



Synthèse de l'article

Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change

Octobre 2019

Référence

R. Cavicchioli, W. J. Ripple, K. N. Timmis, F. Azam, L. R. Bakken, M. Baylis, M. J. Behrenfeld, A. Boetius, P. W. Boyd, A. T. Classen, T. W. Crowther, R. Danovaro, C. M. Foreman, J. Huisman, D. A. Hutchins, J. K. Jansson, D. M. Karl, B. Koskella, D. B. Mark Welch, J. B. H. Martiny, M. A. Moran, V. J. Orphan, D. S. Reay, J. V. Remais, V. I. Rich, B. K. Singh, L. Y. Stein, F. J. Stewart, M. B. Sullivan, M. J. H. van Oppen, S. C. Weaver, E. A. Webb and N. S. Webster, *Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change*, Nature Review Microbiology, 17, 2019, Pages 569-586, <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0222-5>
👉 <https://www.nature.com/articles/s41579-019-0222-5>

Les scientifiques alertent l'humanité sur les liens entre microorganismes et changement climatique

Plan de la synthèse

Introduction	2
Biomes marins	3
Les effets des microorganismes marins sur le changement climatique.....	4
Le changement climatique a un effet sur les microorganismes en retour.....	5
La combinaison des facteurs de pression.....	8
Biomes terrestres	9
Les effets des microorganismes sur le climat varient selon l'écosystème considéré.....	9
Les effets du changement climatique sur les microorganismes.....	11
Biomes agricoles	14
Les effets des microorganismes sur le changement climatique.....	14
Les effets du changement climatique sur les microorganismes.....	15
Maladies infectieuses	15
Les effets du changement climatique.....	16
L'atténuation du changement climatique par les microorganismes.....	18
Conclusion	19



Introduction

La vie sur Terre a évolué au fil de milliards d'années et a généré une importante biodiversité. La présence des microorganismes remonte à l'origine de vie sur Terre, il y a au moins 3,8 milliards d'années et ils existeront probablement bien au-delà de tout événement futur d'extinction. Ils constituent un socle majeur pour la survie de la biosphère et jouent un rôle clé dans les cycles du carbone et des nutriments indispensables à la bonne santé des animaux (y compris l'Homme) et des végétaux. Ils jouent donc par exemple un rôle déterminant dans l'agriculture et le réseau alimentaire mondial. Bien qu'invisible à l'œil nu et donc quelque peu intangibles, les microorganismes soutiennent ainsi l'existence de toutes les formes de vie trophiques supérieures.

Ils sont tout d'abord caractérisés par leur abondance ($\sim 10^{30}$ bactéries et archées au total) et leur diversité, deux facteurs qui leur permettent des réponses variées aux changements environnementaux.

Ensuite, les microorganismes sont présents dans tous les environnements terrestres, y compris ceux qui ne sont pas occupés par des espèces macroscopiques, tels que le sous-sol profond et les environnements « extrêmes ». Ce sont alors les seules formes de vie présentes. Cela leur confère un caractère ubiquiste et une réelle capacité d'adaptation.

La biodiversité microbienne est pratiquement illimitée par rapport à la vie macroscopique qui connaît actuellement un déclin rapide en raison de l'activité humaine. Ceci suggère que la biodiversité des microorganismes spécifiques d'hôte animaux ou végétaux va également diminuer.

Les microorganismes apportent une contribution majeure en termes de séquestration du carbone, en particulier le phytoplancton marin qui fixe autant de CO_2 que les plantes terrestres. Les changements environnementaux affectent les organismes microbiens marins, la photosynthèse et la séquestration du carbone dans les eaux profondes et donc le cycle du carbone. Les microorganismes concourent aussi à la dénitrification de N_2O qui produit du diazote N_2 , un gaz neutre. Les microorganismes offrent également d'importantes possibilités de remédier aux problèmes causés par l'Homme par l'amélioration de l'agriculture, la production de biocarburants et la dépollution.

Les microorganismes contribuent également substantiellement aux émissions de gaz à effet de serre par la respiration hétérotrophe qui produit du CO_2 et la méthanogénèse qui produit du CH_4 . L'activité humaine, lorsqu'elle modifie le ratio d'absorption/libération du carbone, accélère le changement climatique.

Bien que les effets de l'Homme sur les microorganismes soient moins évidents et certainement moins documentés, l'une des principales préoccupations des scientifiques est que des changements dans la biodiversité microbienne ou leurs activités affecteront nécessairement la résilience de tous les autres organismes et, par conséquent, leur capacité à réagir au changement climatique. L'ignorance du rôle, des effets et de la réponse en retour des communautés de microbes face au changement climatique peut être dangereuse et conduire à des erreurs graves d'interprétation ou de prévision des risques. Un effort immédiat, soutenu et concerté est requis pour inclure explicitement les microorganismes dans la recherche, la technologie, les décisions de développement et les politiques de gestion. Les microorganismes ne contribuent pas seulement à l'accélération du changement climatique, mais ils peuvent aussi contribuer énormément à l'efficacité de l'atténuation et aux outils d'adaptation.

Cette synthèse, qui a fait l'objet d'un large consensus dans la communauté scientifique, documente le rôle central et l'importance globale des microorganismes dans

les causes biologiques du changement climatique. Il s'agit à la fois de comprendre comment les microorganismes affectent le changement climatique (y compris la production et la consommation de gaz à effet de serre), mais aussi comment ils seront affectés par ces changements globaux. En effet, les impacts du changement climatique dépendront fortement des réactions des microorganismes, qui sont indispensables pour assurer un avenir écologiquement durable.

DÉFINITION

MICROORGANISME

Tout organisme microscopique ou virus non visible à l'œil nu (moins de 50 µm) sous forme unicellulaire, multicellulaire (par exemple, espèces différenciatrices), agrégées (par exemple, biofilm) ou virale. Il s'agit ici des bactéries microscopiques, des archées, des eucaryotes et des virus, ainsi que de certains eucaryotes unicellulaires macroscopiques (par exemple, le phytoplancton marin) et les champignons décomposeurs du bois.

Biomes marins

Les biomes marins couvrent environ 70 % de la surface terrestre, des estuaires côtiers aux mangroves ou récifs coralliens en passant par la haute mer.

L'importance globale des microorganismes pour les écosystèmes océaniques peut être évaluée par leur nombre et leur biomasse dans la colonne d'eau et sous la surface : à l'échelle planétaire, le nombre total de cellules est supérieur à 10²⁹ et le « *Census for marine life* » estime que 90 % de la population marine est microbienne.

Au-delà de leur nombre, les microorganismes marins remplissent des fonctions écosystémiques essentielles. En fixant le carbone et l'azote, et en reminéralisant la matière organique, ils forment la base des réseaux trophiques océaniques et donc des cycles du carbone et des nutriments à l'échelle mondiale.

Plusieurs facteurs influencent la composition, les fonctions et la répartition des communautés microbiennes marines :

- **Les différentes formes d'énergie mobilisables.**

Les microorganismes phototrophes utilisent l'énergie solaire dans les 200 premiers mètres de la colonne d'eau, alors que la vie marine dans les zones plus profondes utilise l'énergie chimique organique ou inorganique.

- **Les gradients de température d'eau** allant d'environ -2 °C dans les mers couvertes de glace à plus de 100 °C dans les sources hydrothermales.

La hausse des températures n'affecte pas seulement les processus biologiques mais elle réduit aussi la densité de l'eau et donc sa stratification et sa circulation qui affectent la dispersion des organismes et le transport des nutriments.

- **Les précipitations, la salinité et les vents** qui affectent la stratification, le mélange et la circulation de l'eau.

- **Les apports de nutriments**, par l'air, les fleuves et les estuaires et leurs équilibres relatifs.

- **Les zones d'anoxie¹** qui réduisent la solubilité de l'oxygène et donc sa disponibilité pour les communautés aérobies².

Ces zones d'anoxie sont des puits mondiaux pour l'azote réactif (oxyde d'azote qui forme des composés instables) et la production microbienne de

1. L'**anoxie** est une diminution de l'oxygène dissous ou présent et biodisponible dans le milieu (sol, sédiment, eau, atmosphère, etc.).

2. **Aérobies** = contenant du dioxygène

di-azote (N_2). À noter que le protoxyde d'azote, N_2O , gaz toxique responsable de l'eutrophisation et du caractère acidifiant des pluies, compte pour 25 à 50 % des relargage d'azote de l'océan vers l'atmosphère, intervient dans la destruction de la couche d'ozone et a un pouvoir radiatif ~ 250 à 300 fois supérieur à celui du CO_2 pour une même quantité. En outre, les zones d'anoxie sont les plus grands réservoirs de méthane pélagique de l'océan et contribuent de façon importante aux cycles océaniques du méthane. Ces zones se sont étendues depuis les 50 dernières années en raison du réchauffement de l'océan. Leur expansion future observée et prévue peut donc affecter considérablement la disponibilité des éléments nutritifs dans l'océan, accroître les émissions de gaz à effet de serre et modifier la répartition des organismes dépendants de l'oxygène.

Les effets des microorganismes marins sur le changement climatique

1/ Le phytoplancton marin atténue le réchauffement mondial en fixant la moitié du CO_2 photosynthétique global. Sa production primaire mondiale nette est d'environ 50 pétagrammes (1 Pg = 109 tonnes) de carbone par an et il produit la moitié de l'oxygène total, malgré une biomasse égale à seulement ~ 1 % de la biomasse végétale mondiale.

En comparaison avec les plantes terrestres, le phytoplancton marin est distribué sur une plus grande surface. Il est exposé à moins de variations saisonnières et à un taux de renouvellement nettement plus rapide que les arbres (il se compte en jours plutôt qu'en décennies).

Par ailleurs, le phytoplancton réagit rapidement à l'échelle mondiale aux variations climatiques et des phénomènes de bloom³ cycliques se produisent. Ils dépendent plusieurs facteurs :

- la disponibilité des nutriments essentiels dans la colonne d'eau ;
- la présence d'herbivores (qui consomment le phytoplancton) et de pathogènes ;
- le rayonnement solaire ;
- la température ;
- les apports d'eaux douce ;
- le taux de CO_2 .

Ces caractéristiques doivent être prises en compte pour évaluer les contributions du phytoplancton à la fixation du carbone et à la prévision de la façon dont cette production peut changer en réponse à des perturbations. Par exemple, l'augmentation du rayonnement solaire, de la température et des apports d'eau douce aux eaux de surface renforcent la stratification des océans et, par conséquent, réduisent le transport des éléments nutritifs de l'eau profonde vers les eaux de surface, et donc la productivité primaire du phytoplancton. Inversement, l'augmentation des niveaux de CO_2 stimulent la production primaire de phytoplancton, lorsque les nutriments ne sont pas limitatifs. **Au sein du phytoplancton, les diatomées** assurent 25 - 45 % de la production primaire totale des océans, en raison de leur prévalence dans les régions de haute mer lorsque la biomasse totale de phytoplancton est maximale. Les diatomées ont un taux de sédimentation particulièrement élevé par rapport aux autres groupes de phytoplancton et elles représentent environ 40 % du stockage de carbone particulaire dans les profondeurs. Les enrichissements saisonniers en nutriments dans les eaux de surface favorisent la multiplication des diatomées. Le changement climatique d'origine anthropique affectera directement ces cycles saisonniers en modifiant la temporalité des blooms, ce qui diminuera probablement la biomasse des diatomées, donc la production primaire et les captages de CO_2 associés.

Les données de télédétection suggèrent un déclin global de la biomasse des diatomées entre 1998 et 2012, en particulier dans le Pacifique Nord, qui est associé à la

3. Les **blooms** sont des proliférations importantes du phytoplancton.

faible profondeur des couches mixtes de surface dans lesquelles elles vivent et aux concentrations plus faibles en éléments nutritifs.

Le phytoplancton émet du diméthylsulfure et son dérivé, le sulfate de diméthylsulfure, qui favorise les condensations des nuages.

Ces molécules sont relâchées dans l'atmosphère sous forme d'aérosols marins se composant d'un mélange complexe de sel marin, de sulfate non salin et de molécules organiques. Ils peuvent servir de noyaux de condensation des nuages, influençant les précipitations, le bilan radiatif et donc le climat. Ces aérosols biogènes dans l'hémisphère sud ont un nombre et une taille de gouttelettes similaires à ceux des aérosols des régions très polluées. La manière dont ces processus influencent le climat demeure incertaine. Comprendre comment et quel phytoplancton marin contribue aux aérosols permettrait de mieux prédire l'évolution des conditions océaniques et ses répercussions sur le climat. L'atmosphère elle-même contient $\sim 10^{22}$ microorganismes : comprendre les conditions de croissance de ces microorganismes atmosphériques et leur capacité à former des agrégats seront précieux pour évaluer leur influence sur le climat.

2/ Les archées et les bactéries chimio-litho-autotrophes fixent également le CO_2 dans les eaux océaniques profondes et à la surface pendant l'hiver polaire. Ces microorganismes contribuent aussi à la respiration de l'océan en produisant du CO_2 et aux cycles de nombreux éléments. L'influence sur les flux atmosphériques de méthane des microorganismes des fonds marins méthanogènes (produisant du méthane) et méthanotrophes (utilisant du méthane) est plus incertain.

3/ Les virus marins, les bactéries et les herbivores eucaryotes régulent la biomasse du phytoplancton par sa consommation ou sa contamination. Ils sont donc également des composants importants des réseaux trophiques marins et influencent l'efficacité de la séquestration du carbone dans les profondeurs de l'océan. Le changement climatique affecte les interactions prédateurs-proies, y compris les interactions virus-hôte et donc des cycles biogéochimiques globaux.

4/ Les habitats côtiers végétalisés sont importants pour la séquestration du carbone qui est dépendante de l'ensemble du spectre trophique allant des prédateurs aux herbivores, en passant par les plantes et leurs communautés bactériennes et fongiques associées. L'activité humaine, y compris le changement climatique anthropique, a réduit ces habitats au cours des 50 dernières années de 25 à 50 % et l'abondance des prédateurs marins, par exemple a chuté de 90 %. Face à une telle perturbation, il est nécessaire d'en évaluer les effets sur les populations microbiennes car leur activité détermine la quantité de carbone reminéralisée et sous forme de CO_2 et de CH_4 .

Le changement climatique a un effet sur les microorganismes en retour

Le changement climatique perturbe les interactions entre les espèces et les force à s'adapter, se déplacer, être remplacées par d'autres espèces ou disparaître. Les conséquences majeures du changement climatique sont l'augmentation de la température des océans, leur acidification et leur eutrophisation. Par ailleurs, l'Homme est également responsable d'une surexploitation des océans par la pêche ou le tourisme qui peut fragiliser les écosystèmes et aggraver les effets du changement climatique. De nombreux facteurs environnementaux et physiologiques influencent les réponses et la compétitivité globale des microorganismes en conditions naturelles (température, niveaux de CO_2 , acidification, etc.).

Ces phénomènes combinés se potentialisent, provoquant des boucles de rétroaction qui aggravent ou atténuent le changement climatique. Très peu d'études ont examiné l'adaptation évolutive des microorganismes aux diverses conséquences du changement climatique. De même, la compréhension des mécanismes moléculaires de leurs réponses physiologiques et les implications de ces réponses

pour les cycles biogéochimiques est encore parcellaire.

Ainsi, dans les biomes marins, plusieurs phénomènes ont une importance particulière :

- **l'augmentation des températures** en raison de l'effets des concentrations élevées de gaz à effet de serre ;
- **la stratification et les mélanges d'eau** ;
- **la circulation thermohaline** ;
- **les variations d'apport en nutriments** ;
- **l'augmentation de l'irradiation.**

Toute modification de l'activité microbienne a un impact sur l'ensemble de la chaîne trophique et donc sur le recyclage du carbone et les flux d'énergie, entraînant des changements majeurs dans la productivité, l'exportation et l'enfouissement du carbone dans les sédiments.

1/ La productivité primaire du phytoplancton est compliquée à évaluer en raison des phénomènes de bloom cycliques qui le caractérisent. Les études ne sont pas toujours d'accord entre elles. Certaines indiquent une diminution du phytoplancton océanique au cours du dernier siècle, d'autres suggèrent une augmentation globale de la biomasse mondiale de phytoplancton océanique avec des variations régionales, ou en fonction des groupes de phytoplancton.

Dans les zones polaires par exemple, un des mécanismes pourrait être la fonte des glaces qui conduit à une plus grande pénétration de la lumière et potentiellement une augmentation de la production primaire.

Il est urgent de conduire des recherches pour déterminer l'ampleur de la réponse de la vie marine aux perturbations climatiques. Ces processus sont extrêmement complexes et il faut porter une attention particulière à la façon de les quantifier et de les interpréter car, en raison de leur biomasse, les microorganismes joueront un rôle clé dans les modifications des équilibres écosystémiques induites par le changement climatique. Des questions clés restent donc en suspens sur les conséquences fonctionnelles des changements communautaires, comme les changements dans la reminéralisation du carbone par rapport à la séquestration du carbone et le cycle des éléments nutritifs.

Or, les modèles de prévisions sont entachés d'incertitudes, en raison du manque de données à long terme, de la quantité de variables à prendre en compte, des différences méthodologiques dans la production des données et la grande variabilité annuelle et décennale de la production de phytoplancton.

Ces incertitudes mettent en évidence la nécessité de collecter des données à long terme sur la production de phytoplancton et la composition de la communauté microbienne. Elles sont nécessaires pour prédire de manière fiable comment les fonctions microbiennes et les mécanismes de rétroaction permettront de réagir au changement climatique, mais il n'existe que très peu d'ensembles de données de ce type (par exemple, les *Hawaii Ocean Time-series* et *Bermuda Atlantique time-series*). Les expéditions océaniques, comme le consortium Tara Océan ou le groupe mondial pour les expéditions océaniques, fournissent des échantillonnages d'ADN environnemental (métagénome) qui constituent une base de référence précieuse pour l'évaluation des microorganismes marins.

2/ La sédimentation des matières organiques particulières est un mécanisme clé à long terme pour la séquestration du CO₂ de l'atmosphère dans les fonds marins. Un équilibre déterminant pour le changement climatique s'installe entre la production du CO₂ et des nutriments par reminéralisation et l'enfouissement du CO₂ dans les sédiments profonds dont les 50 premiers centimètres contiennent ~ 1 × 1 029 microorganismes.

Par exemple, l'abondance totale d'archées et de bactéries dans les sédiments aug-

mentent avec la latitude (de 34 °N à 79 °N) avec une proportion plus importante de certains taxons tels que *Thaumarchaeota*, ce qui induit des variations de la quantité et de la qualité des matières particulaires qui sédimentent. En conséquence, le changement climatique devrait affecter particulièrement les processus fonctionnels dont les archées benthiques des grands fonds marins sont à l'origine (comme l'oxydation de l'ammoniac) et les cycles biogéochimiques associés.

3/ La latitude et les courants océaniques influent sur la distribution et la diversité des organismes marins. En général, les microorganismes se dispersent plus facilement que les organismes macroscopiques. Néanmoins, des variations biogéographiques peuvent exister en fonction des espèces (mode de vie, associations) et des facteurs environnementaux qui influencent fortement les compositions des communautés, leurs fonctions et la répartition des microorganismes benthiques.

Si la migration vers des environnements plus favorables est impossible, les adaptations évolutives peuvent être le seul mécanisme de survie possible. Les microorganismes, tels que les bactéries, les archées et les microalgues, avec des populations de grande taille et une génération asexuée rapide ont un potentiel d'adaptation élevé.

4/ L'élévation des températures a plusieurs conséquences sur les microorganismes.

Les gradients thermiques font varier la distribution et la diversité des organismes marins.

Chaque organisme a une température optimale de vie et les hypothèses étaient que l'élévation des températures provoqueraient le déplacement vers les pôles des communautés adaptées aux environnements froids. Des travaux récents semblent indiquer que les températures optimales des phytoplanctons des eaux polaires et tempérées sont beaucoup plus élevées que les températures environnementales : un modèle éco-évolutif a prédit que les températures optimales du phytoplancton tropical seraient substantiellement supérieures aux valeurs expérimentales observées. La température optimale est cependant, en général, un mauvais indicateur de l'état physiologique des organismes et de leur adaptation écologique aux environnements froids et les recherches doivent donc continuer pour permettre de comprendre comment les microorganismes s'adapteront au réchauffement.

La sensibilité aux pathogènes peut dépendre de la température.

Une étude en mésocosme a ainsi identifié des variations de la diversité des virus qui infectent *E. huxleyi* dans le cas de températures élevées, même si tous les mécanismes d'interactions ne sont pas décryptés.

La concentration des ribosomes cellulaires chez le phytoplancton eucaryote diminue en cas de températures élevées.

Ces ribosomes ont la particularité d'être particulièrement riches en phosphates. Comme la biomasse du phytoplancton eucaryote est d'environ 1 Gigatonne de carbone, la diminution des ribosomes sous pression climatique modifiera le ratio azote-phosphate et affectera la ressource dans l'océan mondial.

Le réchauffement climatique réduit la teneur en fer des cyanobactéries fixatrices d'azote, avec des implications potentiellement importantes pour la fourniture d'azote aux réseaux trophiques.

5/ L'élévation des niveaux de CO₂ induit des réponses différentes en fonction des phytoplanctons, par exemple, entre le phytoplancton de l'Arctique et le phytoplancton antarctique.

En effet, l'augmentation des niveaux de CO₂ :

- **augmente généralement la croissance** du phytoplancton, en induisant également des **changements génétiques irréversibles** sur le long terme (4-5 ans), comme chez les cyanobactéries marines de genre *Trichodesmium*, avec augmentation de la fixation de l'azote et de la croissance ;
- **affecte les structures des populations** avec des changements dans les écotypes et l'occupation de niches, ce qui modifie les réseaux trophiques et les processus biogéochimiques des cycles (par exemple chez *O. tauri*), ce qui **peut provoquer la rupture des équilibres des écosystèmes**. Une expérience de terrain a par exemple démontré que l'augmentation des niveaux de CO₂ procurait un avantage sélectif à une microalgue toxique, *Vicicitus globosus*, entraînant la perturbation du transfert de matière organique entre les niveaux trophiques.

6/ L'acidification des océans, provoquée par l'absorption du CO₂, a augmenté d'environ 0,1 unité de pH depuis l'ère préindustrielle avec des réductions supplémentaires de 0,3 à 0,4 unités prévues d'ici la fin du siècle. Elle met les microorganismes marins dans des conditions de pH très différentes de leurs conditions historiques récentes, ce qui leur demande plus d'énergie pour maintenir stable leur pH intracellulaire (homéostasie). Les espèces moins aptes à réguler leur pH interne seront donc plus affectées avec des effets sur la taille de l'organisme, l'état d'agrégation, l'activité métabolique et la croissance. Un pH plus bas active en effet préférentiellement, chez les bactéries et les archaebactéries, les gènes responsables de l'entretien des cellules plutôt que les gènes de croissance.

D'autres expériences ont confirmé que les bactéries engagent plus de ressources pour l'homéostasie du pH dans les milieux oligotrophes, c'est-à-dire pauvres en ressources, qui correspondent à la majeure partie des océans. La variation des conditions de pH a aussi des effets sur les virus cyanophages qui les infectent.

La combinaison des facteurs de pression

L'élévation des températures et l'acidification associée induisent la production de cellules plus petites qui contiennent moins de carbone chez les espèces de phytoplancton calcifiant *Emiliania huxleyi*. Cependant, pour cette espèce, les taux de production globaux ne changent pas en raison de l'adaptation évolutive à l'augmentation des émissions de CO₂.

Il semble que **la combinaison de l'augmentation de la température des océans, de l'acidification et de la diminution de l'apport en éléments nutritifs** favorise les planctons de petites tailles *via* la modification des flux biogéochimiques. En effet, ces facteurs augmentent la libération extracellulaire de la matière organique dissoute du phytoplancton, ce qui pourrait entraîner une augmentation de la production microbienne au dépend des niveaux trophiques supérieurs.

La capacité d'adaptation des coraux au changement climatique est fortement influencée par les réponses de leurs microorganismes associés, y compris les microalgues symbiotes et les centaines voire milliers d'espèces microbiennes qui vivent sur les coraux, et sont cruciales pour la bonne santé de leurs hôtes. Ces microorganismes recyclent les déchets, apportent les nutriments et vitamines essentiels et participent au système immunitaire des récifs en régulant les agents pathogènes. Les perturbations de l'environnement affectent rapidement le microbiome corallien.

De tels changements influencent sans aucun doute les fonctions écologiques et la stabilité du système corallien-microorganisme, affectant ainsi leur capacité et le rythme auxquels les coraux s'adaptent à ces changements ainsi que les relations entre les coraux et les autres composantes de l'écosystème récifal. À termes, ces pressions peuvent provoquer le déclin des récifs coralliens en faveur d'une prolifération des macroalgues et des cyanobactéries.

Biomes Terrestres

Le nombre total estimé de microorganismes dans les environnements terrestres est semblable à celui des environnements marins, 10^{29} ; cependant, la biomasse terrestre, principalement composée de plantes, est environ 100 fois supérieure à la biomasse marine.

Les effets des microorganismes sur le climat varient selon l'écosystème considéré

Dans le cas général, l'augmentation des niveaux de CO₂ atmosphérique favorise une plus grande décomposition microbienne et une rétention moindre du carbone organique dans le sol et renforce la concurrence pour l'azote entre les plantes et les micro-organismes.

1/ Les sols stockent environ 2 000 milliards de tonnes de carbone organique.

Les microorganismes du sol régulent la quantité de carbone organique stockés dans le sol et relâchés dans l'atmosphère. Ils influencent ainsi indirectement le stockage du carbone dans les plantes et les sols *via* la fourniture d'azote et de phosphore. Un niveau de CO₂ plus élevé dans l'atmosphère augmente la productivité primaire et donc les litières forestières et racinaires, ce qui conduit à une augmentation des émissions de carbone dues à la dégradation microbienne de ces litières. La nature de la matière organique, en particulier la complexité du substrat, affecte la décomposition microbienne. En outre, la capacité microbienne à accéder à la matière organique diffère selon le type de sol (par exemple, avec différents teneurs en argile). Le rapport entre le carbone disponible pour les microorganismes et le carbone stocké à long terme dépend de nombreux facteurs environnementaux, y compris les caractéristiques des minéraux du sol, l'acidité et l'état rédox⁴ ; la disponibilité de l'eau ; le climat ; et les types de microorganismes présents dans le sol.

L'étude des profils de sol des dix premiers centimètres à un mètre (qui contiennent des stocks plus anciens de carbone) montrent que le réchauffement augmente les fuites de carbone dans l'atmosphère. Expliquer les différences de pertes de carbone entre différents sites nécessitera une plus grande gamme de variables prédictives (en plus de la teneur en matière organique, la température, les précipitations, le pH et la teneur en argile), néanmoins, **les évaluations globales des réponses au réchauffement indiquent que la perte de carbone terrestre sera à l'origine d'une rétroaction positive qui va accélérer le changement climatique, en particulier dans les sols froids et tempérés, qui stockent une grande partie du carbone global des sols.**

2/ Les plantes sont à l'origine de la moitié de la production primaire mondiale nette.

Une quantité importante du carbone ainsi produit est transférée aux champignons mycorhiziens avec qui les plantes sont en symbiose et, dans de nombreux écosystèmes, ces champignons transfèrent des quantités substantielles d'azote et de phosphore aux plantes. À l'inverse, la respiration des plantes (60 Pg de carbone par an) et des microorganismes (60 Pg de carbone par an) libèrent du CO₂ dans l'atmosphère. Les équilibres entre ces deux processus opposés, stockage de carbone dans la biosphère et respiration, (et donc la capacité de la biosphère terrestre à capturer et à stocker les émissions de carbone anthropiques) sont influencés par la température. **Dans l'état actuel des conditions environnementales, environ un quart des émissions anthropique de CO₂ sont stockées dans les écosystèmes et le réchauffement devrait accélérer la libération de carbone dans l'atmosphère.**

Les plantes transfèrent au sol environ 50 % du carbone qu'elles fixent par photosynthèse, ce carbone est alors disponible pour la croissance microbienne. En plus

4. Un état **rédox** est un état d'oxydoréduction.

des microorganismes utilisant les exsudats⁵ comme sources d'énergie, ces mêmes exsudats peuvent rompre les associations organo-minérales, les molécules organiques ainsi libérées peuvent alors être utilisées pour la respiration microbienne, augmentant ainsi les émissions de carbone.

Ces interactions biotiques-abiotiques (plantes-minéraux notamment) doivent être prises en compte aux côtés des interactions biotiques (plantes-microorganismes) pour évaluer l'influence du changement climatique. Les modèles thermodynamiques incorporant ces deux types d'interactions ont été utilisés pour prédire les rétroactions carbone-sol en réponse à l'augmentation de la température ; une étude comparant les deux types de modèles a montré plus de variations mais une influence plus faible du taux de carbone sur le climat dans les modèles thermodynamiques que dans les modèles statiques.

3/ Les forêts, qui couvrent environ 30 % de la surface terrestre, contiennent environ 45 % du carbone terrestre. Elles sont à l'origine d'environ 50 % de la production primaire terrestre et séquestrent jusqu'à 25 % du CO₂ issu de l'activité anthropique. La composition des communautés microbiennes, la densité de bois mort, la disponibilité de l'azote et l'humidité influencent l'activité microbienne (par exemple, la colonisation fongique du bois). Ces éléments de régulation locaux doivent être incorporés dans les modèles de pertes de carbone sous forçage climatique.

La disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes influe sur la balance carbone des forêts, car moins les forêts sont riches en nutriments, plus les microorganismes seront nécessaires aux arbres pour les capter et donc plus ces derniers leur fourniront de carbone en échange (par exemple, sous forme d'exsudats racinaires), ce qui augmentera leur respiration et donc les émissions nettes de carbone.

4/ Les prairies couvrent environ 29 % des surface terrestre et stockent globalement du carbone.

5/ Les lacs représentent environ 4 % de la zone non glaciaire et les lacs peu profonds émettent des quantités considérables de méthane (CH₄). Une étude de 15 ans en mésocosme simulant l'eau douce des environnements lacustres a déterminé que la combinaison des effets de l'eutrophisation et du réchauffement climatique pouvait entraîner une augmentation la libération de CH₄ (bulles de gaz). Comme les petits lacs sont susceptibles à l'eutrophisation et ont tendance à être situés dans des régions soumises au forçage climatique, le rôle des microorganismes lacustres dans la contribution mondiale aux émissions de gaz à effet de serre doit être évalué.

6/ Les tourbières issues de la décomposition de la litière végétale couvrent environ 3 % de la surface terrestre et, comme la productivité végétale de ces zones est supérieure à leur décomposition, les tourbières intactes fonctionnent en tant que puits de carbone mondial et pourraient contenir environ 30 % du carbone global des sols. Néanmoins, les litières résistantes à la pourriture (par exemple, dans le cas de production d'antibiotique phénoliques et de polysaccharides par les sphaignes) inhibent la décomposition microbienne et la saturation de l'eau limite les échanges d'oxygène, favorisant la croissance des bactéries anaérobies⁶ et le dégagement de CO₂ et de CH₄.

L'augmentation des températures induira une réduction de la teneur en eau du sol, favorisant la croissance des plantes vasculaires et réduisant la productivité des mousses spécifiques des tourbières. Ce changement dans la composition de la litière végétale et les processus microbiens associés (par exemple, la réduction de la séquestration de l'azote et l'augmentation de la respiration hétérotrophe) sont

5. Les **exsudats** végétaux sont des substances organiques complexes, plus ou moins fluides, qui suintent de certaines espèces de plantes, généralement des arbres, atteintes de maladies ou de blessures.

6. **Anaérobie** = sans diosyène

en train de faire passer les tourbières de puits de carbone en sources de carbone.

7/ Dans le pergélisol, l'accumulation de carbone dans la matière organique (restes de plantes, animaux et microorganismes) dépasse de loin les pertes respiratoires, constituant ainsi le plus grand puits de carbone terrestre. Un réchauffement climatique de 1,5 à 2 °C par rapport aux températures moyennes de surface observées en 1850-1900 devrait réduire le pergélisol de 28 – 53 % par rapport aux niveaux observés entre 1960-1990, rendant ainsi de grands réservoirs de carbone disponibles pour la respiration microbienne et produisant des gaz à effet de serre.

La fonte et la dégradation du pergélisol :

- rendront disponibles aux organismes microbiens décomposeurs des sources de carbones actuellement gelées, libérant CO₂ et CH₄ ;
- entraîneront le largage de grandes quantités de carbone dans l'océan, avec potentiellement une augmentation des émissions de CO₂ par reminéralisation microbienne accrue et donc une boucle de rétroaction positive d'accélération du changement climatique ;
- entraîneront une libération d'eau et une saturation des sols favorisant la production anaérobie de CH₄ par les méthanogènes et la production de CO₂ par divers micro-organismes.

Dans ces sols en cours de dégel, le métabolisme bactérien n'est pas aussi efficace que dans les sols aérobies drainés qui rejettent du CO₂ plutôt que CH₄. Cependant, une étude de laboratoire de sept ans a révélé qu'une fois les communautés méthanogènes devenues actives, des quantités égales de CO₂ et de CH₄ se sont formés dans des conditions anoxiques, ce qui laisse penser que d'ici la fin du siècle, les émissions de carbone des environnements anoxiques vont accélérer le changement climatique plus fortement que les environnements aérobies.

8/ Les herbivores invertébrés et mammifères prélèvent de la matière organique et influent donc sur sa disponibilité pour la biomasse microbienne.

Par exemple, les criquets diminuent la biomasse végétale et la demande des plantes en azote, augmentant ainsi l'activité microbienne. Le changement climatique peut réduire l'herbivorie, en raison des modifications globales des cycles de l'azote et du carbone qui réduisent la séquestration terrestre du carbone.

9/ Les détritivores ont une influence sur les gaz à effet de serre par effet indirect sur les plantes et les microorganismes du sol.

Les vers de terre, par exemple, améliorent la fertilité du sol en se nourrissant, fouissant et déposant leurs rejets. L'environnement intestinal anaérobie des vers de terre abrite des microorganismes qui dénitrifient les protéines et produisent du N₂O, ce qui peut entraîner une augmentation des émissions nettes de gaz à effet de serre, alors que les effets combinés de l'augmentation des températures et la diminution des précipitations réduisent les émissions en agissant sur l'alimentation des détritivores et la respiration microbienne.

Les effets du changement climatique sur les microorganismes

1/ Le changement climatique peut influencer la structure et la diversité des communautés microbiennes ainsi que leurs fonctions directement (par exemple, saisonnalité et température) ou indirectement (par exemple, composition des plantes, des litières et exsudats racinaires) à travers plusieurs facteurs interdépendants, tels que la température, les précipitations, les propriétés du sol et les apports des plantes. La diversité microbienne du sol influence la diversité des plantes et est importante pour les fonctions des écosystèmes, y compris le cycle du carbone.

Des températures plus élevées favorisent des taux plus élevés de décomposition de la matière organique terrestre. L'effet de la température n'est pas seulement un

effet sur la cinétique microbienne (vitesse de croissance) mais résulte aussi d'un apport positif des végétaux sur la croissance microbienne.

Des changements importants dans les communautés bactériennes et fongiques ont ainsi été observés dans les sols forestiers dont la température moyenne annuelle est supérieure à 20 °C et dans les sols de prairies d'herbes hautes sous forçage climatique. Quelques études montrent une accumulation de carbone due au réchauffement mais la plupart font état d'une balance négative entre respiration microbienne et productivité primaire aboutissant à un rejet net de carbone dans l'atmosphère.

Cependant, il est nécessaire de bien préciser l'échelle de temps considérée. En effet, le réchauffement - qu'il soit de court terme ou de long terme (plus de 50 ans = réchauffement géothermique naturel) - augmente tout d'abord la croissance et la respiration des microorganismes du sol, entraînant une libération nette de CO₂ et un épuisement des substrats, puis, dans un second temps, une diminution de la biomasse et une diminution de l'activité microbienne, donc une diminution des émissions de CO₂.

- Une étude de 26 ans sur le réchauffement des **sols forestiers** montre une variation temporelle dans la décomposition de la matière organique et le relargage de CO₂, entraînant des modifications des communautés microbiennes, une réduction de l'efficacité de l'utilisation du carbone, une réduction de la biomasse microbienne et de l'accessibilité du carbone. Cette étude prédit que le changement climatique anthropique sera responsable de la libération prolongée et stable de carbone. Des prédictions similaires proviennent de modèles de systèmes terrestres simulant les réponses physiologiques microbiennes ou incorporant les effets de gel et dégel des sols de climat froid.
- **Dans les sols désertiques**, la ressource carbone est limitée. Une augmentation des apports en carbone par les plantes favorise donc la transformation de composés azotés, la biomasse microbienne, la diversité (par exemple de champignons), l'activité enzymatique et l'utilisation de matière organique complexe. Bien que ces changements puissent augmenter la respiration et donc la perte nette de carbone des sols, les caractéristiques spécifiques des sols arides et semi-arides pourraient leur permettre de fonctionner comme des puits de carbone.
- **Une étude de 19 sites de prairies tempérées** a révélé que des différences saisonnières dans les précipitations limitaient l'accumulation de biomasse.
- **Le potentiel des communautés microbiennes de la toundra** change de façon marquée au bout d'un an et demi de réchauffement, avec une activité plus forte des gènes impliqués dans les décompositions aérobie et anaérobie du carbone et le cycle des nutriments. Quand les forêts se développent dans les régions de toundra qui se réchauffent, leur croissance peut produire une perte nette de carbone, probablement le résultat d'exsudats racinaires stimulant la décomposition du carbone du sol par les bactéries.
- **Le réchauffement rapide de la péninsule antarctique et de ses îles** a entraîné une expansion de l'aire de répartition de l'herbe antarctique (*Deschampsia antarctica*). En effet, cette plante rivalise avec les espèces indigènes (par exemple la mousse *Sanionia uncinata*) par la capacité supérieure de ses racines à acquérir des peptides⁷ et donc de l'azote. La capacité de l'herbe à être compétitive dépend de la dégradation des protéines par les microorganismes et la production d'acides aminés, de nitrate et d'ammonium. Des sols plus chauds dans cette région abritent une plus grande diversité fongique, le changement climatique devrait provoquer des changements dans les communautés fongiques qui affecteront le cycle des éléments nutritifs et la productivité primaire.

7. Les peptides sont des molécules comprenant au moins deux résidus d'acides aminés reliés par la liaison peptidique, c'est-à-dire CO-NH.

2/ Les réponses de la respiration microbienne aux changements de température :

- Deux études ont évalué les effets de températures élevées sur les taux et les mécanismes de respiration microbienne et leurs conséquences sur l'adaptation bactérienne, *via* l'examen d'une large plage de températures ambiantes (- 2 à 28 °C), dans les sols asséchés (110 échantillons) et les sols boréaux, tempérés et tropicaux (22 échantillons). Les chercheurs ont évalué comment les communautés bactériennes réagissaient à trois températures différentes, entre 10 et 30 °C, et ont mis en évidence que l'adaptation thermique était liée aux caractéristiques biophysiques des membranes cellulaires et des enzymes (compromis activité-stabilité) et au potentiel génomique des microorganismes, les environnements plus chauds ayant des communautés microbiennes avec des modes de vie plus diversifiés.
- Les taux de respiration par unité de biomasse étaient inférieurs dans les sols des environnements à haute température, indiquant que l'adaptation thermique des communautés microbiennes peut diminuer les rétroactions climatiques positives. Cependant, comme la respiration dépend de multiples facteurs interdépendants (et pas de la seule variable température), un tel mécanisme de physiologie microbienne devrait être inséré dans les modèles biogéochimiques.

3/ Les réponses de la croissance microbienne aux changements de température

sont complexes et variées. L'efficacité de la croissance microbienne est une mesure de l'efficacité avec laquelle les microorganismes convertissent la matière organique en biomasse : une efficacité moindre signifie que plus de carbone est libéré dans l'atmosphère. Les études ne sont pas toutes concordantes :

- Une étude en laboratoire d'une semaine a révélé que l'augmentation de la température conduit à une augmentation du taux de renouvellement des microorganismes sans augmentation de l'efficacité de leur croissance (les microorganismes sont plus nombreux mais pas plus efficaces individuellement) et conclue que le réchauffement favorisera donc l'augmentation de la biomasse bactérienne et donc l'accumulation de carbone dans le sol.
- *A contrario*, une étude de terrain de 18 ans a révélé qu'une température de sol plus élevée entraînait l'apparition de substrats plus complexes à dégrader et donc réduisait l'efficacité de la croissance microbienne entraînant sur le moyen, long terme une perte nette associée du stockage de carbone dans le sol.

4/ Le changement climatique est susceptible d'augmenter la fréquence, l'intensité et la durée des proliférations de cyanobactéries

dans de nombreux lacs, réservoirs et estuaires eutrophes. Les cyanobactéries produisent une variété de neurotoxines, hépatotoxines et dermatotoxines qui peuvent être mortels pour les oiseaux et les mammifères (y compris le bétail et les chiens) et menacent l'utilisation des eaux pour les loisirs, la boisson et l'irrigation agricole et les pêcheries. De nombreuses cyanobactéries peuvent se développer à des températures relativement élevées. L'augmentation des stratifications thermiques des lacs et des réservoirs leur permet de flotter vers le haut et de former des agrégats de surface denses, ce qui leur donne un meilleur accès à la lumière et donc un avantage sélectif sur les organismes phytoplanctoniques non-flottants.

Les sécheresses durant l'été augmentent le temps de résidence de l'eau dans les réservoirs, les rivières et les estuaires, et ces eaux chaudes stagnantes fournissent des conditions idéales pour la prolifération cyanobactérienne. La réorganisation des communautés vers les espèces productrices de toxines ou l'augmentation de la production de toxines par les espèces existantes pourrait affecter les lacs d'eau douce polaires, où les cyanobactéries sont souvent les producteurs primaires benthiques dominants.

- Les cyanobactéries toxiques ont ainsi provoqué d'importants problèmes de qualité de l'eau, par exemple au lac Taihu (Chine), au Lac Érié (États-Unis), au Lac Okeechobee (États-Unis), au Lac Victoria (Afrique) et dans la mer Baltique.

- La diversité des cyanobactéries benthiques et la production de toxines dans les péninsules Antarctique et Arctique a augmenté après six mois d'exposition à des températures croissantes.
- La capacité du genre de cyanobactérie *Microcystis* à s'adapter à des niveaux élevés de CO₂ a été démontrée à la fois en laboratoire et sur le terrain. La compétitivité des souches de *Microcystis spp.* a été reliée à la concentration de carbone inorganique dans les carboxysomes *via* l'absorption du CO₂ et du HCO₃⁻.

Biomes agricoles

Selon les données de la Banque mondiale relatives aux terres agricoles, près de 40 % de l'environnement terrestre est consacré à l'agriculture. Cette proportion devrait augmenter, entraînant des changements substantiels dans les cycles du carbone, de l'azote, du phosphore et des autres nutriments. De plus, ces changements sont associés avec une perte marquée de biodiversité, y compris de microorganismes.

L'utilisation des microorganismes associés aux plantes et aux animaux pour augmenter la durabilité de l'agriculture et atténuer les effets du changement climatique sur la production alimentaire est de plus en plus fréquente, mais ceci nécessitera de mieux comprendre les incidences du climat sur ces communautés.

Les effets des microorganismes sur le changement climatique

1/ Production de méthane

Le méthane, CH₄, est produit par deux sources principales : les microorganismes méthanogènes et les combustibles fossiles. Les microorganismes produisent du méthane dans des environnements anaérobies naturels et artificiels (sédiments, sols saturés d'eau comme les rizières, tractus gastro-intestinal des animaux, en particulier les ruminants, installations de traitement des eaux usées et installations de biogaz). Par ailleurs, l'utilisation des combustibles fossiles et l'utilisation d'engrais a considérablement augmenté la disponibilité environnementale de l'azote, perturbant les processus biogéochimiques globaux et faisant peser une menace sur les écosystèmes.

Ce même méthane est dégradé par oxydation atmosphérique et oxydation microbienne dans les sols, les sédiments et l'eau.

Les niveaux atmosphériques de CH₄ ont fortement augmenté ces dernières années (2014-2017), faisant peser une menace sur notre capacité à contrôler le changement climatique et ce pour plusieurs raisons : augmentation des bactéries méthanogènes, augmentation des combustibles industrielles fossiles ou réduction de l'oxydation atmosphérique de CH₄.

- **Le riz** nourrit la moitié de la population mondiale et les rizières contribuent à environ 20 % des émissions de CH₄ d'origine agricole, bien qu'ils ne couvrent qu'environ 10 % des terres arables. Ces émissions devraient doubler d'ici la fin du siècle en raison du changement climatique.
- **Les ruminants** sont la plus grande source d'émissions anthropiques de méthane, avec une empreinte carbone de la production de viande de ruminant de 19 à 48 fois supérieure à l'empreinte carbone de la production de protéines d'origine végétale. Quant aux productions de viande provenant d'animaux non ruminants (tels que les porcs, les volailles et le poisson), elles produisent trois à dix fois plus de CH₄ que la production d'aliments végétaux riches en protéines.

2/ Emissions de N₂O, un puissant gaz à effet de serre

Ce gaz est libéré par oxydation microbienne et réduction de l'azote. L'enzyme N₂O réductase présente dans les rhizobactéries des nodules racinaires ou autres microorganismes du sol peut convertir le N₂O en N₂, un gaz inerte. Mais, quand cette enzyme n'est pas exprimée ou active, du N₂O peut être relargué dans l'atmosphère. Or, le changement climatique perturbe les ratios des transformations microbiennes de l'azote (décomposition, minéralisation, nitrification, dénitrification et fixation) et favorise donc le relargage de N₂O dans l'atmosphère. Il y a un urgent besoin de connaître les effets changements globaux sur les transformations microbiennes des composés azotés.

Les effets du changement climatique sur les microorganismes

Les pratiques agricoles ont évolué d'une gestion extensive (peu de travail, engrais et capital) à une gestion intensive (beaucoup de travail, engrais et capital).

1/ L'augmentation des températures et de la sécheresse affecte fortement la capacité à faire pousser des cultures. Les réseaux trophiques basés sur les champignons (communs dans les systèmes extensifs comme les prairies) sont plus en mesure de s'adapter à la sécheresse que les réseaux trophiques à base de bactéries (courants dans les systèmes intensifs comme la culture de blé). Une évaluation globale de la terre arable a révélé que les champignons et les bactéries du sol occupaient des niches spécifiques et réagissaient différemment aux précipitations et au pH du sol, indiquant que le changement climatique aurait des impacts différents sur leur abondance, leur diversité et leurs fonctions.

2/ L'aridité, qui devrait augmenter en raison du changement climatique, réduit la diversité et l'abondance des bactéries et des champignons et donc le potentiel fonctionnel global des communautés, limitant ainsi leur capacité à soutenir la croissance des plantes.

3/ Les effets combinés du changement climatique et de l'eutrophisation causés par les engrais peuvent avoir des effets importants, potentiellement imprévisibles sur la compétitivité microbienne.

- Par exemple, l'enrichissement en nutriments favorise généralement les proliférations d'algues.
- Un résultat différent a été observé dans le lac de Zurich, relativement profond. La réduction du phosphore provenant des engrais a réduit les proliférations de phytoplancton eucaryote, mais, en augmentant les ratios azote/phosphore, a favorisé la dominance de la cyanobactérie non fixatrice d'azote *Planktothrix rubescens* qui n'a pas pu être contrôlée par prédation. En effet, le réchauffement augmentant la stratification thermique, le mélange des communautés a été réduit, ce qui a diminué la prédation et donc favorisé la persistance des cyanobactéries toxiques.

Maladies infectieuses

Les agents pathogènes viraux, bactériens et fongiques des plantes et des animaux s'adaptent aux facteurs biotiques et abiotiques (tels que la température, les pesticides, les interactions entre microorganismes et la résistance de l'hôte) d'une manière qui affecte la fonction de l'écosystème, la santé humaine et la sécurité alimentaire.

1/ Le changement climatique peut augmenter le risque de maladie en modifiant l'acclimatation de l'hôte et des parasites. Divers facteurs socioéconomiques, environnementaux et facteurs spécifiques à l'hôte pathogène sont impliqués dans l'apparition et la propagation des maladies. La compréhension des facteurs de dispersion, des facteurs environnementaux et de l'écologie des agents pathogènes, de leurs vecteurs et de leurs hôtes est essentielle à la conception de stratégies de contrôle efficaces.

Compte-tenu de l'importance de la diffusion des pathogènes sur la santé des écosystèmes, des systèmes de surveillance de la température ont déjà été développés pour une large gamme d'organismes marins : coraux, éponges, huîtres, homards et autres crustacés, étoiles de mer, poissons et algues.

- **Les maladies des coraux ont un lien étroit avec l'augmentation des températures de surface** et, bien que les mécanismes de la maladie ne soient pas absolument clairs, des associations avec des agents pathogènes existent. Les pics de prévalence de la maladie coïncident avec les périodicités des phénomènes *El Niño*. Le réchauffement des océans altère le microbiome des coraux et, notamment chez certaines espèces, perturbe les équilibres hôte-symbiote, les mécanismes défensifs et les cycles des nutriments, ce qui contribue au blanchiment et aux maladies.
- **Des organismes tels que les poissons sont sensibles à l'acidification des océans** qui peut aussi causer directement des lésions tissulaires, affaiblissant le système immunitaire, ce qui crée des opportunités pour l'invasion bactérienne.
- **Les espèces d'étoiles de mer** ont diminué de 80 à 100 % sur environ 3 000 km de la côte ouest nord-américaine, avec des déclin maximaux survenant lors d'augmentations anormales des températures de surface. Comme les étoiles de mer sont d'importants prédateurs d'oursins, la perte de prédation provoque une cascade trophique qui contribue à la disparition des forêts de varech (par sur-herbivorie) et de la biodiversité associée.
- **Le dépérissement des forêts**, causé par la sécheresse et le stress thermique, peut être exacerbé par les agents pathogènes.
- **La température peut augmenter la sensibilité à l'infection chez les ectothermes (comme les amphibiens)**, éventuellement par perturbation des réponses immunitaires. Les fluctuations imprévisibles de température mensuelle et quotidienne augmentent ainsi la sensibilité de la rainette arboricole cubaine au champignon pathogène *Batrachochytrium dendrobatidis*. L'effet de l'augmentation de la température sur l'infection contraste avec la diminution de la capacité de croissance du champignon en culture pure, illustrant l'importance de l'évaluation des relations hôte-pathogène (plutôt que d'extrapoler à partir d'études de taux de croissance de microorganismes isolés).

2/ La rétroaction cyclique entre la réponse microbienne et l'activité humaine est bien illustrée par les schémas d'adaptation des champignons pathogènes en agriculture. Les écosystèmes agricoles possèdent des caractéristiques communes (irrigation, utilisation d'engrais et cultivars de plantes). Le transport mondialisé disperse facilement les agents pathogènes des cultures, notamment ceux qui sont « adaptés à l'agriculture » et qui sont plus susceptibles de provoquer des épidémies et de constituer une menace plus grande pour la production agricole que les souches naturelles existantes.

La capacité des agents pathogènes fongiques à élargir leur gamme et à envahir de nouveaux habitats en évoluant pour tolérer des températures plus élevées aggrave la menace que représentent les agents pathogènes fongiques, pour les écosystèmes naturels et agricoles.

La réponse des cultures aux pathogènes dépend d'une variété de facteurs en inte-

raction, y compris les niveaux de CO₂, les changements climatiques, la santé des plantes et les interactions spécifiques plantes-pathogènes.

Une large gamme de microorganismes est responsable de maladies des plantes (champignons, bactéries, virus, viroïdes et oomycètes) et peuvent donc affecter les cultures, menacer la sécurité alimentaire, voire même provoquer des famines (par exemple, l'oomycète *Phytophthora infestans* a provoqué la grande famine irlandaise en raison des atteintes aux pommes de terre).

- Une évaluation de plus de 600 parasites des cultures (nématodes et insectes) et agents pathogènes depuis 1960 a révélé une expansion vers les pôles due au changement climatique.
- La propagation des pathogènes et l'émergence des maladies sont facilitées par le transport et l'introduction d'espèces non indigènes et sont influencées par les effets des conditions météorologiques sur la dispersion et la croissance.

3/ Le changement climatique devrait augmenter le taux de résistance aux antibiotiques de certains agents pathogènes humains.

- Les données de 2013 à 2015 suggèrent qu'une augmentation des températures quotidienne de 10 °C (ce qui est concevable dans certaines régions des États-Unis d'ici la fin du siècle) conduira à une augmentation de la résistance aux antibiotiques d'*Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae* et *Staphylococcus aureus* de 2 à 4 % (jusqu'à 10 % pour certains antibiotiques). Les mécanismes sous-jacents potentiels sont que les températures élevées facilitent le transfert horizontal d'éléments génétiques mobiles et augmente les taux de croissance des agents pathogènes favorisant leur persistance environnementale, leur transport et leur transmission.
- La croissance démographique, qui amplifie le changement climatique, est également un facteur important qui favorise le développement de résistance.

4/ Les pathogènes à transmission vectorielle, alimentaire, atmosphérique, aquatique sont particulièrement vulnérables aux effets du changement climatique.

Les mécanismes sous-jacents sont l'augmentation de la saison de transmission qui augmente le taux de répllication des agents pathogènes dans le vecteur et augmente le nombre et la portée géographique des vecteurs et donc la plage sur laquelle les maladies sont transmises. Le changement climatique affectera également l'efficacité avec laquelle les vecteurs transmettent des agents pathogènes. Cette efficacité dépend du temps entre la piqûre d'un hôte infecté et le moment où le vecteur devient lui-même infectieux. Les températures élevées réduisent considérablement ce temps, ce qui offre plus de possibilités de transmission pendant la durée de vie du vecteur. Des épidémies plus importantes et plus fréquentes devraient se produire à l'avenir.

- Les maladies transmises par les moustiques (comme la dengue, le Zika, le chikungunya, la fièvre de *West Nile* et l'encéphalite japonaise) et les maladies transmises par les tiques (comme la maladie de Lyme) vont augmenter, avec des millions de nouvelles personnes à risque à l'avenir. Pour l'instant, *Aedes aegypti*, le principal vecteur de la dengue, du Zika, du chikungunya et du virus de la fièvre jaune, est limité aux régions tropicales et subtropicales, car il ne peut pas survivre aux hivers froids.
- La compréhension des réactions des moustiques à la bactérie *Wolbachia* (un symbiote commun des arthropodes) a entraîné une réduction de la transmission des virus Zika, dengue et chikungunya par le biais de l'introduction de *Wolbachia* dans des populations de moustiques *A. aegypti* relâchées ensuite dans l'environnement.
- Certaines maladies à transmission vectorielle, telles que la fièvre catarrhale ovine, une maladie virale économiquement importante, sont déjà apparues en Europe en réponse au changement climatique.
- Certaines autres, comme **le paludisme et la dengue** sont deux maladies à vecteur, connues pour être très sensibles aux conditions climatiques. Leurs distributions spatiales sont donc appelées à changer en réponse au changement climatique.

- **La multiplication et la diffusion vers les pôles des infections causées par *Vibrio spp.* (transmis par les milieux aquatiques)** est corrélée à l'augmentation de la température globale et la baisse de la salinité des milieux aquatiques causée par une augmentation des précipitations dans les régions côtières comme les estuaires. Ces nouvelles conditions favorisent la croissance de *Vibrio spp.* dans l'environnement.
- **L'augmentation de la température de la surface de la mer** a favorisé les infections à *Vibrio cholerae* au Bangladesh, les infections à plusieurs *Vibrio spp.* pathogènes pour l'Homme dans la région de la mer Baltique, l'abondance de *Vibrio spp.* dans l'Atlantique Nord et la Mer du Nord. La variabilité climatique et notamment les phénomènes à grande échelle perturbent les régimes de précipitations et modifie les températures sur environ deux tiers du globe. Ces phénomènes devraient donc impacter de nombreuses maladies infectieuses (paludisme, dengue, Maladie à virus Zika, choléra, peste, peste équine). L'adaptation des espèces à leur environnement local a été moins étudié chez les microorganismes que chez les animaux (y compris l'Homme) et les plantes, bien que les mécanismes et les conséquences de l'adaptation ont été étudiés dans les populations microbiennes naturelles et expérimentales.

L'atténuation du changement climatique par les microorganismes

Une meilleure compréhension des interactions microbiennes contribuerait à la conception de mesures visant à atténuer et contrôler le changement climatique et ses effets.

- En agriculture, les progrès dans la compréhension de l'écophysiologie des microorganismes qui réduisent le N₂O en diazote inoffensif fournit des options pour atténuer les émissions.
- L'utilisation de souches bactériennes, naturelles ou génétiquement modifiées avec une activité N₂O réductase renforcée peut réduire les émissions de N₂O provenant du soja.
- La manipulation du microbiote du rumen et les programmes de sélection sont des possibilités pour réduire les émissions de méthane par les bovins, sous réserve de trouver des lignées de bétail qui favorisent les communautés microbiennes produisant moins de méthane sans affecter la santé et la productivité des animaux.
- Le développement des protéines fongiques peut remplacer la viande qui est la production la plus productrice de méthane.
- Les biochars, produits par la conversion thermo-chimique de la biomasse en conditions anoxiques⁸, améliorent la stabilisation et l'accumulation de la matière organique dans les sols riches en fer. Le biochar améliore également la rétention de matière organique en réduisant la minéralisation microbienne et l'effet des exsudats de racines sur la rupture des liaisons organo-minérales. Les biochars favorisent donc la croissance des herbes et la réduction du dégagement de carbone.
- L'utilisation à grande échelle de zones humides aménagées pour la production de biocarburant cellulosique utilisant les rejets d'azote provenant du traitement des eaux usées peut contribuer à l'atténuation du changement climatique. Si tous les déchets chinois étaient ainsi utilisés, ils pourraient fournir l'équivalent de 7 % de la consommation d'essence chinoise. De tels aménagements nécessiteraient la caractérisation et l'optimisation de communautés microbiennes adaptées à l'enjeu.
- La biotechnologie microbienne peut optimiser les services écosystémiques de production (nourriture par exemple) et de régulation (des maladies, des émissions ou de séquestration de gaz à effet de serre).



La mise en œuvre de ces solutions sera sans aucun doute facilitée par l'amélioration de la compréhension par le public des rôles clés des microorganismes dans le réchauffement climatique, c'est-à-dire par l'acquisition de connaissances en microbiologie.

Conclusion

Lacunes de recherche

Les connaissances sur les relations entre microorganismes et le changement climatique sont relativement pauvres par rapport aux données sur les organismes macroscopiques. Certains effets sont connus, mais restent incomplets, complexes et difficiles à interpréter. Or, comprendre ces phénomènes, éviter les mécanismes favorisant le changement climatique et favoriser les phénomènes d'atténuation nécessitera d'améliorer notre compréhension quantitative du microbiome mondial marin et du sol, notre compréhension des cycles biogéochimiques et des rétroactions avec le changement climatique partout dans le monde.

Les études doivent intégrer les conditions environnementales pertinentes, adopter une vision « microbcentrique » des pressions environnementales et être suivies d'essais sur le terrain. Les expériences en mésocosme et *in situ* sont particulièrement importantes pour avoir un aperçu des réponses au niveau communautaire en conditions environnementales réelles. Ces approches nécessitent des connaissances issues de multiples disciplines spécifiques aux biomes marin (océanographie physique) et terrestre (géochimie).

Pour comprendre comment la diversité et l'activité microbienne qui régissent les interactions à petite échelle influent sur les cycles mondiaux, il sera important d'échelonner les résultats individuels aux communautés puis à des écosystèmes entiers. Les modélisateurs du système terrestre doivent inclure les contributions microbiennes qui participent aux réponses physiologiques et adaptatives (évolutive) aux forçages biotiques (y compris d'autres microorganismes, plantes et substrats de matière organique) et abiotiques (y compris les surfaces minérales, la physique des océans et chimie). Il est important de pallier la rareté des données (données de physiologie évolutive, données quantitatives, sur les organismes qui influent sur les grands cycles des éléments, données environnementales), pour permettre des prédictions robustes des réponses microbiennes au changement environnemental. Un investissement ciblé dans l'expansion de cette connaissance mécanistique représente un élément critique pour la génération des modèles globaux permettant de comparer, mettre à l'échelle, paramétrer le système Terre et prédire le climat actuel et futur. Le cadre pour les modèles quantitatifs existe, mais ces modèles manquent, pour une grande partie, de détails mécanistes sur les micro-organismes marins et terrestres.

synthèse Hélène Soubelet,
docteur vétérinaire et directrice de la FRB

relecture Jean-François Silvain,
président de la FRB

Francis Garrido,
directeur adjoint du BRGM