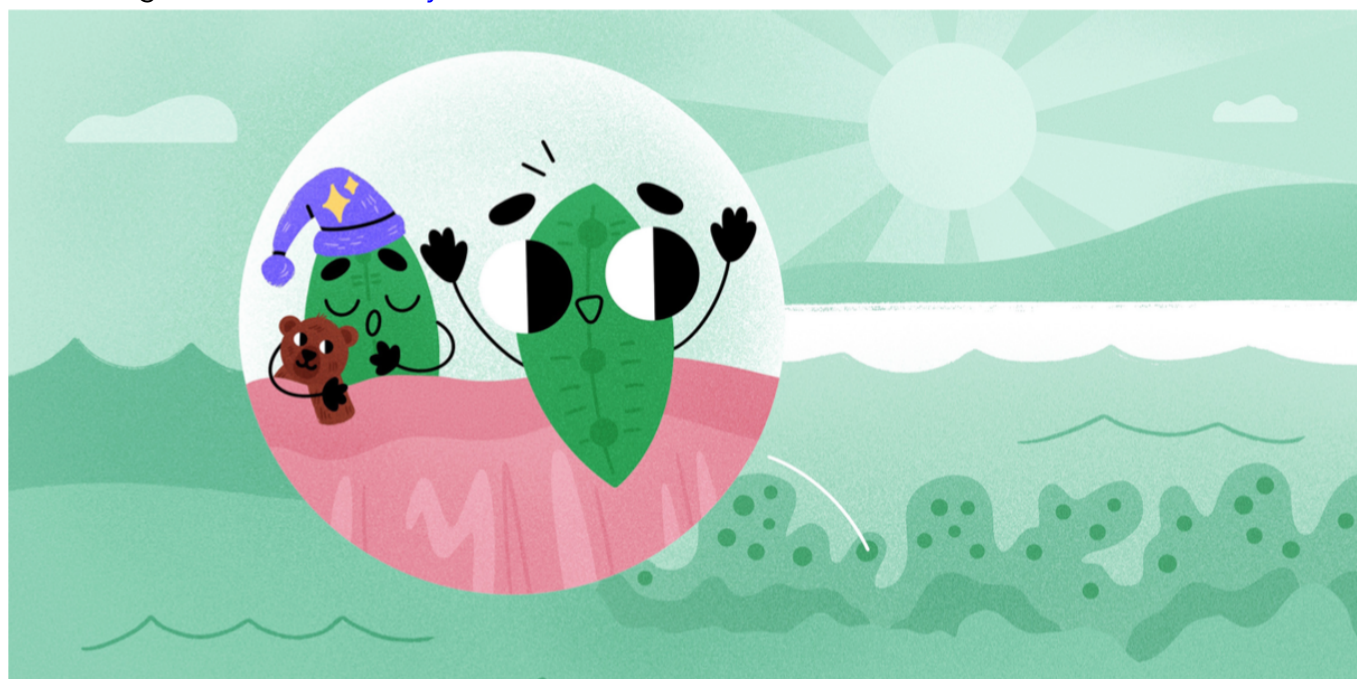




LA VIE STRESSANTE DES ALGUES DE LA BANQUISE

ZoéL.Forgereau^{1*}, BenjaminA.Lange^{2†} et KarleyCampbell¹

¹ Département de Biologie marine arctique, Faculté des Biosciences, Pêche et économie, UiT Université Arctique, Tromsø, Norvège

² Océans et banquise, Centre Fram, Institut Polaire Norvégien, Tromsø, Norvège

SALINITÉ. Concentration en sels dissous dans l'eau. Un sel dissous dans l'eau est sous la forme d'un anion (charge électrique négative) et d'un cation (charge électrique positive).

SAISONNALITÉ. Différences des conditions de l'environnement d'une saison à l'autre (lumière, salinité, température et nutriments), particulièrement importante dans l'Arctique.

L'océan Arctique est situé au « sommet » du monde et est recouvert en grande partie de glace avec des variations au cours de l'année. Il connaît de longues périodes d'obscurité en hiver (nuit polaire) et de longues périodes de lumière en été (jour polaire). Au printemps et en été, la fonte de la glace diminue la salinité dans la partie supérieure de l'océan. Ces différences de conditions d'une saison à l'autre sont appelées saisonnalité. Veux-tu savoir comment les algues microscopiques qui vivent en contact avec la banquise arctique font face à des changements aussi extrêmes dans leur environnement ? Si c'est le cas, lis cet article pour découvrir comment elles s'adaptent aux variations saisonnières spectaculaires de la lumière et de la salinité.

SAISONNALITÉ DE L'ARCTIQUE

L'océan Arctique est situé entre le pôle nord et le nord de l'Europe, de l'Asie et de l'Amérique. La banquise (glace) qui le recouvre une bonne partie de l'année est sujette à des changements spectaculaires de température, d'ensoleillement et de **salinité** au fil des saisons, ce qu'on appelle la **saisonnalité** [1].

En hiver, pendant la longue période d'obscurité de la nuit polaire, l'océan arctique est en grande partie recouvert de la banquise en raison des températures extrêmement basses (de -30°C jusqu'à -69°C !). La durée de la nuit polaire varie avec la distance au pôle Nord et peut durer

ALGUES DE LA BANQUISE.

Organismes unicellulaires photosynthétiques classés en plusieurs groupes, comprenant des diatomées (pennées ou centriques), des flagellés et des dinoflagellés.

CANAU DE SAUMURE.

Poches de liquide plus salé que l'eau de mer, piégées dans la glace et dans lesquelles certaines algues peuvent se développer.

RÉSEAU TROPHIQUE.

Ensemble des interactions alimentaires au sein d'un écosystème.

PRODUCTION PRIMAIRE.

Production de sucres grâce à la photosynthèse, par des organismes à la base de la chaîne alimentaire. Dans l'océan Arctique, les algues sont les principaux organismes assurant la production primaire.

ÉCOSYSTÈME. Système formé par un environnement (avec ses caractéristiques physiques et chimiques) et l'ensemble des organismes (animaux, plantes et micro-organismes) qui y vivent, s'y nourrissent et s'y reproduisent

PHOTOSYNTÈSE. Procédé de certains organismes qui utilisent l'énergie lumineuse pour fabriquer des sucres à partir d'eau, de dioxyde de carbone (CO₂) et de minéraux. Ce processus libère du dioxygène O₂.

NUTRIMENT. Substance utile au développement d'un organisme directement assimilable c'est-à-dire ne nécessitant pas d'être dégradée par digestion pour être utilisée par l'organisme. Des sels tels que nitrates, phosphates et silicates font partie des nutriments des algues de la banquise.

de novembre à début mars. La salinité des eaux de surface de l'océan est alors plus élevée car une partie de l'eau est passée sous forme de glace.

À partir du début du printemps, le soleil revient et l'atmosphère se réchauffe, ce qui fait fondre petit à petit la couverture neigeuse de la banquise et, éventuellement, la glace. À la fin du printemps et en été, la banquise reçoit de la lumière jusqu'à 24 heures par jour : c'est le jour polaire. À mesure que la couverture de neige et la glace fondent, l'eau libérée dans l'océan arctique diminue la salinité des eaux de surface de l'océan.

LES ALGUES DE LA BANQUISE : LA BASE DU RÉSEAU TROPHIQUE ARCTIQUE

Des algues microscopiques photosynthétiques vivent au contact de la glace de la banquise ; on les appelle **algues de la banquise** (Tableau 1).

algues de la banquise	principales caractéristiques	illustration
diatomées pennées (en forme de plume)	forme allongée et entourée d'une couche résistante de silice	
diatomées centriques	forme arrondie et entourée d'une couche résistante de silice	
flagellés	un ou plusieurs flagelles identiques (des structures en forme de fouet utilisées pour nager)	
dinoflagellés	Deux flagelles différents (des structures en forme de fouet utilisées pour nager). Un des flagelles entoure la cellule et l'autre est perpendiculaire au premier	

Tableau 1. Les différents types d'algues de la banquise et leurs principales caractéristiques.

Elles se trouvent principalement dans les eaux de surface de l'océan au contact avec la glace de la banquise. On les trouve aussi dans des poches de liquide super-salées piégées dans la glace, appelées **canaux de saumure**. Elles constituent une partie très importante du **réseau trophique** de l'océan Arctique. En effet, les algues de la banquise sont responsables de la **production primaire** ce qui signifie qu'elles sont les premiers organismes à apporter de l'énergie dans le réseau trophique de cet **écosystème**. Elles le font en fabriquant des sucres par **photosynthèse** ce qui nécessite du dioxyde de carbone (CO₂), de l'énergie lumineuse, de l'eau et des **nutriments** [2, 3].

La production primaire dans la banquise est donc contrôlée par la quantité de lumière et de nutriments disponibles, ainsi que par la température et la salinité.

Des changements majeurs de leur environnement, en particulier de la banquise, peuvent stresser les algues et réduire la production primaire, ce qui affecte l'ensemble de l'écosystème [2]. Les algues sont une source de nourriture pour les organismes marins microscopiques connus sous le nom de zooplancton. Le zooplancton est lui-même une source de nourriture pour les poissons, qui à leur tour peuvent être mangés par de plus grands organismes comme les oiseaux de mer, les phoques, les ours polaires, et même les humains ! La production primaire par les algues est donc de grande importance pour l'écosystème arctique. Comprendre comment les algues de la banquise survivent aux changements environnementaux saisonniers peut aider les scientifiques à prédire comment les changements climatiques pourraient affecter cet écosystème à l'avenir.

LES ALGUES DE LA BANQUISE FACE À LA FAIBLE LUMINOSITÉ EN HIVER

Pendant l'hiver arctique, les algues doivent survivre à l'obscurité et au froid [1]. Elles le font en formant des structures appelées kystes (Figure 1A). Les kystes sont des formes dormantes des algues c'est-à-dire que la cellule cesse de croître et utilise juste l'énergie nécessaire à sa survie. Les kystes ont une paroi épaisse qui protège la cellule dans des conditions environnementales difficiles. Les diatomées peuvent passer de longues périodes à l'obscurité dans un état dormant et ainsi survivre des mois, voire des années [1]. Lorsque les conditions redeviennent favorables au développement des algues, les kystes redeviennent des cellules actives.

Certaines algues de la banquise changent de mode de nutrition pour survivre à l'hiver (Figure 1B). La plupart captent la lumière du soleil et produisent des sucres et de l'oxygène grâce à la photosynthèse. Mais qu'en est-il lorsque la lumière est très limitée dans l'obscurité de l'hiver ? De nombreux Flagellés et Dinoflagellés complètent alors le peu de sucre qu'ils produisent par photosynthèse en se nourrissant d'autres algues !

Leur photosynthèse peut s'adapter aux changements dans la quantité de lumière disponible grâce à des modifications de la quantité de pigments photosynthétiques, les pigments qui absorbent la lumière nécessaire à la photosynthèse. En hiver, on observe une augmentation de leur production d'un pigment photosynthétique particulier appelé chlorophylle A, qui leur permet d'absorber plus de lumière (Figure 1C) [3].

LES ALGUES DE LA BANQUISE FACE À LA LUMIÈRE INTENSE AU PRINTEMPS ET EN ÉTÉ

Lorsque le soleil revient au début du printemps, la lumière dans

PIGMENTS. Molécules qui absorbent la lumière et donnent leur couleur aux cellules ou aux tissus.

l'Arctique commence à augmenter. Elle est maximale au solstice d'été puis décroît. Cette augmentation de la lumière permet aux algues de croître rapidement dès le début du printemps et elles finissent par être très abondantes. Mais pourquoi ? Les kystes redeviennent des cellules actives à mesure que la quantité de lumière solaire augmente (**Figure 1A**) : les algues de banquise se réveillent ! La lumière redevient leur principale source d'énergie (**Figure 1B**) [1].

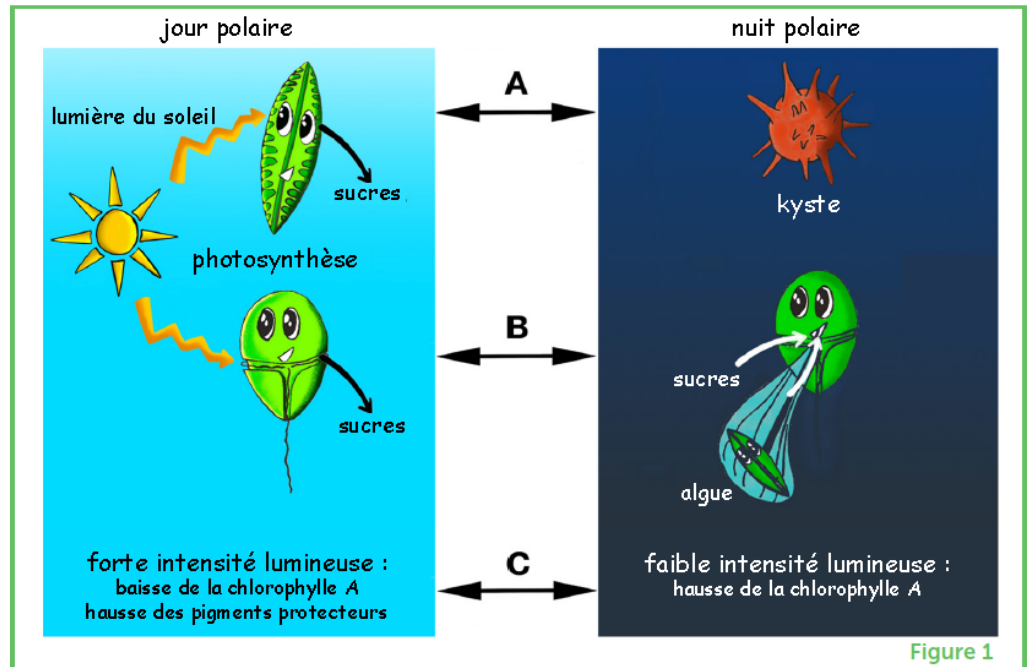


Figure 1. (A) Pendant la nuit polaire, les algues de la banquise se transforment en formes de résistance appelées kystes. (B) Les algues modifient leur mode de nutrition au fil des saisons : pendant la journée polaire, elles utilisent la lumière pour effectuer la photosynthèse ; pendant la nuit polaire, elles se nourrissent d'autres algues. (C) Les algues adaptent la quantité et la nature de leurs pigments en fonction de l'intensité lumineuse : lorsque la lumière est faible, elles produisent plus de chlorophylle A ; lorsque la lumière est intense, elles produisent des pigments qui les protègent des UV.

Mais, en raison de la fonte de la couverture de neige et de la glace, l'intensité lumineuse peut être très élevée. Si les algues ne peuvent pas se protéger de l'intensité lumineuse très élevée pendant la journée polaire, elles peuvent en mourir [3] ! En réponse à cette situation, les algues produisent des **pigments photoprotecteurs**. Elles produisent aussi moins de chlorophylle A ce qui réduit la quantité de lumière qu'elles absorbent (**Figure 1C**) [3]. Certaines algues de la banquise supportent mieux la lumière intense que d'autres [4].

LES ALGUES DE LA BANQUISE FACE À LA SALINITÉ ÉLEVÉE EN HIVER

Les algues sont soumises à la salinité des eaux de surface de l'océan (**Figure 2A**) [5], sauf celles vivant dans les canaux de saumure qui font face à une salinité plus élevée [5]. Ces salinités varient au cours des saisons. En hiver, lorsque l'eau gèle, la saumure et l'eau de mer ont une salinité plus élevée que la cellule d'algue (**Figure 2B**) [5].

PIGMENTS PHOTOPROTECTEURS.

Pigments qui protègent des effets nocifs de la lumière en bloquant les rayonnements UV (Ultra-Violet).

OSMOLYTES. Molécules qui protègent la cellule contre le passage excessif de l'eau vers l'intérieur ou l'extérieur de la cellule lorsqu'elle subit des changements de salinité.

Un sel est un composé chimique formé de l'association d'un cation (ion ayant une charge électrique positive) et d'un anion (ion ayant une charge électrique négative). Les ions ne passent pas librement à travers la membrane des cellules ; l'eau au contraire passe librement. L'eau de mer à haute salinité contient beaucoup d'ions ; pour équilibrer la concentration en molécules de part et d'autre de la membrane de la cellule d'algue, de l'eau sort de la cellule qui rétrécit.

Pour éviter cette situation, les algues de banquise peuvent collecter des ions de leur environnement. Leur mode d'absorption des ions peut nécessiter de l'énergie [5]. Elles peuvent également produire des substances appelées **osmolytes**, ce qui augmente la concentration en molécules de la cellule et lui évite aussi de perdre de l'eau [5].

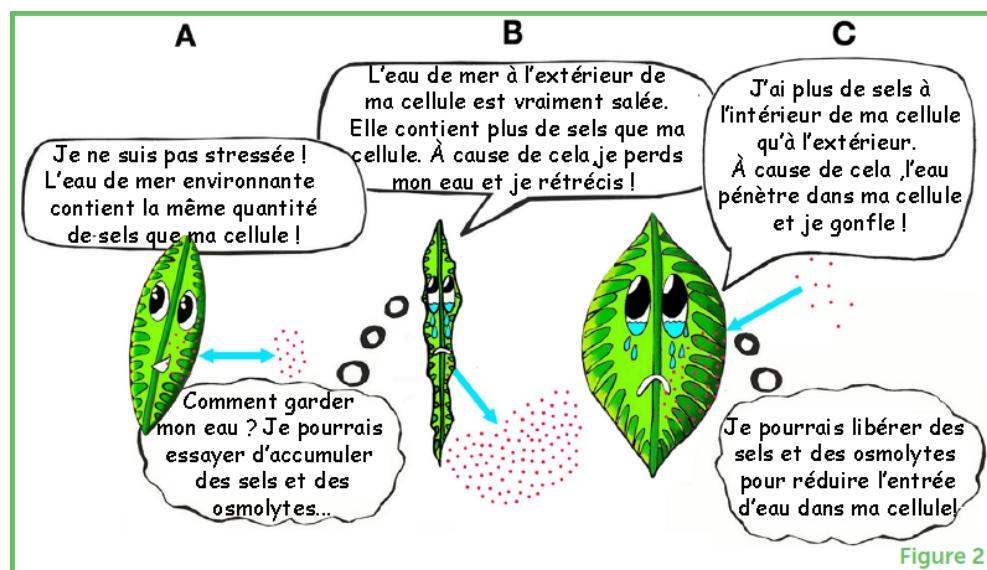


Figure 2

Figure 2. (A) À des salinités normales de l'eau de mer (de l'ordre de 35g/L), la cellule d'algue n'est affectée ni par une perte d'eau ni par un excès d'eau. (B) À des salinités élevées, la cellule rétrécit parce qu'il y a plus de sels à l'extérieur de la cellule qu'à l'intérieur, de sorte que l'eau est expulsée de la cellule. (C) À faible salinité, la cellule gonfle parce qu'il y a plus de sels à l'intérieur de la cellule qu'à l'extérieur, de sorte que l'eau pénètre. Les flèches bleues montrent l'écoulement de l'eau entrant ou sortant de la cellule d'algue. Les points rouges représentent les sels.

LES ALGUES DE LA BANQUISE FACE AUX FAIBLES SALINITÉS AU PRINTEMPS ET EN ÉTÉ

L'augmentation des températures, au printemps et en été, provoque la fonte de la couverture neigeuse et de la glace. Cela ajoute de l'eau douce à l'océan et aux canaux de saumure, ce qui diminue leur salinité. La concentration en sel à l'intérieur des cellules d'algues peut alors être plus élevée que celle à l'extérieur des cellules : l'eau environnante a tendance à pénétrer dans les algues, ce qui les fait gonfler (Figure 2C). Pour réduire l'afflux d'eau dans la cellule, les algues de la banquise peuvent libérer des ions et, pour certaines d'entre elles (flagellés et diatomées), des osmolytes [5]. Comme pour la collecte des ions, certaines méthodes de libération d'ions nécessitent de l'énergie d'autres non.

Certaines algues de la banquise s'adaptent mieux que d'autres selon les conditions de salinité (Figure 3). Les diatomées pennées sont souvent les mieux adaptées aux conditions hivernales sombres et salées (Figure 3A) [4] alors que les flagellés et les diatomées centriques (Tableau 1) s'adaptent mieux à de faibles salinités [4]. L'abondance et la variété des différents types d'algues de la banquise varient donc selon les saisons.

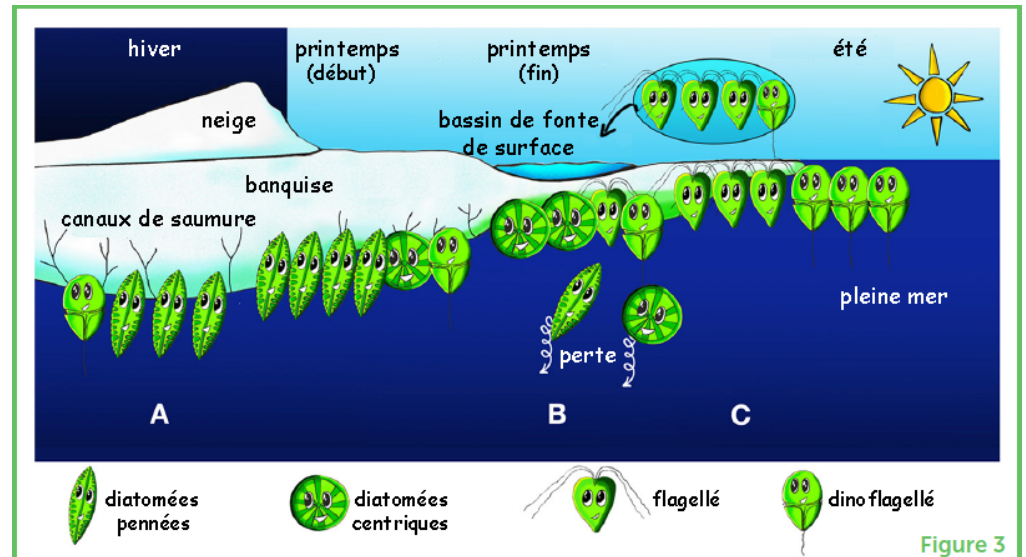


Figure 3. Les changements de salinité au fil des saisons favorisent la croissance de différents types d'algues de la banquise. (A) Les diatomées pennées sont souvent les meilleures pour s'adapter aux salinités élevées en hiver sombre et froid. Elles dominent aussi généralement dans la glace de fond au début du printemps. (B) Les diatomées, les flagellés et les dinoflagellés centriques s'adaptent mieux aux faibles salinités de la fin du printemps. (C) Les flagellés et les dinoflagellés s'adaptent mieux aux faibles salinités et aux nutriments limités à la fin du printemps ou en été.

La fonte de la glace est défavorable aux diatomées pennées qui deviennent moins abondantes à la fin du printemps, tandis que les flagellés et les dinoflagellés, mieux adaptés à une faible salinité et des nutriments moins abondants, prospèrent (Figure 3B, 3C) [4].

MESSAGE À RETENIR

La banquise arctique est sujette à de forts changements saisonniers, car elle subit de longues périodes d'obscurité (nuit polaire) et de lumière (jour polaire). De minuscules algues photosynthétiques vivant dans cet environnement doivent s'adapter pour faire face aux changements saisonniers extrêmes de l'intensité lumineuse et de la salinité. Pour cela, elles peuvent former des kystes, modifier leur mode de nutrition, réguler leur teneur en pigments et modifier leur concentration en sels et en osmolytes. Les différents types d'algues de la banquise s'adaptent différemment à la saisonnalité de l'Arctique. Les diatomées pennées s'adaptent généralement mieux aux conditions hivernales sombres et très salines ; tandis que les diatomées centriques et surtout les flagellés se développent mieux dans les conditions plus chaudes et moins salées de la fin du printemps et de l'été.

C'est parce que les algues de la banquise sont à la base du réseau trophique arctique que les scientifiques cherchent à comprendre et à prédire les changements potentiels de leur production primaire dûs aux changements environnementaux saisonniers. Cela leur permettrait de mieux prédire comment les changements climatiques pourraient affecter à l'avenir la population des algues de la banquise arctique et celle des animaux qui vivent de leur production primaire.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été écrit dans le cadre d'un cours individuel de communication scientifique à l'Université arctique de Norvège et a été une contribution au projet Diatom-ARCTIC (Diatom Autoecological Responses with Changes To Ice Cover) financé par le projet NERC Science of the Environment (NE/R012849/1; 03F0810A), le projet phare PHOTA (Physical drivers of ice algal HOTspots in a changing Arctic Ocean, Tromsø, Norvège, # 66014, PI: BL), ainsi qu'aux projets financés par le Conseil norvégien de la recherche BREATHE (Bottom sea ice Respiration and nutrient Exchanges Rated for THE Arctic, subvention no 325405, PI : KC), CAATEX (subvention no 280531) et HAVOC (subvention no 280292). Ce travail a également été soutenu par le Conseil norvégien de la recherche par le biais de l'Arctic Field Grant (AFG # 322575 à ZF).

RÉFÉRENCES

- [1] Berge, J., Johnsen, G., and Cohen, J. H. 2020. *POLAR NIGHT Marine Ecology: Life and Light in the Dead of Night*. Berlin: Springer Nature.
- [2] Thomas, D. N. 2017. *Sea Ice*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [3] Falkowski, P. G., and Raven, J. A. 2013. *Aquatic Photosynthesis*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- [4] Van Leeuwe, M. A., Tedesco, L., Arrigo, K. R., Assmy, P., Campbell, K., Meiners, K. M., et al. 2018. Microalgal community structure and primary production in Arctic and Antarctic sea ice: A synthesis. *Elementa* 6:e267. doi: 10.1525/elementa.267
- [5] Kirst, G. 1990. Salinity tolerance of eukaryotic marine algae. *Ann. Rev. Plant Biol.* 41:21–53. doi: 10.1146/annurev.pp.41060190.000321

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.2023.878138 ; Forgereau Z, Lange B and Campbell K (2023) The Stressful Life of Sea Ice Algae. *Front. Young Minds*. 11:878138).

TRADUCTION : Jean-Marie Clément, Association Jeunes Francophones et la Science

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

MENTOR SCIENTIFIQUE : Daniel Breton, Ariane van der Straten et Catherine Braun-Breton, Association Jeunes Francophones et la Science

REMERCIEMENTS : Merci à Sébastien Fricaux pour son accueil et son implication dans l'édition de cet article par ses élèves.



JEUNES ÉDITRICES ET ÉDITEURS

ÉLÈVES DE 4^{ÈME} COLLÈGE FLORIAN, ANDUZE, 13-14 ANS

Nous sommes Maxime, Ambre, Shayna, Jules, Sara, Adriana, Ana, Samy, Vianney, Flora, Mia, Rafaël, Eva, Léonie, Ethan, Tony, Aëlys, Yonah, Timéo, Marlon, Loïs, Léna, Lorenzo, Victor, Pascal, Jade, Loris, Lylou et Nisa, de la 4^{ème} « Tango » et Marvin, Mathéo, Charlotte, Léa, Robin, Léa, Shéryl, Emma, Alban, Noam, Maxence, Kerem, Andrés, Jimmy, Paul, Adèle, Lina, Lucas, Wyatt, Sacha, Daniela, Luna, Jason, Lény, Louis, Camille, Léa et Venus de la 4^{ème} « Jive » ! Nous pouvons être bruyants et peu concentrés mais aussi attentifs et sympas ! Nous avons trouvé cet article intéressant et facile à comprendre, mais aussi un peu long pour de jeunes lectrices et lecteurs.

ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)

SOU MIS le 17 février 2022 ; **ACCEPTÉ** le 13 avril 2023

PUBLIÉ EN LIGNE le 5 mai 2023.

ÉDITEUR : Sanae Chiba

MENTOR SCIENTIFIQUE : Luisa Falcon

CITATION: Forgereau Z, Lange B and Campbell K (2023) The Stressful Life of Sea Ice Algae. Front. Young Minds. 11:878138. doi: 10.3389/frym.2023.878138

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 Forgereau, Lange et Campbell

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.

JEUNE EXAMINATEUR

SEBASTIAN, 13 ANS

J'aime le sport, la lecture, les mathématiques, la physique et tout ce qui concerne l'espace !

AUTEURS

ZOE L. FORGEREAU

Zoé L. Forgereau a obtenu une maîtrise ès sciences en écologie marine

et biologie des ressources à l'UT de l'Université arctique de Norvège. Elle a étudié les réponses photosynthétiques et la production primaire d'algues de la banquise lorsqu'il delà salinité diminue. Pour son projet de maîtrise, elle a mené une étude de terrain sur les algues de fond de glace au Svalbard et a mené des expériences en laboratoire.
*zoe.figaro@orange.fr

BENJAMIN A. LANGE

Benjamin A. Lange travaille actuellement à l'Institut norvégien de géotechnique en tant que scientifique en télédétection. Ses principaux intérêts de recherche portent sur la cartographie des propriétés et de la pertinence de l'habitat marin et côtier à l'aide de diverses approches, telles que le carottage et le forage de glace, les systèmes robotiques sous-marins (p. ex., les véhicules télécommandés) et la télédétection aéroportée et par satellite (p. ex., les drones). †Télédétection et géophysique, Institut norvégien de géotechnique, Oslo, Norvège

KARLEY CAMPBELL

Karley Campbell est professeure agrégée de botanique marine à l'Université arctique de Norvège et chercheuse affiliée à l'Université du Manitoba, au Canada. Elle mène des études en laboratoire et sur le terrain sur les microorganismes de la banquise pour voir comment ils vivent maintenant et comment ils pourraient vivre à l'avenir avec les changements climatiques.