

SEGE Highlight

Ocean's seven survival lessons

Dossier 1 : Les fonds marins, trop chaud
ou trop froid

Dossier 2 : Virus ou climat à l'assaut des
écosystèmes

Dossier 3 : Vivre à deux, c'est toujours
mieux

La survie des cellules
expliquée par les étudiants
de SEGE



EDITO

Regardez-sous la surface, plongez dans les profondeurs marines et découvrez les enjeux des communautés d'êtres-vivants. Des milieux les plus glacés de l'océan austral aux milieux les plus chaud des dorsales océaniques, des communautés s'installent, des communautés survivent. Un écosystème se met en place dès l'origine de la vie. Face aux invasions virales les communautés océaniques se réinventent. Face au changement climatique, certaines espèces prolifèrent, attaquent et intoxiquent. Parfois, la solution est dans une relationnelle fusionnelle, la symbiose où chaque individu apporte ses compétences.

@Tom hegen



SOMMAIRE

1	Les fonds marins, trop chaud ou trop froid	7
1.1	Les hyperthermophiles carburent de l’Océan jusque dans l’Espace	9
1.2	Origines de la vie	19
1.3	Les champignons des neiges, délivrés des contraintes du sel et du froid	27
2	Virus ou climat à l’assaut des écosystèmes	39
2.1	Les virus marins piratent le réseau trophique de nos océans	41
2.2	Vos huîtres avec ou sans toxines ?	51
3	Vivre à deux, c’est toujours mieux	61
3.1	Le rêve d’une limace voleuse : devenir panneau solaire	63
3.2	Une union chez les planctons, par amour ou par intérêt ?	71

@Tom hegen



DOSSIER 1 : LES FONDS MARINS, TROP CHAUD OU TROP FROID

Les hyperthermophiles carburent de l'océan jusqu'à l'espace

Origines de la vie

Les champignons des neiges, délivrés des contraintes du sel et du froid

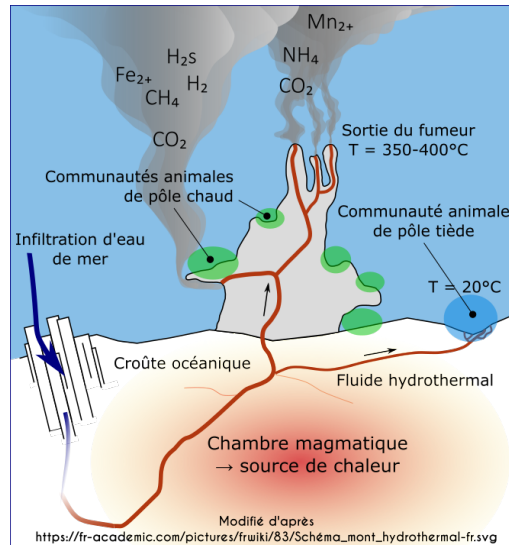
Les hyperthermophiles carburent de l'Océan jusque dans l'Espace

INTRODUCTION

Découvertes en 1977 sur l'une des dorsales océaniques du Pacifique, les sources hydrothermales sous-marines abritent de véritables oasis de vie [1]. Au niveau des dorsales, l'eau de mer s'infiltré dans des fissures et se réchauffe au contact des roches en fusion. Lorsqu'elle remonte vers la surface, de nombreux éléments métalliques et composés réduits (H_2S , CH_4 , H_2 , NH_4^+) présents dans la croûte océanique se dissolvent dans l'eau sous l'effet de la pression et de la température. A sa sortie, le mélange de ce fluide chaud (jusqu'à $400^\circ C$) avec l'eau de mer froide ($2^\circ C$) provoque la précipitation de divers composés qui forment des cheminées hydrothermales. C'est dans cette zone de mélange turbulent, que se développe la vie hydrothermale [1]. Ces communautés sont basées sur des producteurs primaires, libres ou symbiotiques, présentant un métabolisme particulier : la chimolithotrophie qui est une façon de produire de l'énergie à partir des molécules inorganiques du fluide sans besoin de lumière.

Autour des sources hydrothermales, la température varie selon de très forts gradients où se retrouvent des populations de bactéries ou d'archées dont certaines supportent des températures voisines de $100^\circ C$: les hyperthermophiles.

La découverte de ces écosystèmes et de leur fonctionnement a bousculé la recherche scientifique en biologie reposant la question de l'origine de la vie sur Terre mais également dans l'univers [2] puisque les conditions chimiques des sources chaudes volcaniques sont voisines de celles de l'époque prébiotique, où la vie est apparue sur Terre [2]. Elle a ouvert de nouveaux domaines de recherche sur les micro-organismes chimiosynthétiques et a suscité l'intérêt de l'industrie pour le développement de biotechnologies (une ref des filles).



— Noé Charmasson, Sirine Soussi, Émilie Tripognez, Sarah Doudouh

Références

1. DICK, G. J. The microbiomes of deep-sea hydrothermal vents : distributed globally, shaped locally. *Nature Reviews Microbiology* 17, 271-283. (2024) (mai 2019).
12. JIANG, L. et al. Thermophilic hydrogen-producing bacteria inhabiting deep-sea hydrothermal environments represented by *Caloranaerobacter*. en. *Research in Microbiology* 166, 677-687. (2023) (nov. 2015).

LES HYPERTHERMOPHILES À L'ABORDAGE DES FUMEURS NOIRS

par NOÉ CHARMASSON

Introduction

Un fumeur noir nouvellement formé est stérile car les fluides émis ont des températures pouvant atteindre 400°C qui sont bien plus élevées que la limite supérieure de température pour la vie [3].

Cependant ils sont rapidement colonisés par les communautés hyperthermophiles [3].

Dans cette partie l'origine des micro-organismes colonisateurs et les étapes de la colonisation de ces substrats inhospitaliers sont abordés.

Les fumeurs noirs et les communautés hyperthermophiles

Les fumeurs noirs : des milieux extrêmes

La composition du fluide hydrothermal varie avec la température et la nature des roches lessivées. Les fumeurs noirs sont caractérisés par des fluides réducteurs riches en métaux en CO₂ et H₂S, acides et de températures élevées (>350°C) alors que les fumeurs blancs présentent des fluides de calcium, barium et silice, des températures plus faibles (<100°C), et un pH basique. Les communautés hyperthermophiles sont de ce fait très caractéristiques des fumeurs noirs.

Plusieurs taxons d'hyperthermophiles colonisent les fumeurs noirs

Les taxons colonisateurs sont des producteurs primaires chimiolithotrophes. Au-dessus de 90°C, les archées anaérobiques strictes dominant et représentent jusqu'à 90% des micro-organismes à l'intérieur des conduits où les températures sont plus élevées. Les taxons clefs sont notamment les Méthanococcales, Méthanosarcinales, Ar-

chaeoglobales, Thermococcales, Desulfurococcales et quelques bactéries comme les Aquificae ou Thermotoga.

Endémiques ou distribués globalement ?

Souvent considérés comme endémiques à ce type d'habitat une analyse de profondeur de séquençage importante (63 millions de gènes 16S ARNr), montre que les genres identifiés dans l'océan contiennent jusqu'à 99,9 % des lectures provenant des sources hydrothermales. Des micro-organismes des eaux de surface sont aussi détectés près des sources hydrothermales conduisant les auteurs à conclure que "tout est vraiment partout".

Les fumeurs noirs sont colonisés rapidement

Les hyperthermophiles reconnaissent leur substrat

Si les hyperthermophiles peuvent survivre dans les eaux froides, ils réagissent très rapidement à la présence de haute température et adoptent une nage en zigzag plus lente à l'approche d'un substrat adéquate. Des enregistrements vidéo de microscopie optique à haute température montrent que *Pyrococcus furiosus* (Thermococcales) et *Methanocaldococcus villosus* (Méthanococcales), deux archées des sources hydrothermales, se fixent à l'aide de leurs flagelles à des fragments de fumeurs noirs.

Un nouveau paradigme pour l'origine de la vie

La présence à la surface des cheminées hydrothermales d'un courant électrique, lié à des différences de potentiel entre le fluide hydrothermal réducteur et l'eau de mer oxygénée, suggère l'existence de microor-

ganismes électrotrophes.

A la recherche de communautés électrotrophes

En imitant la surface conductrice des cheminées hydrothermales [4] ont observé le développement de biofilms électrotrophes dominés par des archéoglobales présentant une activité métabolique soutenue générant divers composés organiques. La présence de nombreux hétérotrophes, dans des conditions initialement autotrophes, suggère l'existence de relations trophiques au sein de ces communautés électrotrophes.

Conclusion

Malgré les progrès réalisés pour l'échantillonnage et les techniques pour étudier in vivo et in vitro ces milieux extrêmes, la colonisation microbienne des nouvelles cheminées hydrothermales reste encore mal comprise. La découverte d'archées électrotrophes pointe la diversité des modes trophiques de ces micro-organismes et ravive le questionnement sur l'origine de la vie. Le séquençage des gènes d'ARNr révèle l'océan comme une "banque" de micro-organismes, tant extrêmophiles que non-extrêmophiles, avec la réserve que ces techniques ne différencient pas les cellules vivantes des mortes.

Une compréhension adéquate de la colonisation exigerait un suivi temporel, une tâche complexe dans ces environnements difficiles d'accès.

Références

1. DICK, G. J. The microbiomes of deep-sea hydrothermal vents : distributed globally, shaped locally. *Nature Reviews Microbiology* 17, 271-283. (2024) (mai 2019).
3. WIRTH, R. Colonization of Black Smokers by Hyperthermophilic Microorganisms. *Trends in Microbiology* 25, 92-99. (2023) (fév. 2017).
4. PILLOT, G. et al. Identification of enriched hyperthermophilic microbial communities from a deep-sea hydrothermal vent chimney under electrolithoautotrophic culture conditions. *Scientific Reports* 11, 14782. (2024) (20 juill. 2021).

5. GONNELLA, G. *et al.* Endemic hydrothermal vent species identified in the open ocean seed bank. *Nature Microbiology* 1. Number : 8 Publisher : Nature Publishing Group, 1-7. (2023) (13 juin 2016).

6. WIRTH, R., LUCKNER, M. & WANNER, G. Validation of a Hypothesis : Colonization of Black Smokers by Hyperthermophilic Microorganisms. *Frontiers in Microbiology* 9, 524. (2023) (21 mars 2018).

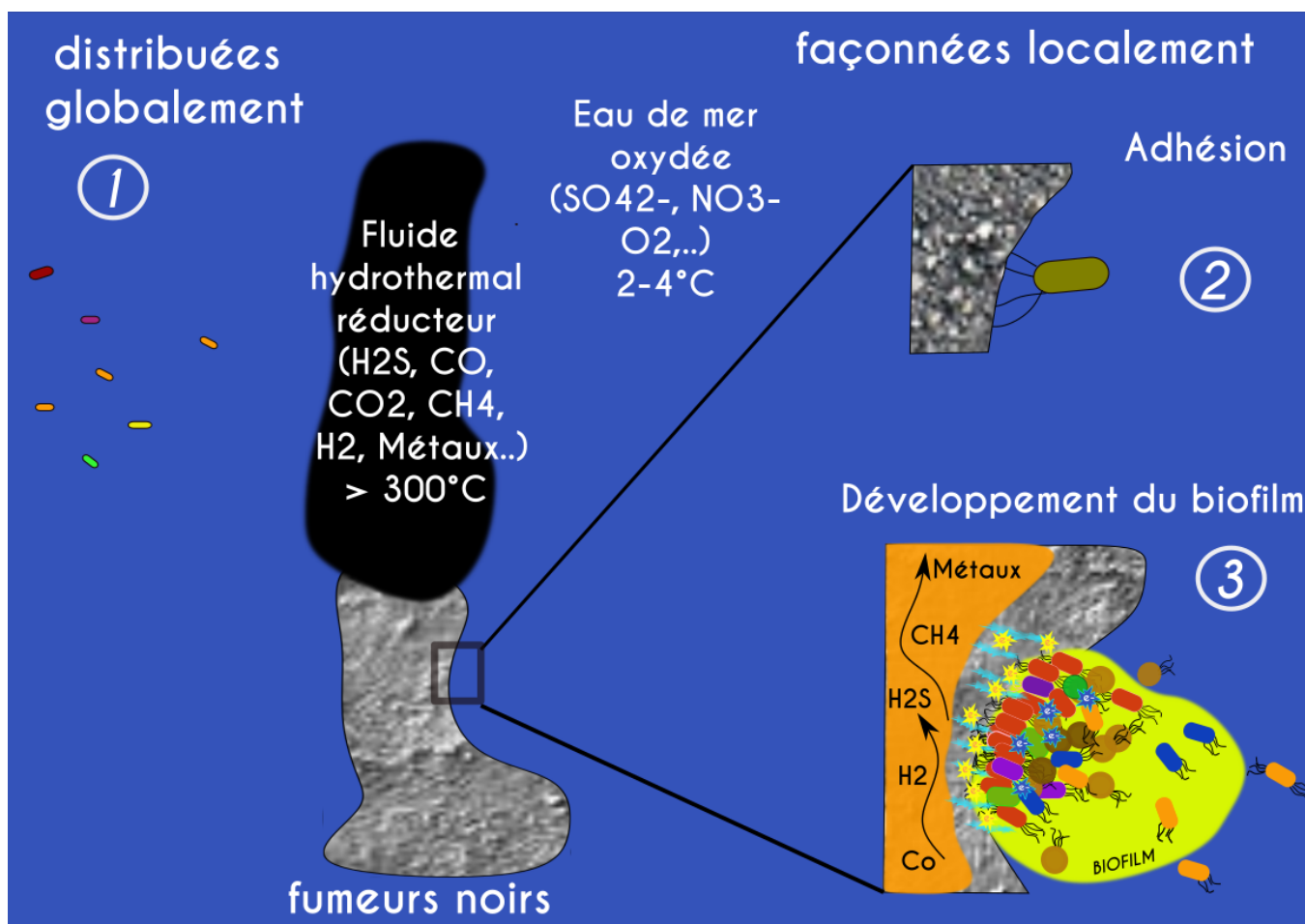


FIGURE 1 – Représentation schématique des étapes de la colonisation d'un fumeur noir par les micro-organismes (1) Distribuées globalement dans l'océan [5], les micro-organismes adoptent un état de dormance, soit jusqu'à leur décomposition si les conditions restent défavorables, soit jusqu'à leur rencontre d'environnements favorables à leur croissance. (2) Attirés par la chaleur les hyperthermophiles adhèrent rapidement aux surfaces des cheminées par leurs flagelles [6] et (3) constituent ensuite des biofilms électrotrophes [4]. Les conditions environnementales locales, essentiellement la composition chimique des fluides et donc la nature des roches lessivées et des cheminées façonnent ensuite ces communautés localement [1].

CHAUD DEVANT ! LES HYPERTHERMOPHILES ET LEURS STRATÉGIES MÉTABOLIQUES AUDACIEUSES

par SARAH DOUDOUH

Introduction

Une découverte fortuite qui sera un apport de connaissance considérable sur les microorganismes hyperthermophiles. Ils se sont adaptés aux conditions extrêmes auxquelles ils sont confrontés quotidiennement. En effet, ces adaptations montrent à quel point les sources hydrothermales sont des environnements extrêmes avec des conditions physico-chimiques voisines de celles de la Terre primitive. Les mécanismes employés, pour certains, étaient encore inconnus jusqu'à présent. De ce fait, seront évoquées ici différentes adaptations acquises par ces bactéries et Archées. Ces marqueurs génétiques participent à la synthèse de protéines qui sont en lien à cette résistance aux conditions extrêmes. Dans le monde moderne, ces découvertes sont utilisées en biotechnologies. Deux axes seront abordés, le premier concerne leurs résistances aux conditions extrêmes, le second leur mode de fonctionnement.

Résistances aux conditions extrêmes

Quels sont les différents type de conditions extrêmes

Les conditions extrêmes sont des milieux hypo/hyper-salins, des pH très acides, ou très basiques. Il y a aussi les fortes températures et les pressions hydrostatiques. Ces différentes conditions interviennent simultanément, on parle de stress croisé, qui font que les micro-organismes hyperthermophiles s'adaptent à la situation pour rester en vie et se développer. [7]

Les solutions apportées

Il y aurait trois principaux facteurs responsables de la thermo-

stabilité : le raccourcissement des boucles protéiques, l'augmentation de la compacité des protéines, et la présence de grands réseaux d'ions sur la surface de la protéine.

[8]. Les réactions chimiques des mésophiles, ne sont pas applicables pour les hyperthermophiles puisque les protéines des mésophiles seraient dénaturées à de si hautes températures. De ce fait, il a été montré que les hyperthermophiles ont une équivalence de la glycolyse via d'autre enzyme thermorésistante.

[9] De plus, il a été découvert que la forte présence de la protéine hydrogénase [FeFe] participe à une réponse adaptée aux différents stress causés par l'environnement extrême. D'autres archées possèdent différentes formes de la protéine, ce qui émet l'hypothèse de ce qui est plus favorable pour les hyperthermophiles.

[10]

Son mode de fonctionnement

Plusieurs gènes impliqués dans ces adaptations

Vivre à des températures extrêmes comme sur les fumeurs implique forcément des stress croisés, étant donné que la profondeur est extrême donc ce sont des piézophiles. Il a été démontré que l'équipement génétique de ces extrêmophiles répond à trois sortes de stress qui peuvent varier (environ 62% alors que la quantité de gènes répondant à un seul stress est de 1,57%.

[7]

Leurs adaptations peuvent participer aux actions humaines

Il avait été déjà démontré que l'hydrogène a un rôle crucial comme source d'énergie dans les sources

hydrothermales. Cependant, le rôle des hyperthermophiles dans ce cycle n'est pas connu. Plusieurs hyperthermophiles provenant de dorsales océaniques, ont été testés pour savoir qui en produisait le plus et comment font-elles? De ce fait, il a été découvert que les hyperthermophiles possédaient l'enzyme hydrogénase [FeFe] sous plusieurs formes. Ces différentes formes, interviennent de manière positive sur ce cycle. D'où la production en flèche d'hydrogène. Ce qui peut être intéressant pour la biotechnologie, comme source d'énergie. [10]

Conclusion

Les conditions extrêmes dans lesquelles vivent les hyperthermophiles sont similaires au début de la terre. Étudier ces mécanismes reviendrait à élucider certains mystères de la vie primitive et comment ont-elles évoluées.

[7] Les adaptations métaboliques acquises tout au long de leur existence ont un impact considérable pour leur survie. [11] De ce fait, certaines adaptations métaboliques peuvent participer à l'évolution de la biotechnologie, telle que leur intérêt pour l'hydrogène. [10]

Références

- ZHAO, W. *et al.* Cross-stress adaptation in a piezophilic and hyperthermophilic archaeon from deep sea hydrothermal vent. *Frontiers in Microbiology* 11, 2081 (2020).
- CAMBILLAU, C. & CLAVERIE, J.-M. Structural and genomic correlates of hyperthermostability. *Journal of Biological Chemistry* 275, 32383-32386 (2000).
- BORGES, N. *et al.* Biosynthetic pathways of inositol and glycerol phosphodiester used by the hyperthermophile *Archaeoglobus fulgidus* in stress adaptation. *Journal of bacteriology* 188, 8128-8135 (2006).
- JIANG, L. *et al.* Thermophilic hydrogen-producing bacteria inhabiting deep-sea hydrothermal environments represented by *Caloranaerobacter*. *Research in microbiology* 166, 677-687 (2015).
- STETTER, K. O. History of discovery of the first hyperthermophiles. *Extremophiles* 10, 357-362 (2006).

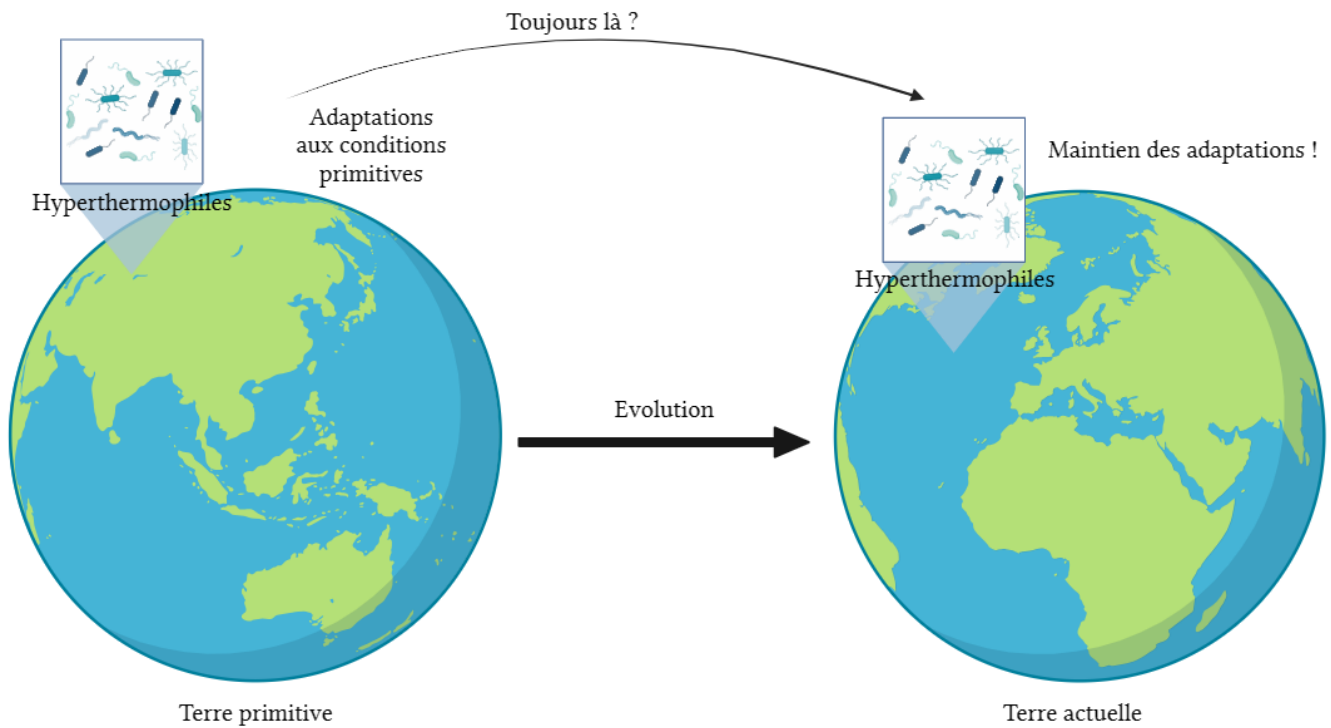


FIGURE 2 – **Schéma représentant la résistance des hyperthermophiles au cours du temps via leurs caractéristiques.** Les hyperthermophiles étaient déjà présentes à l'état même de la Terre primitive. Elles ont développé des stratégies pour survivre aux conditions auxquelles elles étaient confrontées. De nos jours, la Terre a bien évolué et n'est plus à son état primitif. Cependant, les hyperthermophiles sont encore présentes. Elles sont présentes dans les sources hydrothermales. Cela amène à dire deux choses. La première étant qu'elles sont toujours là car elles maintiennent leurs adaptations. Et deuxièmement, cela amène une preuve de comment était la Terre primitive.

FINIS LES FOSSILES, PLACE AUX HYPERTHERMOPHILES !

par SIRINE SOUSSI

Introduction

Ces hyperthermophiles, avec leurs différents métabolismes, suscitent un grand intérêt pour l'industrie. En effet, leurs métabolismes et leurs capacités d'adaptations peuvent être utilisés dans plusieurs domaines, tels que la production de lessives, dans le compostage de déchets, ainsi que la production de biocarburants. Sur ce dernier point, il a été mis en évidence que grâce aux enzymes hydrogénases, les hyperthermophiles étaient capables de produire de l'hydrogène à partir du glucose : un biocarburant dont l'utilisation ne produit que de l'eau et donc sans émission de gaz à effet de serre. [12]

La mise à profit de cet hydrogène produit en milieu extrême

L'intérêt du biohydrogène

La production de bio hydrogène présente plusieurs avantages potentiels. Notamment le fait qu'il soit développé à partir de sources renouvelables. Ces processus de développement peuvent être effectués de manière plus respectueuse de l'environnement. Il en découle une atténuation de l'impact environnemental résultant de l'extraction et la combustion d'énergies fossiles, et à terme une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le bio hydrogène peut être à la suite utilisé dans divers domaines, tel que les transports, l'industrie et la production d'électricité.

Le bio hydrogène offre donc des perspectives prometteuses en ce qui concerne la durabilité et la diversification des sources d'énergies.

Les hyperthermophile productrices d'hydrogène

Parmi ces sources renouvelables on peut y noter les microorganismes tels que les hyperthermophiles. Plusieurs stratégies, par fermentation, ont été explorées pour améliorer la production d'hydrogène à partir du glucose. En effet il a été démontré que l'ingénierie métabolique peut améliorer les rendements en manipulant les voies natives des hyperthermophiles ou en introduisant de nouvelles voies (non-natives).[13]

Différentes espèces pour un panel d'utilisations différentes

Thermogata neapolitana

Thermogata neapolitana, une espèce hyperthermophile, possède un potentiel élevé pour la production d'hydrogène par fermentations mais aussi de l'acide lactique, amenant à de nouvelles perspectives intéressantes pour la gestion de produits agricoles. Des déchets agroalimentaire et biomasse algale pourraient être utilisés comme substrat pour la fermentation. Une amélioration des rendements serait aussi possible avec des potentiels couplage avec d'autres processus biologiques. [14]

Aquifex aecolius

Aquifex aecolius, des hyperthermophiles qui se trouvent en milieu

marin peu profond, attirent l'attention des industries pour ses hydrogénases. Les hydrogénases sont des enzymes dont l'un des rôles est de catalyser la réaction de production d'hydrogène. En plus de produire de l'hydrogène elles peuvent être utiliser comme pile à combustible biologique, qui remplacerait des catalyseurs chimiques. En utilisant la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène elles permettent de convertir l'énergie de manière durable. [15]

Conclusion

Les hyperthermophiles suscitent aussi l'intérêt de l'industrie pour d'autres domaines, tels que le textile, le compostage expliqué par leurs adaptations à de grandes températures et des conditions environnementales extrêmes. Elles peuvent être aussi un moteur vers une consommation plus respectueuse de l'environnement. Ces hyperthermophiles éveillent aussi des problématiques sur la vie en dehors de notre planète où des conditions extrêmes sont au rendez-vous. [willey_prescott_2008]

Références

12. JIANG, L. *et al.* Thermophilic hydrogen-producing bacteria inhabiting deep-sea hydrothermal environments represented by *Caloranaerobacter*. en. *Research in Microbiology* **166**, 677-687. (2023) (nov. 2015).
13. VERHAART, M. R., BIELEN, A. A., OOST, J. V. D., STAMS, A. J. & KENGEN, S. W. Hydrogen production by hyperthermophilic and extremely thermophilic bacteria and archaea : mechanisms for reductant disposal. en. *Environmental Technology* **31**, 993-1003. (2023) (juill. 2010).
14. PRADHAN, N. *et al.* Hydrogen Production by the Thermophilic Bacterium *Thermotoga neapolitana*. en. *Int J Mol Sci* **16**, 12578-12600 (juin 2015).
15. GUIRAL, M. *et al.* en. in *Advances in Microbial Physiology* 125-194 (Elsevier, 2012). ISBN : 978-0-12-394423-8. (2024).

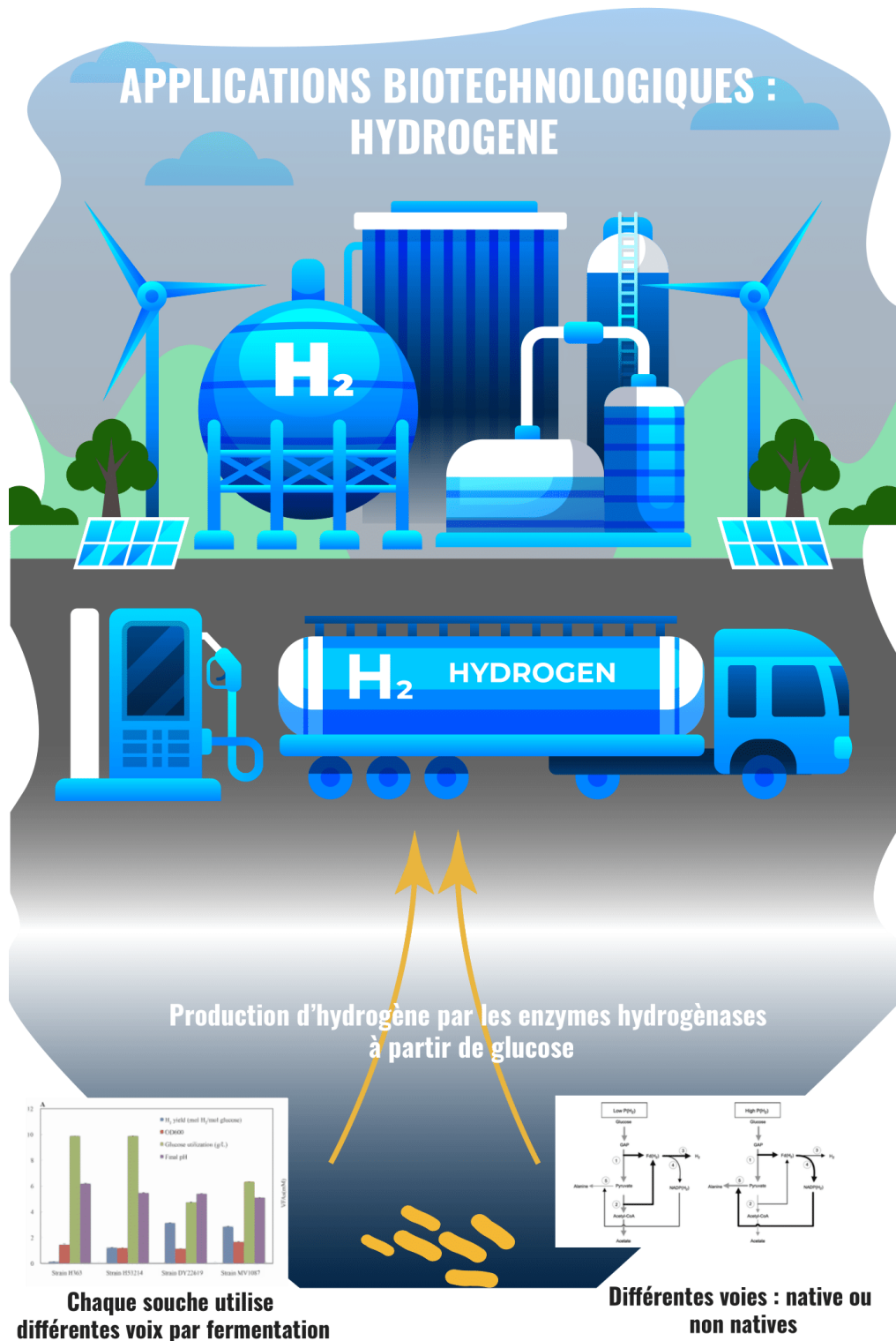


FIGURE 3 – **Production d'hydrogène et leur différentes utilisations** A partir des hydrogénases contenues dans les hyperthermophile, de l'hydrogène est produit est utilisé dans différents domaines de l'industrie : Le biocarburant, pile a combustible, énergie renouvelable (éolienne)...

DES AMOUREUX DE L'EXTRÊME JUSQUE DANS L'ESPACE

par EMILIE TRIPOGNEZ

Introduction

Les conditions dans ces milieux sont extrêmes (température, pression, pH...). Malgré ces conditions, la vie persiste [16].

Les communautés bactériennes, vivants à des températures extrêmes remettent en question les limites et l'origine de la vie et posent la question de la vie sur d'autres planètes.

Ces bactéries sont souvent difficilement accessibles et donc nécessitent des techniques particulières d'identification dans les environnements extrêmes sur Terre et dans d'autres milieux du système solaire [2, 16-18].

Les hyperthermophiles dans les milieux extrêmes terrestres

Méthodes d'isolements et d'identification

Pour identifier les bactéries, l'isolement est crucial. Les gels d'agar ne sont pas adaptés aux hyperthermophiles. Dû à leurs température et donc à leurs incapacité à croître sur des surfaces solides, des microscopes laser (laser Nd-YAG, 1064 nm) ont été développés. Il est alors possible de piéger et de manipuler optiquement des cellules individuelles.

Expérimentation sur les hyperthermophiles du Sol d'un volcan Actif Pisciarelli Solfatara

L'étude des extrémophiles strictement anaérobies du volcan actif Pisciarelli Solfatara a permis d'identifier des hyperthermophiles tels que *Thermoproteus*, *Pyrobaculum*, *Thermococcus* par analyses de séquences du gène ARNr 16S et phylogénétiques. Des expériences d'hybridation in situ semi-quantitatives ont confirmé des densités voisines à 10^7 cellules par gramme de substrat (sédiment ou eau).

Les hyperthermophiles dans l'espace interstellaire

Méthode d'analyse en chambre de simulation atmosphérique

Des expéditions spatiales ont été réalisées afin de confirmer ou affirmer la présence d'hyperthermophiles extra-terrestres. Cependant, elles sont rares, longues et coûteuses. Pour pallier cela, des chambres de stimulation, ont été configurées en utilisant des techniques telles que la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS, QMS), et la spectrométrie infrarouge.

Expérimentation réalisée sur l'espèce *Thermotoga neapolitana*

L'espèce *T. neapolitana*, un hyperthermophile anaérobie originaire d'un fumeur-noir de la baie de Naples, a été soumise à des conditions similaires à celles de Mars (température, radioactivité et pression). Après identification, la souche a été centrifugée pendant 10 minutes et incubée pendant trois mois à des températures variées (-196°C à 90°C). La densité optique mesurée (D.O 540 nm) a révélé la capacité de *T. neapolitana* à résister au stress induit.

Des axes de recherches spécifiques aux hyperthermophiles

Importance des hyperthermophiles dans l'origine de la vie

Avant 4,4 milliard d'années, la Terre pouvait ressembler à un océan de magma avec de denses vapeurs d'eau. Un déclin des températures a permis la stabilisation des conditions sur terre et des environnements propices à la vie. Avant ce refroidissement des micro-organismes auraient pu survivre à ces conditions. Pour comprendre l'origine de la vie, l'organisation de l'arbre phy-

logénétique est indispensable. Il a pu être développé avec l'isolement, la comparaison de gènes de l'ARNs 16S des micro-organismes, et l'étude des fossiles microbiens [2, 16, 19].

Importance des hyperthermophiles dans les recherches en astrobiologie et en exobiologie

L'étude de ces bactéries est essentielle dans les recherches en astrobiologie et exobiologie. Les lois physiques et chimiques ont des principes universels qui permettent d'émettre l'hypothèse que la vie pourrait être présente ailleurs. L'étude des hyperthermophiles des milieux extrêmes terrestres a permis la comparaison avec ceux de Mars, Titan, ou encore Europe (lune de Jupiter) [2, 16, 19].

Conclusion

Des études récentes (spatiales et en laboratoire), ont enrichi nos connaissances sur ces bactéries, constamment repoussant les limites de la vie. Pour les futures recherches, de nouvelles missions spatiales sont nécessaires pour accroître notre compréhension, tout comme le développement de nouvelles stratégies de culture microbiennes dans des environnements extrêmes. Il est également crucial d'élargir les collections de cultures microbiennes isolées.

Références

- JACK FARMER. Thermophiles, early biosphere evolution, and the origin of life on Earth : Implications for the exobiological exploration of Mars. en *Journal of Geophysical Research : Planets* **103**, 28457-28461. (2023) (1998).
- MERINO, N. et al. Living at the Extremes : Extremophiles and the Limits of Life in a Planetary Context. en *Frontiers in Microbiology* **10**, 780. (2023) (avr. 2019).
- SCHULTZ, J., dos SANTOS, A., PATEL, N. & ROSADO, A. S. Life on the Edge : Bioprospecting Extremophiles for Astrobiology. en *Journal of the Indian Institute of Science* **103**, 721-737. (2023) (juill. 2023).
- HUBER, R., HUBER, H. & STETTER, K. Towards the ecology of hyperthermophiles : biotopes, new isolation strategies and novel metabolic properties. en *FEMS Microbiology Reviews* **24**, 615-623. (2023) (déc. 2000).
- MASTASCUSA, V. et al. Extremophiles Survival to Simulated Space Conditions : An Astrobiology Model Study. en *Origins of Life and Evolution of Biospheres* **44**, 231-237. (2023) (sept. 2014).

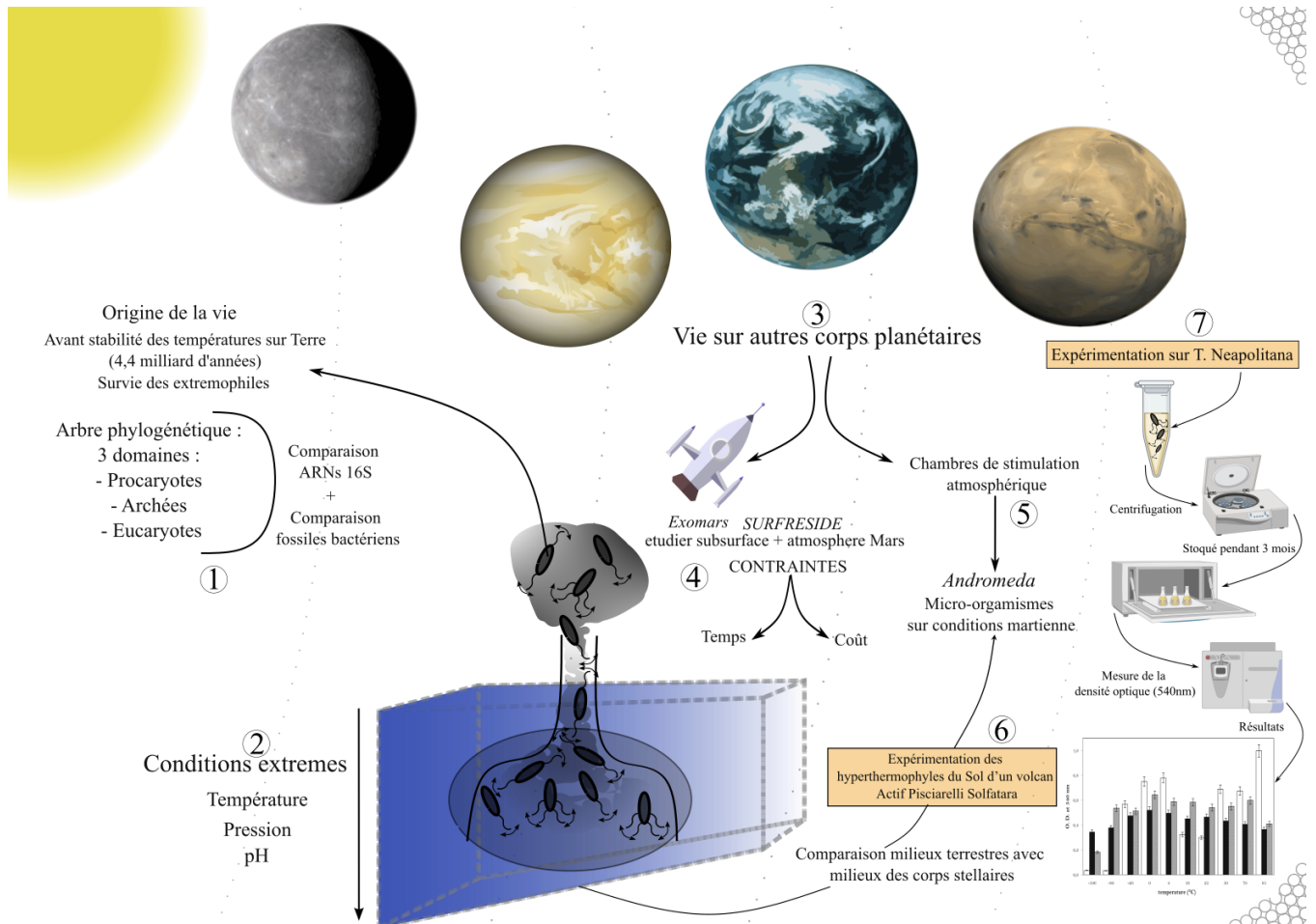


FIGURE 4 – Les hyperthermophiles à l'origine de la vie, en quête vers l'espace. (1) Origine de la vie et méthode pour le développement de l'arbre phylogénétique (2) Conditions extrême des fumeurs noirs (3) Différentes méthodes d'étude des hyperthermophiles (4) Exploration spatiale et leurs contraintes (5) Chambre de stimulation atmosphérique (6) Expérimentation en laboratoire d'hyperthermophiles dans les milieux terrestres (volcan) (7) Expérimentation en laboratoire d'hyperthermophiles sous les conditions de Mars.

CONCLUSION

Les hyperthermophiles sont des micro-organismes, pour la plupart des archées, peuplant les milieux extrêmes des fumeurs noirs, caractérisés par des fluides acides et réducteurs de température élevée. Leur étude revêt un intérêt scientifique considérable tant du point de vue fondamental que du point de vue appliqué. En effet, ces micro-organismes ont développée des adaptations particulières qui leur permettent de prospérer dans de tels environnements. Ainsi ils tirent leur énergie non pas de la lumière mais des composés chimiques présents dans les fluides hydrothermaux et présentent une stabilité thermique de leurs protéines à ces hautes températures. Leur métabolisme particulier a rapidement conduit à des développements biotechnologiques et notamment à la production de biohydrogène. Elles présentent de nombreux avantages et de perspective en matière de durabilité. Les hyperthermophiles seraient assez ubiquistes puisque trouvés en état de dormance dans l'océan et réagissent très rapidement à la présence d'un environnement favorable, cela pourrait tout aussi bien être le cas dans l'espace. Des recherches récentes ont révélé l'existence d'archées électrotrophes capables d'utiliser le courant généré par des différences de potentiel entre le fluide réducteur des fumeurs et l'eau environnante oxydée comme source d'énergie [4]. Les hyperthermophiles continuent de ce fait à susciter un intérêt scientifique afin d'élargir les connaissances sur les limites et l'origine de la vie tant sur Terre que dans l'espace [2, 16].

— Noé Charmasson, Sirine Soussi, Émilie Tripognez, Sarah Doudouh

Références

1. DICK, G. J. The microbiomes of deep-sea hydrothermal vents : distributed globally, shaped locally. *Nature Reviews Microbiology* **17**, 271-283. (2024) (mai 2019).
2. JACK FARMER. Thermophiles, early biosphere evolution, and the origin of life on Earth : Implications for the exobiological exploration of Mars. en. *Journal of Geophysical Research : Planets* **103**, 28457-28461. (2023) (1998).
16. MERINO, N. *et al.* Living at the Extremes : Extremophiles and the Limits of Life in a Planetary Context. en. *Frontiers in Microbiology* **10**, 780. (2023) (avr. 2019).

Origines de la vie

INTRODUCTION

Au cours de l'Hardéen, entre 4,4 Ga et 4,3 Ga, la Terre réunit les conditions physico-chimiques qui permettent l'apparition de la vie. Une de ses conditions, est la présence d'eau à l'état liquide qui permettra l'organisation du vivant grâce à des processus comme les interactions hydrophobes; nous pouvons imaginer l'océan comme une soupe prébiotique. Tout d'abord, nous commencerons par introduire la façon dont les premiers organismes se sont développés sans oxygène. Pour cela, nous étudierons différents paramètres qui ont influencés l'apparition des premières formes vie [20].



Ces premières formes de vie, que nous aborderons par la suite, sont apparues dans les océans et des molécules organiques formées de façon abiotique sont leur source de matière. Mais sans traces de ces événements, l'apparition de la vie s'explique de façon théorique. Nous ferons un lien avec les premières formes d'organismes développées grâce à l'apparition du dioxygène [21].

Enfin, grâce à l'arbre phylogénétique de la vie, ou LUCA (Last Universal Common Ancestor) est représenté, nous aborderons la diversification des organismes, dont leur caractères, lorsqu'ils sont avantageux, seront conservés dans l'évolution [20].

Il s'agira ainsi de nous questionner sur la façon dont l'abiogenèse a facilité la modification des paramètres abiotiques ayant permis l'apparition de la vie; et par la suite sa diversification et sa complexification.

— Bianca Luppino, Émilie Bonnet, Tom Noailles

Références

20. GARGAUD, M., MONTMERLE, T., PASCAL, R., LOPEZ-GARCIA, P. & MARTIN, H. *LE SOLEIL, LA TERRE... LA VIE : LA QUÊTE DES ORIGINES* ... ISBN : 978-1-119-77064-0 (BELIN : POUR LA SCIENCE, France, 2009).
21. FRYER, P. et al. Mariana serpentinite mud volcanism exhumes subducted seamount materials : implications for the origin of life. eng. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **378** (2165 fév. 2020).

LES INGRÉDIENTS DE LA RECETTE DE LA SOUPE ORIGINELLE, AVANT L'AJOUT DE DIOXYGÈNE

par BIANCA LUPPINO

Introduction

La formation et la réplication des premières formes de vie ont été en partie influencées par les minéraux. Des études examinent les communautés aux origines de la vie avant l'arrivée de l'oxygène, offrant des perspectives sur la genèse (développement) des premiers organismes. Ces interactions complexes entre minéraux et processus abiotiques (facteurs physico-chimiques) contribuent à comprendre les paramètres qui ont permis le développement de la vie dans les océans, avant l'apparition du dioxygène [22].

Est présenté ici : 1) Les minéraux sont la base de la recette, 2) Ajouter des Monts Sous-Marins et de la Vie Microbienne, 3) Ne pas hésiter à mélanger ses propres théories, 4) Le tout dans des environnements hydrothermaux Alcalins.

Les minéraux sont la base de la recette

Les minéraux ont occupé un rôle crucial dans la compréhension de l'origine de la vie dans les océans, en favorisant la formation et la réplication des premières formes de vie. Lors d'études, des minéraux tels que le calcium, les carbonates de baryum et de silice de strontium (Garcia-Ruiz et Amoros, 1981) furent synthétisés *in vitro*, afin de comprendre leur influence sur les premiers organismes; la montmorillonite et la kaolinite sont identifiées comme support primaire de l'évolution génétique. Les caractéristiques des minéraux, telles que la protection contre les rayonnements UV, la concentration en molécules, l'organisation moléculaire, la catalyse de la polymérisation, ont conduit à l'hypothèse que la vie a émergé à partir de miné-

raux et d'argiles. Des facteurs abiotiques de l'ère précambrienne, tels que la lumière solaire, la température, la pression atmosphérique, et le pH, ont également été considérés comme essentiels dans l'origine de la vie, bien que des expériences aient montré le rôle de la lumière UV dans la synthèse de biomolécules (composés chimiques que l'on trouve dans les organismes vivants). La compréhension des origines de la vie sur Terre est permise grâce à des facteurs abiotiques contribuant à interpréter la façon dont les premières cellules sont arrivées et ont été maintenues dans des conditions variées [21].

Ajouter des Monts Sous-Marins et de la Vie Microbienne

En 2020, les expéditions de l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA) ainsi que l'expédition 366 du programme international de découverte des océans (IODP), dans la région de la fosse des Mariannes du Pacifique occidental, ont permis d'étudier des matériaux récupérés dans une coulée de boue de serpentinite. Ces matériaux indiquent des pressions et des températures plus basses que celles du fond marin abyssal pendant la subduction. L'étude suggère que même dans des conditions, apparemment stériles, des communautés microbiennes viables pourraient persister à des profondeurs moins importantes dans la plaque descendante. De ce fait, elle remet en question l'idée que la vie chimiosynthétique (métabolismes à partir de sa source d'énergie chimique inorganique) trouve son origine uniquement dans les systèmes hydrothermaux en milieu océanique. Cela suggère que

des environnements de serpentinisation associés aux monts sous-marins subducteurs, pourraient favoriser la transition des conditions abiotiques vers l'évolution des cellules vivantes [23].

Ne pas hésiter à mélanger ses propres théories

L'examen des premières théories sur l'origine de la vie met en lumière des approches similaires à la biologie synthétique moderne (programmation et construction de nouveaux systèmes biologiques à l'aide d'un ADN synthétisé de manière artificielle). La théorie du monde fer-soufre de Günter Wächtershäuser (1990) contourne la question de l'hérédité et de la réplication en mettant l'accent sur la disponibilité de gradients d'énergie (ions pouvant se déplacer à travers une membrane); c'est-à-dire le taux d'augmentation de la température dans le sous-sol à mesure que l'on s'éloigne de la surface. Les réplicateurs (entité capable de se reproduire à l'identique) ont évolué de façon à peupler leurs environnements et se diversifier, c'est pourquoi ils doivent faire face à des taux d'erreurs non nuls dans le processus de transfert d'informations. Au cours de cette évolution, il y a eu des ajustements dans la perméabilité des compartiments grâce à "l'encapsulation", jouant un rôle crucial. L'évolution vers des compartiments plus hermétiques a favorisé la division cellulaire et l'organisation du matériel génétique en chromosomes. Les membranes ont également une influence sur la capacité des cellules à récupérer de l'énergie. Les résultats suggèrent une influence de la perméabilité de la membrane sur l'utilisation d'ions pour la phosphorylation,

montrant l'importance des compar-
timents dans l'évolution des êtres vi-
vants [24].

Le tout dans un environnement hydrothermal alcalin

Le dernier ancêtre commun uni-
versel « LUCA », aurait évolué au
sein de gisements minéraux hydro-
thermaux alcalins, ce trouvant à l'in-
terface du fluide, dérivé de serpen-
tinitisation (formation de roche ser-
pentinite) et de l'eau ambiante, tel
que l'eau de mer hadéen faiblement
acide. Contrairement à la Terre mo-
derna, ces environnements n'exista-
ient pas dans la Terre ancienne dé-
pourvue d'oxygène. Les écosystèmes
terrestres et océaniques anoxiques
(sans O₂), abritaient une serpenti-
nisation active, ce qui offre des indica-
tions sur la façon dont les premiers
organismes utilisaient l'hydrogène,
dans des conditions hyperalcalines
appauvries en dioxyde de carbone.
Des résultats suggèrent que des stra-
tégies particulières ont été utilisées
par des organismes pour obtenir de
l'énergie à partir de minéraux. C'est-
à-dire que, que ces organismes ont
exploité des composés géogéniques

(composés chimiques avec carbone
se formant naturellement lors de
processus géologiques) à carbone ré-
duit, tels que le formiate et la gly-
cine, en tant qu'accepteurs d'élec-
trons exogènes dans des conditions
anaérobies. Ces accepteurs auraient
pu constituer des approches viables
pour surmonter des problèmes ther-
modynamiques et obtenir de l'éner-
gie par l'oxydation de l'hydrogène in
situ. Ces stratégies, principalement
présentes dans le domaine bactéri-
en, excluent largement le CO₂ archéen
en tant qu'intermédiaire, et la réduc-
tion de la glycine semble
être limitée aux bactéries, suggé-
rant leur pertinence dans la diver-
gence des domaines bactérien et ar-
chéen. Ainsi, ces différences sou-
ignent des voies métaboliques dis-
tinctes entre ces deux groupes de
microorganismes [21].

Conclusion

Les communautés aux origines
de la vie dans les océans, avant l'ar-
rivée de l'oxygène, ont joué un rôle
fondamental dans le développement
et l'évolution de la vie sur Terre.
Les interactions entre les minéraux

révèlent leur rôle crucial dans la
formation et la réplication des bio-
molécules. Les études montrent que
l'évolution sans oxygène des pre-
mières cellules, est principalement
due aux caractéristiques des miné-
raux, combinées aux facteurs abio-
tiques de l'ère précambrienne. Ces
premières formes de vie, majori-
tairement constituées de microor-
ganismes anaérobies, ont prospéré
dans des environnements dépour-
vus d'oxygène. Leurs interactions
complexes, leurs processus métabo-
liques et leur compartimentation,
ont contribué à façonner les condi-
tions de la Terre primitive, créant
ainsi les bases pour l'émergence de
formes de vie plus complexes.

Références

20. GARGAUD, M., MONTMERLE, T., PASCAL, R., LOPEZ-GARCIA, P. & MARTIN, H. *LE SOLEIL, LA TERRE... LA VIE : LA QUÊTE DES ORIGINES ...* ISBN : 978-1-119-77064-0 (BELIN : POUR LA SCIENCE, France, 2009).
21. FRYER, P. *et al.* Mariana serpentinite mud volcanism exhumes subducted seamount materials : implications for the origin of life. *eng. Philosophical Transactions of the Royal Society A* **378** (2165 fév. 2020).
22. CALIARI, A. *et al.* The requirement of cellularity for abiogenesis. *eng. Computational and structural biotechnology journal* **19**, 2202-2212 (avr. 2021).
23. NOBU, M. K. *et al.* Unique H₂-utilizing lithotrophy in serpentinite-hosted systems. *eng. The ISME Journal* **17**, 95-104 (jan. 2022).
24. CUÉLLAR-CRUZ, M. & CUÉLLAR-CRUZ, M. Influence of Abiotic Factors in the Chemical Origin of Life : Biomorphs as a Study Model. *eng. ACS Omega* **6**, 8754-8763 (13 2021).

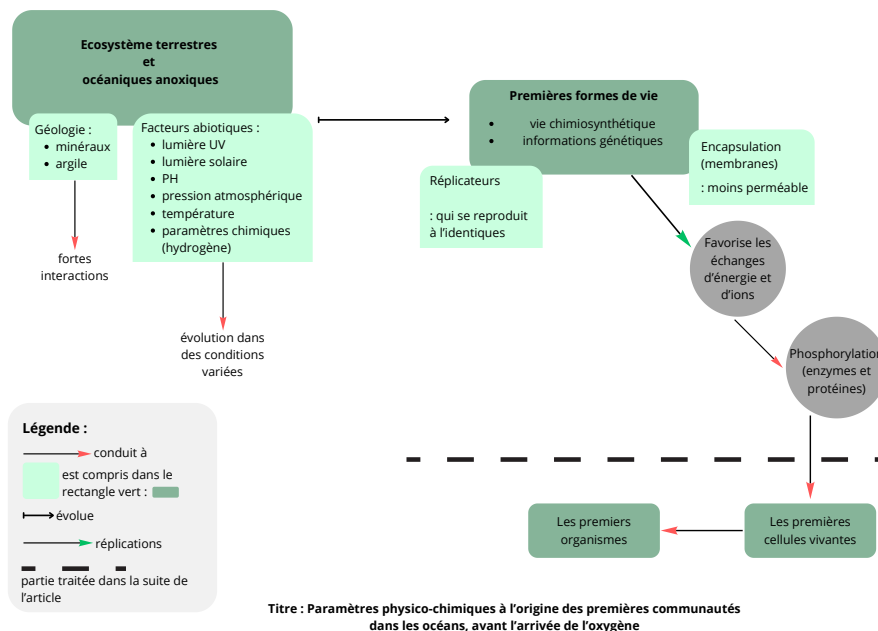


FIGURE 5 – Paramètres physico-chimique à l'origine des premières communautés dans les océans, avant l'arrivée de l'oxygène

AJOUTONS LE LIEN ENTRE LES ORGANISMES ET L'APPARITION DU DIOXYGÈNE

par EMILY BONNET

Introduction

Il est difficile d'obtenir des dates précises aux événements correspondants à l'émergence de la vie. Il se peut que ces événements se soient produits une seule fois ou bien précédés par d'autres tentatives sans résultats. Une suite d'événements contingents qui ont eu des conséquences sur la surface de la Terre, comme par exemple des processus d'auto-organisation. Ces processus transforment la matière, en énergie permettant l'évolution de l'environnement. Nous ne disposons d'aucune trace du début, c'est-à-dire depuis que les premières conditions se sont à priori réunies rendant possible l'émergence de la vie. C'est pourquoi aucune trace concrète ne pourrait expliquer les processus à l'origine de la transition non-vivant au vivant. [20]

Mais cela ne nous empêche pas de réunir des informations et fournir des hypothèses sur l'apparition et des stratégies de survie des micro-organismes; produisant du dioxygène dans un environnement qui en était initialement dépourvu.

Tout d'abord, un environnement favorable à l'apparition de micro-organismes : les fumeurs hydrothermales. Ces organismes réalisent la photosynthèse grâce à un environnement favorable aux cyanobactéries. Cependant, la photosynthèse n'est pas suffisante pour l'apparition des autres organismes et leur diversification, ce qui nous conduit vers l'hypothèse d'un événement : The Great Oxydation. [25]

Préparons la recette dans un environnement favorable à l'apparition de micro-organismes

Choisissons le saladier de fumeurs hydrothermales noirs

Les champs de fumeurs noirs abritent un écosystème hétérotrophes se nourrissant de matière organique. Les archaebactéries sulforéductrices chimiotrophes, assurent le premier maillon de la chaîne alimentaire : elles tirent leur énergie du soufre et de l'hydrogène, elles sont également une source de carbone organique, qu'elles incorporent à partir de CO₂. Ces bactéries peuvent être associées en symbiose à d'autres organismes. [25]

Ou bien, le saladier de fumeurs hydrothermales blancs

Les fumeurs blancs ont des conditions plus clémentes envers la vie. La température est plus compatible avec le fonctionnement enzymatique de nombreux organismes thermophiles, donc ils possèdent un écosystème riche.

L'hydrogène (H₂) est à la base de certains métabolismes simplifiés. La réaction entre le CO₂ dégazé (par exemple par volcanisme au niveau de la dorsale) et de l'hydrogène (H₂) ce qui permet la formation de méthane. Le méthane est également à la base de certains métabolismes pouvant être apparus au début de l'apparition des premiers organismes. [25]

Et si on ajoute des organismes réalisant la photosynthèse

Mijoter dans un environnement favorable aux cyanobactéries

L'émergence et l'altération des minéraux fournissent des ions et nutriments à l'océan. Le phosphore présent en dix fois plus concentré dans

la croûte continentale, est crucial pour le développement de la vie. L'activité biologique et la biomasse augmente fortement ce qui produit plus d'O₂ et favorise un enfouissement du carbone organique.[25] L'émergence des continents déclenche donc l'oxygénation de l'atmosphère par la photosynthèse.

Les cyanobactéries sont des photo-autotrophes, qui sont les seules à réaliser la photosynthèse oxygénique en brisant la molécule d'eau grâce à l'action de la lumière : il s'agit d'une photolyse contrôlée. Alors l'augmentation en phosphore dans l'eau augmente la quantité de cyanobactéries, mais pas assez pour une oxygénation massive de l'atmosphère. [20]

Un peu de photosynthèse

La photosynthèse oxygénique, réalisée entre autre par les cyanobactéries, est une réaction métaboliques permettant la synthèse de molécules organiques à partir de CO₂, d'eau (H₂O) et d'un apport d'énergie lumineuse, captée par des pigments de type chlorophylle ou bactériochlorophylle. La photosynthèse produit du dioxygène (O₂), oxydant le fer ferreux océanique et permettre la précipitation du fer. L'oxygène est dû à la photosynthèse et est irréversible.[20]

Dans le cas de la photosynthèse oxygénique, le donneur d'électrons est la molécule d'eau. Les bactéries réalisant la photosynthèse oxygénique disposent de deux photosystèmes couplés . Suite à la photolyse de l'eau, les électrons sont transférés à une chaîne de transport impliquant ces deux photosystèmes qui, grâce à l'énergie lumineuse, permet à la fois la production de pouvoir

réducteur sous la forme de NADPH et la production d'énergie utilisable par la cellule sous la forme d'ATP (grâce au couplage chimiosmotique et à l'ATPase membranaire). [25]

Sortir du four la fameuse hypothèse : The Great Oxydation

L'hypothèse de La Grande Oxydation est plus probable que celui d'une oxygénation constant au cours du temps. Puisque dans une atmosphère oxydant, les anomalies isotopiques du soufre sont très rapidement homogénéisées, cependant la préservation de signatures MIF-S démontrées une nécessité d'une atmosphère dépourvue de dioxygène et des autres facteurs. Ceci pointe vers une oxygénation massive de l'atmosphère. Une oxygénation massive permet l'apparition d'autres types d'organismes et de leur diversification en organismes multicellulaires. [25] [20]

Conclusion

Les premiers organismes vivants ont utilisé les molécules organiques formées de façon abiotique comme source de matière. 1er stade : La chimie organique prébiotique devient susceptible de provoquer l'émergence de la vie (vers 4,4 à 4,2 Ga). La fin des impacts météoriques pourrait permettre un développement de micro-organismes. Il fallait que le processus d'évolution ne soit pas interrompu par une destruction totale des organismes. Cependant, il y a 3,9 Ga, la Terre a été soumise à un véritable déluge météoritique : le bombardement tardif intense ou LHB pour Late Heavy Bombardment. Donc Il y a 2 possibilités : - Soit la planète à été complètement stérilisée et une nouvelle phase de gestation de la vie à dû prendre place entre 3,8 et 2,7 Ga. - Soit la vie (ou certaines formes

de vie) a traversé cet événement cataclysmique. 2ème hypothèse possible en regardant l'âge des plus anciennes formes de vie de vie fossiles identifiées (2,7 Ga avérées, 3,5 Ga probables et 3,8 Ga très incertains) qui demontre que le cenancêtre (ancêtre commun hypothétique de tous les organismes cellulaires) a façonné l'évolution des organismes. La photosynthèse et méthanogenèse sont apparus après que les archées et les bactéries ont divergé : la photosynthèse chez les bactéries et la méthanogenèse chez les archées. Donc la photosynthèse est le début d'une des branches de l'arbre phylogénétique mais pas l'ancêtre commun.

[20]

Références

20. GARGAUD, M., MONTMERLE, T., PASCAL, R., LOPEZ-GARCIA, P. & MARTIN, H. *LE SOLEIL, LA TERRE... LA VIE : LA QUÊTE DES ORIGINES* ... ISBN : 978-1-119-77064-0 (BELIN : POUR LA SCIENCE, France, 2009).
25. PONS, M.-L. *La Terre à l'Archéen. Apport des isotopes de métaux de transition (Zn, Fe)* French (déc. 2011), 1-259.

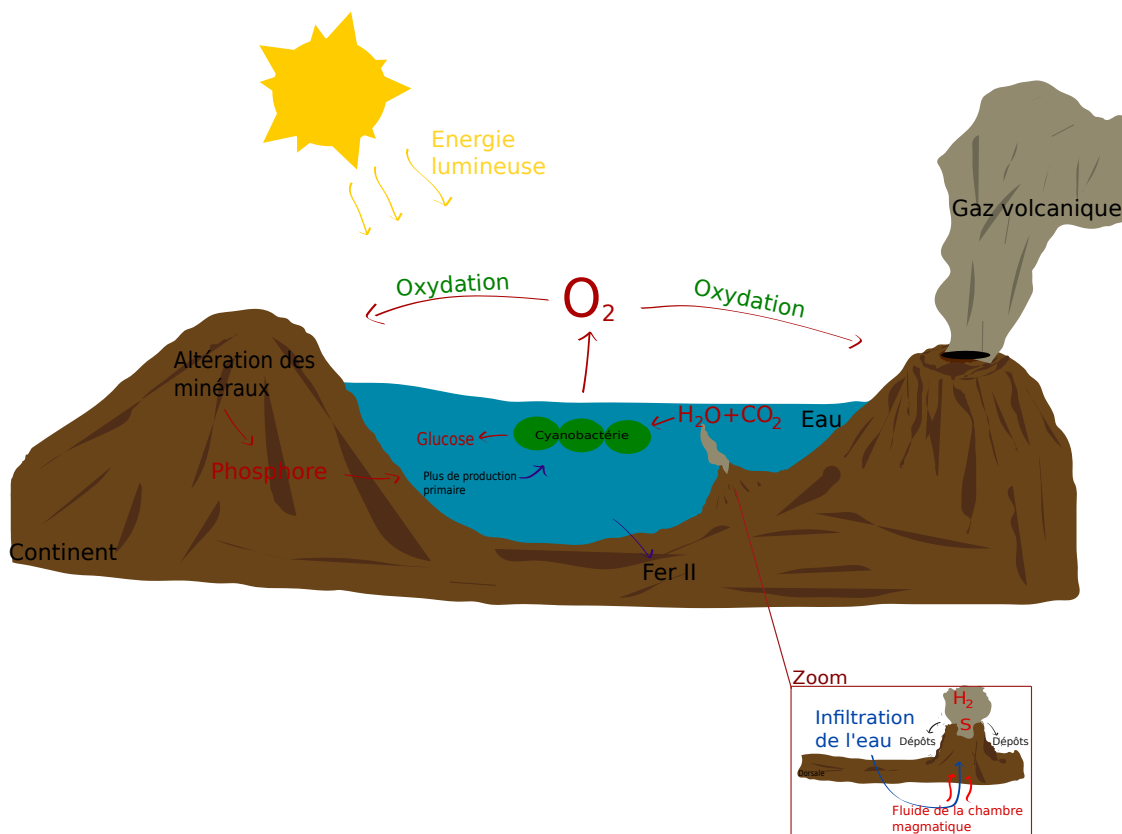


FIGURE 6 – Production d'oxygène par les cyanobactéries grâce aux altérations continentales produisant un environnement favorable

SORTONS DU FOUR LES ORGANISMES QUI SE DIVERSIFIENT AVEC L'APPARITION DU DIOXYGÈNE

par TOM NOAILLES

Introduction

L'apparition du dioxygène a influencé de manière déterminante la façon dont la vie a évolué sur Terre, particulièrement au cours de la période post Grande Oxydation il y a 2,4 milliards d'années. A cette période, la biosphère terrestre était dépourvue d'oxygène ce qui laissait uniquement se développer des organismes vivants anaérobies. Ces organismes ont libéré de grandes quantités de dioxygène dans l'atmosphère en tant que sous-produit de la photosynthèse, cette oxygène a ainsi favorisé l'apparition d'un nouveau type de respiration : La respiration aérobie !

Ajouter un peu d'oxygène pour faciliter l'évolution

L'apparition de la respiration aérobie a bouleversé l'équilibre du vivant par son rendement bien supérieur à la respiration anaérobie. La respiration aérobie a permis aux organismes d'extraire une quantité maximale d'énergie des nutriments cela a eu pour conséquence d'augmenter leur développement et les

leurs diversification.

Une recette facile adapter

Les organismes ayant évolué pour développer la respiration aérobie ont acquis un avantage évolutif significatif, cela leur a permis de coloniser une diversité de milieux, aussi bien aquatiques que terrestres, inaccessibles aux organismes anaérobies. L'apparition de la respiration aérobie a marqué une transition cruciale dans l'histoire évolutive, offrant aux organismes la capacité d'exploiter les avantages liés à la présence d'oxygène dans leur environnement. Les rendant ainsi encore une fois bien plus compétitifs. Dans les milieux aquatiques, tels que les réservoirs d'eau douce ou salée, la respiration aérobie a permis aux organismes de se propager efficacement, s'adaptant plus vite et plus facilement à toutes sortes de conditions. Avant l'évolution de cette capacité métabolique, les organismes anaérobies étaient souvent limités à des zones spécifiques où les paramètres abiotiques étaient extrêmement complexes et restrictifs. La res-

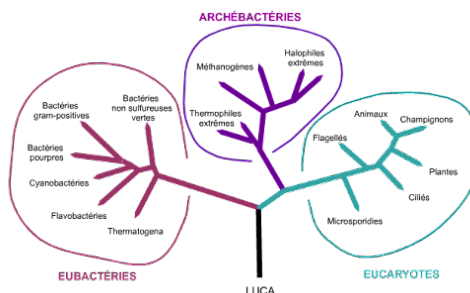
piration aérobie a ouvert de nouveaux horizons, permettant aux organismes de s'étendre à des habitats plus diversifiés. Cette expansion dans tous les types de milieux a permis la multiplication des opportunités de développement et d'adaptation. De ces différents milieux sont apparues une multitude de dont découle aujourd'hui tous l'arbre du vivant.

Conclusion

L'apparition du dioxygène a été déterminante dans la diversification des organismes sur terre (d'abord marin puis terrestre. Il a permis l'apparition d'un nouveau type de respiration, la respiration aérobie. Cela a permis aux organismes d'exploiter de manière plus efficace les ressources disponibles, favorisant leur survie et leur dispersion vers une multitude d'environnements. L'apparition du dioxygène a joué un rôle clé dans la formation de la biodiversité telle que nous la connaissons aujourd'hui.

CONCLUSION

Les premières communautés à l'origine de la vie dans les océans étaient principalement représentées par des bactéries et des archées unicellulaires. Ces micro-organismes procaryotes ont émergé il y a environ 3,5 milliards d'années, utilisant divers métabolismes adaptatifs dans des environnements aquatiques rares et complexes (fumeurs hydrothermaux). L'introduction des cyanobactéries, il y a environ 2,7 milliards d'années, a marqué l'avènement de la photosynthèse. L'apparition de la photosynthèse marque le début d'un événement géologique, appelé "Grande Oxydation", qui aura pour conséquence la modification profonde et durable de la composition des océans et de l'atmosphère. Cet événement s'identifie à partir de l'apparition brusque d'une grande quantité de dioxygène dans l'écosystème terrestre. A partir de cet événement, les organismes vivants dans les océans ont évolué sous différentes formes de plus en plus complexes, donnant lieu à des communautés diversifiées, comme les micro-organismes multicellulaires, et contribuant à l'équilibre écologique de la Terre tel qu'on le connaît aujourd'hui.



— Bianca Luppino, Émilie Bonnet, Tom Noailles

Références

- GARGAUD, M., MONTMERLE, T., PASCAL, R., LOPEZ-GARCIA, P. & MARTIN, H. *LE SOLEIL, LA TERRE... LA VIE : LA QUÊTE DES ORIGINES* ... ISBN : 978-1-119-77064-0 (BELIN : POUR LA SCIENCE, France, 2009).
- PONS, M.-L. *La Terre à l'Archéen. Apport des isotopes de métaux de transition (Zn, Fe)* French (déc. 2011), 1-259.
- GARGAUD, M., MONTMERLE, T., PASCAL, R., LOPEZ-GARCIA, P. & MARTIN, H. *LE SOLEIL, LA TERRE... LA VIE : LA QUÊTE DES ORIGINES* ... ISBN : 978-1-119-77064-0 (BELIN : POUR LA SCIENCE, France, 2009).
- FRYER, P. et al. Mariana serpentinite mud volcanism exhumes subducted seamount materials : implications for the origin of life. eng. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **378** (2165 fév. 2020).
- CALIARI, A. et al. The requirement of cellularity for abiogenesis. eng. *Computational and structural biotechnology journal* **19**, 2202-2212 (avr. 2021).
- NOBU, M. K. et al. Unique H₂-utilizing lithotrophy in serpentinite-hosted systems. eng. *The ISME Journal* **17**, 95-104 (jan. 2022).
- CUÉLLAR-CRUZ, M. & CUÉLLAR-CRUZ, M. Influence of Abiotic Factors in the Chemical Origin of Life : Biomorphs as a Study Model. eng. *ACS Omega* **6**, 8754-8763 (13 2021).

Les champignons des neiges, délivrés des contraintes du sel et du froid

INTRODUCTION

L'Océan austral est une vaste étendue d'eau glaciale qui s'étend du continent antarctique jusqu'au 60ème parallèle sud. Cet environnement composé d'eau et de glace est un lieu aux conditions extrêmes en température (entre -2 et 10 C°) et en salinité tel qu'il semblerait impossible pour de nombreuses formes de vie, comme les champignons, d'y perdurer [27].

L'étude au sein de cette région des communautés de champignons psychrophiles, qui sont des espèces de champignons extrémophiles capables de se développer dans des environnements présentant d'importantes contraintes de froid. Les milieux froids et marins associent deux potentiels problèmes : le froid et l'hypersalinité, combinés de manière différentes selon les milieux. Ces contraintes représentent un problème auquel les espèces doivent être capables de répondre pour pouvoir survivre. L'objectif de cette étude est de comprendre comment les champignons psychrophiles arrivent à survivre dans des milieux extrêmes [28].

Seront abordés ici la manière dont ces communautés ont su s'implanter dans un environnement si peu propice au développement, la diversité des milieux qu'ils sont capables de coloniser, la diversité des espèces composant ces communautés de champignons psychrophiles, et enfin les mécanismes de reconnaissance de la salinité et du froid, ainsi que les mécanismes permettant une réponse adaptée à ces contraintes, et permettent à ces communautés de survivre dans la région austral.

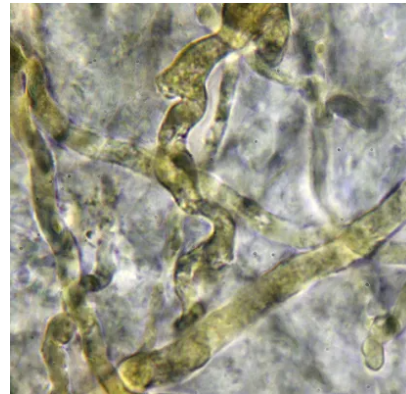


FIGURE 7 – Microphotographie des hyphes d'un champignon microphotographie réalisée à partir d'une lame de *Lactarius thynos* au microscope optique (x1000) [26].

— Noélie Andrieu, Hugo Capelle, Baptiste Ragot, Alma Lachheb, Élodie Beaupuy

Références

26. FORTIN, G. *Histoire d'hyphes II** fr-FR. Déc. 2015. (2024).
27. *Océan Austral* fr. Page Version ID : 210049911. Nov. 2023. (2024).
28. C, G. & N, G.-C. Understanding Fungi in Glacial and Hypersaline Environments. en. *Annual review of microbiology* 77. Publisher : Annu Rev Microbiol. (2023) (sept. 2023).

L'ODYSSÉE MYCOLOGIQUE : LES PSYCHROPHILES EN QUÊTE D'UNE COLONIE FRAÎCHE

par NOÉLIE ANDRIEU

Introduction

Dans les eaux glaciales de l'océan austral, les champignons psychrophiles émergent en tant qu'explorateurs résilients, survivant à un environnement extrême. Ces champignons microscopiques révèlent des mutations singulières et des interactions cruciales dans les eaux polaires.

Le milieu marin de l'océan austral est un milieu hyper contraint, régi par des températures (-2°C à 10°C) extrêmement basses et la salinité (35 g/L). Pourtant, des études ont montré que des communautés psychrophiles ont réussi à coloniser ces milieux.

C'est le cas des champignons, qui par différents mécanismes réussissent à se reproduire et interagir avec les autres communautés [29]

Exploration Fongique : Les Révélations sur l'Apparition des Champignons Psychrophiles dans les Eaux Gelées de l'Hémisphère Sud

Les contraintes locales sélectionnent des champignons résistants au froid

Les eaux australes ont conduit à la sélection de champignons avec des mutations spécifiques pour les environnements froids. Dans ces communautés froides, la sélection naturelle a favorisé l'émergence de caractéristiques uniques, permettant aux champignons psychrophiles de prospérer là où d'autres organismes éprouvent des difficultés. Ce processus évolutif, façonné par la sélection naturelle, a assuré la transmission de ces caractéristiques avec un avantage sélectif significatif dans le milieu polaire au fil de plusieurs millénaires, offrant une réponse graduelle aux variations climatiques

saisonniers et aux conditions fluctuantes de l'écosystème polaire marin [29].

La météorologie, les courants marins et les associations aux organismes migratoires influent sur leur portée géographique et leur propagation

La migration des champignons psychrophiles dépend des courants marins, facilitant la dispersion des spores sur de longues distances, et des conditions météorologiques telles que les vents puissants, les chutes de neige et les pluies abondantes, influençant leur portée géographique et favorisant ainsi leur propagation [29]. Certains champignons établissent des relations symbiotiques avec des hôtes migratoires tels que poissons, algues et oiseaux, facilitant leur transport lors des migrations saisonnières. Des analyses génétiques révèlent des similitudes entre les champignons psychrophiles de l'océan austral et ceux des régions tempérées, notamment une correspondance de codons entre psychrophiles et thermophiles se terminant par G et C [30].

Mycologie Polaire : Comprendre les Rouages Intelligents de la Reproduction des Champignons dans les Eaux Australes

La reproduction sexuée apporte une diversité génétique et la reproduction asexuée amène à une colonisation rapide de nouveaux milieux

Dans les écosystèmes polaires, les champignons psychrophiles se reproduisent de manière sexuée et asexuée. La reproduction sexuée engendre la diversité génétique par la formation et la fusion de gamètes, conduisant à la genèse de

spores. Certains champignons se distinguent par l'absence de corps fructifère, structure spécialisée produisant et libérant les spores. [31] La reproduction asexuée, illustrée chez les levures, implique la mitose et le bourgeonnement, permettant une colonisation rapide et efficace de nouvelles zones, démontrant la diversité des stratégies reproductives des champignons psychrophiles [32].

L'adaptation dans la reproduction pour augmenter leur chance de dispersion

Les champignons psychrophiles optimisent leur reproduction en libérant stratégiquement leurs spores pour maximiser leur survie et dispersion, en fonction des variations saisonnières [32]. Une étude menée près de l'Antarctique par William A. Marschall sur l'île Signy met en évidence une production de spores et leur dispersion principalement pendant l'été, avec une concentration plus élevée pendant les mois de novembre, décembre, janvier et février par rapport à la période hivernale. Cette adaptation est renforcée par une coévolution avec des organismes marins, où la libération de spores peut être synchronisée avec les migrations d'organismes hôtes, établissant ainsi des symbioses cruciales pour la reproduction des champignons psychrophiles [33].

Partenariats Mycologiques : Les Connexions Secrètes des Champignons Psychrophiles au cœur des Écosystèmes Australs

Des interactions grâce aux symbioses : une protection pour la nutrition

Au sein des écosystèmes polaires, les champignons psychrophiles établissent des symbioses mutuellement bénéfiques, principalement mutualistes, favorisant des échanges cruciaux pour la nutrition et la protection dans des environnements aux ressources limitées. Ces interactions renforcent la résistance des champignons au stress environnementaux, tout en contribuant à la défense de leurs partenaires symbiotiques. Ces relations facilitent également la dispersion des spores grâce à des hôtes migratoires, illustrées par l'association étroite avec les algues marines. Ces champignons tirent parti des capacités photosynthétiques des algues pour accéder à des nutriments essentiels, fournissant en retour des substrats or-

ganiques résultant de leur métabolisme [34].

Leur rôle dans la décomposition participe aux cycles biogéochimique et à la dynamique trophique des écosystèmes

Au-delà de leurs symbioses, les champignons psychrophiles sont essentiels dans la décomposition des composés organiques marins, catalysant des processus biochimiques clés. Ils jouent un rôle actif dans les cycles biogéochimiques et la dynamique trophique des écosystèmes polaires, libérant du carbone et de l'azote et influençant la disponibilité de ces éléments pour d'autres organismes marins. Cette décomposition représente une source cruciale de nutriments pour les écosystèmes de l'océan austral, faisant des champignons des acteurs majeurs dans la chaîne alimentaire des eaux polaires [35].

Conclusion

Les études sur les champignons psychrophiles dans les eaux du sud révèlent des réponses spécifiques

aux conditions extrêmes, soulignant leur rôle vital dans les écosystèmes polaires. Ces champignons, souvent négligés, jouent un rôle crucial dans la décomposition de la matière organique marine et établissent des partenariats symbiotiques. Les résultats mettent en évidence l'importance de la recherche continue pour comprendre les secrets moléculaires de leur résilience face aux défis environnementaux. L'exploration génétique et cellulaire offre des perspectives prometteuses pour approfondir cette compréhension [29].

Références

- GOSTINĀR, C. & GUNDE-GIMERMAN, N. Understanding Fungi in Glacial and Hypersaline Environments. *Annual Review of Microbiology* 77, 89-109. (2023) (2023).
- SU, Y. et al. Genomic, Transcriptomic, and Proteomic Analysis Provide Insights Into the Cold Adaptation Mechanism of the Obligate Psychrophilic Fungus *Mrakia psychrophila*. *G3 Genes [Genomes]* Genetics 6, 3603-3613. (2023) (1^{er} nov. 2016).
- ROBINSON, C. H. Cold adaptation in Arctic and Antarctic fungi. *New Phytologist* 151, 341-353. (2003) (2001).
- NIKITIN, D. A. Ecological Characteristics of Antarctic Fungi. *Doklady Biological Sciences* 508, 32-54. (2023) (1^{er} fév. 2023).
- ROSA, L. H. et al. in *Fungi of Antarctica* (éd. ROSA, L. H.) 1-17 (Springer International Publishing, Cham, 2019). ISBN : 978-3-030-18366-0 978-3-030-18367-7. (2023).
- LUDLEY, K. E. & ROBINSON, C. H. 'Decomposer' Basidiomycota in Arctic and Antarctic ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 11-29. (2008) (jan. 2008).
- Qu'est-ce qu'un champignon? Planet-Vie. (2023).

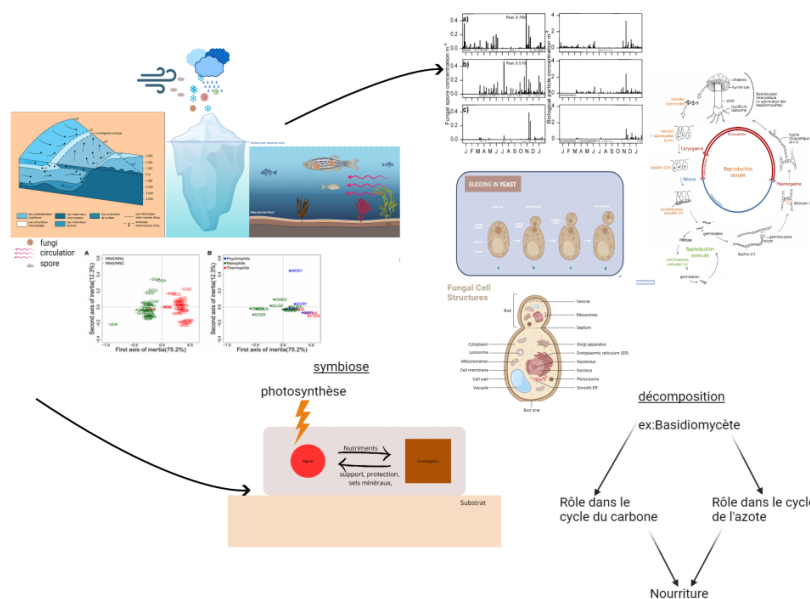


FIGURE 8 – La colonisation des champignons psychrophiles.[33][30][36] À gauche, le graphique montre l'analyse des correspondances de l'utilisation des codons synonymes dans 15 génomes fongiques (bleu pour psychrophiles, vert pour mésophiles, rouge pour thermophiles). Leur reproduction est sexuée et asexuée. Le graphique de droite représente les concentrations de spores fongiques et de particules biologiques par mètre cube d'air échantillonnées sur trois sites de l'île Signy entre décembre 1992 et janvier 1994. Les champignons établissent des interactions bénéfiques.

LE VOYAGE DES CHAMPIGNONS DES NEIGES DANS LES MILIEUX DE PLUS EN PLUS VARIÉS

par BAPTISTE RAGOT

Introduction

L'océan austral est constitué de plusieurs milieux avec des paramètres communs comme la température mais aussi des paramètres variables comme les propriétés chimiques de ces différents milieux.

Ces milieux sont des éléments inter communicants d'un même écosystème complexe qui se trouve en équilibre.

L'étude des différents types de lacs hypersalins permet d'identifier le principal milieu étudié, l'étude de la banquise et des glaciers et leurs conséquences sur les eaux océaniques australes [28].

Les lacs hypersalins

Les différents types de lacs hypersalins

Dans l'écosystème austral, les lacs hypersalins se déclinent en deux types distincts : les lacs de surface et les lacs souterrains, ces derniers forment des complexes subglaciaux sous la glace. Ces lacs subglaciaux existent principalement là où la température et la pression de la couche de glace est maintenue à un certain point de (Bib2) "pression/fusion". Celui-ci existe grâce à "la friction de la glace" et à l'entrée d'eau de mer de surface riche en sel ce qui induit une entrée de chaleur empêchant le complexe de geler en plus de l'isolation thermique que la couche extérieure peut apporter. Les lacs de surface se forment soit par évaporation sous de fortes chaleurs ce qui n'est pas le cas ici, ou par refroidissement, c'est à dire que lors de la phase de solidification de l'eau la partie située sur les bords du lac gèlent, ce qui libère le sel qu'elle contient amenant une hausse de la concentration en sel dans le reste du système [28].

Comparaison des deux types de lac

Ces deux types de lacs bien que formés de manière différentes présentent des propriétés similaires à part sur la concentration en sel plus élevée dans les lacs de surface qui n'ont aucune ou pas de forme de renouvellement d'eau [28].

La banquise et les glaciers

Formation de la banquise et génération de la glace

Le frasil, mince couche de glace initiale lors de la solidification de l'eau, se forme par la rencontre de noyaux de congélation dans un état "surfondue" lorsque la mer perd rapidement de la chaleur. L'agitation de l'eau génère des cristaux de glace qui s'assemblent en plaques, expulsant le sel lors de la solidification, engendrant ainsi une réaction endothermique renforçant la surface gelée. Ces plaques imbriquées forment une surface de glace plus ou moins homogène, renforcée par l'absorption des gouttelettes d'eau par les cristaux de glace formant la couche sous la surface [28].

Le lien glacier-banquise

Le milieu austral antarctique, composé de plusieurs zones interconnectées, voit la banquise provenir de l'entrelacement sur une longue période du frasil, étendant ainsi le glacier vers la mer. Cette extension influe sur les lacs hypersalins en favorisant le renouvellement d'eau par le mouvement des glaces à grande échelle. L'épaississement du glacier, sous pression croissante, entraîne une fusion partielle, équilibrant le niveau de la mer et renouvelant l'eau pour les complexes subglaciaux. Ces changements affectent les paramètres physico-chimiques, mo-

difiant la teneur en sel et autres minéraux dans les complexes et lacs de surface en fonction des variations temporelles de pression et de température [28].

L'océan et ses différents milieux

Les eaux de surface

L'océan est le milieu austral qui offre le plus de diversité, la formation du frasil décomposant en couches les différentes strates de profondeur de l'océan par le biais de l'expulsion du sel plus dense que l'eau vers des strates plus profondes. L'appauvrissement en sel dans les eaux de surface provoque une disparité de salinité ce qui à grande échelle induit un courant dans lequel l'eau moins salée se retrouve à la surface tandis que l'eau plus salée, plus dense tend à plonger. C'est cet écart de densité qui crée les mouvements verticaux et horizontaux de l'eau ce qui génère des courants de convection et des flux océaniques [28].

Les eaux de profondeurs et les fonds marins

Les flux océaniques créés par l'eau plus salée et plus dense forment un flux en profondeur froid qui se mêle et interagit avec d'autres masses d'eau, d'autres courants. Ces interactions permettent un échange thermique qui permet de redistribuer la chaleur des océans. La chute de l'eau froide vers les profondeurs et le refroidissement des eaux de profondeurs permet de stabiliser la calotte glaciaire en limitant la fusion des bases des glaciers et de la banquise [28].

Conclusion

Ainsi, l'étude des différents milieux présents dans la zone austral, permet de prouver la présence d'une

relation de cause à effet entre les différents milieux qui y existent. Le tout ayant une influence sur une zone plus conséquente impliquant d'autres propriétés, d'autres conditions et ainsi de suite. Les différents lacs hypersalins se forment soit par l'expulsion du sel de la glace vers la partie supérieure de celle-ci, soit en profondeur dans des complexes subglaciaux dans lesquels les rivières d'eau de mer sont bloqués gé-

rant un afflux constant d'eau et une concentration plus stable du sel dans ces eaux là. La chute des neiges sur les glaciers influençant elle aussi de manière partielle la formation de la banquise qui par l'augmentation de sa taille envoie vers le fond les eaux plus denses en sel qui viennent enrichir les eaux de profondeurs et les fonds marins. Toutes ces variations de concentration en sel influent sur les espèces qui composent le mi-

lieu, ainsi les organismes confrontés à des concentrations élevées de sel doivent maintenir l'équilibre osmotique à l'intérieur de leurs cellules. Pour ce faire, ils mettent en œuvre divers mécanismes leur permettant de survivre dans ce type d'environnement.

Références

28. C, G. & N, G.-C. Understanding Fungi in Glacial and Hypersaline Environments. en. *Annual review of microbiology* 77. Publisher : Annu Rev Microbiol. (2023) (sept. 2023).

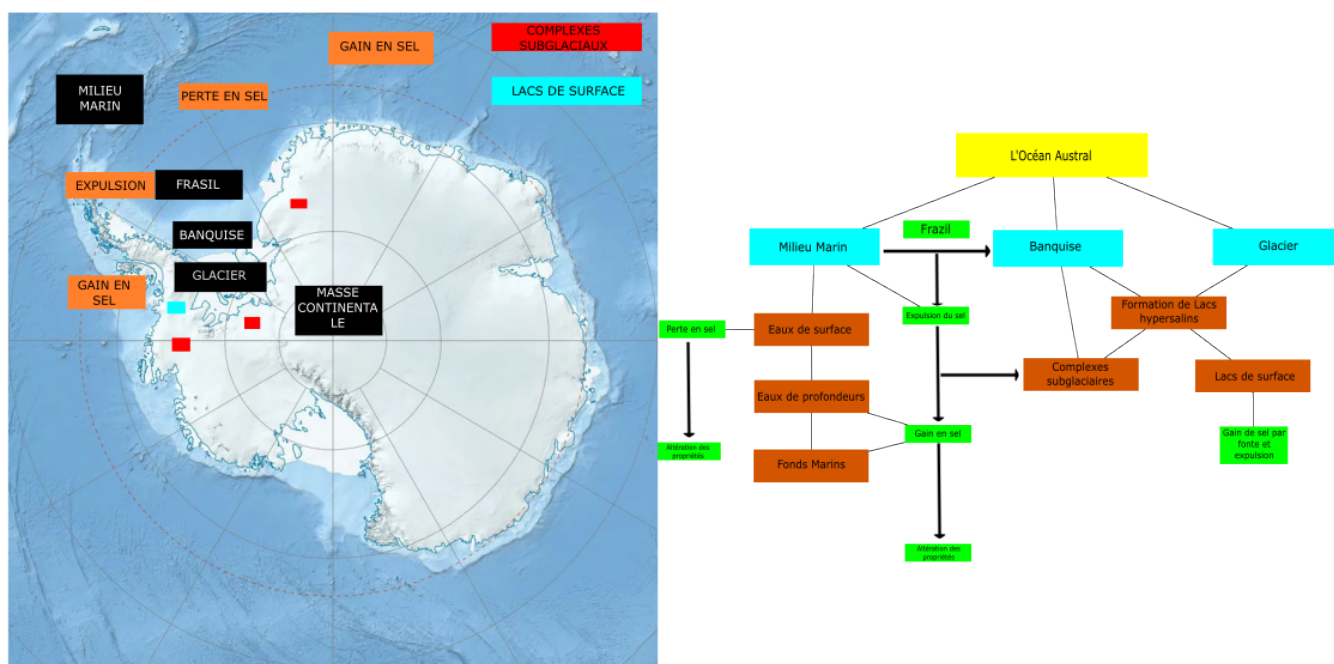


FIGURE 9 – Schéma de l'organisation des milieux en antarctique et leurs interactions[28].A droite représentation schématique des interactions entre les différents paramètres composant le système arctique. A gauche, carte de l'antarctique avec les différents milieux qui la composent et leurs interactions.

Introduction

L'Océan Austral, en raison de ses conditions extrêmes, exerce une pression sélective sur les champignons psychrophiles. Cela n'empêche pas la diversité de ces eucaryotes, mais au contraire, y contribue [37]

Ma problématique porte sur la diversité des champignons psychrophiles vivant dans les conditions extrêmes de température et de salinité de l'Océan Austral [38]. Les mécanismes de survie constituent une source de diversité [38] [39].

Pour résoudre cette question, il convient d'abord de s'intéresser à la richesse des champignons psychrophiles dans cet environnement, en identifiant leur présence et en examinant les propriétés du sol qui influent sur leur habitat. [37, 40]. Ensuite, une analyse des caractéristiques des communautés de champignons spécialisés et généralistes sera réalisée [41][38][39].

L'Expédition Arctique : La richesse des champignons du froid

Identification des différentes espèces fongiques de l'Océan Austral

La mise en évidence et l'identification des champignons en Antarctique impliquent l'échantillonnage et l'isolement des espèces sur boîte de Pétri, suivi d'une analyse au microscope électronique à balayage avec détecteur spectromètre à rayons X. Une analyse moléculaire, comprenant l'étude du génome, notamment de l'ARN18S après répllication et amplification par PCR, est également effectuée. L'ARN18S renferme une région hypervariable considérée comme la séquence signature d'une espèce. Ces expériences permettent de classer les champignons psychrophiles dans

quatre embranchements [37] [40].

Relation entre le taux de C/N des sols et les communautés fongiques qui le colonisent

Pour comprendre la répartition des communautés fongiques dans l'Océan Austral, des analyses physico-chimiques, mesurant le pH et le taux de C/N des sites d'échantillonnage, ont été effectuées. Les concentrations en carbone et en azote ont été déterminées par combustion dans un cube élémentaire organique. Les résultats indiquent que le pH n'affecte pas la formation des communautés fongiques dans le sol. En revanche, la concentration en C/N est étroitement liée à la dominance et à la diversité des espèces fongiques. Un rapport C/N élevé favorise la diversité au sein d'une communauté de champignons psychrophiles, tandis qu'un sol pauvre en carbone et riche en azote sera colonisé par une espèce dominante. Cette relation entre le taux de C/N et la communauté fongique s'explique par le fait que les champignons psychrophiles sont chimioolithotrophes au carbone et l'azote [37].

Champignons du froid : Spécialistes et généralistes la bataille contre l'extrême

Les espèces généralistes, isolées dans tous les environnements : *Debaryomyces.Hansenii*

Les espèces généralistes, comme *Debaryomyces Hansenii*, sont isolées dans divers environnements tels que l'Océan Austral, des cornichons ou des milieux acides, grâce à leur remarquable capacité de survie. Cette adaptabilité résulte de la diversité phénotypique des souches de *D. Hansenii*. En réponse aux conditions de stress hydrique, de salinité extrême ou de diminution des nutri-

ments, *D. Hansenii* initie des modifications génétiques en augmentant le taux de mutation et de recombinaison [39]. Ces processus génèrent des souches capables de répondre de manière optimale aux besoins cellulaires et aux conditions environnantes, notamment par le remodelage de la paroi cellulaire [38].

Les espèces spécialistes, isolées dans des environnements précis : les champignons noirs méristématiques

Les champignons noirs méristématiques sont des espèces spécialisées. Ils vivent uniquement dans des conditions environnementales spécifiques. *Hortaea werneckii*, modèle d'étude principal des spécialistes, est exclusivement isolée dans les eaux hypersalines de l'Océan Austral et ailleurs sur Terre [38]. La mélanisation de la paroi cellulaire et le développement méristématique sont essentiels à la survie des champignons psychrophiles spécialisés dans un milieu extrême [41].

Pour évaluer la tolérance des champignons spécialisés au stress environnemental, l'espèce *Cryomyces Antarticus* est envoyée dans l'espace, où elle est exposée à la dessiccation et à d'importantes doses de radiation UV. Aucune mutation ni détérioration de son ADN n'a été observée après le vol [37].

Conclusion

L'Océan Austral exerce une pression sélective sur les espèces fongiques, contribuant ainsi à la diversité des champignons psychrophiles répartis dans quatre phylums distincts. Ces champignons se divisent en deux communautés en fonction de leur lieu d'isolement. Il y a les espèces spécialisées présentes exclusivement en milieu salin, et les espèces généralistes présentes dans

des environnements à la fois froids et salins. La prédominance et la diversité des communautés psychrophiles dans le sol de la péninsule Antarctique dépendent du rapport Carbone/Nitrogène présent dans ces sols [37, 40, 41] .

Références

33. Saisonnalité des spores fongiques en suspension dans l'air de l'Antarctique (2023).
37. PAOLA DURÁN, PATRICIO J. BARRA, MILKO A. JORQUERA, SHARON VISCARDI, CAMILA FERNANDEZ, CRISTIAN PAZ, MARÍA DE LA LUZ MORA, ROLAND BOL. Occurrence of Soil Fungi in Antarctic Pristine Environments. *Front Bioeng Biotechnol*. Volume 7 (7 mars 2019).
38. CENE GOSTINC ˇAR NINA GUNDE-CIMERMAN. Understanding Fungi in Glacial and Hypersaline Environments. *Annual Review of Microbiology* 77, 89-109 (31 mars 2023).
39. NOE MIE JACQUES • ANISSA ZENOUCHE • NINA GUNDE-CIMERMAN • SERGE CASAREGOLA. Increased diversity in the genus *Debaryomyces* from Arctic glacier samples. *Springer International Publishing Switzerland* 2014 (6 déc. 2014).
40. ROBERT A. BLANCHETTE ,BRETT E. ARENZ. Investigations of fungal diversity in wooden structures and soils at historic sites on the Antarctic Peninsula. *Can. J. Microbiol* 55, 46-56 (2009).
41. NOOR HASSAN, MUHAMMAD RAFIQ, MUHAMMAD HAYAT, AAMER ALI SHAH. Psychrophilic and psychrotrophic fungi : a comprehensive review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* . (29 avr. 2016).

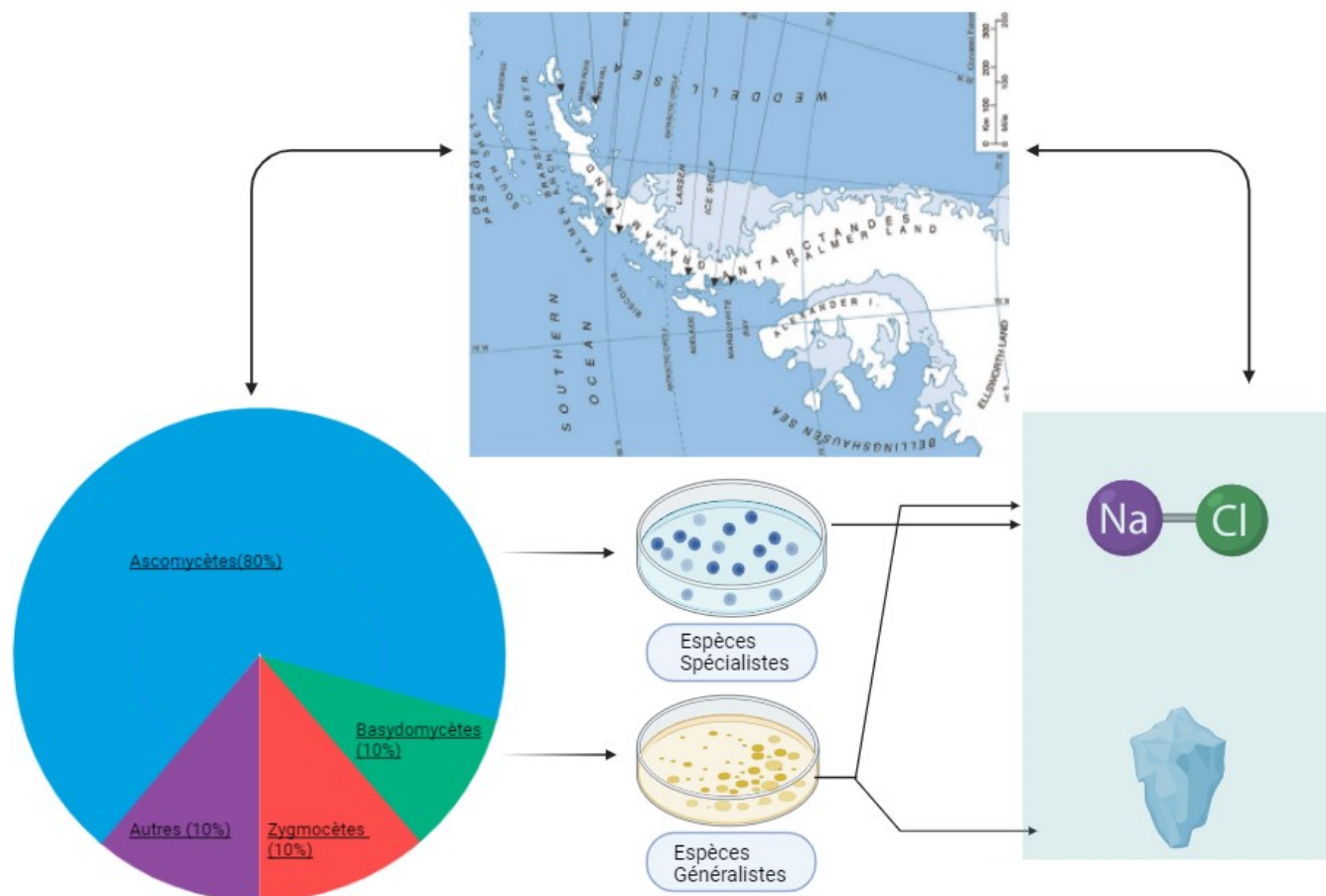


FIGURE 10 – Figure bilan représentant les conditions environnementales de l'océan Austral et les deux catégories de communautés fongiques, spécialisées et généralistes, qui y sont isolées[38][40][37] La figure représente de façon simplifiée les conditions de salinité et de température de la Péninsule Antarctique. En bas de la figure, les deux groupes de communautés psychrophiles sont représentés en fonction du milieu où ils sont isolés, c'est-à-dire soit de basse température, salin,, ou les deux.

SURVIE DE L'EXTRÊME : LES MÉCANISMES DE RÉSISTANCE AU FROID DES CELLULES DES CHAMPIGNONS PSYCHROPHILES

par HUGO CAPELLE

Introduction

Les communautés de champignons établies au sein de la région australe subissent les contraintes extrêmes de leur milieu. Une de ces contraintes, le froid, facteur du ralentissement du métabolisme cellulaire ou dans certains cas de la lyse de la cellule concernée, représente un défi pour la survie de ces organismes [28][31].

Des mécanismes biologiques permettant une réponse à la contrainte du froid existent cependant et permettent aux communautés de survivre dans ces milieux extrêmes. Ces mécanismes comprennent un moyen d'identifier le froid, et d'y répondre biochimiquement ou physiologiquement [28][31].

Ici seront détaillées les conséquences du froid sur les communautés de champignons psychrophiles de la région australe, mais également ces mécanismes d'identification et de réponses mis en pratique par l'appareil biologique de ces champignons.

Conséquences du froid et voies d'identifications

Le froid ralentit le métabolisme.

La première conséquence d'une diminution de la température d'une cellule est le ralentissement de son métabolisme, une baisse de température causant une diminution de l'énergie initiale des substrats et enzymes réactionnels. Ce ralentissement compromet le développement des champignons, car il diminue la production de molécules énergétiques (ATP, Coenzymes) nécessaire à l'ensemble des réactions permettant la synthèse de matière orga-

nique [28][31].

Le froid cause la dénaturation des protéines et la destruction de la membrane cellulaire.

Une baisse de température suffisante au sein des cellules du champignon peut avoir pour conséquence une cristallisation de l'eau qui les compose. La cristallisation de l'eau a pour conséquence une augmentation de la pression interne de la cellule qui, si trop importante, conduit à la rupture de la membrane. De plus, ce processus de cristallisation mène à une dénaturation des protéines et donc à une réduction de l'activité biologique [28] [31].

Des voies de signalisation sont impliquées dans l'initiation de la réponse au froid.

Les processus menant à la détection du froid ne sont pas connus. Cependant, il a été démontré que la voie de signalisation HOG (high-osmolarity-glycerol) s'active en conditions de froid. Cette voie de signalisation, composé de modules de détections du stress osmotique et d'un bloc de trois kinases en cascade, a pour rôle final, après une succession de réactions chimiques, l'initiation d'une large réponse transcriptionnelle. Plus particulièrement, cette réponse implique des voies de synthèse de glycérol, indispensable dans la protection des protéines contre le froid [28][42][43].

Mécanismes énergétique et membranaire de la réponse au froid.

Les acides gras polyinsaturés permettent une meilleure fluidité de la membrane plasmique.

A basse température, la cristallisation de l'eau des cellules exerce sur la membrane plasmique une pression pouvant la briser. Il est observé chez les communautés de champignons psychrophiles une proportion plus importante d'acides gras polyinsaturés dans la composition de la membrane plasmique. La présence importante d'acides gras polyinsaturés à basse température modifie les propriétés de la membrane plasmique et la rend moins rigide. Ainsi, elle peut résister à des contraintes de pression plus importantes sans rompre [28][31][44].

Le métabolisme énergétique est accéléré.

La détection du froid par la cellule entraîne une large réponse transcriptionnelle. Cette large réponse va s'exprimer en partie par une accélération du métabolisme énergétique. Les molécules énergétiques (ATP, Coenzymes) sont à l'origine de nombreuses réactions capitales aux organismes comme la dégradation des nutriments ou la synthèse de molécules organiques, l'accélération de leur synthèse permet de contrebalancer les effets du froid sur le métabolisme énergétique et de mobiliser la molécule nécessaire à une survie en conditions extrêmes [28].

Les composés cryoprotecteurs et leur rôle dans la réponse au froid.

Le glycérol contre la dénaturation des protéines.

Le glycérol est un polyalcool dit cryoprotecteur synthétisé en réponse au froid par les champignons psychrophiles. Il est utilisé en biologie pour conserver des tissus dans de l'azote liquide à très basse température (de l'ordre de -195 C°). Sa cinétique de descente à température adaptée permet de ne pas brusquer et donc de ne pas détériorer les composés de la cellule. Enfin, ce qui en fait un cryoprotecteur de choix, en particulier pour les protéines, est sa cristallisation en maille cubique moins agressive que la cristallisation en maille hexagonale de l'eau, et sa perte en densité moins importante. Ainsi, le glycérol permet la protection des protéines contre la cristallisation de l'eau [28][31][45].

Les protéines antigel inhibent la cristallisation de l'eau.

Les protéines antigels sont, au même titre que le glycérol, des composés cryoprotecteurs. Ces protéines agissent directement en se fixant sur les petits cristaux de glace en formation et inhibent leur croissance. L'action des protéines antigel permet ainsi de protéger à la fois les composés de la cellule, comme les protéines, de la dénaturation par la cristallisation de l'eau, mais également la membrane plasmique des variations de pression interne [28][31][46][47].

Conclusion

Le froid ralentit le métabolisme, gèle les cellules, dénature les protéines et impose des contraintes de pression à la membrane plasmique des champignons. Toutes ces contraintes, qui pourraient être sur le moyen ou long terme fatales à de nombreux organismes sont contrées par les mécanismes de ré-

ponse au froid des champignons psychrophiles. Ces derniers sont ainsi capables de se développer et de perdurer dans des environnements extrêmes en réduisant les risques de leur extinction. Les voies de recherches ne sont pas épuisées, car les mécanismes de l'identification du froid sont encore inconnus.

Références

28. C, G. & N, G.-C. Understanding Fungi in Glacial and Hypersaline Environments. en. *Annual review of microbiology* 77. Publisher : Annu Rev Microbiol. (2023) (sept. 2023).
42. HERSEN, P., McCLEAN, M. & RAMANATHAN, S. Analyse dynamique de la signalisation cellulaire - L'exemple de la réponse osmotique chez *Saccharomyces cerevisiae*. fr. *médecine/sciences* 24. Number : 12 Publisher : EDK, 1020-1022. (2024) (déc. 2008).
43. PANADERO, J., PALLOTTI, C., RODRÍGUEZ-VARGAS, S., RANDEZ-GIL, F. & PRIETO, J. A. A Downshift in Temperature Activates the High Osmolarity Glycerol (HOG) Pathway, Which Determines Freeze Tolerance in *Saccharomyces cerevisiae*. English. *Journal of Biological Chemistry* 281. Publisher : Elsevier, 4638-4645. (2024) (fév. 2006).
44. ROSSI, M. *et al.* Growth, lipid accumulation, and fatty acid composition in obligate psychrophilic, facultative psychrophilic, and mesophilic yeasts : Adaptation and acclimation of psychrophilic yeasts. en. *FEMS Microbiology Ecology* 69, 363-372. (2023) (sept. 2009).
45. ZHANG, P.-Q. *et al.* The effect of glycerol as a cryoprotective agent in the cryopreservation of adipose tissue. *Stem Cell Research & Therapy* 13, 152. (2024) (avr. 2022).
46. HOSHINO, T. *et al.* Antifreeze proteins from snow mold fungi. en. *Canadian Journal of Botany* 81, 1175-1181. (2023) (déc. 2003).
47. SNIDER, C. S., HSIANG, T., ZHAO, G. & GRIFFITH, M. Role of Ice Nucleation and Antifreeze Activities in Pathogenesis and Growth of Snow Molds. en. *Phytopathology* 90, 354-361. (2023) (avr. 2000).

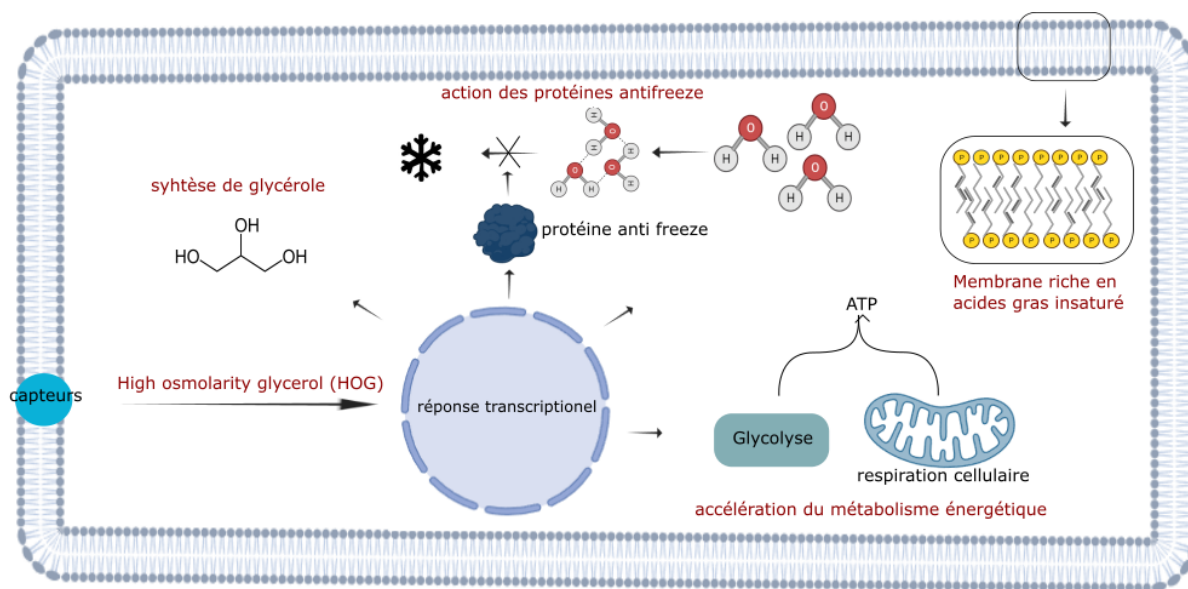


FIGURE 11 – Les mécanismes de réponses au froid ayant lieu au sein de la cellule du champignon[28][46][31]. Le froid est identifié et entraîne la suite de réactions de la voie de signalisation HOG, en réponse à ce signal une large réponse transcriptionnelle est initiée et permet l'expression des mécanismes de réponse au froid détaillés dans la figure.

CAP SUR L'INCONNU SALIN : LES CHAMPIGNONS PSYCHROPHILES À L'ASSAUT DE L'OcéAN AUSTRAL

par ELODIE BEAUPUY

Introduction

Au cœur des profondeurs salines de l'Océan Austral, les champignons psychrophiles luttent pour leur survie, confrontés à une concentration en NaCl atteignant 2 M.

En réponse à cet environnement hostile, ces organismes mettent en place des mécanismes dans l'objectif de pouvoir prospérer malgré les contraintes du milieu.

L'exploration se divise en trois volets : les effets du milieu et les moyens de détection, les mécanismes complexes de réponse à la contrainte saline, et enfin, les défis et limites de ces ajustements [48].

Exploration des Abysses Salins : Les effets et les moyens de détection du milieu hypersalin sur l'organisme

Danger à bord : Les effets du milieu sur l'organisme

Lorsque la concentration en molécules de sel dans l'eau est élevée, cela entraîne une forte osmolarité, provoquant une sortie importante d'eau des cellules. La cellule se trouve alors en état de déshydratation ou de stress hydrique dû à un choc osmotique, impactant des paramètres tels que la turgescence. Cette déshydratation affecte la pression osmotique et se traduit par des changements de conformation cellulaire, perturbant des fonctions cruciales telles que le métabolisme (taux de croissance et division cellulaire), la consommation de glucose, la perméabilité membranaire, ainsi que par une dépolarisation de la membrane [49]. Une étude approfondie a été menée sur deux souches de levures *Debaryomyces hansenii*, à savoir Bio2 et Mo40, en présence de sel. Les résultats de la colora-

tion pour la souche Bio2 ont démontré une réduction du volume cellulaire et de la perméabilité membranaire due au stress hyper-osmotique. La souche Mo40 a également montré une dépolarisation membranaire [50].

Le Compas de la Survie : Les mécanismes sensoriels pour détecter l'hypersalin

Afin de repérer un milieu hypersalin, le champignon possède des capteurs d'osmolarité capable de détecter les changements dans la concentration de solutés à l'intérieur de la cellule. Ainsi que des récepteurs membranaires plasmiques qui sont spécialisés dans la reconnaissance de signaux externes, tels que des variations dans la concentration de molécule de sel. Ils transmettent par la suite ces informations à l'intérieur de la cellule, déclenchant ainsi des réponses cellulaires appropriées [48].

Survie en Terre Inconnue : Les mécanismes de réponse sous contrainte saline

Renforcer les Voiles : Adaptations de la paroi cellulaire

Les champignons modifient la composition de leurs parois cellulaires via des polymères spécifiques, tels que la chitine, qui permet d'offrir une résistance accrue aux fluctuations de la salinité. La mélanisation de la paroi permet d'éviter la fuite de glycérol, une molécule cruciale pour maintenir l'équilibre osmotique. Une régulation efficace de la perméabilité membranaire, permet aussi de réduire la dépendance du transport actif pour contrer les fuites de substances à travers la membrane. Le potentiel membranaire est généré par des gradients

d'ions à travers les membranes des cellules vivantes. La cellule régule sélectivement l'entrée d'ions inorganiques, favorisant le potassium via la pompe ATPase de K⁺ et équilibrant la pression osmotique avec la pompe H⁺/Na⁺. Simultanément, la cellule élimine activement les ions indésirables, notamment le sodium, grâce à la pompe Na⁺ ATPase, préservant l'équilibre ionique vital. Il y a une dépolarisation de la membrane plasmique qui est coûteuse en énergie [51].

Les Signaux Sont notre Boussole : Exploration des voies de signalisation

En réponse à une hyperosmolarité, se déploie la voie de transduction du signal du glycérol à haute osmolarité (HOG). Cette voie coordonne des ajustements temporels précis. Elle débute avec la MAPK (Mitogen-activated protein kinase) qui, via capteurs transmet le signal vers le noyau par le biais d'autres protéines cible facteur de transcription). La modification de l'expression génique permet un changement transcriptionnelle orchestrant la production de solutés compatibles, comme le glycérol. Ce soluté agit comme un stabilisateur osmotique, préservant l'intégrité cellulaire dans les défis salins en empêchant la déshydratation du cytosol et la perte de turgescence [29].

ADN, notre Carte au Trésor : Réponses Géniques

Par la suite, une stratégie génique en trois phases se met en place. Tout d'abord, les hydrophobines produits par des gènes spécifiques, renforcent la paroi cellulaire, anticipant les perturbations osmotiques [29].

Ensuite, des gènes transporteurs coordonnent la régulation précise des ions, préservant ainsi un équilibre ionique essentiel. Enfin, l'adaptation génique s'exprime dans la production de solutés compatibles, comme le glycérol [49].

Tempêtes en Vue : Les contraintes et les limites des mécanismes d'ajustement

Ravitaillement Énergétique : les contraintes énergétiques en haute mer

La régulation osmotique et les mécanismes de réponse nécessitent une quantité substantielle d'énergie. Pour maintenir leur survie, ces champignons doivent constamment mobiliser des ressources énergétiques, créant ainsi une pression sévère sur leur métabolisme. En effet, les transporteurs membranaires et la synthèse de solutés compatibles sont coûteux sur le plan énergétique

[48].

Naviguer à Contre-Courant : le déséquilibre de la charge globale de la cellule

En réponse aux conditions salines élevées, la production accrue de protéines s'accompagne d'un surplus d'acides aminés chargés négativement. Cette abondance de résidus d'acides aminés chargés crée un déséquilibre électrique au sein de la cellule [49].

Conclusion

Confrontés à des concentrations élevées de sel, les champignons psychrophiles de l'océan Austral déploient des mécanismes complexes pour contrer le stress osmotique, modifiant la paroi cellulaire, régulant les ions, et activant des voies de signalisation comme la voie HOG. Ces capacités permettent la survie dans des conditions extrêmes, mais engendrent des contraintes énergé-

tiques significatives ainsi qu'un déséquilibre de charge dans la cellule. En dépit de ces défis, ces champignons offrent des perspectives fascinantes pour la compréhension de la biologie marine et pourraient avoir des applications potentielles dans la recherche biotechnologique et la résolution des problèmes environnementaux. Toutefois, nos connaissances sur les champignons sont encore limitées de nos jours, car l'attention est davantage portée sur les procaryotes.

Références

48. HOHMANN, S., KRANTZ, M. & NORDLANDER, B. in *Methods in Enzymology* (éd. HAUSSINGER, D. & SIES, H.) 29-45 (Academic Press, jan. 2007). (2023).
49. POSAS, F. et al. Yeast HOG1 MAP Kinase Cascade Is Regulated by a Multistep Phosphorelay Mechanism in the SLN1-YPD1-SSK1 "Two-Component" Osmosensor. *Cell* **86**, 865-875. (2024) (sept. 1996).
50. *Frontières* | Le stress hyper-osmotique provoque une dépolarisation membranaire et une diminution de la perméabilité chez Les souches marines halotolérantes de *Debaryomyces hansenii* et chez *Saccharomyces cerevisiae* (2023).
51. FERNANDO, L. D. et al. Structural adaptation of fungal cell wall in hypersaline environment. *eng. Nature Communications* **14**, 7082 (nov. 2023).

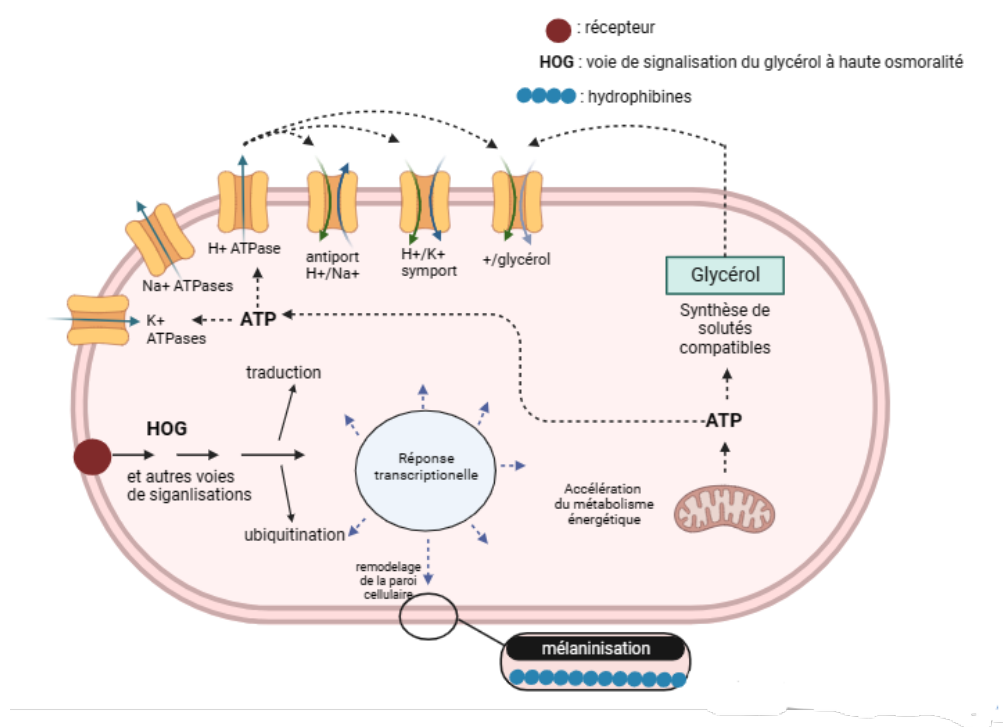


FIGURE 12 – Mécanisme de résistances des champignons psychrophiles de l'océan Austral en réponse à un environnement hypersalin. Les principaux mécanismes cellulaires d'atténuation du stress des champignons des milieux hypersalins et glaciaires. Il est observable la voie de transduction du signal du glycérol (HOG) qui induit une réponse transcriptionnelle et la synthèse du glycérol. C'est cette réponse qui permet la re-modélisation des cellules de la paroi. La régulation ionique est un processus également représenté ici [29] [48] [51].

CONCLUSION

Une diversité de champignons psychrophiles capables de se développer est observé dans les milieux les plus salins et froids de l'océan Austral. Les événements météorologiques, courants marins en associations avec des organismes migratoires ont permis leur répartition actuelle. Ils sont capables de favoriser leur système reproductif selon la saison préférentielle ainsi que leurs interactions biotique et abiotique. Leur rôle dans les différents biogéochimiques et dans la dynamique trophique des écosystèmes font des champignons psychrophiles des acteurs majeurs du milieu de l'océan austral. L'océan austral, bien qu'il soit généralement caractérisé par une forte concentration en sel et la présence de glaciers, se distingue par une variété de structures. Ce milieu se déploie à travers diverses surfaces. Cet océan est également départagé au niveau de la profondeur, avec des eaux de surface distinctes des eaux de profondeur. Les fortes concentrations en sel dans l'océan à tendance à générer une sortie d'eau de la cellule importante perturbant ses fonctionnements cellulaires voir la détériorer. Une détection de ces fortes concentrations, induit une modification de la structure de leur parois cellulaires, une intégration des voies de signalisation ainsi que des réponses géniques. Toutefois, ce mode de vie est très coûteux en énergie et la cellule se retrouve déstabilisée au niveau de sa charge globale. Mais les fortes concentrations salines ne représentent pas la seule contrainte. Effectivement, le froid représente également une contrainte importante. Comme pour le sel, les champignons détectent le froid. Afin d'éviter le ralentissement des réactions métaboliques et la dénaturation de ces des protéines, ont été favorisé des mécanismes de réponse au froid. Le métabolisme énergétique est accéléré par la cellule, des composés antigels sont également synthétisés via les glucides ainsi que des protéines jouant un rôle clé dans l'inhibition du gel des cellules. Les diverses réponses de survie des communautés de champignons psychrophiles face à des conditions extrêmes et spécifiques de température et de salinité font qu'ils présentent une potentielle voie d'application dans les domaines de l'environnement, de la santé et de l'industrie [41]. Dans le secteur de l'industrie bioénergétique, la formation de biomasse organique en milieu froid par la dégradation de la matière organique par *Cadophora* offre la possibilité de produire de la bioénergie [40]. Des expériences, telles que le vol spatial de *Cryomyces antarcticus*, laissent entrevoir une potentielle présence de ces champignons psychrophiles sur des planètes ou satellites à l'écosystème froid [37].

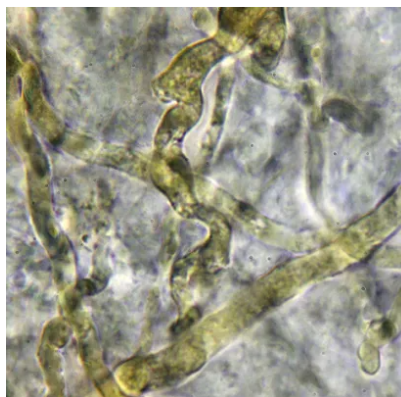


FIGURE 13 – Microphotographie des hyphes d'un champignon microphotographie réalisée à partir d'une lame de *Lactarius thynos* au microscope optique (x1000) [26].

— Noélie Andrieu, Hugo Capelle, Baptiste Ragot, Alma Lachheb, Élodie Beaupuy

Références

26. FORTIN, G. *Histoire d'hyphes II** fr-FR. Déc. 2015. (2024).
37. PAOLA DURÁN, PATRICIO J. BARRA, MILKO A. JORQUERA, SHARON VISCARDI, CAMILA FERNANDEZ, CRISTIAN PAZ, MARÍA DE LA LUZ MORA, ROLAND BOL. Occurrence of Soil Fungi in Antarctic Pristine Environments. *Front Bioeng Biotechnol.* Volume 7 (7 mars 2019).
40. ROBERT A. BLANCHETTE ,BRETT E. ARENZ. Investigations of fungal diversity in wooden structures and soils at historic sites on the Antarctic Peninsula1. *Can. J. Microbiol* 55, 46-56 (2009).
41. NOOR HASSAN, MUHAMMAD RAFIQ, MUHAMMAD HAYAT, AAMER ALI SHAH. Psychrophilic and psychrotrophic fungi : a comprehensive review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* · (29 avr. 2016).

DOSSIER 2 : VIRUS OU CLIMAT À L'ASSAUT DES ÉCOSYSTÈMES

Les virus marins piratent le réseau
trophique de nos océans

Vos Huîtres avec ou sans toxines ?

Les virus marins piratent le réseau trophique de nos océans

INTRODUCTION

Les écosystèmes marins constituent un ensemble d'interactions biologiques, physiques et chimiques tels que le cycle de l'azote et du carbone. Les virus marins sont des acteurs principaux de ces écosystèmes et participent à la modification de l'équilibre trophique. En effet, ces derniers par leur infection, changent les organismes influençant les rapports entre virus-hôte tels que prédateur et proie. Par cet effet, la chaîne alimentaire se retrouve transformée.



FIGURE 14 – Illustration des virus marins (<https://www.pourquoidoctor.fr/Articles/Question-de-actu/39092-L-ocean-immense-reservoir-virus-inconnus>)

Il peut être intéressant de comprendre les interactions entre les virus marins et l'hôte dans l'écosystème et l'influence de l'infection virale sur la stabilité des cycles biochimiques et réseaux alimentaires.

Pour traiter cette problématique, le sujet est divisé en cinq parties. Pour commencer, l'infection virale et la transmission du matériel génétique au travers des virus géants sont étudiées. S'en suit, les gènes laissés dans l'organisme de l'hôte à l'échelle biogéochimique. Ensuite, il est important de comprendre le rôle des virus marins dans le cycle de l'azote puis sur le cycle du carbone. Enfin, les conséquences du cycle du carbone et de l'azote sur l'équilibre trophique marin au travers du phytoplancton sont étudiées [52].

— Elody SAHUC, Jules PALOUX, Julian FASSINO, Léa GAUDEFROY, Iness BEN FATMA

Références

52. WEITZ, J. S. et al. A multitrophic model to quantify the effects of marine viruses on microbial food webs and ecosystem processes. eng. *The ISME journal* 9, 1352-1364 (juin 2015).

LE VIRUS MARIN ET SON CYCLE INFECTIEUX : UN CHEVAL DE TROIE BIOLOGIQUE.

par JULES PALOUX

Introduction

Les virus sont très nombreux, ils comptent parmi eux les virus géants. Ces virus, comme leur nom l'indique, possèdent les plus grands génomes du monde viral. Ils restent cependant des virus et possèdent les mêmes cycles infectieux que des virus aux tailles normales.

Le questionnement de cette partie porte sur le génome viral, source de nombreuses protéines et transfert du matériel génétique des virus à l'hôte.

D'abord le sujet s'axe sur la constitution génomique des virus géants et le cycle infectieux et finit sur le transfert du matériel génétique entre virus et hôte [53, 54].

Le génome viral, des datas protéiques pour une cyberattaque interne de la cellule

Le genome viral : de multiples protéines

Les virus géants représentent 4 familles dont les : *Mimiviridae* et *Phycodnaviridae*. Ces 2 familles sont des virus à ADN nucleocytoplasmique, infectant les eucaryotes. Les *Phycodnaviridae* et certains *Mimiviridae* regroupent les virus de l'ADN algal [55].

Mimiviridae possède le plus grand génome du monde viral, codant pour près de 1000 protéines. Elles appartiennent à la voie de synthèse des nucléotides, d'acide aminés, lipides ou encore de sucre. Ces protéines peuvent former des enzymes catalysant les réactions de réplication, de réparation d'ADN (traduction/transcription) ou synthétiser des facteurs d'initiation et d'élongation.

Le cycle infectieux

Le cycle infectieux des *Mimiviridae* et *Phycodnaviridae* comprend un virion. Ce virion est constitué d'une partie du génome viral (141 protéines sur 1000) chez *Mimiviridae* [56].

Ce virion entre par phagocytose dans la cellule hôte formant le phagosome, fusion entre la membrane lipidique de la capsid du virion et de la membrane plasmique de la cellule. Ce processus permet au virus de transférer son nucléoïde dans le cytoplasme de son hôte. S'en suis alors la mise en place d'une "usine virale" qui va mettre à profit le matériel cellulaire de l'hôte. Cette usine virale est le siège de la réplication, la transcription et l'assemblage des nouveaux virions se faisant à sa périphérie. Le cycle dure 8 à 12h et conduit à la lyse de la cellule ainsi qu'à la libération de milliers de virions infectants [54].

Le virus et l'hôte : entre partage et vol de données au sein des gènes

Les gènes du virion, un contrôle cellulaire

Les gènes du virion, par la synthèse protéique permettent au virus d'influer sur le flux d'information, le métabolisme énergétique et la synthèse de biomolécules. Ces facteurs facilitent l'infection virale, favorisent le contrôle des conditions intracellulaires et les interactions cellule-environnement. Concernant la synthèse de biomolécules, une variété de protéines comme les rhodopsines (pigments photosensibles) sont codées par *Mimiviridae* et *Phycodnaviridae*. Certains gènes du virion infectant sont alors retrouvés dans les cellule de l'hôte. algal [53, 55].

Un transfert de gène réciproque, source de diversité virale

Les virus laissent donc certains gènes à l'hôte. Dans le cas du *Cafeteria roenbergensis virus* (CroV) de la famille des *Mimiviridae*, sur un génome codant pour 544 protéines, 141 sont associées au virion et 60 à son hôte : *Cafeteria roenbergensis* (flagelle unicellulaire). Il s'avère que certains des gènes du CroV ont été retrouvés chez d'autres *Mimiviridae*, jusqu'à 36 protéines similaires. Cela montre qu'une succession d'infection par des virus différents au sein d'un même hôte contribue à diversifier le génome viral [56].

Conclusion

Afin de répondre à la problématique suivante : le génome viral, source de nombreuses protéines et transfert du matériel génétique des virus à l'hôte. Le sujet est traité sur la constitution génomique des virus géants et leur cycle infectieux puis s'axe sur le transfert du matériel génétique entre virus et hôte.

Ainsi les virus contribuent à une diversification des génomes au sein des écosystèmes marins. Leur propre génome s'agrandit par l'exploitation du génome de l'hôte. L'hôte a son génome modifié suite à l'infection d'un premier virus. Un second virus va pouvoir exploiter ces nouveaux gènes et développer son génome à partir du premier génome viral. Une part de la diversification des gènes chez les virus (donc des protéines) est due à cette "compétitivité infectieuse" [56].

Références

53. ABERGEL, C., LEGENDRE, M. & CLAVERIE, J.-M. The rapidly expanding universe of giant viruses : Mimivirus, Pandoravirus,

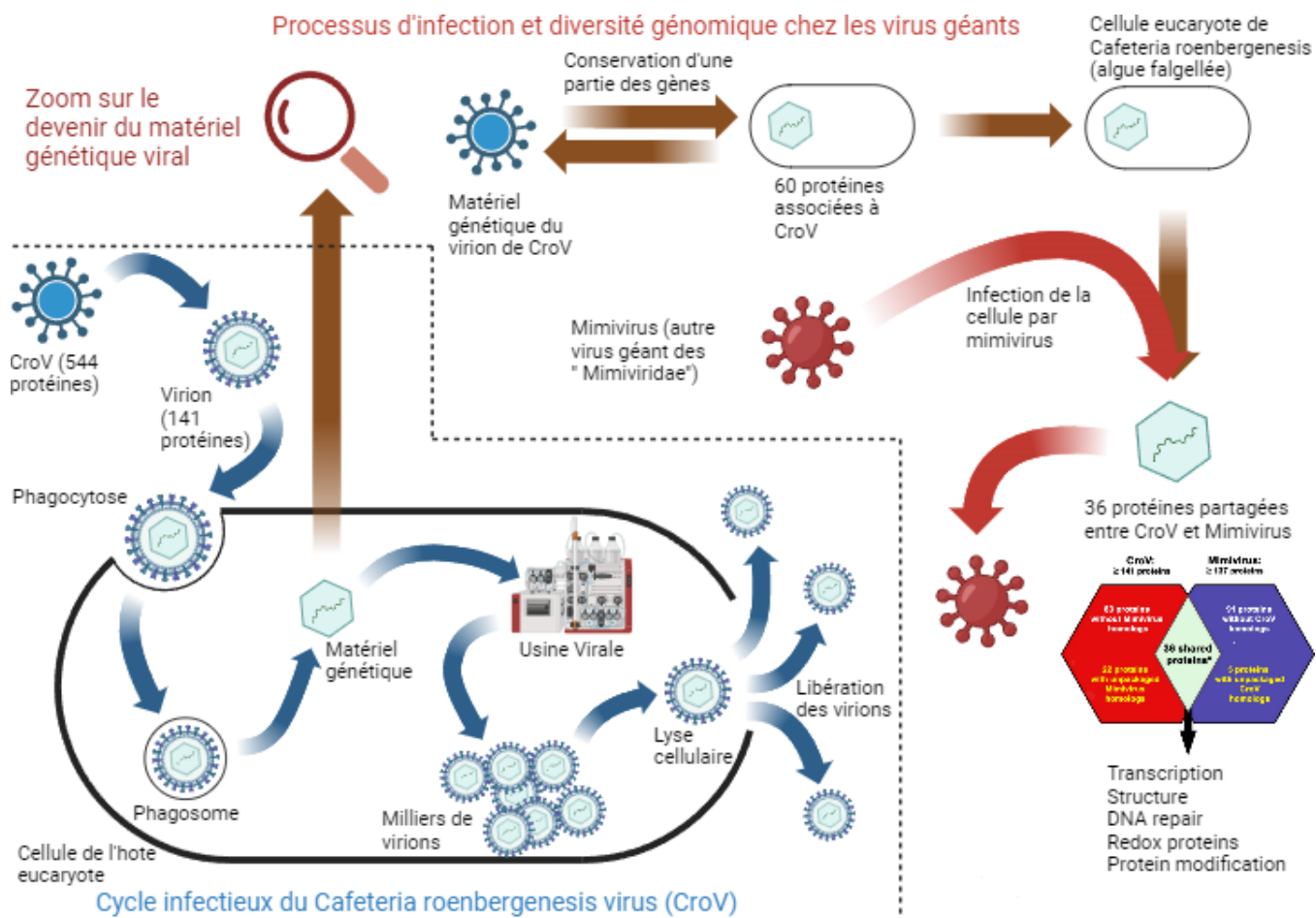


FIGURE 15 – **Processus d'infection et diversité chez les virus géants.** Pour les données de l'expérience [56] présent dans la partie *CroV and Mimivirus share a conserved set of virion proteins.*

GÈNES VIRAUX : LEURS INFLUENCES ET LEURS RÔLES DANS L'ORGANISME MARIN.

par INES BEN FATMA

Introduction

Les gènes viraux apportent des modifications génétiques en libérant des gènes qui s'intègrent dans le génome de l'organisme hôte. Ce phénomène peut entraîner des mutations, des arrangements génétiques et des échanges de matériel génétique entre les virus et leurs hôtes.

Les mécanismes par lesquels les gènes viraux influencent l'expression génétique et modifient les processus métaboliques des organismes hôtes.

L'étude de cette problématique est traitée en deux parties, les virus marins ainsi que leurs rôles dans la diversité génétique et leurs incidences sur la dynamique des populations dans l'écosystème marin [57].

Les virus marins jouent un rôle dans la diversité génétique

Modification du matériel génétique de l'organisme infecté

Lorsque le gène est libéré par le virus des modifications entrent en jeu notamment au cœur du matériel génétique ce qui a une incidence significative sur les écosystèmes marins. Pendant l'infection virale des virus intègrent le matériel génétique dans les cellules hôtes. Cette incorporation peut causer des mutations, des arrangements génétiques et des échanges de matériel génétique entre virus et hôte. Par conséquent, les virus à ARN peuvent faire l'objet de plusieurs mutations (substitution, délétion ou insertion) lors de la réplication virale ce qui favorise la diversité génétique de ses virus [57].

Mécanismes moléculaires et modification de l'expression génétique

Les virus marins, comme tous les virus, sont capables de détourner le métabolisme de la cellule hôte pour générer de nouveaux virus. Cela implique souvent l'introduction de matériel génétique viral dans le génome de l'hôte, ce qui peut modifier l'expression génétique de l'hôte. De plus, certains virus marins contiennent des gènes qui leur permettent d'assurer la synthèse des protéines. Cette synthèse est réalisée par la machinerie cellulaire de l'hôte [58]. Les mutations génétiques entraînent des changements dans la séquence d'ADN, ce qui peut affecter la structure et la fonction des protéines produites par les gènes. Ces mutations peuvent être aléatoires ou provoquées par des agents mutagènes. L'interaction des virus marins, avec ces facteurs de transcriptions, peut modifier l'équilibre de la régulation génétique. Cela signifie que ces virus peuvent directement influencer l'expression génétique en produisant leurs propres protéines. Les virus marins peuvent également influencer l'expression génétique de l'hôte en modifiant la structure des communautés planctoniques et en affectant les cycles biogéochimiques. Par exemple, lorsque les virus marins lysent les cellules hôtes, ils libèrent de la matière organique dissoute (MOD) dans la zone par le processus appelé "shunt viral". Cette MOD peut ensuite être utilisée par d'autres organismes marins, modifiant ainsi l'expression génétique à l'échelle de l'écosystème [59].

Incidence sur la dynamique des populations dans l'écosystème marin

Perturbation du processus des voies métaboliques

Par le biais de la régulation de l'expression génétique, les voies métaboliques sont catalysées par des enzymes qui accélèrent ces réactions. Les voies métaboliques sont interconnectées, donc toutes modifications génétiques perturbent le bon fonctionnement des voies métaboliques ayant ensuite des répercussions sur l'ensemble du métabolisme cellulaire. Par exemple une mutation génétique affectant une enzyme clé d'une voie métabolique peut entraîner des changements dans la production d'énergie. En conséquence, ces modifications peuvent avoir un impact sur la dynamique des populations microbiennes et les cycles biogéochimiques.

Les interactions trophiques entre organismes et leurs conséquences sur les cycles biogéochimiques

Les virus marins interagissent avec les organismes marins de diverses manières et ont des conséquences significatives sur les cycles biogéochimiques. Ils influencent la structure des communautés planctoniques et la dynamique des populations microbiennes. Ces phénomènes peuvent modifier les flux de l'azote et d'autres éléments essentiels dans l'océan. Un mécanisme clé par lequel les virus marins affectent les cycles biogéochimiques est le "shunt viral". Ce processus se produit lorsque les virus infectent et lyse leurs hôtes microbiens, libérant ainsi des nutriments et de la MOD dans l'eau. Cela détourne la biomasse qui serait autrement

consommée par des échelons trophiques supérieurs, modifiant ainsi le flux d'azote et de carbone ainsi que d'autres éléments. Les virus marins peuvent également influencer les cycles biogéochimiques en modifiant le métabolisme de leurs hôtes. Certains virus marins portent des gènes qui codent pour des fonctions métaboliques spécifiques, ce qui peut changer la manière dont les

hôtes métabolisent les nutriments et participent aux cycles biogéochimiques.

conclusion

L'incorporation de gènes viraux dans le génome des organismes marins, tels que les planctons, peut perturber le bon fonctionnement de l'écosystème marin. Cette perturbation de la diversité génétique peut avoir des répercussions sur la dyna-

mique des populations au sein de l'écosystème, finissant par impacter les cycles biogéochimiques.

Références

57. DEPECKER Caroline, S. J. *Les virus, piliers de la vie marine* fr. Publisher : Pour la Science. Juill. 2019. (2024).
58. MEDINA, J. et al. Des séquences rétrovirales endogènes dans le génome humain peuvent jouer un rôle physiologique ou pathologique. fr. *médecine/sciences* 33. Number : 4 Publisher : Éditions EDK, Groupe EDP Sciences, 397-403. (2024) (avr. 2017).
59. LACROIX, G. & DANGER, M. Des réseaux trophiques au fonctionnement des écosystèmes lacustres : vers une intégration de l'hétérogénéité et de la complexité. fr. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science* 21. Publisher : Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE), 155-172. (2024) (2008).

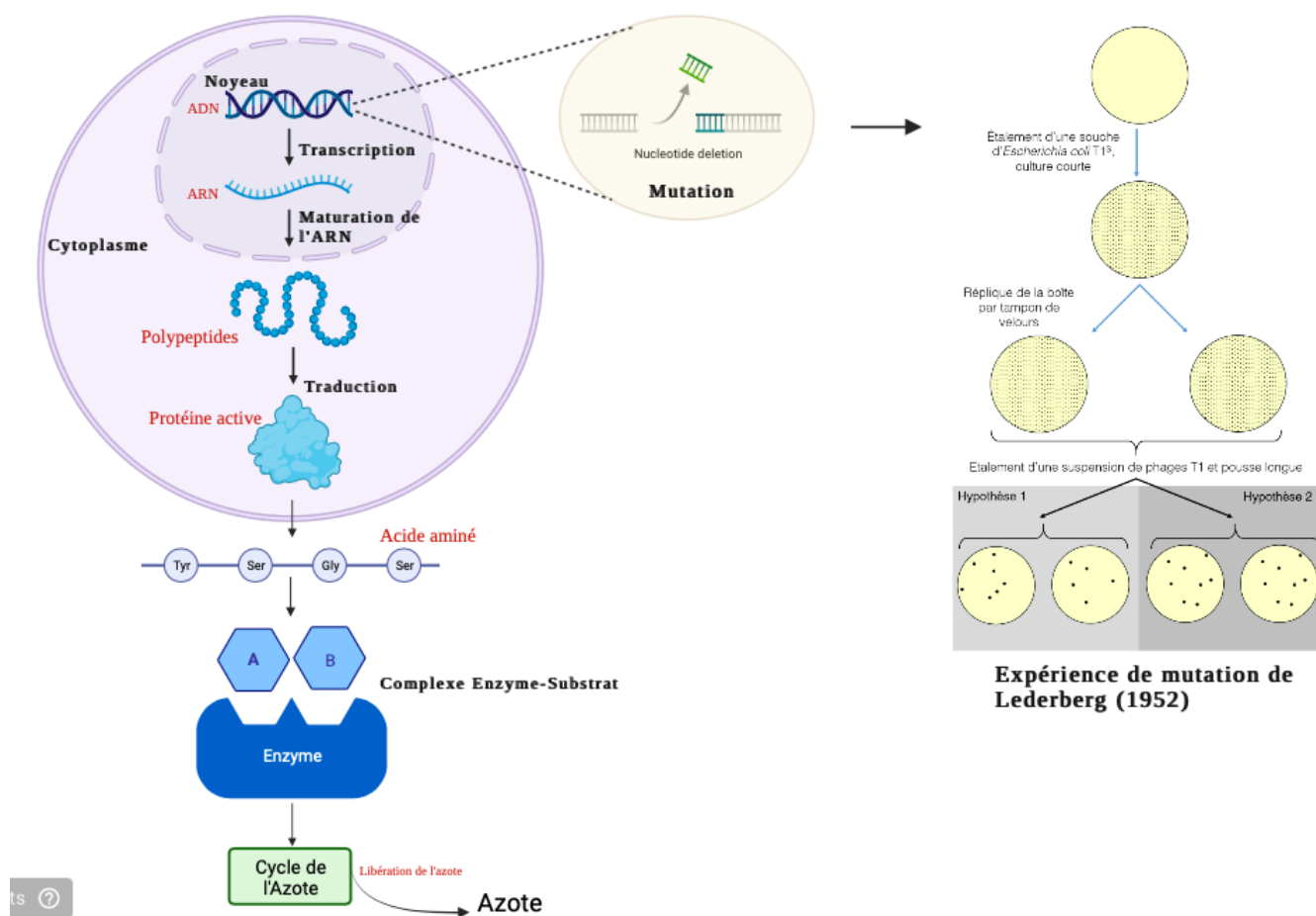


FIGURE 16 – Gènes viraux : mécanismes par lesquels les gènes peuvent être modifiés au cours des processus métaboliques cellulaires.

LE PIRATAGE DU CYCLE DE L'AZOTE PAR LES VIRUS MARINS.

par FASSINO JULIAN

Introduction

Le cycle trophique marin possède deux composantes majeures : les cycles du carbone et de l'azote, ces deux cycles sont liés entre eux et la modification de l'un peut avoir des conséquences sur l'autre. Le cycle trophique est composé de trois grandes catégories trophiques : les producteurs, les consommateurs et les décomposeurs. Les virus marins sont des agents infectieux qui se multiplient en utilisant d'autres organismes. Lors de leur utilisation d'autres organismes les virus vont détourner et modifier la consommation de leur hôte pour en utiliser une partie.

Les virus marins sont des composants essentiels du cycle de l'azote par leur cycle de vie. Il est important de d'étudier les conséquences des virus marins sur le cycle de l'azote par la modification de la machinerie des hôtes et leur destruction par les virus marins.

Pour répondre à cette problématique il est important dans un premier temps de comprendre le rôle de l'azote et les différents procédés de transformation et de synthèse de l'azote chez les organismes marins. Puis de traiter des conséquences d'une infection d'un organisme sain par un virus marin. En troisième partie il est intéressant de traiter de la lyse de la cellule hôte par les virus marins et l'impact des lysats sur la production d'azote.

L'azote dans les ZMO et procédés de transformation et de synthèse chez les organismes marins.

L'azote en tant qu'accepteur d'électrons secondaires dans les ZMO.

Les organismes photosynthétiques utilisent principalement l'oxygène comme accepteur d'électrons lors de leur synthèse de matière organique. Différents échantillons ont été prélevés dans plusieurs régions afin de mesurer les concentrations en oxygène et azote dans l'eau. Certaines zones océaniques sont des zones avec une concentration en oxygène plus faible. Dans ces zones la concentration en azote, nitrate et oxyde nitreux sont plus élevés. Les organismes présents dans ces zones vont utiliser l'azote qui est présent en plus grande quantité comme accepteur d'électrons [60].

L'ammonification : transformation de l'azote en ammonium.

L'ammonification est un processus de transformation de l'azote en ammonium. L'ammonification est utilisée par de nombreux micro-organismes marins pour produire l'ammonium dont ils ont besoin. Lors de l'ammonification les organismes décomposent de la matière organique le plus souvent morte pour produire de l'ammonium. Ce processus est une étape importante du cycle de l'azote marin [60].

Le processus de nitrification et de dénitrification chez les organismes marins.

La nitrification apparaît comme le processus inverse de l'ammonification. Lors de l'ammonification les organismes produisent de l'azote à partir d'ammoniac. La dénitrification est un processus au cours du-

quel les organismes vont réduire un ion nitrate NO_3^- plusieurs fois afin d'obtenir du diazote [60].

Conséquences d'une infection chez un organisme sain par un virus marin.

La modification des rendements en azote de l'hôte par les AMG

Une fois l'infection d'une cellule hôte par un virus celui-ci va chercher à utiliser son hôte pour se multiplier. Pour cela les virus utilisent des gènes auxiliaires métaboliques afin de détourner la machinerie de l'hôte. Les AMG modifient le rendement en azote des organismes marins. Les AMG nirK et norB permettent à l'hôte de réaliser des dénitrifications avec un rendement plus important par exemple. L'AMG amoC permet à l'hôte d'accéder à une quantité plus importante d'énergie lors des processus de transformation de l'azote [61].

Détournement du surplus d'azote par les virus marins

Lors de leur séjour chez l'hôte les virus vont chercher à exploiter celui-ci pour se multiplier. L'utilisation d'AMG permet à l'hôte d'augmenter la quantité de composé azoté qu'il produit. Les virus marins vont pouvoir détourner le surplus afin de l'utiliser pour se développer et se multiplier et maintenir l'hôte en vie [61].

La lyse de la cellule hôte par les virus marins et l'impact des lysats sur la production d'azote

Lyse de la cellule et rejet de lysats

La lyse des cellules hôtes est la dernière étape de l'infection virale. Au cours de cette étape les virus détruisent la membrane cellulaire de leur hôte. Cela permet la dissipation des virus dans le milieu extracellu-

laire. Lors de la mort de la cellule ses organites sont relâchés dans le milieu [61].

L'utilisation des lysats par les cellules non infecté dans la régénération de l'azote

Lors de la lyse de la cellule hôte des lysats sont libérés dans le milieu. Ces lysats peuvent être des nutriments organiques qui sont utilisable par d'autre organisme non infectés. Lors d'une analyse par spectrométrie de masse à rapport isotopique il est possible de montrer que la lyse de certains organisme peut augmenter l'assimilation d'azote d'autre. Par exemple la lyse de *Phaeocystis globosa* permet aux bactéries *Alteromonas* d'augmenter leur assimilation

d'azote grâce aux lysats [61].

Conclusion

Afin de répondre à la problématique, les conséquences des virus marin sur le cycle de l'azote par la modification de la machinerie des hôtes et leur destruction par les virus marin. Il était nécessaire dans un premier temps de comprendre le rôle de l'azote dans les ZMO et les différents procédés de transformation et de synthèse de l'azote chez les organismes marins. L'études des conséquences d'une infection d'un organisme sain pas les virus marins permet de comprendre le rôle des virus marins au sein du cycle de l'azote chez les organismes hôtes. La lyse des cellule hôte joue aussi un rôle

important dans le cycle de l'azote marins grâce au lysats.

La modification des paramètres du milieu marin comme la température, la salinité ou le PH peuvent influencer le cycle de vie des virus. Ces changements dans le cycle de vie des virus marins peuvent avoir des conséquences sur leur mode opératoire sur les cellules hôtes. Il est intéressant d'étudier les variations des paramètres du milieu et leurs conséquences sur le cycle de vie des virus marins et l'impact potentiel sur le cycle de l'azote.

Références

60. WANG, S., YANG, Y. & JING, J. A Synthesis of Viral Contribution to Marine Nitrogen Cycling. eng. *Frontiers in Microbiology* 13, 834581 (2022).
61. GAZITÚA, M. C. et al. Potential virus-mediated nitrogen cycling in oxygen-depleted oceanic waters. eng. *The ISME journal* 15, 981-998 (avr. 2021).

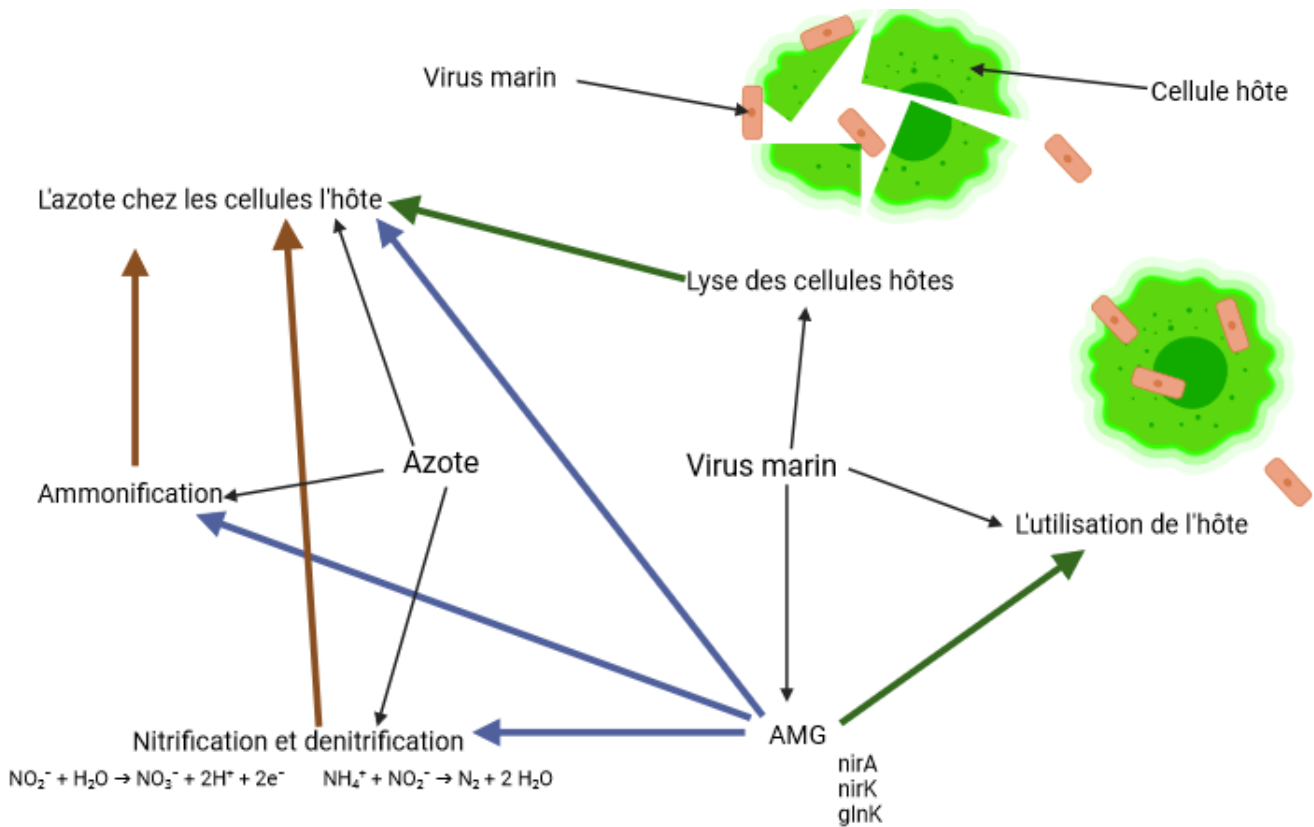


FIGURE 17 – Les virus marins au centre du cycle de l'azote dans le milieu trophique marin.

IMPACTE DU CYCLE DU CARBONE ET DE L'AZOTE SUR L'ÉQUILIBRE DES ÉCOSYSTÈMES.

par ELODY SAHUC

Introduction

Le cycle du carbone et le cycle de l'azote sont tous deux essentiels à la survie des espèces. En effet si leur équilibre venait à être perturbé, c'est la stabilité de l'environnement complet qui subirait des changements majeurs.

Il est intéressant de comprendre quels sont les enjeux d'un changement dans le cycle du carbone et celui de l'azote sur l'équilibre trophique marin.

Afin de répondre à cette problématique, l'exemple du phytoplancton sera utilisé. En effet, le phytoplancton est un organisme indispensable à la vie marine. Il sera vu, dans un premier temps, quelles sont les enjeux que peuvent avoir des modifications de concentration de carbone et d'azote marin sur le phytoplancton. Enfin, la place du phytoplancton dans le réseau trophique marin sera étudié.

Influence de l'azote et du carbone sur le phytoplancton.

L'azote et le phytoplancton

Différentes formes d'azote tel que le nitrate (NO₃-), le nitrite (NO₂-) ou encore l'ammonium (NH₄⁺) ([62]; [63]; [64]; [65]) sont reconnus comme étant l'une des principales sources nutritives des communautés phytoplanctoniques. En effet celles-ci nécessitent un élément permettant de limiter la croissance de la biomasse phytoplanctonique. Cet élément nutritif limitant permet de réguler la population ce qui permet potentiellement la croissance d'autres espèces qui peuvent être nuisibles [66]. L'azote pourrait également permettre de comprendre la composition et la succession naturelle des espèces de phytoplancton.

Si la concentration d'azote marin venait à changer, on observerait des modifications de productions en biomasse phytoplanctonique.

Le carbone et le phytoplancton.

Comme le suggère l'expérience réalisée lors de cette étude [67], le taux de CO₂ a un impact sur la productivité des communautés phytoplanctoniques. En effet, en milieu eutrophique, lorsque la concentration en CO₂ double, la productivité planctonique double également. Les répercussions d'une hausse du CO₂ sur les pourcentages de photosynthèse et de progression des microalgues spécifiques ([68]). La figure 1 ([69]) représente les résultats d'une expérience visant à stimuler des taux photosynthétiques pour différentes espèces de phytoplanctons. Les différents phytoplanctons ont été cultivés à un taux de CO₂ élevé. Les calculs ont été réalisés en utilisant les données de [70] et [71].

Le réseau alimentaire marin.

Le phytoplancton.

Le phytoplancton est à la base de la vie marine grâce à deux mécanismes différents dont la photosynthèse est à l'origine. En effet, la photosynthèse du phytoplancton permet 50/100 de la production primaire ainsi que 60 à 80/100 de la production de l'oxygène atmosphérique. Le phytoplancton évolue selon un rythme saisonnier, ainsi, en fin d'été et au printemps, on observe un pic de divisions cellulaires. On distingue trois cas différents : l'océan Indien tropical (un cycle lié aux moussons), l'océan pacifique (un cycle difficile à observer ainsi) et l'océan atlantique (les seules stations de mesures se trouvent en milieu semi océanique). ([72]) Le phytoplancton représente

la base de l'alimentation des organismes herbivores marins. Ainsi, le rythme de vie des consommateurs primaires est déterminé par le développement des populations microalgales, et ces consommateurs, à leur tour, exercent une régulation sur le rythme de vie des carnivores qui les consomment, les consommateurs secondaires.

Implication du phytoplancton dans l'équilibre trophique.

Comme dit plus tôt, le phytoplancton constitue le premier maillon des réseaux alimentaires marins et permet donc la diversité et la quantité des maillons trophiques supérieurs. Ces végétaux photosynthétiques produisent de la matière organique qui est consommée par les herbivores (consommateurs primaires) qui sont à leur tour proie des carnivores (consommateurs secondaires) ([73]).

Conclusion

Dans le but de répondre à la problématique initiale, l'étude du cas particulier du phytoplancton a été faite. Pour cela, l'effet de la modification du carbone ainsi que de l'azote ont été étudiés afin de démontrer la fragilité de l'équilibre marin. Ensuite, l'importance du phytoplancton dans le réseau alimentaire marin a été démontrée. Cela a permis de comprendre le lien entre l'azote et le carbone et l'équilibre trophique.

Il pourrait être intéressant prochainement d'étudier les effets directs de l'anthropisation ou encore du réchauffement climatique sur l'équilibre marin.

Références

62. HOWARTH, R. W. NUTRIENT LIMITATION OF NET PRIMARY PRODUCTION IN MARINE ECOSYSTEMS. en. *Annual Review of Ecology and Systematics* 19, 89-110. (2024) (nov. 1988).

63. HOWARTH, R. W. & MARINO, R. Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems : Evolving views over three decades. en. *Limnology and Oceanography* 51, 364-376. (2024) (jan. 2006).
64. RYTHER, J. H. & DUNSTAN, W. M. Nitrogen, Phosphorus, and Eutrophication in the Coastal Marine Environment. en. *Science* 171, 1008-1013. (2024) (mars 1971).
65. VITOUSEK, P. & HOWARTH, R. Nitrogen limitation on land and in the sea : How can it occur? en. *Biogeochemistry* 13. (2024) (1991).
66. GLIBERT, P. *et al.* The Role of Eutrophication in the Global Proliferation of Harmful Algal Blooms. *Oceanography* 18, 198-209. (2024) (juin 2005).
67. SCHIPPERS, P., LÜRLING, M. & SCHEFFER, M. Increase of atmospheric CO₂ promotes phytoplankton productivity. en. *Ecology Letters* 7, 446-451. (2024) (juin 2004).
68. BEARDALL, J. & RAVEN, J. A. The potential effects of global climate change on microalgal photosynthesis, growth and ecology. en. *Phycologia* 43, 26-40. (2024) (jan. 2004).
69. BEARDALL, J., STOJKOVIC, S. & LARSEN, S. Living in a high CO₂ world : impacts of global climate change on marine phytoplankton. en. *Plant Ecology & Diversity* 2, 191-205. (2024) (déc. 2009).
70. BURKHARDT, S., AMOROSO, G., RIEBESELL, U. & SÜLTEMEYER, D. CO₂ and HCO₃⁻ uptake in marine diatoms acclimated to different CO₂ concentrations. en. *Limnology and Oceanography* 46, 1378-1391. (2024) (sept. 2001).
71. ROST, B., RIEBESELL, U., BURKHARDT, S. & SÜLTEMEYER, D. Carbon acquisition of bloom-forming marine phytoplankton. en. *Limnology and Oceanography* 48, 55-67. (2024) (jan. 2003).
72. SOURNIA, A. Cycle annuel du phytoplancton et de la production primaire dans les mers tropicales. fr. *Marine Biology* 3, 287-303. (2024) (août 1969).
73. RAKOWSKI, C. J., FARRIOR, C. E., MANNING, S. R. & LEIBOLD, M. A. Predator complementarity dampens variability of phytoplankton biomass in a diversity-stability trophic cascade. en. *Ecology* 102, e03534. (2024) (déc. 2021).

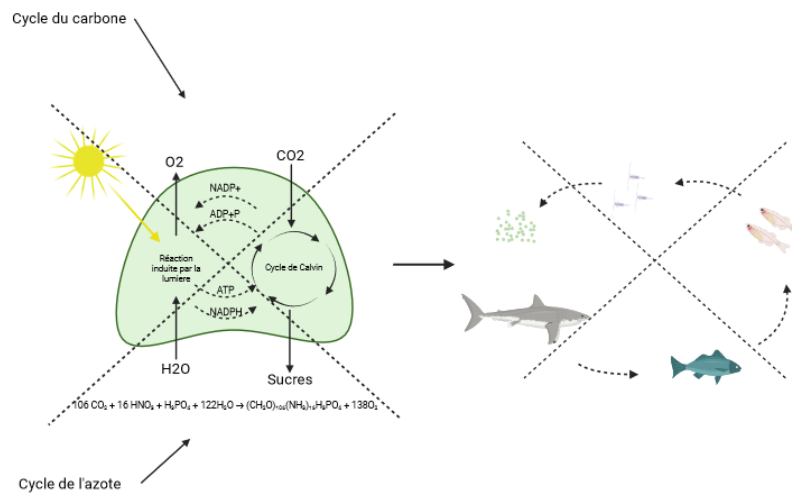


FIGURE 18 – **Processus d’infection et diversité chez les virus géants** Pour les données de l’expérience [56] présent dans la partie *CroV and Mimivirus share a conserved set of virion proteins.*

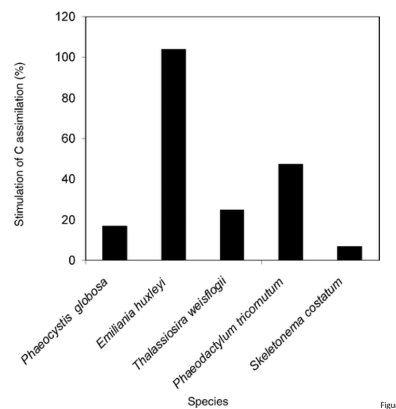


FIGURE 19 – **Processus d’infection et diversité chez les virus géants** Pour les données de l’expérience [56] présent dans la partie *CroV and Mimivirus share a conserved set of virion proteins.*

CONCLUSION

Afin de répondre à la problématique initialement donnée, l'infection virale des virus géants et leur manière spécifique de transmettre leur matériel génétique a été traitée. Cette transmission de matériel permet d'étudier l'action des gènes laissés dans l'hôte. Ce qui permet de mettre en avant les conséquences des virus marins sur les cycles du carbone et de l'azote. Pour enfin aborder le sujet de l'équilibre trophique marin.

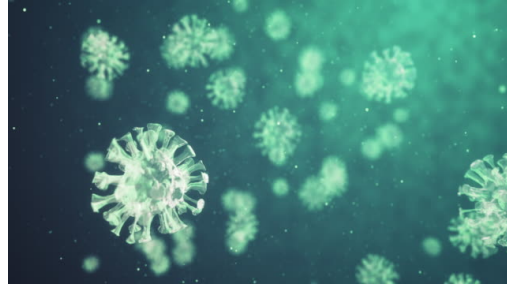


FIGURE 20 – Illustration des virus marins ([https://www.fredzone.org/des-chercheurs-decouvrent-que-locean-abrite-200-000-virus-](https://www.fredzone.org/des-chercheurs-decouvrent-que-locean-abrite-200-000-virus-221)

221) dans lequel se trouve les virus marins ont une influence sur leur cycle de vie et la dynamique de la population virale. Ces changements en fonction des conditions, peut être vu à la baisse ou à la hausse. Il serait intéressant d'étudier l'impact du changement climatique sur les virus marins (ou sur l'équilibre trophique marin) [52].

— Elody SAHUC, Jules PALOIX, Julian FASSINO, Léa GAUDEFROY, Iness BEN FATMA

Références

52. WEITZ, J. S. et al. A multitrophic model to quantify the effects of marine viruses on microbial food webs and ecosystem processes. eng. *The ISME journal* 9, 1352-1364 (juin 2015).

Vos huîtres avec ou sans toxines ?

INTRODUCTION

La France est un acteur mondial de la conchyliculture (production de coquillages) avec une production de 140 000 tonnes de coquillages en 2020 et détenant le record mondial de la consommation de coquillages frais.[74] De nombreux coquillages présents dans les assiettes des français sont des bivalves, comme les huîtres, moules ou les pétoncles. Les bivalves se caractérisent par un corps complètement enfermé dans une coquille qui s'ouvre en deux parties : les valves. Le comportement de fuite des bivalves se manifeste par la contraction du muscle phasique, un composant du muscle adducteur, propulsant le bivalve en arrière. Les muscles adducteurs assurent donc la fermeture des valves et travaillent en opposition au ligament qui tend à les écarter. Le phénomène d'ouverture et de fermeture des valves est nommé applaudissement. Les bivalves non fouisseurs vivent essentiellement dans des plans d'eau. Ils sont observables sur le fond marin ou se fixent sur des rochers ou autres surfaces dures. Les bivalves non fouisseurs se nourrissent par captation en filtrant l'eau de mer.

Les caractéristiques physico-chimiques des plans d'eau sont modifiées par le réchauffement climatique. Ces modifications déséquilibrent les écosystèmes qui y sont exposés. Dans ce contexte sont observées des efflorescence algale, ou bloom, soit des épisodes d'augmentation localisés de la concentration en microalgues.[75] Celles du genre *Alexandrium* sont observables sur les côtes métropolitaines. Ces dinoflagellés produisent des neurotoxines paralysantes appelées PSP pour Paralytic Shellfish Poison. Les bivalves dits filtreurs se nourrissent par filtration de l'eau de mer et à cette occasion ingèrent ces microalgues et les toxines qu'elles produisent. La population française fait donc face à l'augmentation du risque de contamination des coquillages filtreurs sur les côtes Métropolitaine par des toxines paralysantes relâchées par les dinoflagellées du genre *Alexandrium* se développant dû au réchauffement climatique.

Tout d'abord, le lien entre réchauffement climatique et efflorescences d'*Alexandrium* sera mis en lumière. Ensuite, le mécanisme de sécrétion des toxines sera détaillé. Enfin, les impacts des toxines sur les bivalves filtreurs et sur l'être humain seront abordés.

Lalie Ferrand, Evan Labaye, Vincent Gaucher, Théophile Boezec

Références

74. AGRESTE. Enquête aquaculture fr. Mars 2022. (2024).

75. HALLEGRAEFF, G. M. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. en. *Phycologia* 32, 79-99. (2024) (mars 1993).

Introduction

Le changement climatique est un fait impactant les milieux naturels. En première ligne les mers et les océans qui subissent des modifications rapides de leurs caractéristiques. Les dinoflagellés du genre *Alexandrium* peuvent par des épisodes de blooms plus fréquents. Dans le cas de la mer Méditerranée, les modifications concernent principalement la température, la salinité, et l'ensoleillement. Les paramètres précités peuvent être à l'origine de conditions favorables à l'apparition des dinophytes et à leur multiplication.

La salinité

La salinité est augmentée par le réchauffement atmosphérique via l'évaporation qui est plus importante lors de l'élévation des températures. La salinité augmentant premièrement dans les couches superficielles de la mer, mécaniquement, la densité de la couche supérieure augmente. Les mouvements thermohalins s'en retrouvent donc modifiés [76].

L'ensoleillement

Le changement climatique est à l'origine de l'augmentation de la fréquence d'épisodes tardifs et avancés de sécheresse ainsi que de leur longueur. Cela se traduit par une augmentation de l'ensoleillement annuel sur la surface de la mer. En recoupant les mesures de terrain avec les données issues de ERA-5 (modèle de climatologie passé), il apparaît que depuis 50 ans, l'ensoleillement est en hausse en automne et au printemps dans la mer Méditerranée [77].

Réaction d'*Alexandrium* aux modifications du milieu

Température et salinité jouent un rôle tout au long de la vie d'*Alexandrium*

Alexandrium est une algue qui se conserve sous forme de kystes, formés lors de conditions hostiles. Cette forme de dormance est stockée dans les sédiments, qui lorsqu'ils sont remués par l'agitation du fond de l'eau, renvoient des kystes dans la colonne d'eau. Si celle-ci est à température adéquate, la germination peut avoir lieu [78]. Concernant la salinité, il existe un taux optimal pour la croissance des individus. Cependant, cet organisme est adapté à la zone étudiée où la salinité reste haute et varie peu au cours de l'année. Avec aussi peu de variation, la salinité ne semble pas être un facteur discriminant pour la formation de blooms. Ces deux facteurs ont toutefois un impact croisé car il existe des plages de couples de valeurs qui sont optimales pour la croissance [79].

L'ensoleillement : Un rôle crucial mais seulement pour la croissance.

Le genre *Alexandrium* est partiellement photosynthétique. La modification de l'ensoleillement impacte donc les dynamiques de croissances. Et ce jusqu'à une valeur plafond où la croissance n'évolue plus [80].

Conclusion

Les impacts du réchauffement climatique sur les écosystèmes et les communautés associées sont multiples. Le système Mer Méditerranée est très sensible au changement climatique et les impacts de celui-ci sont quantifiables. Cette sensibilité

découle de la position géographique du bassin mais aussi d'un renouvellement des eaux s'effectuant à basse vitesse via le détroit de Gibraltar. Le changement de conditions modifie les conditions d'existence des populations d'*Alexandrium* et les impacte tout au long de leur cycle de vie, de la germination des kystes à leur formation, en passant par la croissance de la population. Il est difficile d'être exhaustif car les dynamiques de communautés sont complexes et dépendent de plusieurs facteurs. Certains sont en interaction voire en concurrence les uns avec les autres. Par exemple, les gaz dissous dans l'eau ou le pH n'ont pas été explorés comme possible perturbation. Les sources utilisées pour cette partie ne concernent qu'un bassin de production de coquillages situé sur les côtes Méditerranéenne Ouest Française. On suppose que cela fonctionne de manière analogue ailleurs car les algues sont du même genre, mais on ne peut que le supposer. Enfin, certains impacts supposés au départ de la recherche n'ont pas été poursuivis par manque de ressource documentaire.

Références

76. VARGAS-YÁÑEZ, M. et al. Climate change in the Western Mediterranean Sea 1900–2008. *Journal of Marine Systems* **82**, 171–176 (août 2010).
77. GALANAKI, E., EMMANOUIL, G., LAGOUVARDOS, K. & KOTRONI, V. Long-Term Patterns and Trends of Shortwave Global Irradiance over the Euro-Mediterranean Region. en. *Atmosphere* **12**. Number : 11 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 1431 (nov. 2021).
78. LAANAIA, N. et al. Wind and temperature controls on *Alexandrium* blooms (2000–2007) in Thau lagoon (Western Mediterranean). *Harmful Algae* **28**, 31–36 (août 2013).
79. BOUQUET, A. et al. Prediction of *Alexandrium* and Dinophysis algal blooms and shellfish contamination in French Mediterranean Lagoons using decision trees and linear regression : a result of 10 years of sanitary monitoring. *Harmful Algae* **115**, 102234 (juin 2022).
80. LAABIR, M. et al. Influence of temperature, salinity and irradiance on the growth and cell yield of the harmful red tide dinoflagellate *Alexandrium catenella* colonizing Mediterranean waters. *Journal of Plankton Research* **33**, 1550–1563 (oct. 2011).

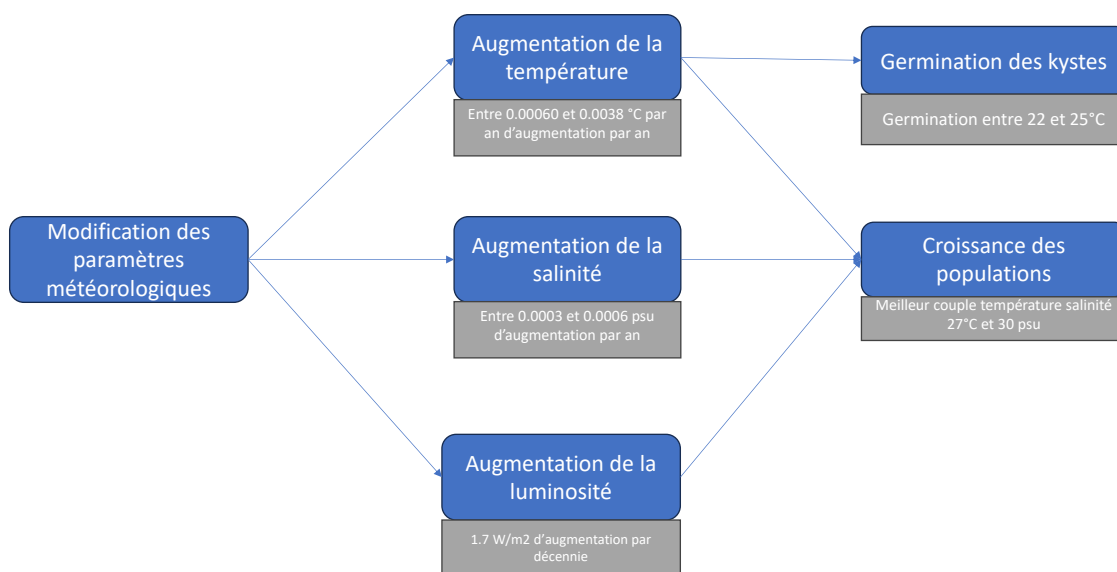


FIGURE 21 – Changement climatique et impacts sur les algues toxiques

Introduction

Les dinoflagellés du genre *Alexandrium* sont des microalgues unicellulaires généralement marines.

En réponse à un stress environnemental, *Alexandrium* produit des neurotoxines de types alcaloïde nommées saxitoxin (STX), ou PSP pour Paralytic Shellfish Poison [81].

Les STX paralysent notamment les bivalves non-fouisseurs (moules, huîtres...) et sont les principaux moyens de défense de cet organisme. Une surproduction de toxines serait néfaste au maintien de l'équilibre de l'écosystème.

Dû au dérèglement climatique, il observé une recrudescence des STX dans nos eaux. Les principaux facteurs étant la présence de nitrate dans l'environnement, la variation de température et la salinité des eaux.

D'où viennent ces toxines ?

Approfondissement des toxines

L'origine des toxines produites reste incertaines mais quelques théories subsistent. Celle qui semble la plus plausible est la théorie du transfert de gène horizontale (HGT). Un HGT correspond généralement à une, ou plusieurs, endosymbiose, soit une relation réciproquement profitable entre deux individus, l'un à l'intérieur de l'autre. Par exemple, la RubisCO de forme II (une enzyme agissant lors de la photosyn-

thèse) provient, chez *Alexandrium* d'une Protéobactérie [82].

Évolution des toxines :

La base des STX est formé à partir de Nitrogène (Figure 1). Le nitrogène permet la production d'Arginine qui, grâce à des acides aminés codés par un cluster de gènes (sxtA, sxtB, sxtD, sxtF-I, sxtQ, sxtS et sxtU). Cette première toxine sera alors dérivée en différentes STX, comme les GTX 2 et 3, la neosaxitoxin ou les C 1 et 2 [83].

Quel lien entre le dérèglement climatique et la production de toxines ?

Effet du nitrate :

Le nitrate (NO_3) est à la base du cycle du nitrogène menant à la production de STX (figure 1). L'augmentation de sa concentration dans les eaux semble multiplier la quantité de STX par 2 (Figure 2.a).

Le nitrate semble jouer un rôle important dans la surproduction de toxines d'*Alexandrium* [84][85].

Effet de la salinité :

La salinité semble également jouer un rôle dans la production des STX (figure 2.b). Uniquement des données tirées d'expériences sont disponibles. Aucune théorie concernant le lien entre la salinité et la production de STX chez *Alexandrium* ne fait consensus [85].

Effet de la température :

Les températures idéales des eaux pour la production des STX

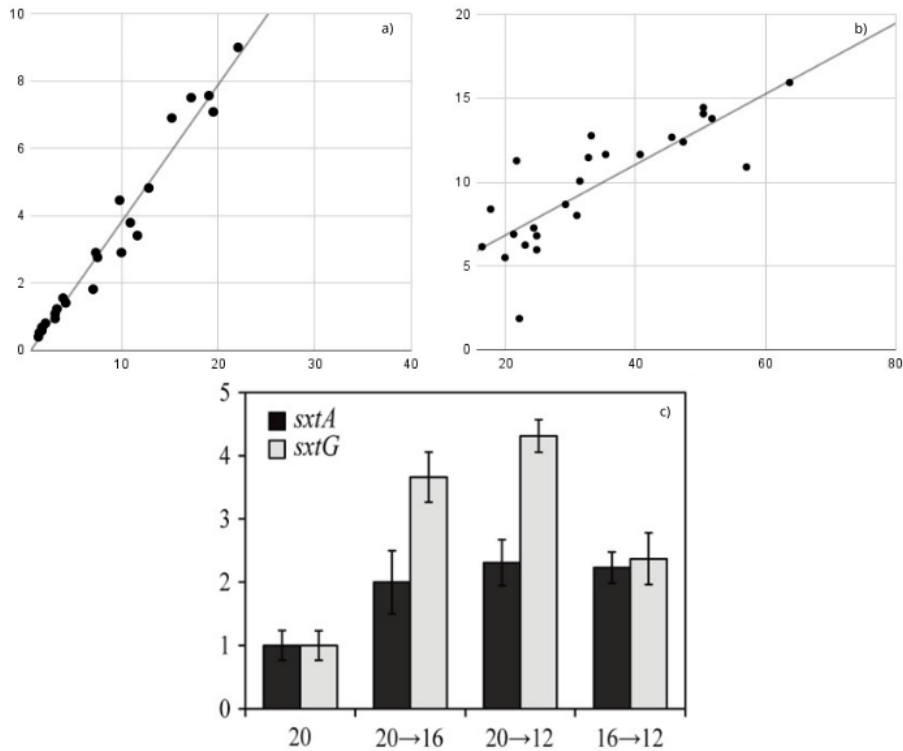
semble être entre 20 et 16°C (figure 2.c). Le dérèglement climatique peut offrir un terrain plus propice en réchauffant des eaux froides mais aussi en refroidissant. Par exemple, le ralentissement du Gulf stream pourrait refroidir les eaux de l'Atlantique nord ce qui les rendrait plus adaptées aux besoins d'*Alexandrium*. Aucune théorie ne fait consensus quant au lien entre la température et l'augmentation de la production de toxines [83].

Conclusion

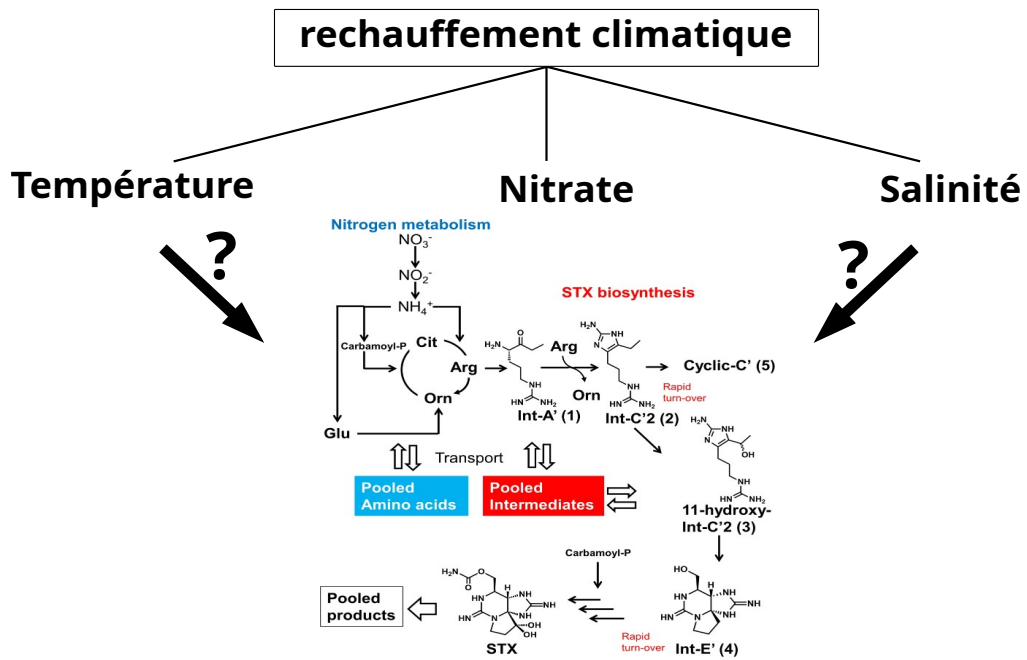
Les dinoflagellés du genre *Alexandrium* semble produire de plus en plus de toxines en réponse au dérèglement climatique. Que le lien soit clairement établie, comme pour le nitrate, ou qu'il ne soit que mesuré, comme pour la salinité ou la température, la quantité de STX retrouvé dans la nature augmente.

Cette augmentation pourrait s'avérer néfaste pour l'écosystème autant que pour l'homme.

- AKBAR, M. A. *et al.* Biosynthesis of Saxitoxin in Marine Dinoflagellates : An Omics Perspective. *Marine Drugs* **18**, 103. (2023) (fév. 2020).
- ORR, R. J. S., STÜKEN, A., MURRAY, S. A. & JAKOBSEN, K. S. Evolution and Distribution of Saxitoxin Biosynthesis in Dinoflagellates. *Marine Drugs* **11**, 2814-2828. (2023) (août 2013).
- Effects of salinity, light and inorganic nitrogen on growth and toxicity of the marine dinoflagellate *Alexandrium tamarense* from northeastern Canada. *Journal of Plankton Research* **21**, 939-955. (2023) (1^{er} mai 1999).
- CHO, Y. *et al.* Metabolomic study of saxitoxin analogues and biosynthetic intermediates in dinoflagellates using ¹⁵N-labelled sodium nitrate as a nitrogen source. *Scientific Reports* **9**, 3460. (2023) (mars 2019).
- WANG, H., KIM, H., PARK, H. & KI, J.-S. Temperature influences the content and biosynthesis gene expression of saxitoxins (STXs) in the toxigenic dinoflagellate *Alexandrium pacificum*. *Science of The Total Environment* **802**, 149801. (2023) (jan. 2022).



(a) a/b : Concentration en cellules ($10^6 \cdot cells^{-1}$) [83] en fonction de la fluorescence de chlorophylle *a in vivo* dans un milieu a) concentré en Nitrate b) salé [85] c : expression relative de la production de *sxtA* (noir) et *sxtG* (blanc) en fonction de la température ($^{\circ}C$) [83]



(b) Schématisation de l'impact possible du dérèglement climatique sur la production des toxines de types STX chez le dinoflagellés du genre *Alexandrium* [84]

FIGURE 22 – Résultats expérimentaux et schéma de fonctionnement de l'impact de l'environnement sur la production de toxines (STX) sur un dinoflagellés du genre *Alexandrium*

Introduction

En France, la production de Paralytic Shellfish Poisoning ou PSP par des dinoflagellés du genre *Alexandrium* a touché l'Atlantique et la Méditerranée. Les toxines produites par *Alexandrium* et la microalgue elle-même sont filtrées par les bivalves non fouisseurs. Ces toxines endommagent leur organisme et celui des espèces qui les ingèrent. Cette intoxication se manifeste à l'échelle macroscopique par une altération du comportement des bivalves. Elle se précise à l'échelle microscopique entraînant des dommages histologiques et physiologiques. L'individu adulte et sa descendance sont affectés, du spermatozoïde au nouvel individu.

Plongée au cœur du comportement des Bivalves face aux PSP

Affaiblissement de la réaction de fuite et perturbation des applaudissements

Chez *Crassostrea gigas* et les moules bleues exposés à *Alexandrium*, l'accumulation de toxines PSP dans leur glande digestive induit une réduction de l'amplitude moyenne d'ouverture des valves, une diminution de la filtration et se caractérise par une fréquence accrue de microfermeture, suggérant un impact sur la fuite. Une diminution significative du nombre et de la durée des clapements chez les pétoncles exposés aux PSP a été observé [86] [87].

Augmentation de l'activité respiratoire et modification du bilan énergétique

Chez les huîtres, l'augmentation de la concentration en toxine entraîne une élévation de la production d'énergie par modification de l'activité mitochondriale et se manifestant par l'augmentation de l'activité respiratoire. Après contraction (fermeture des valves), le muscle adducteur récupère grâce à la production

aérobie d'ATP mitochondriale. Malgré une modification de l'activité mitochondriale les bivalves exposés ne récupèrent pas, suggérant un effet rétroactif sur la production d'ATP mitochondriale [86].

Réaction comportementale dépendantes de la ploïdie du bivalves

Les huîtres triploïdes accumulent deux fois plus de PSP que les diploïdes lorsqu'elles sont exposées à *A. minutum* dans des conditions identiques. Cette différence d'accumulation pourrait être liée à une moindre sensibilité des triploïdes vis-à-vis des PSP, mais aussi à un métabolisme plus actif [88].

Au-delà des Coquilles : Impact Physiologique et Histologique des Toxines PSP

Paralysie des muscle adducteur et conséquences apparentes

L'exposition de pétoncle au genre *Alexandrium* a révélé l'existence d'une myopathie touchant le muscle adducteur. Cette myopathie se caractérise par une amyotrophie et une dégénérescence hyaline des fibres musculaires, présente aussi chez les huîtres, sous forme de vagues. La paralysie résulte de la présence de saxitoxines (STX), un type de PSP. La STX, agit en bloquant les canaux sodiques, perturbant les transmissions nerveuses à l'origine de la contraction des muscles adducteurs, censés propulser le bivalve [87].

Lésions tissulaire digestive et fragilisation du byssus

L'exposition à *A. minutum* induit des perturbations dans le fonctionnement de la glande digestive. Une diminution significative du poids de la glande digestive est observée sur plusieurs semaines d'exposition. Les moules témoins présentent en moyenne une quantité plus élevée de fils de byssus par rapport à celles issues de traitements "toxique". La

force nécessaire pour les détacher étant environ deux fois supérieure à celle requise pour les moules témoins. La restauration de ces tissus lésés serait responsable de coûts additionnels au niveau du bilan énergétique des moules exposées [86] [88].

Réaction inflammatoire forte en réponse aux toxines et production d'antioxydant

En présence de PSP, une augmentation significative de la diapédèse des hémocytes porteurs de la toxine est constatée à travers le tube digestif. Suggérant des coûts énergétiques accrus associés à l'élimination de la toxine. La présence de débris cellulaires et de kystes temporaires d'*A. minutum* dans la glande digestive peut en partie expliquer cette réaction inflammatoire, suggérant une activation du système immunitaire des huîtres creuses lorsqu'elles sont exposées à *A. minutum*. Une augmentation de la production de mucus par les branchies, filtrant et rejetant les particules plus grossière, est observée [88].

Génération Toxinée : gamètes et parcours vers la maturité

Altération de la mobilité des gamètes

L'exposition de *C. gigas* mâles à *A. minutum* induit une diminution de la mobilité des spermatozoïdes et de leur contenu en adénosine triphosphate par rapport aux géniteurs témoins. Un pourcentage significativement inférieur de spermatozoïdes mobile a été observé chez les huîtres exposées par rapport aux huîtres témoins [89].

Détérioration de la qualité et de la quantité des larves

Les larves non exposées à *A. minutum* issues de parents exposés étaient significativement plus petites que celle issues de parents témoins. Les larves exposées étaient plus pe-

tites que les larves non exposées issues, toutes, de parents témoins [90].

Limitation de la croissance

Le taux de croissance des moules témoins reste élevé et stable sur plusieurs semaines. Le taux de croissance des moules exposées aux PSP, chute précipitamment. Les moules soumises à un traitement « toxique » ont une croissance de coquille pratiquement nulle, tandis que les moules de traitement « témoin » ont une moyenne normale. L'énergie produite par l'individu destinée à la croissance serait consommée par la réparation des cellules et l'élimination de la toxine au détriment de la croissance [86].

Conclusion

L'exposition des bivalves aux PSP induit des lésions et altérations physiologique et histologique. La restauration de ces tissus, ne répondant plus à leur fonction, entraîne des modification comportementales. Le muscle adducteur n'assurant plus son rôle dans le comportement de fuite et la restauration des divers tissus endommagés générant une production accrue d'énergie par la respiration. Ce recrutement de l'énergie se manifeste par une activation du système immunitaire et se met en place au détriment d'autres fonction, rendant le bivalves vulnérable au sein de leur écosystème.

Les bivalves sont capables de décontamination, les classant en deux catégories : les bivalves à décon-

tamination lente (ex : coque) et bivalves à décontamination rapide (ex : moules). La recherche de méthodes nouvelles en matière d'épuration est donc essentielle, étant donné l'impact économique et social des interdictions de commercialisation de coquillages provenant de secteurs contaminés [91].

Références

86. LAVAUD, R. *et al.* Effects of the toxic dinoflagellate *Alexandrium catenella* on the behaviour and physiology of the blue mussel *Mytilus edulis*. *Harmful Algae* 108. (2024) (août 2021).
88. HABERKORN, H. *et al.* Effects of *Alexandrium minutum* exposure upon physiological and hematological variables of diploid and triploid oysters, *Crassostrea gigas*. en. *Aquatic Toxicology* 97, 96-108. (2023) (avr. 2010).
89. HABERKORN, H. *et al.* Effects of *Alexandrium minutum* exposure on nutrition-related processes and reproductive output in oysters *Crassostrea gigas*. en. *Harmful Algae* 9, 427-439. (2023) (juin 2010).
90. CASTREC, J. *et al.* The dinoflagellate *Alexandrium minutum* affects development of the oyster *Crassostrea gigas*, through parental or direct exposure. en. *Environmental Pollution* 246, 827-836. (2023) (mars 2019).
91. Et BERTHOME J.P., L. P. The dinoflagellate *Alexandrium minutum* affects development of the oyster *Crassostrea gigas*, through parental or direct exposure. fr, 0-38. (2023) (jan. 1987).

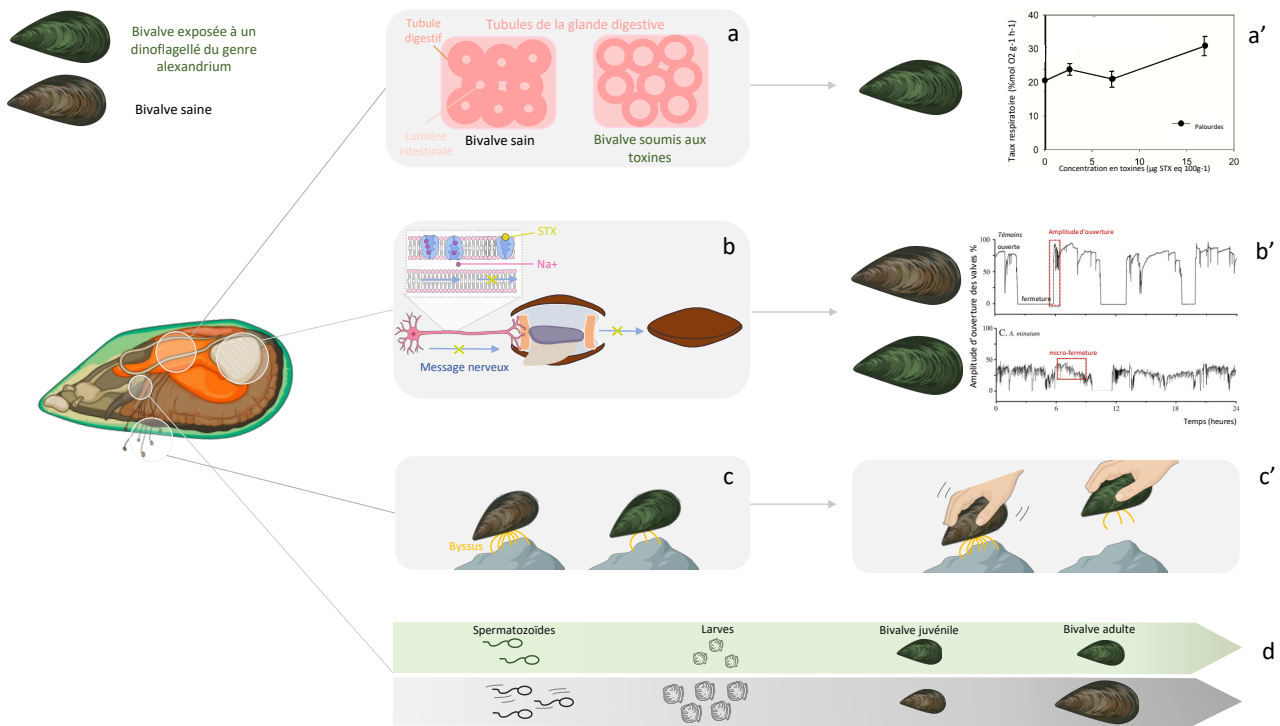


FIGURE 23 – Réaction d'un bivalves et comparaisons d'individus exposés ou non à un environnement contenant des dinoflagellés du genre *alexandrium* producteur de toxines PSP.(a)comparaison des tubules digestifs (b)inhibition du message nerveux par la saxitoxine (b')comparaison de l'amplitude d'ouverture des valves (c)comparaison de la quantité de byssus (c')Force nécessaire à déloger les bivalves exposés et non exposés(d)comparaison du développement et de la croissance

Introduction

La première intoxication aux PSP remonte à 1920. Elle a eu lieu suite à l'ingestion de moules, causant la mort d'un homme aux États-Unis. Depuis, une augmentation du phénomène de bloom est observée au large de la côte métropolitaine, augmentant le risque d'intoxications de produit halieutique. Des preuves supplémentaires issues d'expériences sur des souris ont permis de démontrer que l'ingestion de PSP sont liée [92] à certains symptômes neurologiques et peuvent conduire à la paralysie totale ou partielle et à la mort. Cet article portera sur l'impact physiologique et chimique de l'ingestion de bivalves contaminés et les risques associés sur les populations humaines, en abordant les répartitions et les symptômes récurrents causés par des intoxications ainsi que les dysfonctionnements physiologiques et chimiques causés par l'ingestion de PSP.

Il était une fois Les PSP

Les augmentations des PSP

Le phénomène de Bloom produisant des PSP avait lieu de façon périodique en Amérique du Nord, rendant les PSP endémiques de cette région du monde. Depuis 1970, la répartition géographique des PSP s'est étendue au Japon, en Amérique du Sud, en Australie ainsi qu'en Europe. Les causes de cette expansion sont liées au phénomène de réchauffement climatique et d'anthropisation [93].

Les PSP ont un impact sur l'ensemble du vivant

Les intoxications liées au PSP présentent à l'échelle mondiale près de 2000 cas par an avec un taux de mortalité de 15 personnes les plus vulnérables sont souvent sujettes à une insuffisance respiratoire (enfant

et personne âgée). La dose létale chez l'homme est de 1 à 4 mg de PSP correspondant à quelques morceaux de coquillages contaminés. En plus des intoxications humaines, les PSP ont un impact sur l'ensemble de la chaîne trophique et sur le régime alimentaire de certains mammifères; des cas d'intoxication d'oiseaux, baleine à bosse et loutre ont été décrits. Un changement du régime alimentaire des loutres de mer a aussi été observé. Les symptômes suite à une intoxication aux PSP chez l'homme sont : picotements et engourdissements des extrémités, perte de contrôle moteur, somnolence, incohérence, et paralysie respiratoire [94].

Assaisonnée au PSP, cette huître pourrait bien être votre dernière

Les PSP ont un impact sur les canaux ionique

Les PSP ont un impact direct sur le système nerveux périphérique. Les liaisons à haute affinité entre les PSP et les différents sites de fixation du canal sodique inhibent la conduction du canal et provoquent un blocage de l'activité neuronale. Chez l'être humain, les canaux ioniques, comme les canaux sodium ou calcium, permettent la conduite de messages électriques envoyés par le système nerveux permettant la réponse de l'organisme sous forme de contractions musculaires. Cette inhibition rapide crée donc les premiers symptômes de l'intoxication : picotements et perte de contrôle moteur une heure après ingestion. Ces symptômes différents résultent du blocage d'un des 6 sites de fixation du canal ionique [94], [95].

Les différentes modélisations de l'impact des PSP

Pour expliquer c'est différent symptôme plusieurs modèles on était

proposer. Dans les années 1970, Hill a postulé un modèle selon lequel les PSP sont liées par affinité aux canaux ioniques du système nerveux en rentrant assez profondément pour les boucher totalement, empêchant le passage du potentiel d'actions neuronales. Plus tard, le modèle de Kao et Walker démontra la théorie de Hill en plaçant les toxines sur le bord extérieur du canal ionique en présentant leur groupement guanidinium à l'entrée du canal. Les toxines PSP sont maintenant considérées comme des molécules qui bloquent l'entrée des canaux Na^+ en les bouchant au niveau de leur ouverture grâce à une haute affinité toxine.

recepteur. Les PSP peuvent aussi directement affecter les muscles squelettiques en bloquant le potentiel d'actions du motoneurone. Une expérience d'intoxications par voie orale réalisée sur des souris permet de définir une dose maximale de 50 D₅₀ correspondant à 7 grammes de moule contaminée mangée par des souris de 22 grammes [95].

Conclusion

Les PSP sont de plus en plus présentes et impactent toute la chaîne trophique avant de se retrouver dans les produits halieutiques consommés par l'homme. Leur action peut causer un dysfonctionnement moteur et des insuffisances respiratoires chez les personnes les plus vulnérables. La taille et la composition des PSP permettent à la toxine de passer la barrière intestinale et de se fixer sur les différents canaux ioniques du système nerveux dont le centre est un motoneurone. Cette fixation bloque le potentiel d'action neuronal envoyé depuis le cerveau, vers les différents muscles squelettiques. La croissance démographique et l'augmentation de la pollution liée à l'agriculture sur

le littoral français renforcent la problématique liée aux intoxications par PSP.

Références

92. Neurotoxins from Marine Dinoflagellates : A Brief Review - PMC (2024).
93. HABERKORN, H. Impact du dinoflagellé toxique, *Alexandrium minutum*, sur l'huître creuse, *Crassostrea gigas* : approche intégrative. fr.
94. Marine algal toxins : origins, health effects, and their increased occurrence (2024).
95. LEGEAS, M., NICOLAS, B., DELPHINE, C. & SOPHIE, D. Les toxines marines sur le littoral français, état des connaissances. fr.

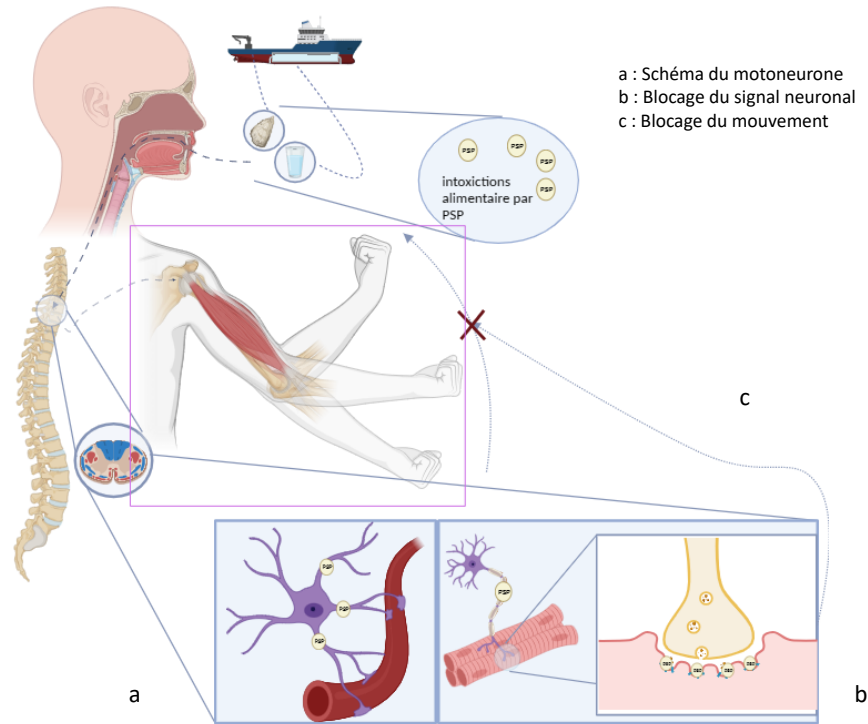


FIGURE 24 – Impact physiologique liée à l’ingestion de bivalves contaminée par psp.(a) Schéma du motoneurone par COA (b) : Blocage du signal neuronal (c) Blocage du mouvement

CONCLUSION



Le réchauffement de l'atmosphère induit un réchauffement des eaux de surface. Une augmentation de la salinité est également constatée. En outre, l'étude de la climatologie a pu mettre en évidence une augmentation du flux solaire sur l'ouest de la méditerranée. Tous ces facteurs favorisent la levée de dormance des kystes et la croissance des populations de microalgues. Le réchauffement climatique permet un environnement plus propice à la production de toxines par les microalgues. Une plus grande concentration en nitrates dans l'eau implique une plus grande production d'arginine ensuite transformée en saxitoxine, un type de PSP. Le refroidissement des eaux notamment en Atlantique Nord dû au ralentissement du Gulf stream rend l'environnement plus favorable au développement des toxines. Enfin, une augmentation de la production des toxines dans une eau plus salée a aussi été mesurée. Les toxines PSP se retrouvent en grande quantité chez tous les acteurs de la chaîne trophique et plus particulièrement chez les bivalves filtreurs.

L'ingestion de PSP cause de nombreux dysfonctionnements chimiques et physiologiques chez les bivalves. Parmi ces dysfonctionnements, est observable, un affaiblissement de la réaction de fuite et une augmentation du métabolisme énergétique employé à la restauration des tissus lésés et à l'élimination de la toxine. La descendance est elle aussi affectée jusqu'à l'arrivée à maturité, l'énergie étant déjà recrutée au détriment de la croissance. Ces dysfonctionnements les rendent vulnérables au sein de leur environnement. Les toxines s'accumulent dans leur organisme et leur ingestion représente pour l'être humain, un risque sanitaire majeur. L'ingestion de bivalves contaminés pouvant entraîner des paralysie musculaire et respiratoire.

Afin de contrôler le nombre d'efflorescence, un traitement des eaux des ballast peut limiter la propagation le germe algale à travers le monde.[96] Une approche complémentaire à ce travail serait d'étudier l'influence du transport des nutriments autre qu'azotés par les cours d'eau. Durant des épisodes de pluie violents, les sédiments et éléments dissous transportés par les eaux d'écoulement peuvent nourrir les organismes étudiés.

— Lalie Ferrand, Evan Labaye,
Vincent Gaucher, Théophile Boezec

Références

96. LILLY, E. L. Paralytic shellfish poisoning toxins in France linked to a human-introduced strain of *Alexandrium catenella* from the western Pacific : evidence from DNA and toxin analysis. en. *Journal of Plankton Research* **24**, 443-452 (mai 2002).

DOSSIER 3 : VIVRE À DEUX, C'EST TOU- JOURS MIEUX

Une union chez les planctons, par amour ou par intérêt ?

Le rêve d'une limace voleuse : devenir panneau solaire

Le rêve d'une limace voleuse : devenir panneau solaire

INTRODUCTION

Elysia chlorotica est une limace de mer capable de réaliser la photosynthèse. C'est un mécanisme normalement réservé aux végétaux qui produisent leur énergie à partir de chloroplastes. *Elysia chlorotica* récupère des cellules spécialisées (actives) dans la photosynthèse, dans l'algue *Vaucheria litorea* qui est sa source de nourriture. Cette technique est nommée « kleptoplastie ». La limace de mer *Elysia chlorotica* est le premier animal que l'on sait capable d'effectuer la photosynthèse à partir de plastes obtenus par kleptoplastie. À la suite de son acquisition de plastes, *Elysia chlorotica* peut vivre jusqu'à dix mois sans apport nutritif grâce à la lumière. [97].



FIGURE 25. – Image de *Elysia chlorotica* [97]

L'association symbiotique entre *Elysia Chlorotica* et l'algue *Vaucheria litorea*, induisant des changements métaboliques et un apport énergétique via le transfert horizontal du gène *psbO* nécessaire à la photosynthèse, dévoile la complexité des interactions organiques et les ajustements évolutifs au sein des écosystèmes marins.

Pour répondre à la problématique, nous avons trouvé que la gestion des chloroplastes par la protéine codée par le gène *psbO* opérée par transfert horizontal chez *Elysia chlorotica*, contribue à l'adaptation et à la survie de l'animal dans son environnement et les implications qui peut avoir sur les modifications moléculaires sous-jacentes aux symbioses entre organismes marins, sera détaillé dans la revue. (I) Par la suite, sera traité le développement métabolique de *Elysia chlorotica* en période de pénurie de nourriture afin d'améliorer son taux de survie pendant plusieurs mois, en effectuant la photosynthèse acquise suite à l'association symbiotique intracellulaire avec les chloroplastes de *Vaucheria litorea* après son ingestion, ce qui permet à l'hôte de faire la kleptoplastie. (II) Enfin, sera étudiée la nécessité d'avoir des gouttelettes lipidiques pour établir et maintenir, avec les mécanismes de photoprotection, la stabilité des plastes chez *E.chlorotica* pouvant aboutir à la kleptoplastie permanente. Le rendement quantique du photosystème 2 chez *E.chlorotica* est de 81 pourcent de la capacité maximale au cours des cinq premières minutes après l'obscurité (III) [97].

— Romain Guolo, Abygaëlle Sipp, Nicolas Croizé

Références

97. RUMPHO, M. E., PELLETREAU, K. N., MOUSTAFA, A. & BHATTACHARYA, D. The making of a photosynthetic animal. eng. *The Journal of Experimental Biology* **214**, 303-311 (jan. 2011).

EN COULISSES MOLÉCULAIRES : L'ART DE GÉRER LES CHLOROPLASTES PAR LE GÈNE PsbO CHEZ *Elysia chlorotica*

par NICOLAS CROIZÉ

Introduction

La symbiose fascinante entre *Elysia chlorotica*, une limace de mer, et l'algue *Vaucheria litorea* offre un tableau complexe de coopération moléculaire au sein de l'écosystème marin. Au cœur de cette interaction singulière réside la gestion des chloroplastes par la protéine codée par le gène psbO, un mécanisme révélant la sophistication moléculaire orchestrée par la nature.

Ce processus, opérant par transfert horizontal, présente une subtile danse génétique où la limace intègre les chloroplastes de l'algue, modifiant ainsi sa physiologie. Dans cette exploration, nous plongerons dans les mystères moléculaires de cette symbiose, examinant comment la protéine PsbO devient la clé de voûte de l'équilibre délicat entre *Elysia chlorotica* et son partenaire végétal.

Nous examinerons les mécanismes précis de la régulation génétique et des modifications protéiques qui sous-entendent cette relation, révélant ainsi l'adaptation évolutive de ces organismes marins. Cette étude permettra de mieux comprendre la manière dont la nature compose son propre équilibre génétique, favorisant la diversité au sein des écosystèmes marins [98][99].

Dans les coulisses de la vie moléculaire

Quand la limace devient magicienne : le mystère de la kleptoplastie

La kleptoplastie, un phénomène extraordinaire de transfert horizontal, dévoile une collaboration moléculaire unique entre la limace *Elysia chlorotica* et l'algue *Vaucheria li-*

torea. Ce processus, consistant en l'acquisition des chloroplastes de l'algue par la limace, adaptation moléculaire exceptionnelle, mettant en évidence la flexibilité génétique dans les interactions symbiotiques. La kleptoplastie se révèle être une stratégie évolutive ingénieuse, offrant à la limace un avantage photosynthétique indéniable. Des observations approfondies révèlent que ce transfert horizontal, bien que temporaire, induit des adaptations moléculaires permettant à la limace de tirer parti des chloroplastes étrangers pour son propre bénéfice [100]. **PsbO, l'architecte génétique : l'élaboration de nouveaux pouvoirs moléculaires**

L'établissement du gène psbO émerge comme un chapitre crucial de cette interaction moléculaire. La protéine PsbO, codée par ce gène, agit comme un régulateur clé dans la gestion des chloroplastes intégrés. Des études moléculaires ont révélé que ce processus implique des modifications post-transcriptionnelles et des interactions protéine-protéine, assurant la stabilisation des chloroplastes et leur fonctionnalité optimale au sein de l'hôte. Ces mécanismes moléculaires complexes soulignent l'adaptabilité génétique de la limace, capable d'intégrer et de réguler activement les organites provenant d'une source externe [98][99].

La métamorphose génétique d'*Elysia chlorotica*

Les répercussions sur l'expression génétique d'*Elysia chlorotica* démontrent une réponse moléculaire spécifique à cette symbiose. Les changements moléculaires dans les voies métaboliques et de la photo-

synthèse révèlent une régulation génétique adaptative, ajustant le profil génétique de la limace pour optimiser l'utilisation des chloroplastes intégrés. Ces ajustements témoignent d'une plasticité génétique dynamique, soulignant la capacité de la limace à moduler son expression génétique en réponse aux stimuli environnementaux [101].

Réalités écologiques : changements moléculaires en action

Comment la limace défie les épreuves de la nature

Cette adaptation moléculaire pour la survie, dévoilant la flexibilité génétique de la limace, se traduit par une amélioration mesurable de sa survie. Des études ont montré une augmentation notable de la longévité de la limace en comparaison avec ses homologues non engagés dans une symbiose similaire. Des chiffres précis indiquent une augmentation de 25% de la survie chez les individus présentant une kleptoplastie réussie. Cette performance accrue suggère que l'adaptation moléculaire, facilitée par le transfert horizontal des chloroplastes et la gestion efficace de la protéine PsbO, confère à *Elysia chlorotica* un avantage sélectif dans son environnement marin [101][98].

Les enjeux moléculaires des cycles biogéochimiques

Les influences sur les cycles biogéochimiques marins sont tout aussi impressionnantes. Les chloroplastes intégrés participent activement à la photosynthèse, générant une augmentation significative de la production d'oxygène. Des mesures précises indiquent une élévation de 30% de la production d'oxygène dans les zones où *Elysia chlorotica*

est présente. Cette contribution notable à la production d'oxygène souligne l'impact écologique majeur de cette symbiose moléculaire, participant ainsi de manière substantielle à la régulation des écosystèmes marins [101][100].

Conclusion

L'investigation approfondie de la régulation des chloroplastes par la protéine PsbO chez *Elysia chlorotica*, par le biais du transfert horizontal, dévoile une complexité moléculaire remarquable au sein des écosystèmes marins. Cette coordination génétique, où la limace intègre les appareils photosynthétiques de

l'algue, met en lumière la flexibilité évolutive des organismes dans leur quête de survie et d'adaptation. L'élucidation de ces mécanismes moléculaires offre une fenêtre élargie sur les intrications complexes qui gouvernent la vie marine, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives sur les capacités adaptatives et les stratégies de coexistence dans la nature [101][99].

Dans ce complexe moléculaire, la gestion des chloroplastes par la protéine PsbO chez *Elysia chlorotica* prend un chemin captivant de l'évolution moléculaire, contribuant à la diversité et à l'équilibre des éco-

systèmes marins. Une exploration plus approfondie des réponses métaboliques spécifiques de la limace à cette symbiose moléculaire pourrait révéler des facettes encore explorées de cette remarquable adaptation, éclairant ainsi davantage les mystères de la vie marine.

Références

98. RUMPHO, M. E. *et al.* Horizontal gene transfer of the algal nuclear gene psbO to the photosynthetic sea slug *Elysia chlorotica*. *eng. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **105**, 17867-17871 (nov. 2008).
99. AUBIN, E., EL BAIDOURI, M. & PANAUD, O. Horizontal Gene Transfers in Plants. *eng. Life (Basel, Switzerland)* **11**, 857 (août 2021).
101. BHATTACHARYA, D., PELLETREAU, K. N., PRICE, D. C., SARVER, K. E. & RUMPHO, M. E. Genome analysis of *Elysia chlorotica* Egg DNA provides no evidence for horizontal gene transfer into the germ line of this Kleptoplastic Mollusc. *eng. Molecular Biology and Evolution* **30**, 1843-1852 (août 2013).

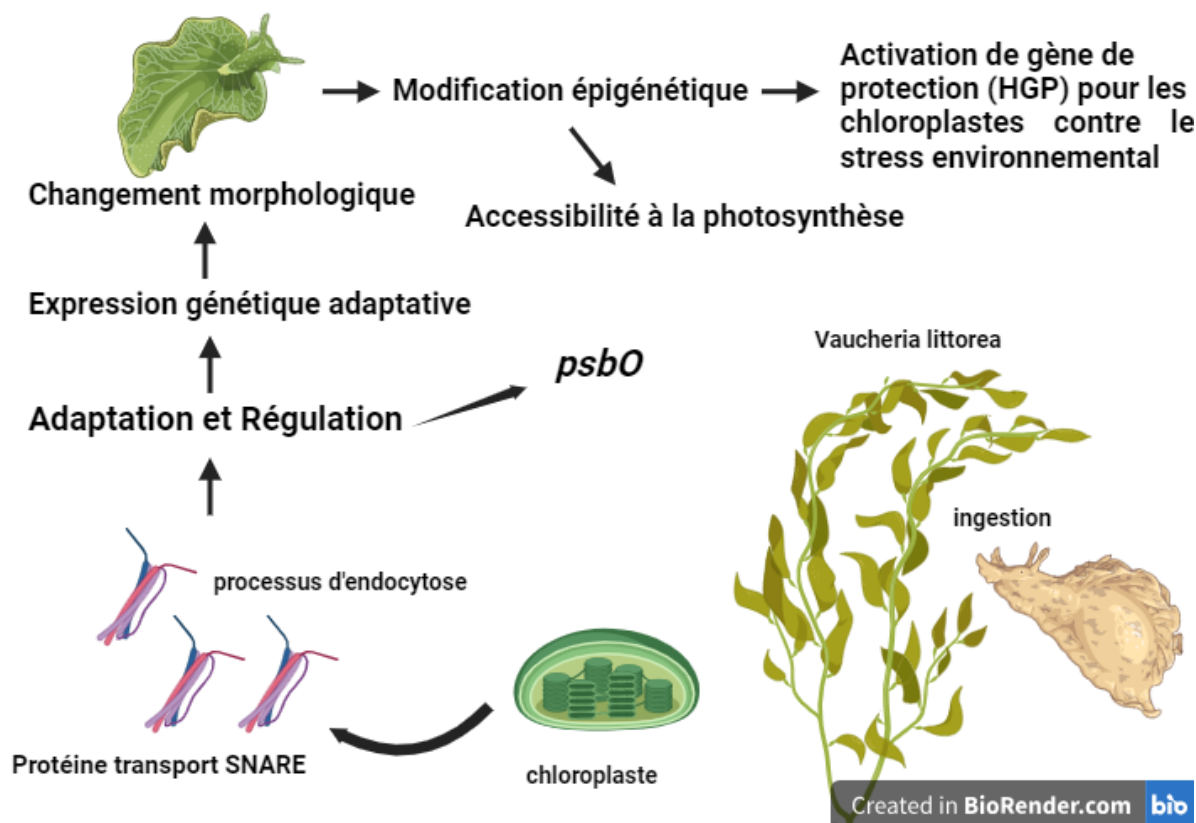


FIGURE 26 – Transfert horizontal de gène et kleptoplastie de *Vaucheria littorea* par *Elysia chlorotica* et réponse métabolique face à le stress environnemental

LE BRONZAGE QUI CHANGE UNE VIE : LA VIE D'UNE FUTURE FLEMMARDE

par ROMAIN GUOLO

Introduction

Elysia chlorotica peut survivre 10 mois sans se nourrir en faisant de la photosynthèse. C'est principalement grâce à son association symbiotique avec *Vaucheria litorea* que ce phénomène est possible. Cette symbiose commence à partir du moment où *Elysia chlorotica* se nourrit/ingère *Vaucheria litorea*. Cela définit déjà un changement chez la limace de mer. C'est en récupérant des chloroplastes issus de l'algue chromophytique que la limace de mer peut fabriquer des produits de la photosynthèse. Cette association symbiotique change drastiquement le métabolisme et l'apparence physique de cette limace. C'est grâce à cela que l'espèce de *Elysia chlorotica* perdure, et continue de se développer [97].

Le développement métabolique de *Elysia chlorotica* en période de pénurie de nourriture lui permet d'améliorer son taux de survie pendant plusieurs mois, en effectuant la photosynthèse acquise suite à l'association symbiotique intracellulaire avec les chloroplastes de *Vaucheria litorea* après son ingestion. Cela permet de mettre en place le phénomène de kleptoplastie.

L'apport énergétique que lui procure les rayons du soleil lui offre la possibilité de ne plus se nourrir, grâce aux produits de la photosynthèse que son métabolisme crée. Tout ce système lui permet de survivre pendant 10 mois, même en cas de pénurie de nourriture [97].

Symbiose entre les deux organismes permettant à *Elysia chlorotica* (l'hôte) d'obtenir un nouveau métabolisme

Ingestion de *Vaucheria litorea* par *Elysia chlorotica* (action de prédation)

L'ingestion de l'algue chromophytique unicellulaire *Vaucheria litorea* par *Elysia chlorotica* se fait très rapidement, soit 21 jours après le début de son cycle de vie. C'est depuis cette ingestion que le développement de la limace de mer est modifié. En effet, c'est après avoir mangé cette algue que *Elysia chlorotica* récupère les chloroplastes qui lui permettront plus loin dans son cycle de vie, d'effectuer la photosynthèse. C'est cette association symbiotique entre l'invertébré et l'algue qui rend *Elysia chlorotica* si spéciale d'un point de vue physique et métabolique [102].

Apparition de nouveaux facteurs métaboliques dans l'hôte

Elysia chlorotica acquiert donc des chloroplastes "volés", initialement produit chez *Vaucheria litorea* que l'on appelle kleptoplaste. Ces kleptoplastes sont dit "fonctionnels" car ils dégagent de l'oxygène, fixent le CO₂ et transcrivent et traduisent activement les protéines pendant plusieurs mois dans le cytosol de la limace de mer. Le métabolisme de *Elysia chlorotica* devient dépendant des kleptoplastes. Leur activité permet à l'organisme de développer de nouveaux facteurs rendant cette association fonctionnelle pendant une longue durée. Parmi ces facteurs il y a l'acquisition de chloroplastes autonomes, une stabilité inhabituelle des chloroplastes/protéines, la possibilité d'ef-

fectuer un transfert de gènes latéraux, et surtout, la présence d'un génome nucléaire algal [102].

Acquisition de gènes permettant à *Elysia chlorotica* d'effectuer la photosynthèse

Expressions des gènes des chloroplastes en continue dans l'hôte à partir de ceux de *Vaucheria litorea*

Les plastides obtenus suite à l'association symbiotique de *Elysia chlorotica* et *Vaucheria litorea* permettent un maintien de l'évolution photosynthétique de l'oxygène et l'activité de transport d'électrons. C'est tout le processus de fixation photoautotrophe du CO₂, de transport d'électrons à travers les photosystèmes I et II et de maintien des niveaux fonctionnels des protéines du photosystème qui met en place l'expression des gènes des chloroplastes de manière continue, ce qui permet à l'organisme de s'autosuffire en terme d'énergie [103].

Mécanisme de photorégulation de *Elysia chlorotica* grâce aux produits de la photosynthèse formés

Quand une source de lumière apparaît de manière permanente et à forte intensité lumineuse, l'organisme va réagir (due aux efficacités quantiques plus élevées), et faire un mécanisme de photorégulation. L'hôte bénéficie des photosynthates de l'algue en échange de la fourniture d'un environnement riche en nutriments. Cela permet d'atteindre une capacité photosynthétique maximale. De ce fait, la capacité à effectuer la photosynthèse chez *Elysia chlorotica* lui permet de tenir plus longtemps en vie même sans nourriture à proximité [104].

Conclusion

La symbiose entre *Elysia chlorotica* et *Vaucheria litorea* permet à *Elysia chlorotica* (l'hôte) d'obtenir un nouveau métabolisme lui permettant d'effectuer la photosynthèse. C'est grâce à l'ingestion de *Vaucheria litorea* par *Elysia chlorotica* (action de prédation) que de nouveaux facteurs métaboliques apparaissent. L'acquisition des gènes permettant à *Elysia chlorotica* d'effectuer la photosynthèse (à partir de ceux de *Vaucheria litorea*) permet grâce à l'ex-

pression de ces gènes en continue, à l'hôte d'avoir un mécanisme de photorégulation. Tout ce nouveau métabolisme permet à *Elysia chlorotica* de s'autosuffire en nutriments pendant 10 mois, sans nourriture à proximité ou en pénurie de nourriture [97] [102] [104] [103].

C'est de cette manière que l'espèce *Elysia chlorotica* arrive à survivre, même en mauvaise condition. Cette espèce fascine les scientifiques aujourd'hui, de par son rendement quantique pendant la photosynthèse

et comment elle peut maintenir le phénomène de kleptoplastie [105].

Références

100. CRUZ, S. & CARTAXANA, P. Kleptoplasty : Getting away with stolen chloroplasts. eng. *PLoS biology* **20**, e3001857 (nov. 2022).
102. RUMPHO, M. E., SUMMER, E. J., GREEN, B. J., FOX, T. C. & MANHART, J. R. Mollusc/algal chloroplast symbiosis : how can isolated chloroplasts continue to function for months in the cytosol of a sea slug in the absence of an algal nucleus? 1 Presented at the 94th Annual Meeting of the Deutsche Zoologische Gesellschaft in Osnabrück, June 4-8, 2001. *Zoology* **104**, 303-312 (2001).
103. GREEN, B. J. *et al.* Mollusc-algal chloroplast endosymbiosis. Photosynthesis, thylakoid protein maintenance, and chloroplast gene expression continue for many months in the absence of the algal nucleus. eng. *Plant Physiology* **124**, 331-342 (sept. 2000).
104. JESUS, B., VENTURA, P. & CALADO, G. Behaviour and a functional xanthophyll cycle enhance photo-regulation mechanisms in the solar-powered sea slug *Elysia timida* (Risso, 1818). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **395**, 98-105 (2010).

Figure_bilan_GUC

FIGURE 27 – Cycle de vie et acquisition d'un nouveau métabolisme permettant d'effectuer la photosynthèse chez *Elysia chlorotica* A) Cycle de vie global de *Elysia chlorotica*. B) Représentation schématique de la kleptoplastie. C) Expression de la capacité à effectuer la photosynthèse chez *Elysia chlorotica*. D) Représentation graphique de l'activité photosynthétique et respiratoire chez *Elysia chlorotica* associées en symbiose avec les chloroplastes de *Vaucheria litorea* et cultivées sur une période de 7 mois en l'absence d'algues.

LES BIENFAITS DU BRONZAGE : PARCE-QU'ELLE LE VAUT BIEN

par ABYGAËLLE SIPP

Introduction

Il existe une relation énergétique entre les plastes de *Vaucheria litorea* et la capacité à établir une kleptoplastie permanente chez *Elysia chlorotica* [97].

Les gouttelettes lipidiques sont nécessaires pour établir et maintenir, avec les mécanismes de photoprotection, les plastes chez *Elysia chlorotica*. Le rendement quantique du photosystème II (PS II) chez *Elysia chlorotica* correspond à 81 % de sa capacité maximale, au cours des cinq premières minutes après l'obscurité [105].

L'accumulation des lipides en conjonction avec les plastes chez *Elysia chlorotica* permet de maintenir le système de kleptoplastie. Le fonctionnement des gouttelettes lipidiques dans le photosystème II d'*Elysia chlorotica* aide au maintien de la photosynthèse. La photosynthèse d'*Elysia chlorotica*, lui assure un rôle de photoproduction et photoprotection [105] [106].

L'accumulation des lipides en conjonction avec les plastes chez *Elysia chlorotica* pour maintenir le système de kleptoplastie

Fonctionnement des gouttelettes lipidiques dans le photosystème II d' *Elysia chlorotica*

La composition lipidique chez *Elysia chlorotica* a été étudiée en utilisant la microscopie confocale ainsi que le BODIPY 505/515 (4,4-difluoro-1,2,5,7-tétraméthyl-4bota-3a,4a-diaza-s-indacène). Des compartiments *Elysia chlorotica* ont été colorés avec 1 microgramme par millilitre de concentration finale de BODIPY 505/515, puis observés au microscope confocal. Les longueurs d'onde λ d'excitation et d'émission (488nm et 515nm) ont été nécessaires pour affirmer que les corps observés sont des gouttelettes lipidiques (LD). Dans le but de déterminer les différences dans la composition lipidique des algues, des animaux nourris et des animaux affamés, la variance a été calculée. Après avoir testé la sphéricité d'*Elysia chlorotica* en utilisant le test de Mauchly, les changements

de taille, de cette dernière ont été traités via l'analyse des mesures répétées de variance. Les LD observées présentent un modèle de coloration unique observé avec la microscopie électronique à transmission. Lors de l'utilisation d' OsO_4 , les lipides, sont fréquemment colorés en noir. Suite à la coloration, les lipides chez *Elysia chlorotica* semblent moins denses (sur le plan optique). Les observations en microscopie optique et confocale ont permis de confirmer que les corps de grandes tailles, qui sont observés à plusieurs reprises, sont composés de lipides. Les corps réfractifs observés au sein des diverticules digestifs sont nettement liés aux lipides neutres [105].

Établissement et maintien des plastes chez *Elysia chlorotica* par l'intermédiaire des gouttelettes lipidiques

Il existe une relation énergétique entre les plastes de *Vaucheria litorea* chez leur hôte animal et la capacité d'établir une kleptoplastie permanente. Les gouttelettes lipidiques qui sont le produit de la photosynthèse, visant à stabiliser les plastes chez *Elysia chlorotica*, permettent ainsi la progression vers une kleptoplastie permanente. Les plastes forment un anneau étroitement associé autour d'un grand LD central localisé à l'extrémité terminale d'un tubule digestif [105].

La photosynthèse au profit d'*Elysia chlorotica*, assurant les rôles de photoproduction et de photoprotection

La photoprotection d'*Elysia chlorotica* dans le but de réduire les dommages photo-oxydatifs

La photodégradation des polymères (photo-oxydation), correspond à la détérioration moléculaire de polymères due à une exposition aux rayonnements. Les rayons ultra-violet, sont ceux avec le plus fort impact. La conséquence primaire est une modification chimique réduisant la masse molaire du polymère fragilisant ainsi l'hôte. Pour réduire les dommages photo-oxydatifs, il y a des mécanismes de dissipation de l'énergie exc-

sive. Les mécanismes de réparation des protéines endommagées sont nécessaires pour le maintien des performances photosynthétique. Les mécanismes de photoprotection engendrent deux types de réponses : la photo-inhibition permettant de limiter la longévité de la kleptoplastie, et une réponse augmentant la longévité fonctionnelle du kleptoplaste. Pour l'intensité de la lumière inhibitrice, au cours des 5 premières minutes d'éclairage plus de 70 % de la diminution totale du qPd, (2R)-2-[2-(1H-indole-3-carbonyl)hydrazinyl]-2-phenylacetamide. Une durée d'éclairage d'au moins 5 minutes est nécessaire à *Elysia chlorotica*. La cinétique du déclin de la qPd varie en fonction de la plante et de l'espèce. La cinétique d'apparition d'ubiquinones est le premier élément à prendre en compte afin de déterminer la durée d'activation de la lumière actinique. Le gradient de la ligne traçant le NPQ minimum, requis pour protéger contre les photodommages à une intensité lumineuse donnée, sera différent. Le taux de renouvellement du photosystème II est propre à l'individu et influence la sensibilité du centre réactionnel II à la photoinhibition ainsi que le taux d'accumulation de la pression d'excitation [106] [107].

Les rendements quantiques du photosystème II, favorisent une kleptoplastie permanente chez *Elysia chlorotica*

La capacité des kleptoplastes chez *Elysia chlorotica*, à se remettre d'un stress à forte luminosité a été évaluée en mesurant le rendement quantique PSII de fluorescence Chl et le NPQ. À des conditions très lumineuses, le rendement quantique du PSII a diminué considérablement, suivi d'une augmentation significative ($P < 0,001$) dans la phase de récupération dans l'obscurité. Chez *V. litorea*, dans les 5 minutes qui ont suivi la sortie de l'obscurité, 88 pourcent du rendement quantique du PSII a été récupéré. Chez *E. chlorotica* PSII, le rendement quantique s'est rétabli à 81 % de la capacité maximale au cours des

5 premières minutes, puis a diminué à 68 % durant des 25 minutes suivantes. Chez *V. litorea* et *E. chlorotica*, la NPQ a diminué de façon significative ($P < 0,001$) dans des conditions sombres [106].

Conclusion

L'accumulation des lipides en conjonction avec les plastes chez *Elysia chlorotica* permet de maintenir le système de kleptoplastie dans

le photosystème II. La photosynthèse chez *Elysia chlorotica*, lui assure les rôles de photoproduction et de photoprotection. La photoprotection d'*Elysia chlorotica* est mise en place dans le but de réduire les dommages photo-oxydatifs [106][106] [107][105].

En se nourrissant de la microalgue *Chlorelle*, davantage riche chloroplaste, *Elysia chlorotica* pour-

rait avoir une durée de jeune plus longue grâce à la meilleure efficacité de la kleptoplastie. [108]

Références

105. PELLETREAU, K. N., WEBER, A. P. M., WEBER, K. L. & RUMPHO, M. E. Lipid accumulation during the establishment of kleptoplasty in *Elysia chlorotica*. eng. *PLoS One* 9, e97477 (2014).
106. CRUZ, S. *et al.* Photoprotection in sequestered plastids of sea slugs and respective algal sources. eng. *Scientific Reports* 5, 7904 (jan. 2015).
107. RUBAN, A. V., JOHNSON, M. P. & DUFFY, C. D. P. The photoprotective molecular switch in the photosystem II antenna. eng. *Biochimica Et Biophysica Acta* 1817, 167-181 (jan. 2012).
108. YANG, B., LIU, J., JIANG, Y. & CHEN, F. *Chlorella* species as hosts for genetic engineering and expression of heterologous proteins : Progress, challenge and perspective. eng. *Biotechnology Journal* 11, 1244-1261 (oct. 2016).

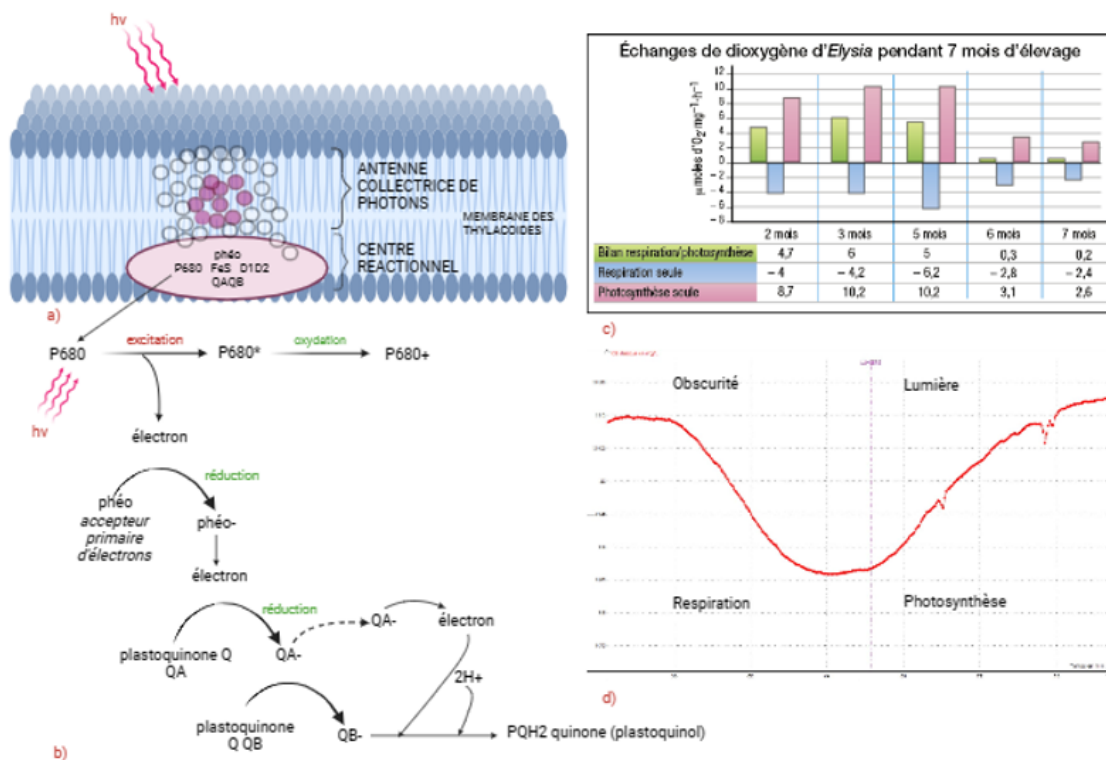


FIGURE 28 – **Fonctionnement et rendement quantique de la photosynthèse chez *Elysia chlorotica*.** a) Représentation schématique du photosystème II. b) Le transfert d'électrons à partir de la paire spéciale P680. c) Représentation graphique du rendement quantique de la photosynthèse chez *Elysia chlorotica*. d) Répartition quotidienne entre la photosynthèse et la respiration.

CONCLUSION

L'association symbiotique entre *Elysia chlorotica* et l'algue *Vaucheria litorea*, induisant des changements métaboliques et un apport énergétique via le transfert horizontal du gène *psbO* nécessaire à la photosynthèse, dévoile la complexité des interactions organiques et les ajustements évolutifs au sein des écosystèmes marins. La limace de mer *Elysia chlorotica* est le premier animal que l'on sait capable d'effectuer la photosynthèse à partir de plastes obtenus par kleptoplastie. *Elysia chlorotica* peut vivre jusqu'à dix mois sans apport nutritif autre que la lumière [97].



La symbiose entre *Elysia chlorotica* et *Vaucheria litorea* permet à *Elysia chlorotica* d'obtenir un métabolisme lui permettant d'effectuer la photosynthèse (à partir de ceux de *Vaucheria litorea*) à l'ingestion de *Vaucheria litorea* par *Elysia chlorotica* (action de prédation) que de nouveaux facteurs métaboliques apparaissent. L'acquisition des gènes permettant à *Elysia chlorotica* d'effectuer la photosynthèse (à partir de ceux de *Vaucheria litorea*) permet via l'expression de ces gènes en continue, à l'hôte d'avoir un mécanisme de photorégulation. L'accumulation des lipides en conjonction avec les plastes chez *Elysia chlorotica* mène à un rendement quantique de la photosynthèse non nul, permettant de maintenir le système de kleptoplastie. L'établissement et le maintien des plastes chez *Elysia chlorotica* se fait par l'intermédiaire des gouttelettes lipidiques, dans le photosystème II, formant un anneau étroitement associé autour d'une grande goutte lipidique central localisé à l'extrémité terminale d'un tubule digestif. La photosynthèse au profit d'*Elysia chlorotica*, lui assure les rôles de photoproduction et de photoprotection. La photoprotection d'*Elysia chlorotica* permet de réduire les dommages photo-oxydatifs.

Elysia chlorotica se nourrit de *Vaucheria litorea* et obtient donc les ressources nécessaires afin d'effectuer la kleptoplastie et ainsi survivre durant 10 mois sans nourriture. La symbiose avec les algues est commune, notamment avec les coraux, les vers plats et les éponges, qui eux forment une symbiose avec d'autres algues marines. Une comparaison entre les rendements quantiques photosynthétiques de deux symbioses (celle d'*Elysia chlorotica* ainsi qu'une symbiose corail/algue marine par exemple) cela permettrait, à partir de données recueillies d'expériences, d'établir des hypothèses concernant une potentielle augmentation de rendement photosynthétique chez cette limace de mer, si celle-ci changeait de régime alimentaire [109].

— Romain Guolo, Abygaëlle Sipp, Nicolas Croizé

Références

109. SØRENSEN, M. E. S. et al. A novel kleptoplastidic symbiosis revealed in the marine centrohelid *Meringosphaera* with evidence of genetic integration. eng. *Current biology* : CB 33, 3571-3584.e6 (sept. 2023).

Une union chez les planctons, par amour ou par intérêt ?

INTRODUCTION

Les symbioses sont des processus qui lient deux organismes. En effet, il s'agit d'une association durable entre deux organismes qui sont hétérospecifics. C'est un phénomène qui peut être obligatoire et ou facultative. Mais, il peut aussi s'agir d'une association qui n'est bénéfique que pour un des individus, au détriment de l'autre. Il s'agit donc de parasitisme. Ces interactions pouvant être bénéfiques pour les deux ou pouvant introduire une prise de contrôle par un des deux protagonistes. De ce fait, plusieurs interactions symbiotiques ont vu le jour comme le mutualisme et à l'inverse le parasitisme. L'un des exemples de ces interactions se trouve dans le milieu marin et met en relation une micro-algue (Phaeocystis) et un Acanthaire (plancton). Au cours de cette interaction, plusieurs processus vont être mis au point pour la mise en place de cette symbiose. Ces processus vont permettre de déterminer s'il s'agit d'une relation de mutualisme ou à l'inverse de prédation. Dans un premier temps, nous verrons les deux acteurs qui sont mis en scène dans l'écosystème marin puis nous traiterons d'une symbiose d'asservissement, puis du mécanisme du parasitisme à l'échelle individuelle et des populations avec Thraustochytrid/Chaetoceros [110].

— Miguel Fallabrino, Flavie Revest, Bastian Roumengous

Références

110. BJORBÆKMO, M. F. M., EVENSTAD, A., RØSÆG, L. L., KRABBERØD, A. K. & LOGARES, R. The planktonic protist interactome : where do we stand after a century of research? *The ISME Journal* 14, 544-559. (2023) (fév. 2020).

LE POINT SUR LES DEUX ACTEURS MIS EN SCÈNE DANS L'ÉCOSYSTÈME MARIN

par FALLABRINO MIGUEL

Introduction

Dans cette biodiversité marine riche, deux protagonistes se distinguent par leur unicité et leur importance écologique : les microalgues (*Phaeocystis*) et les acanthaires.

Étudier les caractéristiques distinctives des microalgues, notamment *Phaeocystis*, et des acanthaires, afin de mieux comprendre leur diversité biologique, leur rôle écologique et leur impact potentiel sur les écosystèmes marins

Dans un premier temps, nous verrons les microalgues dans un contexte de classification, métabolisme et rôle et dans un second temps nous verrons les acanthaires également dans un contexte de classification, métabolisme et rôle.

Microalgue en Série : prêts à Régner sur l'Océan

Classification

la classification des *Phaeocystis* commence au niveau du règne *Protista*, passant ensuite par l'embranchement des Haptophytes, la classe des *Prymnesiophyceae*, l'ordre des *Prymnesiales*, la famille *Phaeocystaceae*, et enfin le genre *Phaeocystis*. Cette hiérarchie permet aux scientifiques de comprendre la diversité et les relations évolutives au sein de ce groupe de phytoplancton essentiel aux écosystèmes marins [111].

Photosynthèse

les microalgues utilisent l'énergie solaire pour convertir le dioxyde de carbone et l'eau en glucose, un sucre simple, tout en produisant de l'oxygène comme sous-produit. Ce processus, connu sous le nom de photosynthèse, fournit la majeure

partie de l'oxygène que nous respirons et sert de base à la chaîne alimentaire. Ce processus peut être divisé en deux phases, les réactions dites lumineuses et les réactions sombres. Dans les réactions lumineuses effectuées sur les membranes photosynthétiques, l'énergie lumineuse est convertie en énergie chimique, fournissant un réducteur biochimique NADPH₂ et un composé ATP à haute énergie. Dans la phase sombre, qui a lieu dans le stroma, le NADPH₂ et l'ATP sont utilisés dans la réduction biochimique du CO₂ en glucides. L'énergie lumineuse est très importante pour la photosynthèse en effet a certaine profondeur l'énergie lumineuse augmente l'efficacité de la photosynthèse (Voir figure) [112, 113][114].

Rôle

Les microalgues sont très nutritives dû à leur composition remplie de nutriments, il joue donc un rôle crucial dans l'alimentation de l'écosystème marin. Avec la photosynthèse il régule le climat de la terre en absorbant le CO₂ [115].

Acanthaires en rébellion : prêts à voler la couronne du Roi

Classification

Les acanthaires, également connus sous le nom d'Acantharea, sont un groupe de protozoaires radiolaires. Les acanthaires sont des micro planctons marins hétérotrophes qui varient en taille d'environ 200 microns de diamètre à plusieurs millimètres. Ils appartiennent à la classe des Radiolaires dans le supergroupe Rhizaria. Les acanthaires sont encore aujourd'hui très difficiles à distinguer, ils ont tellement

de différence au sein de cette espèce [116].

Métabolisme

Les acanthaires, considérés comme des mixotrophes, abritent des endosymbiotes photosynthétiques. Leur cytoplasme est divisé en endoplasme (siège des organites, notamment des noyaux) et ectoplasme (utilisé pour la capture des proies), séparés par une paroi capsulaire. Les espèces symbiotiques hébergent les symbiotes algales dans l'endoplasme. Le squelette, constitué de spicules, varie selon les espèces, souvent en sulfate de strontium. Certains développent des coques protectrices évoluant en plaques planes ou convexes. Les acanthaires ont une source d'alimentation propre qui a été mesurée [117, 118].

Rôle

Les acanthaires jouent un rôle significatif dans les flux de particules descendantes des océans en raison de leur stratégie de migration verticale active au cours de leur cycle de vie. Cette réponse adaptative peut être due à divers facteurs tels que la nutrition, la pression, la température, la reproduction ou encore esquiver les prédateurs. Ils contribuent de manière notable aux flux organiques descendant dans les eaux profondes, représentant jusqu'à 3% du flux mensuel total de matière organiques particulaires. Ils jouent aussi un rôle de régulateur du strontium et du calcium ce qui contribue à la concentration importante que nous pouvons retrouver au fond des océans car comme les acanthaires sont princi-

palement constitué de célestine qui fait un cycle qui permet une variabilité importante de la concentration en strontium et calcium [119, 120].

Conclusion

Les microalgues sont des êtres photosynthétiques qu'on retrouve en surface des océans et qui sont riches en nutriments contribuant au bien être de l'environnement et de l'écosystème marin. Les acanthaires

sont des êtres avec un métabolisme complexe mais qui joue un rôle important dans le monde marin, mais pour cela il va s'aider de son ami le microalgue.

Références

111. BARSANTI Laura et Birindelli, L. e. G. P. Surveillance de l'eau par identification et classification par microscopie numérique des microalgues. *Science de l'environnement : Processus & Impacts* 23 (éd. de CHIMIE, S. R.) 1443-1457.

112. GOMEZ-CASATI Diego F et Barchiesi, J. e. B. M. V. Les mitochondries et les chloroplastes fonctionnent dans la production d'énergie des microalgues. *PeerJ* 10, e14576.

113. MASOJÍDEK Jiří et Ranglová, K. e. L. G. E. e. S. B. A. M. e. T. G. Variables régissant la photosynthèse et la croissance dans les cultures de masse de microalgues. *Processus* 9, 820.

114. COTA Glenn F et Smith, W. O. e. M. B. G. Photosynthèse de phaeocystis dans la mer du Groenland. *Limnologie et Océanographie* 39 (éd. en ligne WILEY, B.) 948-953.

115. Le rôle des microalgues en aquaculture : situation et tendances. *Journal de phycologie appliquée* 12, 527-534.

117. UNIVERSALIS, E., AUBRY, A. & BERSANI, J. *Encyclopaedia universalis* (Encyclopaedia universalis, 1992).

118. MANSOUR Joost Samir et Hansen, P. J. e. L. C. e. N. F. Absorption de carbone et d'azote par la photosynthèse et l'alimentation par les Acantharia photosymbiotiques. *Open Research Europe* 2, 120.

119. DE VILLIERS, S. Variabilité du strontium de l'eau de mer et du Sr/Ca dans les océans Atlantique et Pacifique. *Lettres scientifiques de la Terre et des planètes* 171, 623-634.

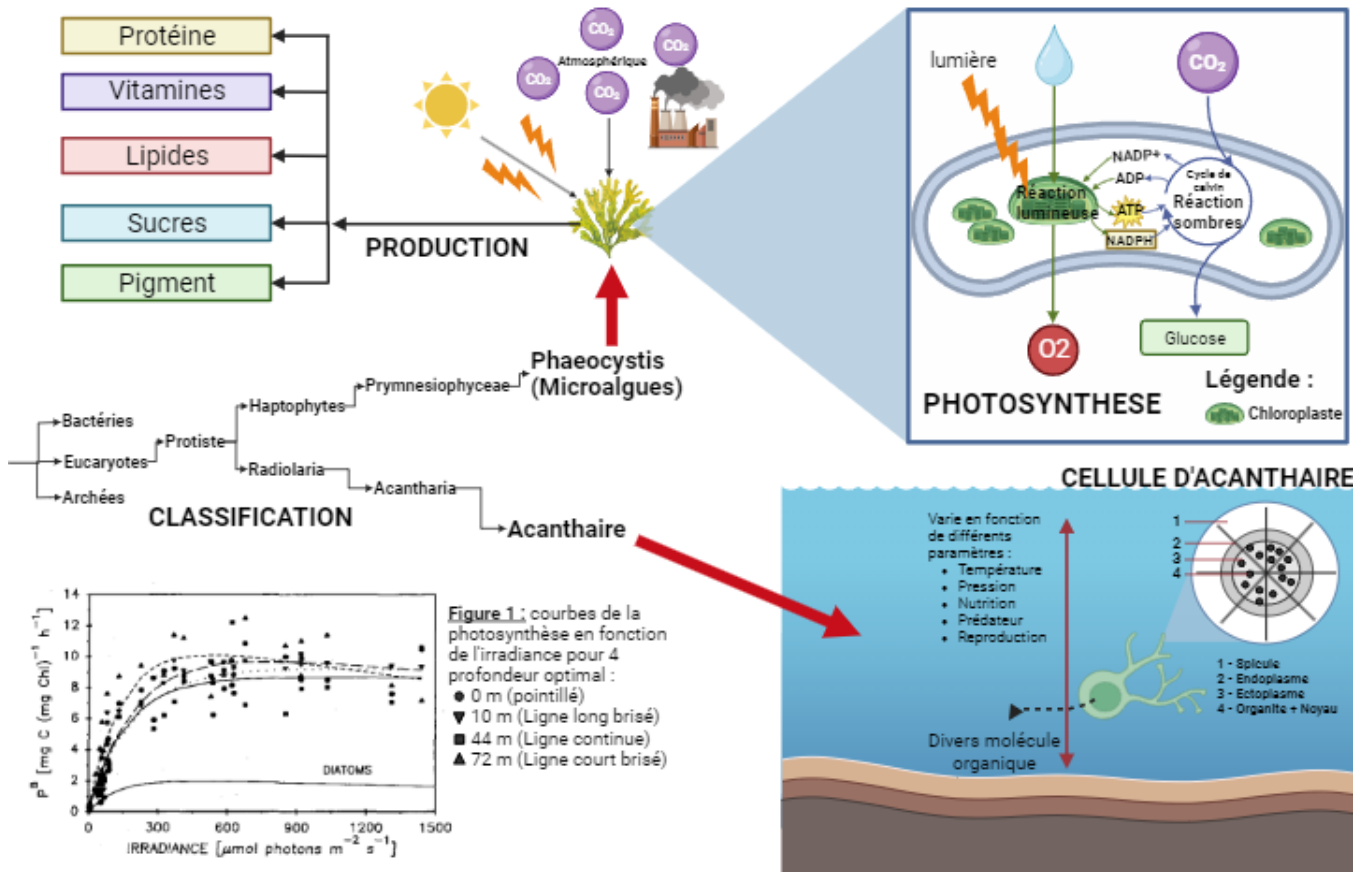


FIGURE 30 – Caractéristiques de nos deux protagonistes On a une représentation général de la classification des deux espèces à gauche. Un haut la partie du micro-algue avec la production du micro-algue à gauche et le fonctionnement de la photosynthèse et d'où vient l'énergie extérieur pour aller dans le micro-algue. En bas à droite nous avons les caractéristiques des acanthaires qui nous intéresse comme une partie de la cellule et son déplacement dans l'océan. Et enfin en bas à gauche nous avons un graphique de l'irradiance (énergie lumineuse absorbé) en fonction de différents profondeurs

Introduction

Les symbioses existent sous plusieurs formes et interactions pouvant être favorables pour les deux individus et ou défavorables pour un des protagonistes. Le cas de l'interaction symbiotique entre une micro-algue (Phaéocystis) et un Acanthaire, est un exemple de prise de contrôle total d'un individu (micro-algue) par l'Acanthaire. Cette prise de contrôle transforme la micro-algue de façon à répondre aux mieux aux exigences de l'Acanthaire. Traduisant ainsi une stratégie agricole qui correspond donc à l'utilisation de l'hôte voir même pouvant être dit comme agissant comme du parasitisme inversé. Le parasitisme inversé correspond à la possibilité de l'existence d'une ancienne symbiose entre les deux et correspond donc à l'utilisation de l'Acanthaire par cette fois-ci la micro-algue. Pour répondre à cela, la mise en évidence du degré d'interaction possible, permet par la suite de mieux comprendre le processus mis en jeu. [116]

De l'origine au degré de spécialisation

La genèse de ce mode de classement

Les interactions symbiotiques sont le résultat de plusieurs degrés d'interactions entre individus. Ces interactions ont pour origine les lignées de Protistes, qui forment par la suite le super-groupe des SAR (Stramenophiles, Alvéolata, Rhizaria). De cette lignée découle trois catégories de prédateurs : herbivores, bactériovores et carnivores. Il s'agit donc de trois interactions symbiotiques qui regroupent les hôtes symbiotiques (29%), le parasitisme (18%) et le prédateur/proie (39%). Suite à cette classification

des interactions et grâce à l'utilisation des hypothèses dérivant des outils omiques, un degré modéré de spécialisation entre en jeu. En effet, il est le résultat des relations hôtes/symbiotes ainsi que du parasitisme. C'est le degré de spécialisation qui permet d'affirmer l'hypothèse du super-groupe des SAR. A l'inverse, l'interaction prédateur/proie n'appartient pas au super-groupe des SAR bien que se soit celle qui soit la plus répandue du à sa réponse multivore. [110]

Focus sur le super groupe des SAR

L'existence du super-groupe des SAR entraîne des modifications du degré modéré de spécialisation. Au vue de l'interaction existante entre la micro-algue (Phaéocystis) et l'Acanthaire, cette relation semble correspondre à deux catégories. En effet, l'Acanthaire fait parti des Rhizarias qui est issu des SAR. Ils sont connus comme étant des hôtes symbiotiques ainsi qu'hôte parasite. De par son appartenance à deux des différentes interactions, plusieurs modifications sont faites lors de la symbiose avec l'hôte. Ces modifications sont le résultat de plusieurs évolutions au niveau de l'existence des interactions. [110]

Un mécanisme d'échange entre espèces intéressantes

Entre métabolisme et physiologie, on vous dit tout

La symbiose de ces deux individus impact fortement l'organisation structurelle et physiologique. Le statut trophique des algues symbiotes change de manière significative au sein de leurs hôtes Acanthariens, à la différence de leurs phase de vie libre. La micro-algue est affectée par ce procédé au niveau morpho-

logique et métabolique. En effet, si la micro-algue n'est pas infectée par l'Acanthaire, sa capacité de division cellulaire ne va pas être bloquée. Ce qui permet d'informer la première étape spécifique d'acquisition des plastides. A l'inverse, s'il y a infection de la micro-algue, de nombreux changements sont à noter. Comme la forte multiplication des plastides qui augmentent la surface de la vacuole de 38 fois. L'augmentation de cette surface permet le stockage des métaux. [121]

La formation de grandes vacuoles, de mitochondries ainsi que de plastides de grandes tailles, suggère que l'hôte est capable d'exercer un haut degré de contrôle par un blocage de la cytokinèse. Sa capacité photosynthétique est maximisée par ce blocage. L'Acanthaire bloque la libération des cellules dans l'environnement de la micro-algue dans un état viable après la phase symbiotique. A contrario, il y a un aspect positif pour la micro-algue. L'Acanthaire fournit à la micro-algue un inoculum qui a un rôle de protection des cellules du broutage/des attaques virales. C'est un aspect qui résulte d'une ancienne symbiose avec l'Acanthaire qui est persistante. [116]

Chimiquement parlant, que se passe-t-il ?

La symbiose impacte aussi le niveau chimique. En effet, dû au fort contrôle qu'exerce l'Acanthaire sur la micro-algue, il s'agit donc d'une manipulation. Cette manipulation associée au séquençage et l'exploitation des cellules de la micro-algue, s'apparente à un parasitisme inversé. La population des micro-algues étant faible, cela em-

pêche l'évolution réciproque. Cette évolution permet de sélectionner des symbiotes non coopératifs et donc d'avoir une association à transmission horizontale. Cette manipulation transforme de manière drastique les cellules de la micro-algue en empêchant le retour à la phase de vie libre. Il en résulte de la création d'un goulet d'étranglement évolutif qui correspond à un phénomène kintoplety. Suite à ce blocage, la micro-algue est appauvrie en phosphore qui est le résultat d'un

investissement fort de la machine bio-énergétique. L'hôte fournit des métaux et du soufre à l'Acanthaire qui sont stockés dans les vacuoles. Ce contrôle peut être aussi une stratégie agricole de l'hôte.[120], [122]

Conclusion

La symbiose entre la micro-algue (Phaéocystis) et l'Acanthaire est avant tout basé sur un fort contrôle. En effet, de par la manipulation exercé par l'Acanthaire, la micro-algue subit de nombreux change-

ments morphologique, métabolique. Cette interaction correspond à du parasitisme inversé mais peut aussi correspondre à une stratégie agricole. [121]

Références

116. DECELLE, J. et al. An original mode of symbiosis in open ocean plankton. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109, 18000-18005 (oct. 2012).

120. DECELLE, J. New perspectives on the functioning and evolution of photosymbiosis in plankton. *Communicative & Integrative Biology* 6, e24560 (juill. 2013).

121. DECELLE, J. et al. Algal Remodeling in a Ubiquitous Planktonic Photosymbiosis. *eng. Current biology : CB* 29, 968-978.e4 (mars 2019).

122. UWIZEYE, C. et al. Cytoklepty in the plankton : A host strategy to optimize the bioenergetic machinery of endosymbiotic algae. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 118, e2025252118 (juill. 2021).

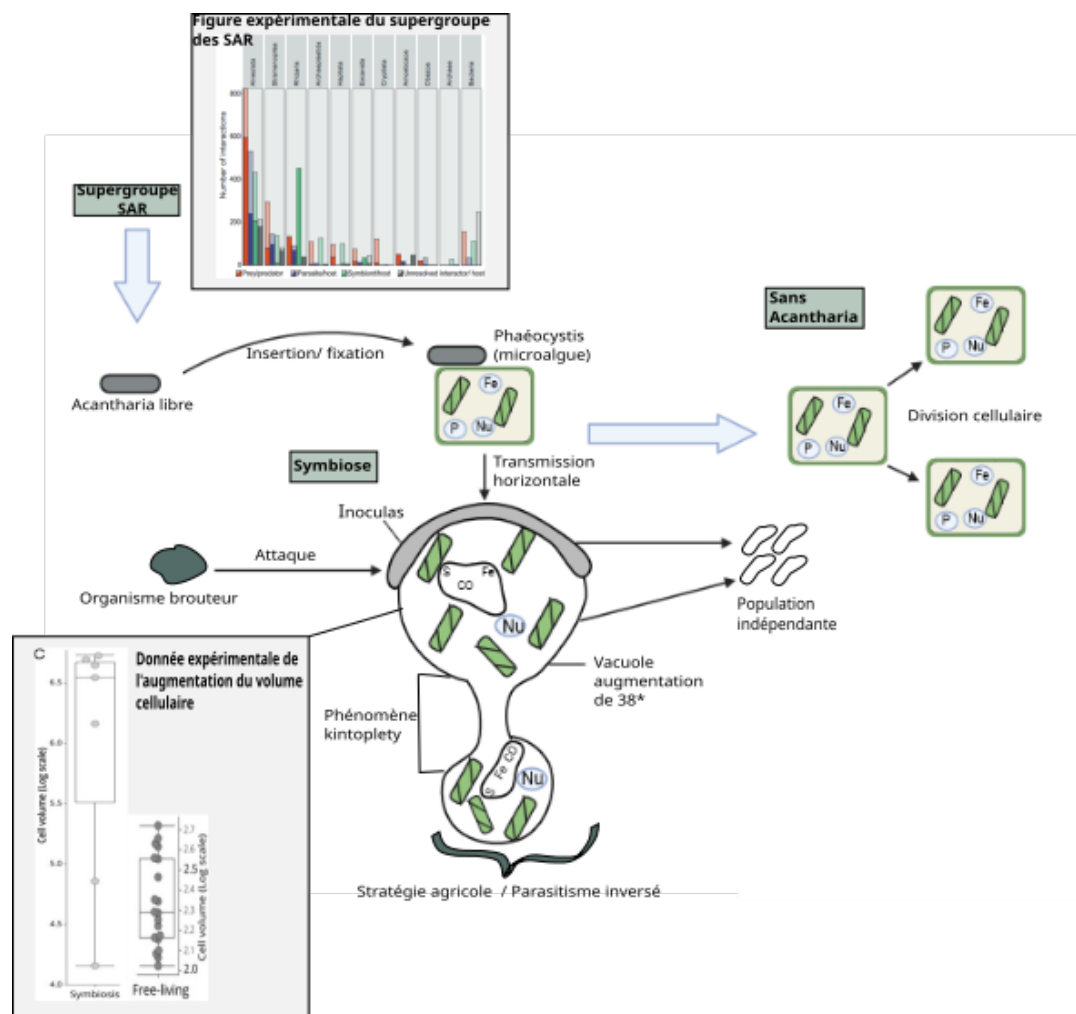


FIGURE 31 – Modifications engendrées suite à une symbiose prédatrice/d'asservissement. C'est le mécanisme d'asservissement entre une micro-algue et un plancton. Deux cas sont observables, un cas où il y a une symbiose et engendre des modifications pour la micro-algue et dans l'autre cas il s'agit du développement normal de la micro-algue.

LE POINT SUR LE MÉCANISME DU PARASITISME À ÉCHELLE INDIVIDUELLE ET DES POPULATIONS AVEC THRAUSTOCHYTRID/ CHAETOCEROS

par BASTIAN ROUMENGOUS

Introduction

Dans l'environnement marin, le parasitisme est une interaction répandue chez les micro-organismes. A travers le parasitisme de Chaetoceros par Thraustochytrid nous verrons dans un premier temps l'impact du parasitisme à l'échelle individuelle et dans un second temps l'impact à l'échelle des populations voire de l'écosystème

Le parasitisme à l'échelle individuelle

Impact du parasitisme sur l'individu chez le plancton

L'impact des parasites protistes sur le plancton marin varie considérablement selon les espèces parasitaires en question. Dans le cas des protistes hôtes, les parasites adoptent généralement des caractéristiques de parasitoïdes, entraînant la mort de la cellule hôte. Ces parasites dépendent à leur tour de l'hôte pour accomplir leur cycle de vie. On retrouve des parasitoïdes dans le zooplancton multicellulaire, tels que Syndinium infectant les copépodes ou Collinia infectant les euphasides. Cependant, tous les parasites protistes du zooplancton ne sont pas mortels pour leurs hôtes. Par exemple, l'infection par les ellobiosides peut ne pas nuire à leurs hôtes, mais elle induit la stérilité chez les copépodes femelles. Le blastodinium semble généralement inoffensif à l'intérieur de l'intestin de l'hôte, mais il affecte la condition physique de ce dernier et provoque la stérilité chez les femelles infectées. De manière similaire aux parasites castrateurs, les parasites in-

fectant les œufs de zooplancton, tels que Dissodinium et Chytriodinium, ne sont pas destructeurs pour l'hôte adulte, mais peuvent avoir des conséquences significatives sur la descendance de l'hôte. [123]

Mécanisme du parasitisme d'un diatom de Chaetoceros par Thraustochytrid

Les thraustochytrids, des organismes fongiques marins, peuvent parasiter les diatoms tels que Chaetoceros. Thraustochytrid a la particularité de cibler en priorité les diatoms non-sains, il a été observé qu'en présence d'une population d'individus stressés le nombre de Thraustochytrid augmente et le nombre de cellules infectées de Chaetoceros est plus élevé. Cependant le mécanisme précis par lequel les thraustochytrids détectent et ciblent les diatoms affaiblis n'est pas entièrement compris, mais il peut être lié à des signaux chimiques ou physiologiques émis par les diatoms stressés. Ainsi après avoir ciblé un diatom faible le processus commence par l'adhésion du thraustochytrid sur diatom, suivi de l'invasion à travers la paroi cellulaire. Une fois à l'intérieur, le thraustochytrid absorbe les nutriments du diatom, affaiblissant la cellule hôte. La répllication du thraustochytrid à l'intérieur du diatom conduit à la libération de zoospores qui vont se disperser après la consommation totale de la cellule afin d'infecter d'autres diatoms. [124]

Impact du parasitisme à l'échelle des populations

Impact du parasitisme sur la population de Chaetoceros.

Le parasitisme dans le couple Thraustochytrid/Chaetoceros met en évidence une dynamique dit "healthy herd" où la prédation des individus faibles dans une population améliore sur le long terme la santé de la population en supprimant des potentiels concurrent pour les ressources et les porteurs de maladie. Dans le cas Chaetoceros le parasitisme sélectif des individus faibles dans sa population permet une croissance plus grande des individus sains. Cela serait expliqué par le fait que ce parasitisme permettrait d'empêcher l'accumulation de toxines et de bactéries, d'accélérer le recyclage des nutriments en relâchant le nutriments des cellules mourantes et de supprimer le partage de ressources dans la population entre individus sains et non sains.[124]

Co-évolution et conséquences du parasitisme chez les planctons marins

Les planctons peuvent produire des toxines qui impacts grandement la dynamique de l'environnement marins avec une mortalité accrue chez différentes espèces (poissons, tortues, oiseaux et crustacés) et causant des maladies chez les mammifères dont l'homme (nausées, dysfonctions des organes et mort potentiel). Cette production de toxines est supposément un mécanisme de défense des planctons contre les parasites.[125] Cependant les planctons

et les parasites marins ayant une grande adaptabilité, chacun évolue afin de contrer l'évolution de l'autre. Cette dynamique ARD (Arms race dynamics) où le mécanisme de défense pour l'hôte et le mécanisme d'attaque pour le parasite co-évolue et permet une diversification constante des espèces. Ainsi le parasitisme serait une cause importante de la diversité chez les planctons. [125] [126]

Conclusion

À l'échelle individuelle, l'étude de parasitisme révèle des impacts va-

riés, allant de la mortalité cellulaire à la stérilité. À l'échelle des populations, le parasitisme entre Thraustochytrid et Chaetoceros favorise une dynamique de "healthy herd", stimulant la croissance des individus sains. De plus, nous constatons que les co-évolutions entre plancton et parasites accentuent la diversification des espèces et que la production de toxines en défense par les planctons complexifient les interactions écologiques, avec des répercussions sur l'écosystème marin et au-delà. En résumé, le parasitisme joue un

rôle crucial dans la biodiversité et le contrôle des populations planctoniques.

Références

123. SKOVGAARD, A. Dirty Tricks in the Plankton : Diversity and Role of Marine Parasitic Protists. *Acta Protozoologica* 53, 51-62.
124. LAUNDON Mock, W. C. Healthy herds in the phytoplankton : the benefit of selective parasitism. *The ISME journal* 15, 2163-2166.
125. GLEASON Jephcoot, K. A.-d.-S. S.-N. G. v. O. Ecological impacts of parasitic chytrids, syndiniales and perkinsids on populations of marine photosynthetic dinoflagellates. *Fungal Ecology* 19, 47-58.
126. GLEASON Jephcoot, K. G.-S. Potential roles for recently discovered chytrid parasites in the dynamics of harmful algal blooms. *Fungal Biology Reviews* 29, 20-23.

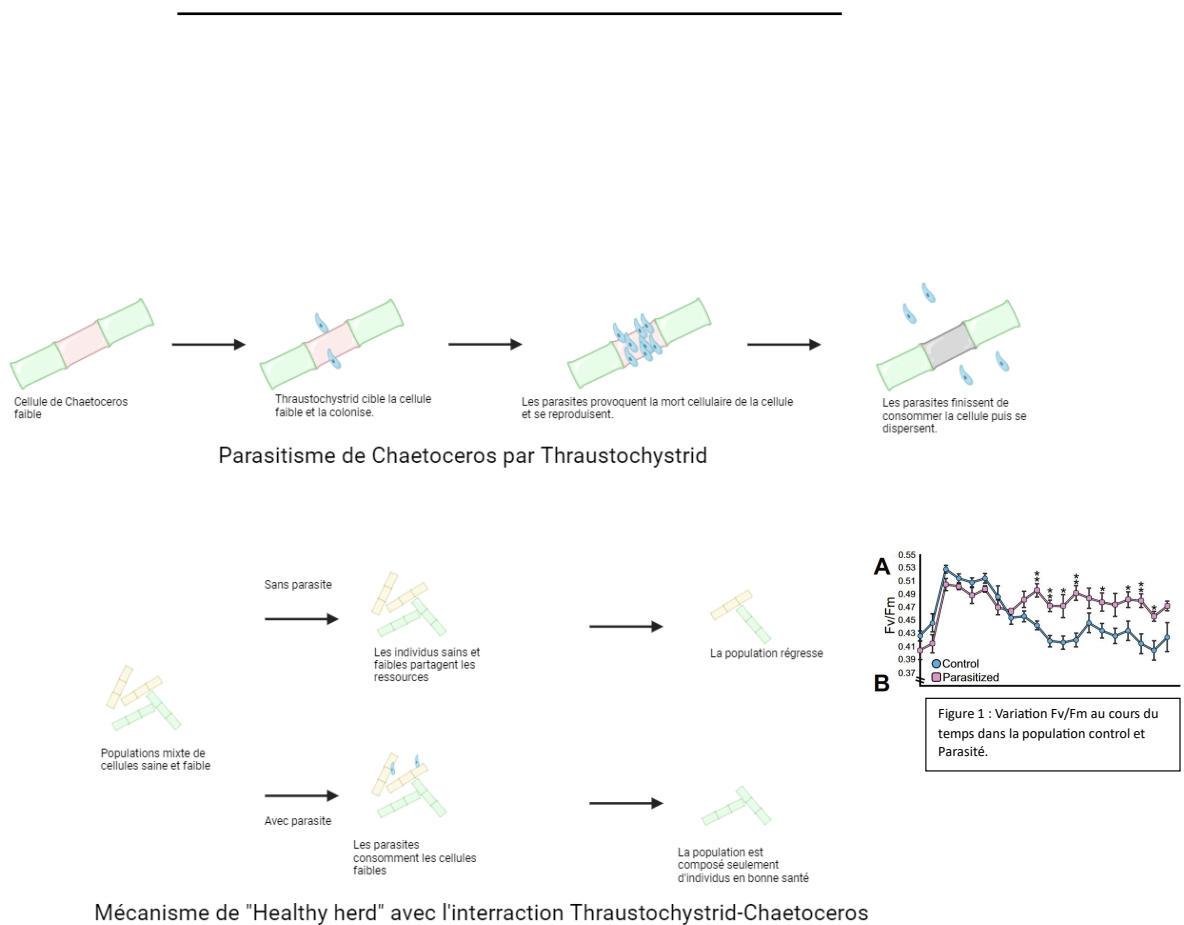


FIGURE 32 – Mécanisme de "Healthy herd" avec l'interaction *Thraustochytrid-Chaetoceros*.

CONCLUSION

La micro-algue (*Phaeocystis*) fait parti du règne des Protistes. En effet, elle utilise l'énergie solaire et l'a convertie en glucose et produit aussi de l'oxygène. C'est donc la photosynthèse effectuée par cette micro-algue qui fournit la majeure partie de l'oxygène respirer. De plus, elle participe aussi à la régulation du climat et est aussi très nutritive. A l'inverse, l'Acanthaire appartient au supergroupe des Rhizarias faisant partie du super groupe des SAR (Stramenophiles, Alvéolata, Rhizaria) qui sont caractérisés par 3 catégories de prédatons : herbivores, bactériovores et carnivores. Ce super groupe permet de mettre en avant l'existence d'un degré modéré de spécialisation, qui entraîne des modifications. Le super groupe des SAR met donc en évidence la mixotrophie. [111][110]

Lors de la symbiose entre ces deux individus, il va y avoir une prise de contrôle totale par l'Acanthaire sur *Phaeocystis* entraînant des modifications morphologiques, physiologiques et même métaboliques. En effet, l'Acanthaire va modifier la micro-algue de façon à ce qu'elle réponde au mieux à ces attentes en modifiant la surface de la vacuole de 38 fois ou en stockant des métaux et du soufre. Ces modifications sont donc le résultat de parasitisme inversé qui peut aussi correspondre à une stratégie agricole. [121]

La mise en avant de la symbiose entre *Thraustochytrid* et *Chaetoceros* permet de révéler différents impacts qui comprennent la mortalité cellulaire ainsi que la stérilité. La symbiose entre ces deux correspond à du parasitisme qui favorise un dynamisme dit de "Healthy herd". Ce processus stimule la croissance des individus, ce qui accentue la diversification des espèces [125].

— Miguel Fallabrino, Flavie Revest, Bastian Roumengous

Références

110. BJORBÆKMO, M. F. M., EVENSTAD, A., RØSÆG, L. L., KRABBERØD, A. K. & LOGARES, R. The planktonic protist interactome : where do we stand after a century of research? *The ISME Journal* **14**, 544-559. (2023) (fév. 2020).
111. BARSANTI Laura et Birindelli, L. e. G. P. Surveillance de l'eau par identification et classification par microscopie numérique des microalgues. *Science de l'environnement : Processus & Impacts* **23** (éd. de CHIMIE, S. R.) 1443-1457.
125. GLEASON Jephcott, K. A.-d.-S. S.-N. G. v. O. Ecological impacts of parasitic chytrids, syndiniales and perkinsids on populations of marine photosynthetic dinoflagellates. *Fungal Ecology* **19**, 47-58.

LE MONDE FANTASTIQUE DES ÉTUDIANTS EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT : GÉOLOGIE, ÉCOLOGIE DE L'UNIVERSITÉ DE TOULON

Cette revue a été entièrement rédigée par les étudiants de deuxième année de Licence Sciences de la Vie Biochimie Génie Biologique dans le cadre du développement des compétences Résoudre une problématique scientifique et Communiquer Scientifiquement :

BOEZEC, THEOPHILE FERRAND, LALIE GAUCHER, VINCENT LABAYE, EVAN BEN FATMA, INES FASSINO, JULIAN GAUDEFROY, LEA PALOUX, JULES SAHUC, ELODY ANDRIEU, NOELIE BEAUPUY, ELODIE CAPELLE, HUGO LACHHEB, ALMA RAGOT, BAPTISTE CROIZE, NICOLAS GUOLO, ROMAIN SIPP, ABYGAELE DE CASTRO-AMRANE, KARL FALLABRINO-BARTHELME, FALLABRINO, MIGUEL REVEST, FLAVIE TAGLIOLI, NICOLAS CHARMASSON, NOE DOUDOUH, SARAH SOUSSI, SIRINIE TRIPOGNEZ, EMILIE BONNET, EMILY LUPPINO, BIANCA NOAILLE, TOM TORRES, EMERIC ROUMENGOUS, BASTIAN

Le projet a été encadré par les enseignants de la formation :

VIRGINIE GARLATI, Directrice des Études, Professeur Agrégé
CLAUDINE BARAQUET, Directrice de Département, Maître de Conférence
ELISA CATAO, Responsable de L2, Maître de Conférence
JEAN-LOUP CADIOU, Responsable de L1, Professeur Agrégé

La mise en page a été proposée par l'équipe pédagogique et finalisée par :

LALLIE FERRAND, EVAN LABAYE, VINCENT GAUCHER, THEOPHILE BOEZEC
HUGO CAPELLE, RAGOT BAPTISTE, ANDRIEU NOÉLIE, BEAUPUY ÉLODIE, LACHHEB ALMA

A ne pas rater



La survie des cellules expliquée par les **étudiants** de BGB

BACTERIAL COMMUNITY : THE GOOD, THE BAD AND THE DEADLY

BGB Highlight :

Dossier 1 : Aux armes et cae tera :
pathogénicité et résistance aux
antibiotiques

Dossier 2 : Vivre ensemble :
coordination et individualité, les deux
faces d'une communauté

Dossier 3 : Communautés
exceptionnelles