

À propos d'*Emiliana huxleyi*, de son petit nom Ehux...

Guy JACQUES et Yves DANDONNEAU

Le plancton végétal, ou phytoplancton, recèle des groupes et des espèces d'une beauté exceptionnelle sous l'objectif d'un microscope. Parmi celle-ci nous aimerions présenter *Emiliana huxleyi*, une des cinq mille espèces de la classe des coccolithophyceae. Ce choix tient à ce qu'il s'agit du coccolithophoridé le plus abondant dans l'océan actuel et que, pour cette raison, son génome vient d'être décrypté. Cette espèce était déjà une « vedette médiatique », la seule, à notre connaissance, à disposer d'un site propre (www.soes.soton.ac.uk/staff/tt/eh/) et d'un diminutif, « Ehux ». Comment aurait-il pu en être autrement lorsque l'on a comme parrains Cesare Emiliani, l'un des fondateurs de la paléoclimatologie, et Aldous Huxley, l'auteur, en 1932, du « Meilleur des mondes ». Le corps de ce coccolithophoridé d'environ cinq millièmes de millimètre de diamètre renferme des plaques de calcite en forme d'assiette. Même si cette forme domine, avec beaucoup de variétés d'ornementations, d'autres espèces ont des plaques prolongées par des massues, des trompettes, etc. Ehux est l'une des espèces du phytoplancton les plus abondantes sur la planète, formant dans la plupart des océans, à l'exception de la zone équatoriale, des efflorescences qui peuvent concerner des superficies jusqu'à 1 000 000 kilomètres carrés avec des concentrations de 1 à 10 millions d'individus par litre d'eau de mer. La réflexion de la lumière solaire par les plaques blanches de calcite rend ces floraisons aisément repérables depuis l'espace dans le domaine visible (Figure 1).



1 Prolifération du coccolithophoridé *Emiliana huxleyi* en Manche en juillet 1999.

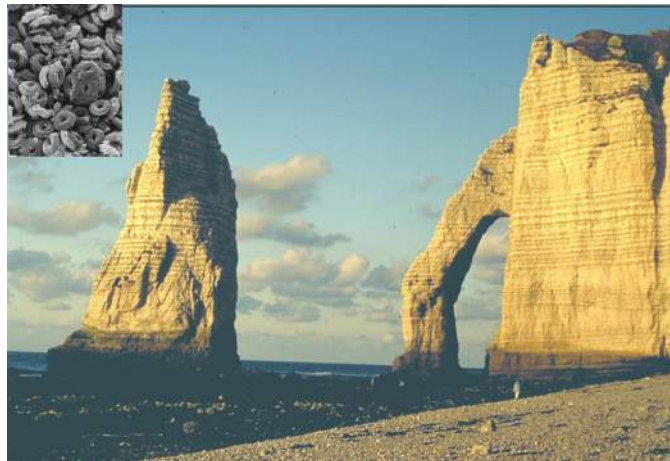
Les squelettes calcaires de ces algues nanoplanctoniques réfléchissent la lumière solaire ; cela suffit pour les observer sans faire appel à la détection de leur chlorophylle.



2 Guy JACQUES, un Argonaute devant la craie du Désert blanc au sud-ouest de l'Égypte.

À leur mort, les cellules de coccolithophoridés tombent rapidement au fond car leur densité est nettement supérieure à celle de l'eau de mer. Elles sont relativement protégées d'une dégradation rapide car elles ont produits des alcénones, composés organiques très résistants. Les plaques calcaires en forme d'assiette, les coccolithes, se dissocient...et l'aventure de la craie commence sur ces fonds marins peu profonds. Tous les éléments sont unis par un ciment calcaire dû à la dissolution de certains organismes et à la précipitation du carbonate de calcium. La craie a alors la consistance d'une boue qui, au cours du temps, se compacte en expulsant son eau et en se cimentant.

Dans le monde, la craie se dépose principalement au crétacé (la craie lui a donné son nom) supérieur, entre – 90 et – 65 Ma. C'est une roche rare sur le globe. En dehors du Bassin parisien, elle se cantonne au nord de l'Europe où elle forme de magnifiques falaises...et dans le Sahara, à l'ouest de l'Égypte, le Désert blanc éclatant de la blancheur de sa craie (Figure 2), contemporain du Bassin parisien et parfois recouvert de calcaires du début du tertiaire. Les falaises d'Étretat (Figure 3) sont composées à 98 % des coccolithes dont nous avons parlé. Ceux qui ont écrit à la craie dans les années 1950 ne savaient sans doute pas que c'étaient ces coccolithes qui formaient la trace sur le tableau noir. Finalement, des organismes à la vie éphémère, quelques dizaines de jours, sont à l'origine, des dizaines de millions d'années plus tard, de roches paraissant éternelles qui peuvent atteindre cinq cents mètres d'épaisseur.

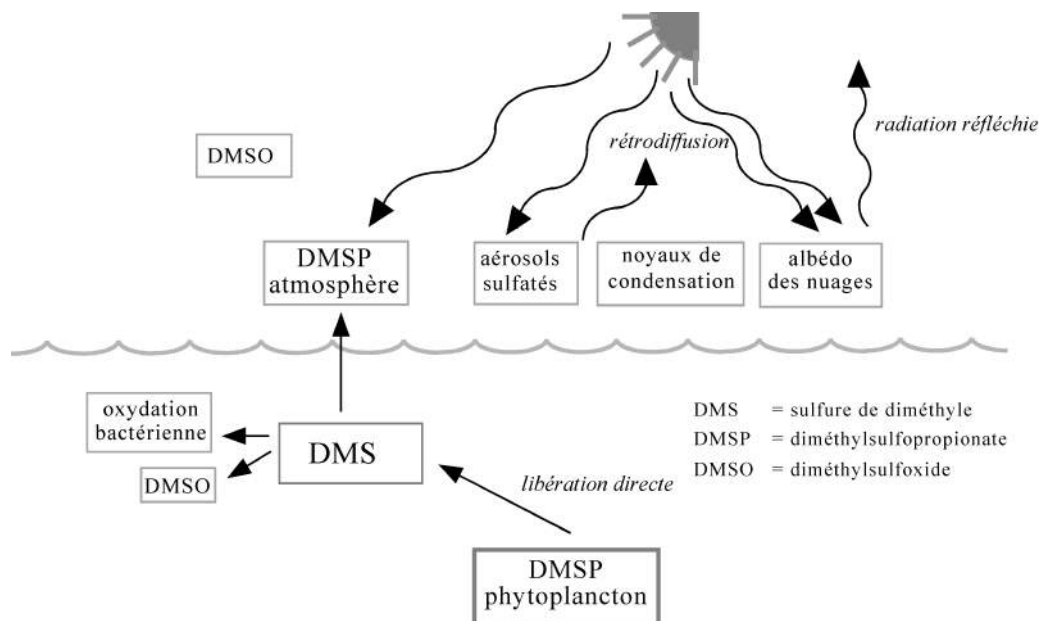


3 Les falaises de craie blanche à silex d'Étretat se sont formées au Crétacé supérieur (entre 94 et 86 Ma).

Nous avons longtemps cru qu'Ehux était l'espèce dominante, voire la composante unique des falaises de craie d'Étretat ou de Douvres, ces dernières ayant été chantées lors de la Seconde guerre mondiale : *The White Cliffs of Dover* fut créée en 1942 par la chanteuse britannique Vera Lynn pour remonter le moral des troupes. Cette idée de l'ancienneté d'Ehux figure encore dans de nombreux articles. Mais, douche froide ! Dieter Wolf-Gladrow sur le site de l'Alfred Wegener Institute de Bremerhaven, écrit : *No Ehux in cliffs of Dover because Ehux too Young!* Il reprend l'idée de Patrizia Ziveri de l'université d'Amsterdam qui indique que la première apparition d'Ehux est datée d'environ 270 000 ans seulement, c'est-à-dire rien au plan géologique puisque les falaises en question ont plus de 60 millions d'années ! Mais si l'un de nos lecteurs a observé au microscope électronique la craie des falaises de la Manche et, pourquoi pas du Désert blanc, ou s'il connaît d'autres sources sûres, qu'il nous avertisse.

Les coccolithophoridés constituent un des exemples qui ont incité James Lovelock à élaborer sa théorie Gaïa de rétroaction de la biologie sur le climat planétaire. L'hypothèse CLAW (acronyme des auteurs Robert Charlson, James Lovelock, Meinrat Andreae et Stephen Warren), formulée en 1987 dans l'article *Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate* publié dans *Nature* (326: 655-661) fait du phytoplancton, producteur de sulfure de diméthyle (C_2H_2S , Figure 4) (c'est ce gaz qui donne aux embruns « l'odeur de la

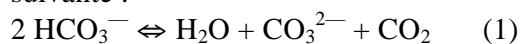
mer »), le « thermostat vert » de la planète. Cette vision est certes exagérée mais il est certain que le phytoplancton est à l'origine de 80 % des émissions océaniques de soufre. Et dans ce processus, les coccolithophoridés constituent le groupe le plus efficace émettant, pour une même biomasse, dix fois plus de DMS que les diatomées. Les bactéries et les virus qui attaquent ces microalgues lors des efflorescences jouent un rôle clé dans la libération du DMS dans l'atmosphère. Ces gaz agissent sur l'osmorégulation (régulation de la concentration en sels dissous dans le milieu interne) du phytoplancton mais aussi comme antioxydant et comme cryoprotecteur. Mais si l'intérêt se porte depuis longtemps sur ces produits soufrés c'est parce qu'une fois introduits dans l'atmosphère par les embruns, ils agissent sur le climat par forçage direct (dispersion des radiations solaires grâce à leur propre effet albédo) et par forçage indirect (principale source de noyaux de condensation de nuages).



4 Cycle du soufre de diméthyle et de ses dérivés de sa production par le phytoplancton jusqu'à son action de régulation thermique dans l'atmosphère.

Quant au rôle des coccolithophoridés sur le cycle du carbone, il est moins simple qu'il n'y paraît. En effet, il pourrait facilement venir à l'esprit l'idée d'une efficacité particulière des coccolithophoridés, et plus généralement, de tous les organismes à thèque riche en carbonate de calcium, dans le pompage et le piégeage de CO₂. On pourrait en effet imaginer que ces organismes utilisent du CO₂ à la fois par photosynthèse, pour élaborer leurs molécules organiques, et pour constituer leurs coccolithes. La réalité est loin d'être aussi simple.

Le gaz carbonique est un gaz acide, qui se combine avec l'eau pour former de l'acide carbonique, H₂CO₃, lequel se dissocie en donnant des ions bicarbonate, HCO₃⁻ et, plus difficilement et transitoirement des ions carbonate, CO₃²⁻. L'ensemble gaz carbonique, bicarbonates et carbonates constitue le carbone inorganique dissous. *Emiliana huxleyi* transforme du carbone inorganique dissous en matière organique par photosynthèse, en bon phytoplancton qu'il est, et il en transforme en calcaire en fabriquant des coccolithes. Bravo, cela semble doublement efficace pour extraire du gaz carbonique de l'atmosphère et amortir le réchauffement du climat ! C'est en effet un coup double, mais en bilan net de carbonates seulement, pas en termes de gaz carbonique. Pour comprendre cette différence, il faut faire un peu de chimie : dans l'eau de mer, gaz carbonique, carbonates et bicarbonates sont en équilibre, et cet équilibre peut être représenté par la réaction suivante :



Si on retire une quantité d'un de ces éléments, la réaction est activée de façon à en atténuer la soustraction. Ainsi, lorsque *Ehux* réalise la photosynthèse, le CO₂ enlevé à droite de cette réaction

est régénéré en actionnant cette réaction vers la droite, mais en partie seulement : la différence constitue la pompe biologique de carbone de l'océan. Mais lorsqu'il fabrique des coccolithes en calcaire, selon la réaction :



Le calcaire CaCO_3 est solide et sa formation retire donc des carbonates CO_3^{2-} de la solution qu'est l'eau de mer. L'équilibre décrit dans la réaction (1) est rompu et le retour à l'équilibre se fait en actionnant cette réaction vers la droite, ce qui régénère des carbonates mais produit aussi du CO_2 , augmentant alors sa pression partielle ! De plus, ce retrait de carbonates diminue l'alcalinité de l'eau de mer, et augmente donc son acidité, ce qui tend encore à libérer du gaz carbonique. Et lorsqu'il y a du gaz carbonique en excès dans l'eau de mer, il passe dans l'atmosphère !

Cette fabrication de coccolithes a un coût énergétique pour Ehux. Même si ce coût est faible, il constitue un handicap pour cette espèce, chez laquelle il n'a aucun rôle de protection puisque Ehux expulse ses coccolithes à mesure qu'elle en produit. Pourquoi alors Ehux est elle aussi compétitive par rapport aux autres espèces du phytoplancton ? La réponse réside paradoxalement dans un autre handicap de Ehux : son matériel enzymatique n'est pas très performant pour capter le gaz carbonique lors de la photosynthèse. Alors, Ehux fabrique du calcaire pour libérer du CO_2 et réaliser sa photosynthèse plus confortablement. On devrait peut être lui dire de prendre davantage de précautions avec le climat !

Si nous avons choisi d'évoquer Ehux maintenant c'est parce que le génome de cette espèce vient d'être établi et publié le 11 juillet 2013¹ par un consortium international impliquant des équipes françaises du CNRS, de l'UMPC, de l'Inra et de l'École normale supérieure. C'est le premier génome séquencé de l'embranchement des haptophytes. Et ce travail est plein de surprises. Car le génome de ce microorganisme marin unicellulaire contient une fois et demi plus de gènes que le génome humain, tout en étant vingt fois plus petit (141 millions de bases contre 3 200 millions pour le génome humain). En étudiant treize souches d'Ehux rapportées de tous les océans par *Tara*, les scientifiques ont mis en évidence la présence de 30 000 gènes codant pour toutes sortes de protéines et de fonctions, dont plus de la moitié sont totalement inconnues dans les bases de données génétiques existantes. Cette avancée de biologie moléculaire est intéressante pour l'écologie, d'autant que les treize souches séquencées, que l'on aurait pu penser relativement proches, partagent seulement, en moyenne, 75 % de leurs gènes. Cette configuration que les chercheurs ont qualifié de « pan-génome » (un génome-cœur entouré d'un génome permutable), typique des bactéries et des archées², est remarquable pour un organisme eucaryote³ sexué. Elle offre probablement à Ehux une flexibilité génomique et des capacités d'adaptation élevées qui expliquent sa large distribution géographique et qui devraient lui permettre de s'adapter aux changements futurs du milieu océanique. Par exemple, une suite de gènes de base (six transporteurs de phosphore inorganique et une phosphatase alcaline à haute efficacité) permet à Ehux de prospérer dans des milieux pauvres en phosphates. Ainsi, une étude très récente a montré qu'une souche d'Ehux vivant normalement à une température de 15 °C et sous une pression partielle de CO_2 qui est actuellement de l'ordre de 400 μatm était capable de conserver (et même d'améliorer légèrement son taux de croissance) lorsqu'on la cultive à 23 °C, et qu'alors, une augmentation en quelques jours de la pression partielle de CO_2 jusqu'à 2200 μatm n'affectait pas sa son taux de production de coccolithes. Ehux, que l'on pensait menacé par le réchauffement global, et surtout par l'acidification des océans susceptible de dissoudre les coccolithes, s'en tirerait donc très bien. Ce résultat est toutefois à considérer avec prudence puisque la souche utilisée ne provient que d'une seule cel-

¹ *Pan genome of the phytoplankton Emiliania underpins its global distribution*. Nature 499, 209-213.

² Encore appelées archéobactéries, ce sont des microorganismes unicellulaires procaryotes (ni noyau ni organites à l'instar des bactéries). Mais du point de vue génétique, de leur biochimie et de leur biologie moléculaires, les archées sont aussi différentes des bactéries que des eucaryotes.

³ Organismes unicellulaires ou pluricellulaires possédant un noyau et des mitochondries.

lule, qui pourrait ne pas refléter les possibilités d'adaptation de l'ensemble de la population de cette espèce.

Dans ce génome de base sont également présents les gènes pour la prise et l'assimilation d'azote inorganique (ammonium, nitrite, nitrate) ainsi que pour l'utilisation et la dégradation de composés riches en azote (urée). Ceci explique la gamme très large de milieux où se déroulent des floraisons d'Ehux. Les gènes impliqués dans les mécanismes limitant les besoins en fer sont également présents dans le génome de base. En décryptant ce génome les chercheurs ont évidemment cherché à localiser les gènes codant pour la formation du DMS et du DMSP dont nous avons parlé. Déception ! Ces gènes n'ont pas été trouvés mais l'analyse a détecté des gènes qui produisent les intermédiaires et les fonctions soufrées et carbonées des dernières étapes de la dégradation du DMSP. Ce n'est donc sans doute que partie remise...

Ehux fait encore preuve d'originalité en matière d'adaptation pour lutter contre les espèces qui la menacent. Ses efflorescences sont en effet limitées par divers organismes herbivores marins et, surtout, par des virus qui attaquent cette algue quand elle pullule. Le virus Ehv joue ainsi un rôle majeur dans la régulation des populations d'algues. Confirmant l'hypothèse qui veut qu'une espèce évolue en permanence pour maintenir son aptitude à se protéger des prédateurs, parasites, virus, etc. Ehux passe d'un stade diploïde normal (génome présent en deux exemplaires) à un stade haploïde, le temps que les populations de virus aient diminué. Cette réduction d'une cellule diploïde à une cellule haploïde (un seul exemplaire) est celle qui différencie les cellules sexuelles d'un organisme des autres cellules. La sexualité apparaîtrait donc comme une stratégie de défense face à un virus. Cette modification s'accompagne d'un changement morphologique, la version haploïde étant une cellule nue (sans coccolithes) possédant deux longs flagelles. Observant cette forme au laboratoire, les chercheurs ont longtemps cru qu'il s'agissait d'un autre organisme introduit accidentellement dans la culture d'Ehux. Les travaux manquent pour savoir si l'existence de ces deux stades est générale ou exceptionnelle chez les coccolithophoridés. Plutôt que d'augmenter sa protection calcaire en réponse à l'attaque virale, l'algue « disparaît » aux yeux de son pathogène. Aussi, les chercheurs⁴ ont-ils appelé cette stratégie celle du Chat du Cheshire, ce chat philosophe du roman *Alice au Pays des Merveilles* de Lewis Carroll qui échappe à l'ordre de décapitation de la Reine de Cœur en rendant son corps transparent.

L'article qui a motivé cette note, à savoir la description du génome d'Ehux, prouve tout l'intérêt pour l'écologie des travaux de biologie moléculaire. Dans le cas d'Ehux, on voit également tous les avantages que l'on peut tirer d'une étude comparative de souches provenant de différentes régions océaniques. En cela, l'expédition autour du monde de *Tara*, que les Argonautes ont critiqué comme présentant peu d'intérêt pour la biogéochimie et l'étude du rôle de l'océan dans sur l'évolution climatique, s'avère précieuse grâce à l'ensemble varié d'échantillons qui ont été mis à disposition des laboratoires. La description du génome indiquant toutes les potentialités d'une espèce constitue également un outil précieux pour prévoir l'évolution de l'écosystème pélagique aux modifications de température, de teneur en sels nutritifs et de pH qu'il va expérimenter. Ce dernier point est capital car Ehux est le principal responsable de la biocalcification dans l'océan. Or, on sait que l'acidification des océans menace les organismes marins à « squelette » externe calcaire qui pourraient commencer à se dissoudre et à ne plus pouvoir se former. Or, l'équilibre préindustriel du cycle du carbone s'est établi en fonction de l'activité de calcification d'Ehux qui tend à augmenter la pression partielle de gaz carbonique dans l'océan (encart) et, par conséquent, à diminuer le puits océanique de carbone. En raison de l'acidification en cours de l'océan, la biocalcification par les organismes à test calcaire, notamment par Ehux, devrait évoluer et modifier les flux de car-

⁴ The « Cheshire Cat », escape strategy of the coccolithophore *Emiliana huxleyi* in response to viral infection. Fraga M, Probert I, Allen MJ, Wilson WH, de Vargas C, 2008. PNAS, 105 (41) : 15944-9.

bone entre l'océan et l'atmosphère. Une étude menée par différents laboratoires français a confirmé la moindre calcification des coccolithophoridés dans des eaux pauvres en carbonates et, donc, plus acides⁵. Mais tout espoir n'est pas perdu pour les coccolithophoridés avec l'acidification des océans ! En effet, les eaux côtières au large du Chili présente une situation atypique. Alors que ces eaux sont les plus acides de l'océan (pH de 7,6 à 7,9), des coccolithes très calcifiés ont été observés. Les analyses génétiques menées à la Station biologique de Roscoff montrent que ces souches sont différentes de celles observées dans d'autres régions océaniques. Dans cette région, ce groupe a été capable de s'adapter naturellement à un environnement peu favorable à la calcification. De là à généraliser cette aptitude à d'autres groupes de coccolithophoridés de l'océan mondial, il y a un pas que l'on ne peut absolument pas franchir aujourd'hui.

⁵ *Sensitivity of coccolithophores to carbonate chemistry and ocean acidification*. Beaufort L, et al., 2011. Nature 476: 80-83.