

Toutefois, les biologistes ont découvert des vestiges d'un système de traduction des ARN en protéines chez *Mimivirus* et *Megavirus*, sous la forme de plusieurs enzymes nécessaires au chargement des acides aminés sur leurs ARN de transfert respectifs. La mise au jour de ces vestiges remet en question la frontière censée séparer le monde des virus de celui des organismes cellulaires parasites.

L'usine à virions, un véritable microbe

L'analyse du cycle infectieux de *Mimivirus* et de *Megavirus* nous a ainsi fait comprendre que l'objet biologique auquel se rapporte la complexité du génome de ces virus géants n'est pas le virion (la particule virale), mais l'usine à virions, véritable micro-organisme parasite transitoire, qui n'utilise de la cellule hôte que l'appareil de traduction et les nutriments présents dans son cytoplasme. Dans ce nouveau cadre conceptuel, l'utilisation du mot *virus* pour désigner à la fois le virion et l'entité biologique globale qui aboutit à sa multiplication apparaît comme une confusion historique, qui doit

être proscrite depuis la découverte des virus géants.

Dans le même temps, le débat classique sur l'appartenance des virus au monde vivant est, au moins pour les Mégaviridés, tranché. Pendant leur phase intracellulaire, ces virus ont clairement tous les attributs de la vie microbienne : métabolisme actif, croissance, reproduction. Simplement, ce nouveau type de microbe ne dissémine pas son génome en se divisant comme une bactérie, mais en en produisant de multiples copies.

Par cette séparation nette du *soma* (l'organisme proprement dit, transitoire et producteur d'agents reproducteurs) du *germen* (les agents de la reproduction, véhicules du génome), le mode de réplication des virus géants apparaît soudain plus proche de celui des organismes dotés d'une reproduction sexuée que de celui des micro-organismes pratiquant la scissiparité. Seul l'avenir nous dira si cette apparente similitude a un sens biologique profond. Mais il est déjà clair que la découverte de *Mimivirus* et de *Megavirus* devrait nous inciter à l'humilité quand nous nous prenons à penser que toutes les formes de vie ont été reconstruites sur notre planète.

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Legendre *et al.*, Genomics of megavirus and the elusive fourth domain of life, *Communicative & Integrative Biology*, vol. 5(1), pp. 102-106, 2012.

D. Arslan *et al.*, Distant Mimivirus relative with a larger genome highlights the fundamental features of Megaviridae, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 108, pp. 17486-17491, 2011.

J.-M. Claverie et C. Abergel, Megavirus réécrit l'évolution des virus à ADN, *Biofutur*, vol. 327, p. 11, décembre 2011.

Les virus, ennemis utiles, *Dossier Pour la Science* n° 55, avril-juin 2007.

3 FILMS POUR COMPRENDRE NOTRE UNIVERS

ENIGMES DE L'UNIVERS³
LE TOUT, LE RIEN ET LE CHAOS

« FASCINANT ET ACCESSIBLE »
TIME OUT

MEILLEUR FILM
FESTIVAL INTERNATIONAL
DU FILM SCIENTIFIQUE 2010 - ATHÈNES
LA VIE SECRÈTE DU CHAOS

SÉLECTION OFFICIELLE
PARISCIENCE 2011
CE RIEN QUI EST TOUT

DÉJÀ DISPONIBLE EN COFFRET 2 DVD
POUR RECEVOIR NOTRE CATALOGUE : SHOWSHANKFILMS@GMAIL.COM

FURNACE

SHOWSHANK FILMS

La diversité des virus aquatiques

Stéphan Jacquet et Caroline Depecker

Abondants et variés – on n'en connaît sans doute qu'une infime partie –, les virus aquatiques sont des acteurs clefs des écosystèmes marins et d'eau douce.

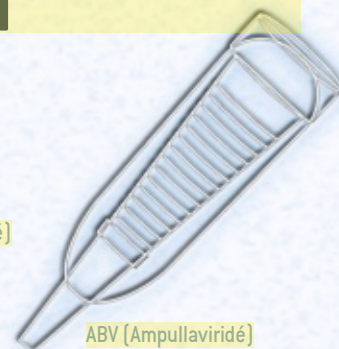
Le 31 mars 2012, après deux ans et demi de navigation et 80 000 kilomètres parcourus, l'expédition scientifique *Tara Oceans* s'est achevée à Lorient, en Bretagne. Selon Pascal Hingamp, membre du programme, parmi les quelque 20 000 échantillons prélevés en 153 stations dans les océans du globe et en cours d'analyse, on a déjà identifié, dans les 29 prélèvements de mer Méditerranée, un milliard de paires de bases d'ADN viral, dont 70 millions proviennent de virus géants. La plupart des séquences d'ADN de virus géants détectées n'avaient jamais été répertoriées.

Présents dans les océans à des concentrations avoisinant dix millions par millilitre, les virus sont les entités biologiques les plus nombreuses sur la planète. Mis bout à bout, ils constitueraient un collier de perles dont la longueur dépasserait dix millions d'années-lumière. Tous ensemble, les virus marins contiendraient plus d'atomes de carbone que 75 millions de baleines bleues.

C'est seulement à partir de 1989, grâce aux travaux d'une équipe norvégienne, que l'on a pris conscience de l'abondance des virus dans des milieux aquatiques variés. De fortes concentrations ont été mesurées dans les lacs, les rivières, les glaces ou les sédiments, des profondeurs océani-



SH1 [non classé]



ABV [Ampullaviridé]



Phage T4 [Myoviridé]

ques jusque parfois dans les nuages, ce qui suggère qu'ils jouent un rôle important dans le fonctionnement de la biosphère.

S'intéressant de plus en plus aux virus aquatiques, les chercheurs sont confrontés aujourd'hui à une difficulté de taille : leur diversité. Au regard de cette diversité, les données de référence sont rares, ce qui rend difficiles l'identification et la classification des nouveaux échantillons. Or le nombre d'échantillons analysés a considérablement augmenté ces dernières années, grâce à la multiplication des expéditions océanographiques et des recherches menées sur certains lacs. Malgré la performance des outils de biologie moléculaire, au mieux 30 pour cent des séquences génétiques virales examinées ont été identifiées.

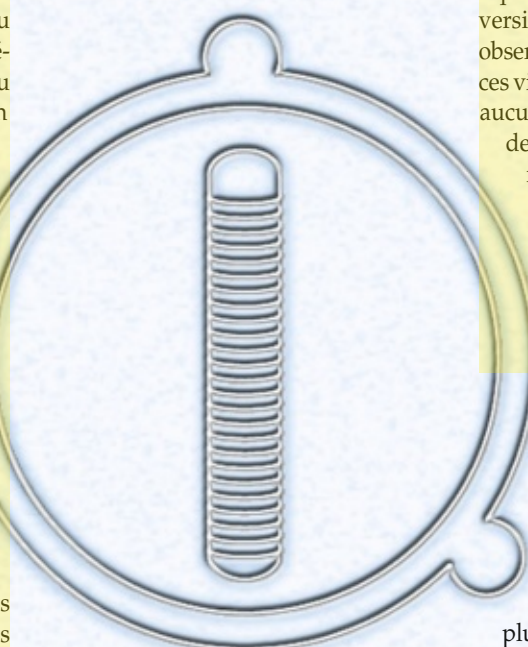
Pour autant, les informations issues de ces analyses, que nous rapportons ici, sont précieuses et bouleversent certains résultats admis jusqu'à présent. Les organismes colonisés par les virus sont ainsi bien plus variés que les espèces bactériennes pressenties. La forme et la taille de certains virus sont également surprenantes. Enfin, on commence à mesurer l'impact de la diversité virale sur le monde vivant. Grâce à divers mécanismes, tels la destruction d'une espèce dominante au profit

d'espèces plus rares ou le transfert de gènes viraux vers l'hôte, les virus maintiennent la biodiversité des écosystèmes aquatiques et facilitent le brassage génétique.

Toutes les six à sept semaines pendant près de trois ans, des échantillons en provenance de la goélette *Tara* sont arrivés au Génomscope d'Évry, où leur matériel génétique viral est analysé. La mission du voilier consistait à arpenter les océans afin d'y prélever tout type d'organisme marin invisible à l'œil nu. Objectif de l'expédition : étudier divers écosystèmes planctoniques, notamment les interactions des différents micro-organismes les uns avec les autres ainsi qu'avec leur environnement physico-chimique. Simultanément, les programmes OVID (*Ocean Virus Diversity*), de Matthew Sullivan, et *Tara-Girus*, de Hiroyuki Ogata, ont cartographié la géographie des diversités virales et des métabolismes associés tout au long de l'expédition. Les résultats des premiers séquençages génétiques réalisés sur des échantillons en provenance d'une station de prélèvement suggèrent la présence de nouveaux virus bactériens en très grand nombre et d'un virus géant (ou girus) d'un type inédit.

Dans toutes les mers du globe

D'autres programmes scientifiques en cours arrivent aux mêmes conclusions dans diverses régions du globe. Achievées en 2009, les expéditions océanographiques du programme PAME (*Polar Aquatic Microbial Ecology*) étudient la diversité et la distribution de l'ensemble des micro-organismes habitant les régions polaires : dans ces endroits également, les premiers résultats montrent que les virus sont abondants, diversifiés et sont produits chaque jour en quantité. Le programme GOS (*Global Ocean Sampling*), quant à lui, lancé en 2003 et toujours en cours, a déjà permis d'analyser par séquençage massif des échantillons d'eau de différentes mers et provinces océaniques telles que la mer Noire, la mer Méditerranée, la mer Baltique, la mer du Nord, ainsi que les océans Atlantique, Pacifique, Indien et Antarc-



PSV [Globuloviridé]

L'ESSENTIEL

- ✓ Les virus sont les entités biologiques les plus abondantes et les plus variées des milieux aquatiques.
- ✓ Par des mécanismes de transfert de gènes et de pression de sélection, les virus jouent un rôle clef dans le fonctionnement des écosystèmes et le maintien de leur biodiversité.
- ✓ La diversité des virus et celle de leurs hôtes sont indissociables. Aujourd'hui, la compréhension de leurs interactions constitue un des enjeux de l'écologie aquatique.

Pour la Science

tique. En moyenne, on constate que 200 litres d'eau de mer contiennent plus de 5 000 virus différents.

De précédents programmes ont déjà révélé l'étendue de la diversité virale aquatique. En 2005, Mya Breitbart, de l'Université de Californie, et ses collègues ont observé que 30 à 90 pour cent des séquences virales prélevées en zone côtière n'ont aucun homologue connu dans les bases de données génétiques existantes. Ce résultat a été confirmé peu après par une autre équipe californienne, dirigée par Forest Rohwer, qui a proposé pour la première fois une vue d'ensemble de la diversité et de la répartition des virus marins.

À partir de 184 échantillons récoltés pendant dix ans jusqu'à 3 000 mètres de profondeur sur 68 sites différents (dans la mer des Sargasses, le golfe du Mexique, les eaux côtières de la Colombie-Britannique et l'océan Arctique), ces scientifiques ont montré que plus de 91 pour cent des séquences virales obtenues étaient inconnues. Parmi elles apparaissaient de nombreux cyanophages nouveaux (virus des cyanobactéries, une sous-classe de bactéries photosynthétiques) et des virus à ADN simple brin (virus dont les informations génétiques sont codées sur un seul brin d'ADN et non deux comme dans le génome des mammifères). Ainsi, selon leur estimation, la seule côte de Colombie-Britannique compterait quelque 129 000 génotypes différents (un génotype est l'ensemble des constituants génétiques caractéristiques d'un seul organisme) dans les remontées d'eaux froides. Ces travaux révèlent l'ampleur de notre ignorance : ils suggèrent qu'il existerait plusieurs centaines de milliers de génotypes viraux différents.

Dans une moindre mesure, nos propres analyses, *via* l'utilisation du séquençage à

1. QUELQUES VIRUS AQUATIQUES, représentés d'après leur observation en microscopie électronique. Les phages (*page ci-contre en bas*) sont les plus répandus. Plus ou moins allongée, leur tête icosaédrique (à 12 faces triangulaires) se prolonge par une queue de longueur variable. Ils s'arriment aux bactéries qu'ils infectent au moyen de leurs « pattes ».