



39€

Jusqu'à
-77%
de remise

PLS16

☐ **autre** (30 € par abonnement supplémentaire), soit----- abonnements → total ----- €

Abonnez-vous encore plus vite sur rueidesetudiants.com



« Plus du tiers des microorganismes planctoniques repérés par *Tara Oceans* sont inconnus »

Pendant plus de quatre ans, le voilier *Tara* a fait le tour des océans en prélevant des échantillons de plancton. Grâce à cette moisson sans précédent, nos connaissances sur les microorganismes marins et leur écologie vont faire un pas de géant.



Éric KARSENTI, biologiste et directeur de recherche émérite au CNRS, a assuré la direction scientifique de l'expédition *Tara Oceans* (2009-2013).

Entretien avec **Éric Karsenti**

De 2009 à 2013, dans le cadre de la mission *Tara Oceans*, la goélette *Tara* a effectué un immense périple au cours duquel près de 35 000 échantillons de plancton ont été récoltés, puis envoyés pour analyse à différents laboratoires. Les premiers résultats ont été publiés en 2015. Éric Karsenti, chercheur en biologie cellulaire au Laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL), à Heidelberg, et lauréat 2015 de la médaille d'or du CNRS, a assuré la direction scientifique de l'expédition. Il nous explique en quoi celle-ci a consisté et pourquoi ses résultats renouvellent profondément la science du plancton et de son rôle dans les écosystèmes.

POUR LA SCIENCE

L'étude du plancton océanique et de son rôle écologique était le principal objectif de l'expédition *Tara Oceans*. Pouvez-vous nous rappeler ce que recouvre le terme de plancton ?

ÉRIC KARSENTI : Le plancton (marin) est constitué de tous les organismes vivants qui se laissent dériver à grande distance dans l'océan, même si beaucoup d'entre eux, comme les méduses, peuvent se déplacer

activement sur de courtes distances. Cela inclut donc les virus, les bactéries et archées, les protistes (c'est-à-dire les eucaryotes unicellulaires tels que les protozoaires et les microalgues), le zooplancton, constitué d'animaux pluricellulaires dont la taille va d'environ 0,1 millimètre à plusieurs centimètres, et le phytoplancton (le plancton végétal).

PLS

Pour quelles raisons l'expédition *Tara Oceans* a-t-elle été mise en place ?

É. K. : L'idée initiale était de monter une expédition médiatique, dans un objectif de vulgarisation scientifique, pour parler au grand public d'évolution, de biologie marine... Mais le coût d'une telle opération s'est révélé prohibitif. Par ailleurs, en discutant avec Christian Sardet et Gaby Gorsky, de l'observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer, ainsi qu'avec d'autres chercheurs, je me suis aperçu qu'on ne savait presque rien sur le plancton à l'échelle globale – alors même que les microorganismes marins ont joué un rôle de premier plan dans l'évolution de la vie sur Terre, par exemple en enrichissant l'atmosphère terrestre en oxygène. Ainsi a émergé, notamment au travers de

discussions avec Gaby Gorsky, Colombar de Vargas et d'autres, l'idée de caractériser de façon exhaustive l'écosystème planctonique, des virus jusqu'aux larves de poissons. C'est cette vision que nous avons réussi à faire financer en partie par des organismes publics (CNRS, CEA, EMBL...). Nous avons recruté des spécialistes de diverses disciplines, sollicité la fondation Tara et sa goélette du même nom, et, ce qui était une partie essentielle de l'entreprise, nous avons défini les procédures d'échantillonnage, en fonction des classes d'organismes et des objectifs scientifiques que nous nous sommes fixés.

PLS

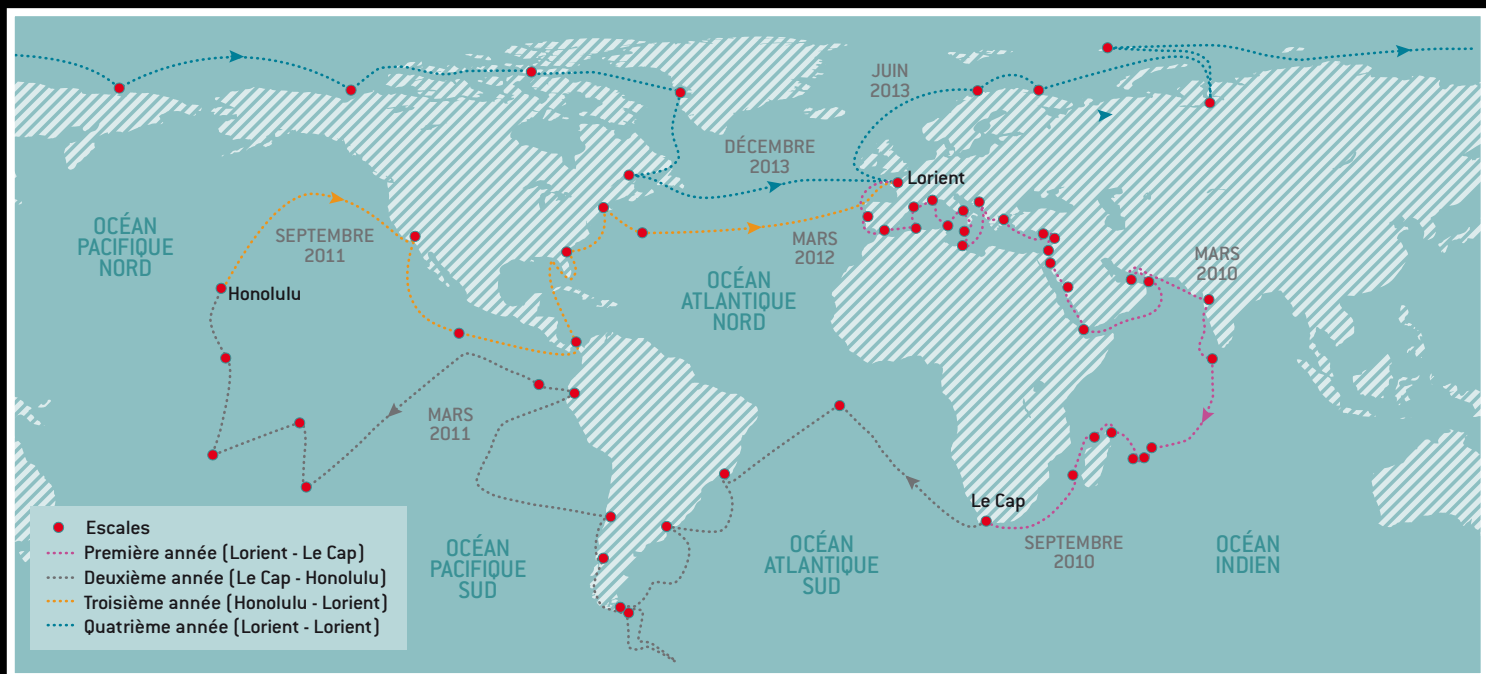
Y a-t-il eu dans le passé d'autres missions analogues d'exploration du plancton ?

É. K. : Depuis Darwin et son grand voyage autour du monde à bord du *Beagle*, et surtout l'expédition du *Challenger* (1872-1876) qui est à l'origine de l'océanographie moderne, il y a eu peu d'expéditions à long terme en circumnavigation avec un programme intégré. Mais il y a une dizaine d'années, le biologiste et homme d'affaires américain Craig Venter a monté une expédition d'échantillonnage de la diversité génétique



CETTE PHOTOGRAPHIE DE RADIOLAIRES de la baie de Villefranche-sur-Mer montre une dizaine d'individus *Aulacantha scolymantha*, d'environ un millimètre de diamètre, deux grands radiolaires (*Thalassicolla pellucida* et *Thalassolampe margarodes*) et une colonie de *Collozoum inerme* (en haut à gauche). Les petits points ocre sont des microalgues vivant en symbiose avec ces protistes.

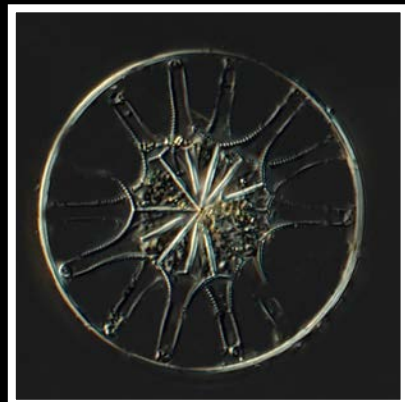
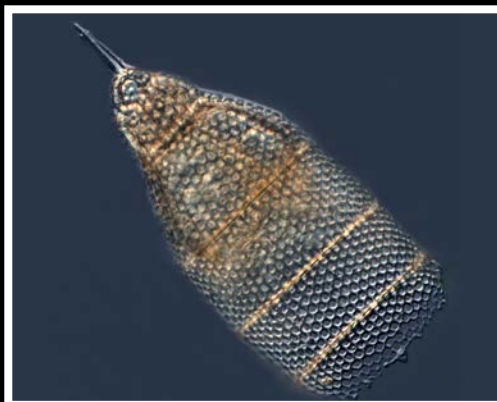
© Christian Sureau, « Plankton - Aux origines du vivant, Ulmer, 2013



D'après carte de l'expédition Tara Océans

QUELQUES MICROORGANISMES DU PLANCTON

photographiés dans le cadre de la mission *Tara Oceans*.
De gauche à droite : le radiolaire *Eucyrtidium acuminatum* (océan Indien), une diatomée (océan Indien), le dinoflagellé *Ceratium pentagonum* (Atlantique Sud), la diatomée *Planktoniella sol* (océan Indien), le dinoflagellé *Ornithoceras magnificus* (océan Indien).



des bactéries océaniques. Cette *Global Oceanic Sampling Expedition*, qui s'est déroulée de 2004 à 2006, a consisté à pomper l'eau en surface pour recueillir les bactéries et séquencer globalement leurs génomes. En cela, Craig Venter a été un précurseur de la métagénomique, démarche qui consiste à analyser le matériel génétique de toute une population d'organismes différents. Mais d'une part les techniques de séquençage de l'époque étaient encore rudimentaires, d'autre part cette exploration se limitait à la génétique et ne cherchait pas du tout à caractériser l'écologie des communautés microbiennes. Son envergure n'est donc pas comparable à celle de *Tara Oceans*.

PLS

De quelle façon la mission *Tara Oceans* se déroulait-elle ?

É. K. : L'équipage était constitué de six marins, six scientifiques, un journaliste et

un artiste. Nous naviguions pendant trois ou quatre jours, puis restions en station 60 heures en général pour collecter des échantillons à différentes profondeurs – de la surface jusqu'à 600 mètres.

Pour les protistes et autres microorganismes, il suffisait de pomper et filtrer une centaine de litres d'eau. Pour les organismes plus gros, qui sont plus parsemés, il fallait des volumes d'eau beaucoup plus importants qu'il n'était pas question de pomper : cela aurait nécessité des moyens trop lourds. Leur récolte s'effectuait donc en laissant traîner des filets, équipés de débitmètres et dont la maille avait une taille adaptée aux organismes visés.

Les échantillons étaient généralement conservés à -20°C , parfois à la température de l'azote liquide (-195°C) ; certains organismes collectés étaient placés dans du formol. Tous les mois ou deux, on les expédiait à l'EMBL, à Heidelberg, qui les répartissait ensuite entre le Genoscope, à

Évry, et les laboratoires de Villefranche-sur-Mer, de Roscoff, de Barcelone et de l'université de l'Arizona. Cela représentait à chaque fois environ une tonne de matériel !

PLS

Les sites d'échantillonnage étaient-ils choisis au hasard ?

É. K. : Pas du tout. Nous nous sommes efforcés de faire un choix de stations représentatives (il y en a eu 210 au total) en nous appuyant sur des cartes satellitaires dressées par des océanographes, en tenant compte des paramètres environnementaux (vent, température, courant, etc.), de la richesse ou de la pauvreté du milieu, des particularités de certains endroits... Nous voulions un échantillonnage non seulement représentatif et assez complet, mais aussi qui soit corrélé avec les données environnementales et l'histoire océanographique de la masse d'eau sondée. C'est ce qui fait la force de *Tara*

© Photos de plancton : John Dolan, Laboratoire d'océanographie de Villefranche-sur-Mer (OVR-SUMPC)



© V. Hilaire - Tara Expéditions

© Latrelle-Tara Expéditions

L'EXPÉDITION TARA OCEANS, qui a démarré en septembre 2009 et s'est achevée en décembre 2013, a couvert presque tous les océans (à gauche). La goélette Tara (ci-contre) a effectué un parcours de quelque 140 000 kilomètres. Son équipage comprenait six scientifiques, qui s'assuraient notamment du bon déroulement des prélèvements (ci-dessus, des filets à plancton de type « Bongo ») et de la préservation des échantillons.



Oceans: une telle approche écosystémique n'avait jamais été adoptée auparavant.

PLS

Comment les échantillons sont-ils analysés ?

É. K. : Les analyses sont de deux types. Il s'agit d'une part d'imagerie, d'autre part de séquençage. L'imagerie, par microscopie, par cytométrie en flux, etc., est essentiellement faite dans les laboratoires que j'ai mentionnés, mais il y avait aussi de l'imagerie réalisée *in situ*, grâce à une caméra que l'on immergeait à des profondeurs variables (entre la surface et 1 000 mètres de profondeur) et qui permettait d'enregistrer des images d'organismes de taille supérieure à 0,5 millimètre environ.

Quant au séquençage, il est question aussi bien de métagénomique, c'est-à-dire du séquençage de l'ADN global de l'échantillon, que de métatranscriptomique, c'est-à-dire du séquençage de son ARN. Ces

analyses apportent des informations sur la diversité génétique et taxonomique de chaque échantillon, ainsi que sur les gènes exprimés. À ces « métaséquençages » s'est ajouté le séquençage de quelques génomes entiers de petits organismes eucaryotes, afin de fournir des références de comparaison. De ce point de vue, le Genoscope, sous l'impulsion de Jean Weissenbach puis de Patrick Wincker, a réalisé un travail colossal et d'une très grande qualité.

PLS

Qu'a-t-on ainsi appris sur la diversité du microplancton marin ?

É. K. : Pour les protistes, les données des séquençages effectués jusqu'ici indiquent qu'ils regroupent de l'ordre de 150 000 genres, alors qu'on en connaissait une dizaine de milliers seulement. En termes d'espèces, cela fait bien sûr beaucoup plus, peut-être entre 1 et 10 millions. Et le tiers environ de ces unités

taxonomiques n'ont pu être rattachées à aucun des groupes connus d'eucaryotes... Pour ce qui est des virus et bactéries, les analyses montrent qu'ils englobent près de 40 millions de gènes différents, dont la plupart (59 %) semblent bactériens. Une partie des gènes répertoriés proviennent d'études et missions antérieures, mais plus de 80 % d'entre eux proviennent du recensement de *Tara Oceans*. On estime aussi qu'environ 30 % des dizaines de milliers d'espèces de bactéries contenues dans les échantillons de *Tara Oceans* n'étaient pas connues de la science. Ce chiffre serait de l'ordre de 90 % pour les virus.

PLS

Une publication récente livre des résultats surprenants concernant des protistes nommés rhizaires. De quoi s'agit-il ?

É. K. : Les rhizaires constituent un grand groupe de protistes auquel appartiennent

notamment les radiolaires. Ils ont un squelette minéral dont émergent des pseudopodes. Certains rhizaires sont des géants dans le microplancton et peuvent atteindre plusieurs centimètres, mais ils sont extrêmement fragiles et passent donc le plus souvent inaperçus dans les prélèvements. Avec plusieurs autres chercheurs, Tristan Biard, de la station biologique de Roscoff, a étudié les rhizaires de taille supérieure à 0,6 millimètre en examinant 1,8 million d'images prises par une caméra spéciale immergée, dans le cadre de 11 campagnes océaniques qui se sont déroulées entre 2008 et 2013, en particulier celle de *Tara Oceans*.

PLS

Et quels ont été les résultats ?

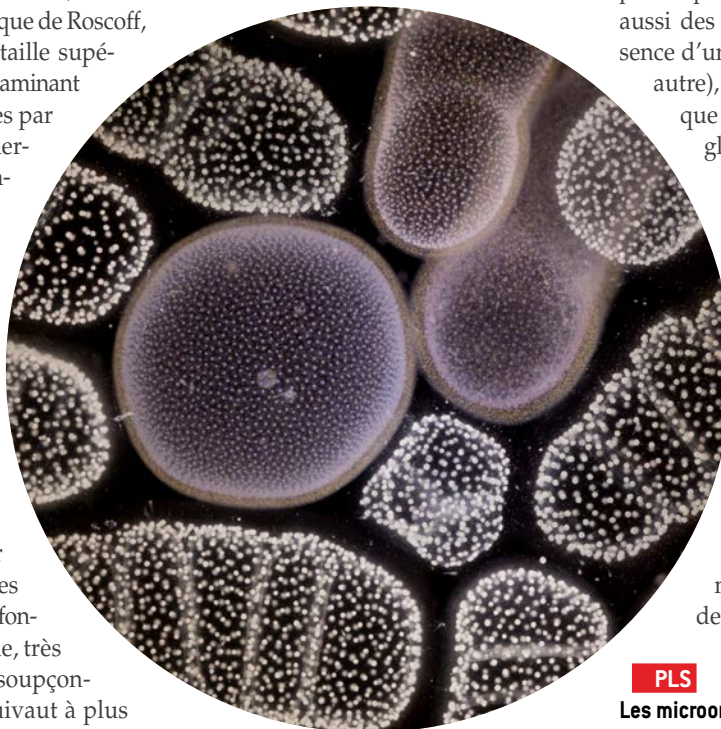
É. K. : Cette étude a notamment permis d'estimer la biomasse constituée par les rhizaires vivant dans les 200 premiers mètres de profondeur. Elle se révèle énorme, très supérieure à ce que l'on soupçonnait : en carbone, elle équivaut à plus de 5 % de celle de tous les organismes marins. De plus, les rhizaires sont relativement abondants dans les vastes régions océaniques pauvres en nutriments, où ils seraient avantagés par leur capacité à vivre en symbiose avec des microalgues. Leur biomasse y est équivalente à celle de tous les autres organismes planctoniques de taille comprise entre 0,2 et 20 millimètres. Ces découvertes modifient notre compréhension des écosystèmes planctoniques, et suggèrent que les rhizaires pourraient avoir un poids important dans le bilan des flux de carbone des océans.

PLS

Y a-t-il d'autres études de *Tara Oceans* qui portent sur les flux de carbone ?

É. K. : Lionel Guidi, du laboratoire de Villefranche-sur-Mer, et d'autres chercheurs en ont publié une en même temps que celle de l'équipe associée à Tristan Biard. En s'appuyant sur des analyses informatiques et génétiques, ils ont caractérisé certains réseaux d'organismes planctoniques qui

sont associés à l'export de carbone dans les régions océaniques pauvres en nutriments, l'export de carbone désignant le processus par lequel le carbone contenu dans les organismes marins finit par couler et par se retrouver séquestré dans les fonds. Mais il reste encore beaucoup à comprendre...



VUE AU MICROSCOPE DE RHIZAIRES formant des colonies, qui peuvent atteindre plusieurs centimètres. Chaque point blanc représente un individu (unicellulaire) de la colonie. *Tara Oceans* a révélé l'importance de leur biomasse.

PLS

Comment étudie-t-on les interactions de tous ces organismes ?

É. K. : Des méthodes bio-informatiques permettent, à partir des données des séquençages de l'ADN et de l'ARN des échantillons, qui renseignent sur la nature et l'abondance des différents organismes présents, de « cartographier » les interactions. Leur principe consiste à déterminer les cooccurrences et à les analyser. L'idée est par exemple que si un taxon (un type d'organismes apparentés) donné A se retrouve systématiquement dans les échantillons où est présent le taxon B, on « prédit » que les taxons A et B sont en interaction. On vérifie ensuite les prédictions bio-informatiques en observant

au microscope certains des échantillons, pour confirmer par exemple que les organismes A et B sont bien physiquement associés. On observe ainsi que la plupart des organismes sont en interaction, qu'il s'agisse de symbiose, de parasitisme ou de commensalisme. Ainsi, il n'y a quasiment pas de protistes isolés. On peut trouver aussi des relations d'exclusion (la présence d'une espèce excluant celle d'une autre), et les chercheurs ont constaté que de telles relations concernent globalement 20 % des organismes planctoniques.

Ces cartographies des réseaux d'interactions prennent également en compte les paramètres environnementaux (pH, température, concentration en phosphates...). Or le rôle des facteurs environnementaux dans la composition des communautés planctoniques s'est révélé bien moins important qu'on ne le pensait : l'environnement explique seulement 18 % des variations de composition.

PLS

Les microorganismes planctoniques sont-ils répartis de façon particulière dans les océans ?

É. K. : *Tara Oceans* a confirmé des choses que l'on savait déjà, comme le fait que la biodiversité du plancton est plus riche dans les régions tropicales où qu'il y a plus d'abondance dans les mers froides. Mais elle a aussi montré que la circulation océanique joue un rôle particulièrement important dans la façon dont se distribuent les communautés d'organismes planctoniques.

Par exemple, une étude a porté sur l'influence des anneaux d'Agulhas (ou anneaux des Aiguilles), de vastes tourbillons qui se forment à l'est de l'Afrique du Sud, entre l'océan Indien et l'océan Atlantique sud. Les données de *Tara Oceans* ont montré que ces anneaux forment une sorte de barrière qui isole l'une de l'autre les communautés planctoniques des deux océans. Plus généralement, l'analyse des données de l'expédition devrait fournir une vision globale de la concentration des organismes planctoniques et de leur diversité selon les régions. Et la

comparaison avec ce que l'on sait sur les poissons sera sans doute utile pour la gestion des pêcheries.

PLS

Le réchauffement climatique perturbe-t-il les populations de plancton ?

É. K. : On l'ignore pour l'instant, mais *Tara Oceans* a mis en évidence une stricte corrélation entre la température et la composition en archées et bactéries du plancton. Dans les profondeurs où la lumière pénètre, la température est, de fait, le principal facteur environnemental qui influe sur la composition du plancton. On devrait donc pouvoir se faire une idée de la façon dont la distribution des organismes planctoniques changera avec le réchauffement climatique. Par ailleurs, les résultats que j'ai déjà évoqués concernant les flux de carbone sont un avant-goût de ce que l'on peut apprendre sur la place du plancton dans la machinerie climatique de la Terre.

PLS

Quelles suites prévoit-on à *Tara Oceans* ?

É. K. : D'abord, l'exploitation complète des échantillons et données recueillis demandera encore plusieurs années de travail. De nouvelles publications sont d'ailleurs en cours, l'une sur la circulation océanique et la répartition du plancton, une autre sur la métatranscriptomique des eucaryotes, une troisième sur les îles du Pacifique et le rôle du fer, la quatrième sur les génomes de plus d'une centaine d'organismes unicellulaires. Il reste aussi à exploiter la dernière phase de la mission, qui s'est déroulée dans l'océan Arctique. De plus, toutes les données de *Tara Oceans* sont mises en accès libre et public, ce qui permet à tous les chercheurs de les exploiter. Enfin, la goélette *Tara* vient d'entamer (en mai 2016) sa prochaine mission, *Tara Pacific*. Prévue jusqu'en 2018, elle porte sur les systèmes coralliens du Pacifique, et notamment le plancton qui y est associé... ■

Propos recueillis par Maurice MASHAAL

■ BIBLIOGRAPHIE

T. Biard *et al.*, In situ imaging reveals the biomass of giant protists in the global ocean, *Nature*, vol. 532, pp. 504-507, 2016.

L. Guidi *et al.*, Plankton networks driving carbon export in the oligotrophic ocean, *Nature*, vol. 532, pp. 465-470, 2016.

Section spéciale *Tara Oceans*, *Science*, vol. 348, n° 6237, 22 mai 2015 (plusieurs articles).

C. Sardet, *Plancton - Aux origines du vivant*, Ulmer, 2013.



LES { Partagez les savoirs }

RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

POUR LA SCIENCE

COURS PUBLICS

Cycle 3 paléontologues du 19^e siècle face à l'évolution
Judi 24 novembre - 18h : D'Orbigny préoccupé par l'évolution
Avec **M. Godinot**, paléontologue, directeur d'Étude à l'École Pratique des Hautes Études, Muséum

Grand Amphithéâtre du Muséum — 57 rue Cuvier, Paris 5^e

Cycle Exploration des faunes marines profondes tropicales : Tropical Deep-Sea Benthos fête ses 40 ans
Lundi 7 novembre - 18h : Au cœur de la diversité des crustacés
Avec **L. Corbari**, chercheuse en Biologie marine, spécialiste des crustacés, Muséum
Lundi 14 novembre - 18h : La systématique des gastéropodes venimeux
Avec **N. Puillandre**, spécialiste de la systématique évolutive des gastéropodes marins, Muséum
Lundi 21 novembre - 18h : Des données biodiversité à la gestion des espaces naturels : enjeux dans les grands fonds
Avec **S. Samadi**, professeur, Muséum, **J. Delavenne**, analyste des données biodiversité marine

UN CHERCHEUR - UN LIVRE

Lundi 28 novembre - 18h : En lien avec l'exposition : Précieux vélins. Trois siècles d'illustration naturaliste.
Par **P. Heurtel**, conservatrice, chef du service des collections de la Bibliothèque, Muséum.
M. Lenoir, conservatrice, directrice honoraire de la Bibliothèque, Muséum

FILMS

Cycle « Expéditions : l'usage du monde »
Samedi 19 novembre - 15h : Milieu ou « Milieu »
Les aventures d'un entomologiste japonais aux prises avec un imminent typhon
Réalisation : **D. Faure**, France, 2015, 52 min. - En présence du réalisateur

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution — 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e



Microbiote : les plantes aussi !

De nombreux microorganismes interagissent avec les végétaux au niveau des racines, des feuilles, des graines... L'étude d'une plante modèle, l'arabette des dames, commence à révéler l'importance de leur rôle et les mécanismes de leur sélection.

Stéphane Uroz, Aurélie Cébron, Aurélie Deveau et Francis Martin

Nous ne sommes pas seuls ! Dans notre corps, des milliards de microorganismes microscopiques contribuent à notre santé, à notre croissance et à notre résistance aux stress environnementaux. Ces microorganismes (bactéries, champignons, virus...) constituent ce que l'on nomme un microbiote. Et de la même façon que nous hébergeons un microbiote à la surface de notre peau, dans notre système digestif et ailleurs, des microbiotes ont aussi été mis en évidence chez les autres animaux.

Des interactions nombreuses

Et les plantes ? Ont-elles aussi un microbiote ? Oui : les plantes ne poussent pas de manière axénique (en l'absence de tout germe) dans la nature. Au contraire, elles hébergent de nombreux microorganismes – bactéries ou champignons – bénéfiques ou néfastes à leur surface, dans leurs tissus et au voisinage de leur système racinaire (voir la figure ci-contre).

Dès leur apparition dans les milieux aquatiques puis lors de la colonisation des environnements terrestres, les plantes ont été en interaction avec les microorganismes. La longue évolution des plantes et des microorganismes, parfois commune, a conduit au développement de nombreux types d'interactions allant de la symbiose stricte à des interactions bénéfiques ou au contraire néfastes avec des microorganismes hétérotrophes (se nourrissant de composés organiques). L'ensemble de ces interactions contribue à la nutrition et à la santé des plantes et conditionne leur développement.

Mieux comprendre le microbiote des plantes est donc un important objectif de recherche : cela devrait nous aider à développer des modes de culture plus adaptés et plus respectueux de la qualité des sols.

Décrivons d'abord la composition et la distribution spatiale du microbiote des plantes. Nous verrons ensuite quelles avancées sont venues de l'étude du microbiote d'une plante modèle, l'arabette des dames, et quelles sont les applications

LES DIVERS TISSUS ET ORGANES développés par les plantes durant leur cycle de vie constituent autant d'habitats colonisés par les microorganismes. Ces habitats sont indiqués ici, accompagnés de l'ordre de grandeur de la densité correspondante en microorganismes.

