

REDRESSEUR DE HAMPE

Généralement en grès et doté d'une rainure centrale, ce type d'instrument semble avoir été employé afin de redresser les hampes des flèches avant leur utilisation.



a pu décrire très en détail l'évolution du comportement des chasseurs-cueilleurs. À cet égard, il importe d'abord de mettre en évidence quels pans de la vie sociale ont été les plus modifiés par le changement. L'évolution de l'armement n'a d'abord touché que les tailleurs et les chasseurs. Ensuite, les nouveaux approvisionnements alimentaires qui en ont découlé, et leurs effets indirects sur la conception des espaces de stockage et sur l'approvisionnement en matières premières, ont concerné tout le monde.

Sonja Grimm a ainsi déterminé quatre phases de changement d'intensité et de dynamique. Après 16000 ans BP, au tout début de la période étudiée, les innovations sont restées, pendant 3500 ans, l'œuvre de précurseurs, et n'ont pas concerné toute la société. Avant 14700 ans, les nouvelles ressources disponibles ont contribué à assouplir le système rigide des règles et des normes, mais les Magdaléniens sont dans l'ensemble restés fidèles à leur système social. On employait par exemple toujours les mêmes outils, tels les grattoirs servant au traitement des peaux, les burins et forets employés dans d'autres activités. Certains grands circuits migratoires avaient probablement aussi été conservés.

Lorsqu'il y a 14000 ans, il s'est mis à nouveau à faire très froid, la steppe aride est revenue, repoussant partiellement les forêts, mais les savoir-faire du froid, comme la préparation de bouillons gras, avaient été oubliés. Et à quoi était bon le fait que des troupeaux de rennes traversent à nouveau les paysages, puisque personne ne connaissait leurs trajets ni ne savait comment organiser de grandes chasses? La rareté des ressources qui en a résulté a alors pu plonger les sociétés de chasseurs-cueilleurs dans une crise grave, ce qui

expliquerait en partie le petit nombre des découvertes archéologiques de cette phase. La vague de froid a par ailleurs marqué le passage définitif dans l'ère des groupes aziliens. Une explication possible de ce tournant serait que le système social déjà perturbé des Magdaléniens s'est alors complètement effondré, puisque ceux qui comptaient sur leurs propres forces plutôt que sur les règles rigides du système magdalénien avaient désormais plus de chances de survivre.

L'AVÈNEMENT DE L'AZILIEN

Après deux siècles vraisemblablement chaotiques, une réorientation se fait sentir à partir d'il y a 13800 ans BP. L'expansion du couvert forestier s'accompagne d'un formidable élan de développement: bon nombre des innovations mises au point au cours des 1000 dernières années, mais qui ne se sont répandues que sporadiquement, telles que l'arc et les flèches, dominant désormais. Elles jouent dorénavant un rôle essentiel dans les stratégies de survie des chasseurs-cueilleurs. Cela se produit très différemment d'une région à l'autre, selon la stratégie qui y réussit. Ainsi, alors qu'en Rhénanie, certains groupes utilisent déjà des pointes à dos courbe typiques de la culture azilienne et chassent le cerf rouge, dans la vallée de Somme d'autres groupes préfèrent chasser les aurochs à l'aide d'une plus grande variété d'armes de chasse. Une mosaïque de cultures similaires, quoique différentes, apparaît ainsi dans le nord-ouest de l'Europe.

Ce n'est qu'après la stabilisation des conditions climatiques et environnementales que les groupes reprennent contact et, au cours des 800 années suivantes, établissent le système culturel stable des Aziliens. Un système beaucoup plus souple, qui laisse plus de place à l'initiative et aux essais que le système rigide des Magdaléniens.

Il ressort de notre analyse qu'à la fin de la glaciation, les évolutions sociales ne furent pas synchronisées avec les évolutions climatiques. Elles les suivirent souvent avec environ un siècle de retard. Les sociétés résistaient même à des changements de l'environnement aussi drastiques que ceux qui ont marqué la fin du Weichsélien. Des vagues de froid aussi intenses que celles de la fin de cette période n'ont provoqué l'effondrement des comportements et des valeurs traditionnelles qu'après et seulement après que les innovations tentées par certains individus eurent démontré que des alternatives existaient. Finalement, le comportement des Européens de la fin de l'ère glaciaire montre que les règles d'une société, ses traditions et les mécanismes qui la régulent influencent davantage son évolution que les conditions climatiques, même extrêmes. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. B. Grimm, **Resilience and re-organisation of social systems during the Weichselian lateglacial in Northwest-Europe. An evaluation of the archaeological, climatic, and environmental records**, Monographien des RGZM, vol. 128, sous presse.

E. Caron-Laviolette, O. Bignon-Lau et M. Olive, **(Re)occupation : Following a Magdalenian group through three successive occupations at Étiolles**, *Quaternary International* vol. 498, pp. 12-29, 2018.

Collectif, **Pincevent (1964-2014). 50 années de recherches sur la vie des Magdaléniens**, Centre archéologique de Pincevent et SPF, 2014.

J.-G. Rozoy, **Le propulseur et l'arc chez les chasseurs préhistoriques. Techniques et démographies comparées**, *Paléo*, vol. 4, 1992.

L'ESSENTIEL

> La chaîne alimentaire des océans a longtemps été décrite comme reposant sur deux groupes d'organismes : le phytoplancton et le zooplancton.

> En fait, de nombreux organismes planctoniques sont mixotrophes : pour se nourrir, ils utilisent à la fois

la photosynthèse, comme les plantes, et ingèrent d'autres organismes, comme les animaux.

> Ces mixotrophes ont une influence majeure sur les efflorescences d'algues nocives, les populations de poissons et même le cycle global du dioxyde de carbone.

L'AUTEURE



ADITEE MITRA
spécialiste du zooplancton
et des organismes mixotrophes
à l'université de Swansea,
au Pays de Galles (Royaume-Uni)

Le plancton animal qui voulait devenir végétal

Certains microorganismes du plancton marin font de la photosynthèse, comme les plantes, et mangent d'autres organismes, comme les animaux. Les biologistes ont découvert que ces minuscules végétaux prédateurs jouent dans les océans un rôle bien plus important qu'on ne le pensait.

Dans les eaux chauffées par le soleil d'été des côtes espagnoles, paisibles en apparence, se déroule une bataille invisible à l'œil nu. La scène a lieu à proximité de la surface, dans un essaim d'organismes microscopiques du plancton. Certains sont rose orangé, d'autres vert sombre. Ils nagent paresseusement en cercles, tout en captant l'énergie fournie par le Soleil pour produire par photosynthèse les nutriments nécessaires à leur survie.

Soudain, un microorganisme à tentacules, un *Mesodinium*, surgit en zigzaguant, attiré par les sucres et les acides aminés qui s'échappent

des autres organismes. Il ne dépasse pas les 22 micromètres, mais il fait figure de géant par rapport aux autres, qui mesurent 3 micromètres. Ses tentacules jaillissent et happent ses malheureuses proies vertes (des nanoflagellés) qui sont alors consommées et complètement digérées.

Avec ses proies de couleur rose (les cryptophytes), le prédateur est plus sélectif, bien que tout aussi brutal. Il les détruit et les digère en grande partie, mais il prend soin d'engloutir intacts leurs organites responsables de la photosynthèse, les chloroplastes et les nucléosomes. En quelques minutes, le *Mesodinium*, qui jusque-là était pâle, se pare d'une teinte ➤



Un microorganisme mixotrophe, du genre *Dinophysis* (à droite), aspire les organites responsables de la photosynthèse d'un autre microorganisme du plancton, du genre *Mesodinium*.

© Mark Ross Studios

> rouge sombre tandis qu'il assimile les organites de ses proies. *Mesodinium* n'est pas capable de produire lui-même ces éléments, donc de capter et d'utiliser le dioxyde de carbone comme le font les véritables organismes photosynthétiques. Il dépend donc des chloroplastes de ses victimes pour accomplir cette tâche. La double stratégie de cet organisme, qui consiste à la fois à chasser sa nourriture comme un animal et à utiliser la photosynthèse comme une plante, est nommée mixotrophie.

Toutefois, le *Mesodinium* ne profite pas bien longtemps de son butin. Non loin de là, un autre mixotrophe s'approche. Légèrement plus grand, ce dinoflagellé du genre *Dinophysis* a une méthode de chasse différente. Il tourne autour de sa proie et déploie des fils en forme de harpons qui immobilisent le *Mesodinium*. Le nouveau prédateur administre alors le coup de grâce : il perce sa cible grâce à un appendice, le pédoncule, par lequel il aspire, comme avec une paille, les entrailles de sa victime, notamment ses chloroplastes. Ces petites usines photosynthétiques sont alors assimilées par leur nouvel hôte auquel elles vont commencer à fournir de l'énergie. Les restes du premier voleur, le *Mesodinium*, dérivent avec le courant.

On a longtemps considéré les mixotrophes comme de simples curiosités

Ces tueurs unicellulaires ne sont que deux exemples parmi les innombrables microorganismes mixotrophes qui nagent dans les mers. La plupart des biologistes marins ont longtemps considéré les mixotrophes comme de simples curiosités, comparés aux deux principaux groupes d'organismes planctoniques supposés dominer le premier maillon de la chaîne alimentaire des océans. L'un de ces groupes, le phytoplancton, fonctionne d'une façon proche de celle des plantes. Ses membres utilisent l'énergie de la lumière du soleil et les nutriments inorganiques présents dans l'eau pour réaliser la photosynthèse. L'autre groupe, le zooplancton, fonctionne plutôt comme les animaux : ses membres se procurent leurs nutriments en

chassant et en mangeant du phytoplancton. De cette façon, les nutriments remontent la chaîne alimentaire vers les animaux plus grands.

Comparés à ces deux groupes « puristes », les organismes mixotrophes étaient considérés comme des sortes d'anomalies, qui jouent sur les deux tableaux sans être efficaces ni sur l'un ni sur l'autre. De la même façon, on ne connaît que quelques rares exemples de mixotrophes terrestres, telle la dionée attrape-mouche, une plante carnivore.

UNE VISION OBSOLETE DE LA CHAÎNE ALIMENTAIRE

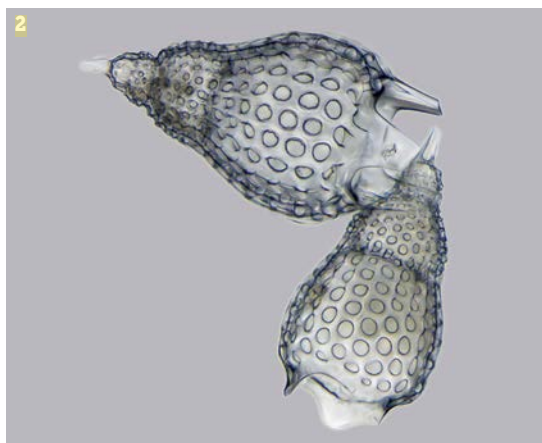
Cette conception classique de la chaîne alimentaire des océans est cependant obsolète. Grâce à une accumulation d'observations, d'expériences et de résultats de modèles de populations planctoniques, les biologistes ont mis en évidence ces dernières années que la plupart des organismes unicellulaires du plancton ne sont ni purement photosynthétiques, ni purement prédateurs. Les mixotrophes auraient ainsi un rôle bien plus important que nous le pensions. La dynamique du bas de la chaîne alimentaire – et par conséquent tout ce qui se trouve au-dessus – serait alors à revoir. Si une grande part des microorganismes du plancton sont effectivement mixotrophes, la croissance de leurs populations ne dépend pas seulement de la photosynthèse, mais aussi de la disponibilité des proies.

Par ailleurs, ces particularités des mixotrophes ont des répercussions sur divers aspects de l'environnement et de l'écosystème. Par exemple, une plus grande activité mixotrophe modifie la vitesse à laquelle les océans emmagasinent le dioxyde de carbone (gaz à effet de serre qui contribue au réchauffement climatique) et le confinent dans les sédiments des fonds marins.

Les mixotrophes sont aussi moins sensibles aux changements de luminosité liés aux saisons, leur capacité de prédation leur offrant une grande flexibilité d'adaptation. Les populations de mixotrophes peuvent ainsi nourrir davantage les larves de poissons, ce qui augmente les ressources en poisson pour l'alimentation humaine. Mais il peut aussi y avoir des effets négatifs. Certaines espèces mixotrophes engendrent des efflorescences algales, dont les émissions massives de toxines conduisent à la fermeture d'écloseries de crustacés et de mollusques et à la mort de grandes quantités de poissons.

Ces quelques exemples montrent qu'il est important de prendre en compte ces étranges organismes que sont les mixotrophes. C'est donc un schéma plus riche et complexe qui a été élaboré ces dernières années par les spécialistes de biologie marine.

À bien y regarder, les organismes mixotrophes semblent sortir tout droit d'un roman de



DES MONSTRES MINUSCULES

Il existe une grande variété de mixotrophes. Certains, comme *Tripos longipes* (1), sont capables de réaliser la photosynthèse par eux-mêmes. En revanche, d'autres, comme certaines espèces de l'ordre des *Nassellaria* (2), présentent des symbioses avec des organismes photosynthétiques. Les espèces du genre *Karlodinium* (3) fonctionnent comme *T. longipes*.

science-fiction. Les harpons et les pédoncules de *Dinophysis* rappellent, à plus petite échelle, les caractéristiques des plantes qui envahissent la Terre dans *Le Jour des triffides*, de l'auteur britannique John Wyndham. Dans ce roman paru en 1951, les triffides sont capables d'utiliser leurs racines pour extraire les nutriments du sol et pour se déplacer. Elles ont aussi des dards venimeux dont elles se servent comme des fouets pour aveugler ou tuer les humains, afin de se repaître de leurs cadavres.

J'ai entendu parler du plancton mixotrophe pour la première fois il y a un peu plus de dix ans, pendant mon doctorat qui portait sur le microzooplancton. À l'époque, les manuels décrivaient encore les mixotrophes comme d'étranges raretés des mers. Pourtant, avec la double capacité de chasser et de faire de la photosynthèse, combinée dans une seule cellule, les mixotrophes apparaissaient à mes yeux comme des organismes parfaits. L'évolution ayant tendance à favoriser l'efficacité, j'étais surprise que la mixotrophie ne soit pas plus répandue dans le règne du vivant.

En cherchant à approfondir le sujet, j'ai découvert toute une série d'articles fascinants de Diane Stoecker, une spécialiste du plancton au laboratoire Horn Point, à l'université du Maryland, aux États-Unis. Depuis les années 1980, cette chercheuse et d'autres

avaient montré que la mixotrophie était loin d'être négligeable dans le plancton océanique. Je l'ai contactée et les discussions que j'ai eues avec elle m'ont convaincue que les mixotrophes n'étaient pas rares dans la nature. Mais il restait à savoir combien ils étaient et quel était leur impact dans l'écosystème.

IL N'EXISTAIT AUCUN MODÈLE PRENANT EN COMPTE LES MIXOTROPHES

Je suis spécialisée dans le développement de modèles mathématiques et de simulations numériques qui décrivent les chaînes alimentaires afin de comprendre le comportement des divers organismes impliqués. Parmi les modèles d'écosystèmes océaniques existants, je n'en ai pas trouvé un seul capable de simuler les détails de la double vie des mixotrophes. À l'époque, l'idée de mettre au point un tel modèle intéressait peu les comités scientifiques. En l'absence de financement pour ce projet, j'y travaillais le soir avec mon mari, Kevin Flynn, spécialiste de biologie marine. Au printemps 2009, notre simulation fonctionnait et était capable de représenter différentes populations de mixotrophes, certaines davantage tournées vers la prédation, d'autres vers la photosynthèse. Nous avons publié nos résultats cette même année dans une revue spécialisée.

>