

> Une autre solution pour obtenir des champs intenses est de faire appel aux matériaux supraconducteurs, qui perdent leur résistance électrique à température suffisamment basse. Pas de résistance, pas d'effet Joule et, cerise sur le gâteau, une alimentation électrique très réduite. Ainsi, les 9000 électroaimants du collisionneur LHC, au Cern, qui produisent un champ de 8 teslas, sont faits d'un alliage niobium-titane supraconducteur. Hélas, cette solution est elle aussi fortement limitée: la supraconductivité disparaît si le matériau est plongé dans un champ magnétique trop élevé, 9 teslas par exemple pour l'alliage niobium-titane à sa température de refroidissement au LHC.

LES SUPRACONDUCTEURS À LA RESCOUSSE

D'où l'idée de construire des électroaimants hybrides, avec un électroaimant extérieur supraconducteur et un électroaimant intérieur «résistif». Dans cette configuration, le champ magnétique à la périphérie du dispositif n'est pas suffisant pour faire perdre sa supraconductivité à l'électroaimant externe, tandis qu'au centre, les champs créés par les deux électroaimants s'ajoutent: on atteint aujourd'hui 45 teslas, mais au prix d'une grande consommation d'énergie.

Plusieurs équipes dans le monde cherchent à réaliser des dispositifs entièrement à base de supraconducteurs en utilisant des matériaux, tels les cuprates, qui restent supraconducteurs à des températures moins basses et à des champs de plusieurs dizaines de teslas, et qui supportent des courants très intenses – par exemple plus de 1000 ampères pour un fil en alliage ReBCO (pour *rare-earth barium copper oxyde*) de 1 millimètre carré de section.

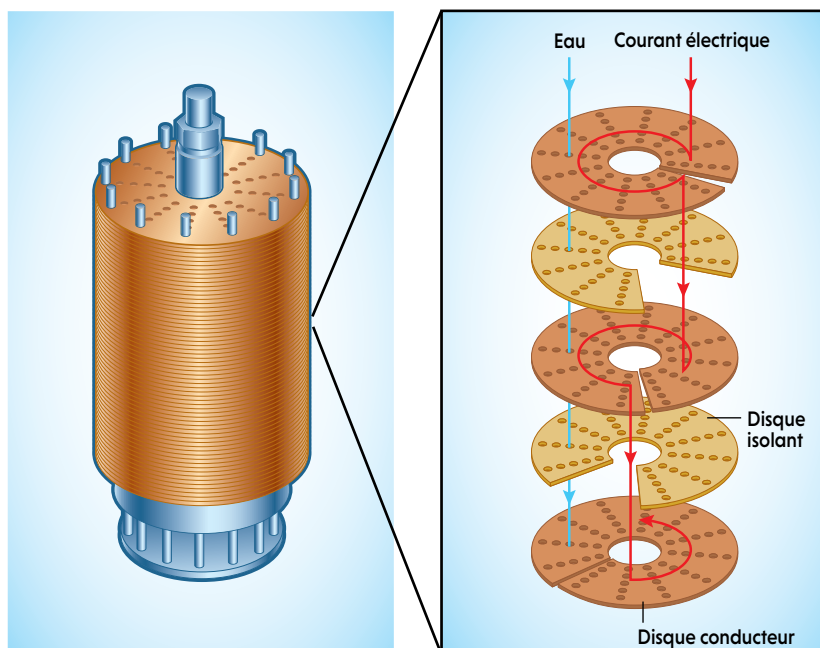
Pour des raisons de fabrication et de résistance mécanique, on élabore ces matériaux sous la forme de films de 1 micromètre d'épaisseur déposés sur un ruban isolant épais de quelques dizaines de micromètres et de largeur centimétrique. Les aimants sont alors construits en empilant plusieurs galettes obtenues en enroulant le ruban sur lui-même.

Reste une difficulté: pour des champs très intenses, le moindre incident peut faire perdre localement sa supraconductivité au matériau. L'effet Joule réapparaît, réchauffe le matériau, la perte de supraconductivité s'étend de proche en proche et le circuit tout entier est menacé d'endommagement par échauffement.

Pour remédier à ce problème, les physiciens du Laboratoire national des

LES ÉLECTROAIMANTS DE BITTER

Un électroaimant de Bitter est constitué d'un empilement qui alterne disques conducteurs et disques isolants. Ces disques sont fendus et disposés de telle façon que le courant, qui circule dans toute la masse du matériau conducteur, décrit globalement une trajectoire hélicoïdale, comme dans un solénoïde. Les disques sont par ailleurs percés de nombreux trous à travers lesquels circule de l'eau, ce qui assure un refroidissement efficace. La masse du conducteur autorise le passage d'un courant très intense et offre une bonne résistance aux contraintes mécaniques exercées par le champ magnétique, qui peut alors atteindre des valeurs record.



champs magnétiques intenses, à Grenoble, ont fait le choix d'utiliser, en guise d'isolant entre les enroulements de ruban... du métal. Lorsque tout fonctionne bien, le courant circule dans le supraconducteur, de résistance électrique nulle, plutôt que dans le métal: malgré sa faible résistance, ce dernier se comporte comme un isolant. Mais en cas d'incident, le courant bloqué par la perte de supraconductivité passe par le métal sur tout le périmètre de la bobine. Au lieu d'être local et destructeur, l'échauffement, réparti sur toute la galette, est bien plus faible et n'endommage plus le dispositif.

Ainsi, cette année à Grenoble, la bobine prototype nommée Nougat, placée pour être testée au sein d'un électroaimant classique produisant déjà 20 teslas, a permis d'atteindre un champ magnétique total de 32,5 teslas pendant plusieurs minutes. Ces expériences ouvrent la voie à la production de champs magnétiques très intenses – 30 à 50 teslas – en continu, par des dispositifs intégralement supraconducteurs, compacts et économes en énergie. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Battesti et al., **High magnetic fields for fundamental physics**, *Physics Reports*, vol. 765-766, pp. 1-39, 2018.

P. Pugnat et al., **Progress in the construction of the 43 T hybrid magnet at LNCMI-Grenoble**, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28(3), pp. 1-7, 2018.

Développez votre analyse critique en physique !

NOUVEAUTÉ

Vous êtes un enseignant cherchant à améliorer ses explications ? Ce livre est fait pour vous !
Vous y trouverez des moyens d'enrichir et de libérer votre esprit critique.

L'apprentissage de la critique Développer l'analyse critique en physique

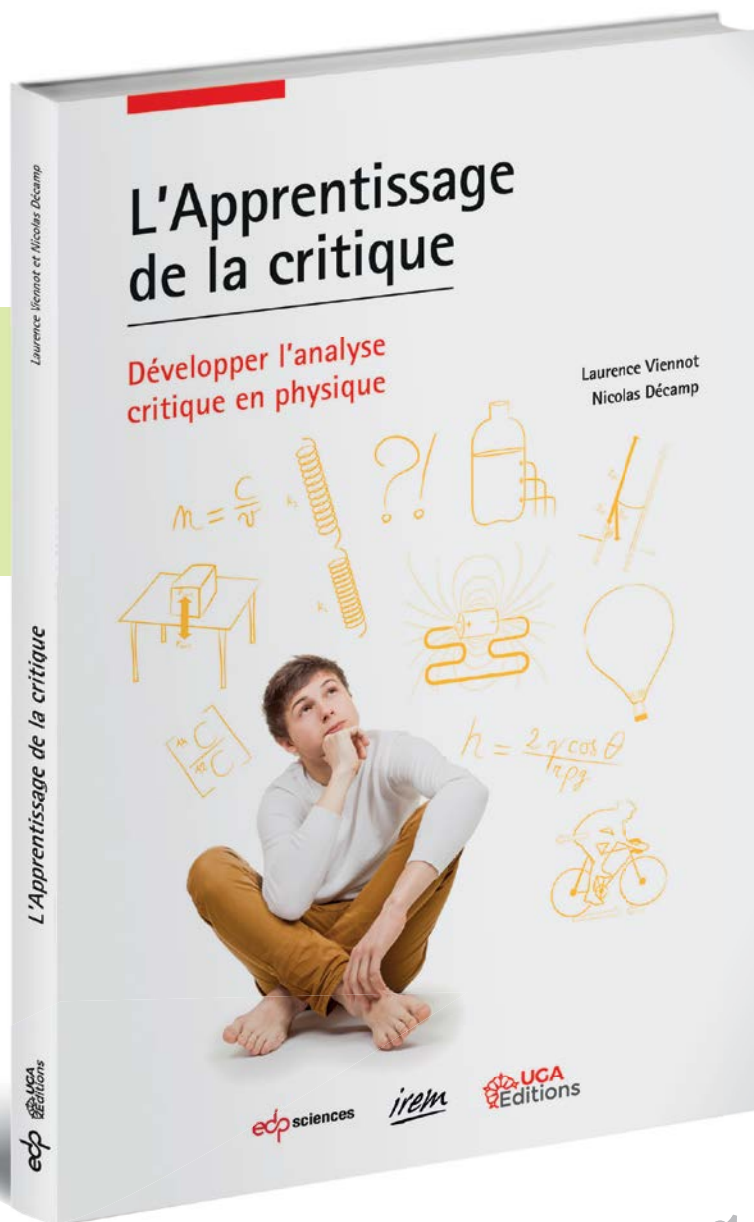
Laurence Viennot & Nicolas Décamp

Lisez ce livre si vous voulez davantage savoir à quoi vous en tenir sur les explications de phénomènes physiques qui vous sont livrées.

ISBN : 978-2-7598-2355-0 – Prix : 25 €

Format : 16 × 24 cm – 202 pages

Public : enseignants du second degré et de l'université, formateurs d'enseignants.



DÉJÀ PARU

Mathématiques récréatives

Éclairages historiques et épistémologiques

Sous la direction de Nathalie Chevalarias, Michèle Gandit, Marcel Morales, Dominique Tournès.

ISBN : 978-2-7598-2318-5 – Prix : 25 € – Format : 16 × 24 cm – 256 pages

Public : enseignants du second degré et de l'université, curieux des mathématiques.

COLLECTION
Enseigner les sciences



L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*

LE CORAIL FAIT DANS LA DENTELLE

La dentelle est similaire à la structure du corail. De ce parallèle, le plasticien Jérémie Gobé a bâti un projet entre art et science pour aider à la régénération et à la sauvegarde des récifs coralliens.

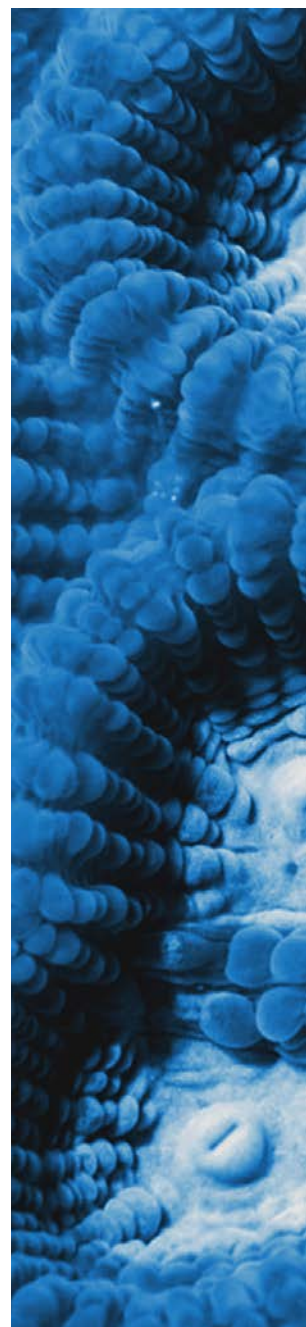
Pêche industrielle, réchauffement climatique, acidification des océans, hausse du niveau marin, pollutions... les menaces qui pèsent sur les coraux sont légion. Et, de fait, pour ne prendre qu'un seul exemple, la Grande Barrière, en Australie, a perdu plus de la moitié de ses coraux en moins de trente ans... Pourtant, les récifs coralliens abritent à eux seuls 25% de la biodiversité marine et protègent les côtes des tempêtes et de la montée des eaux. Peut-on remédier à cette situation catastrophique? Peut-être, et, par la même occasion, sauver des savoir-faire en voie de disparition. C'est la double ambition

du projet *Corail Artefact*, conduit par le plasticien Jérémie Gobé, dont les œuvres magnifient les deux problématiques.

Tout commence en 2010, quand l'artiste, séduit par leur esthétique, acquiert des fragments de corail chez Emmaüs. Il y a deux ans, pour le Festival international des textiles extraordinaires, à Clermont-Ferrand, l'association organisatrice HS Projets lui offre une carte blanche. À cette occasion, il rencontre la Scop Fontanille, une entreprise de plus de 150 ans, sauvée de la faillite par ses propres salariés. Sa spécialité? La dentelle. Quel rapport avec le corail? Le point d'esprit!

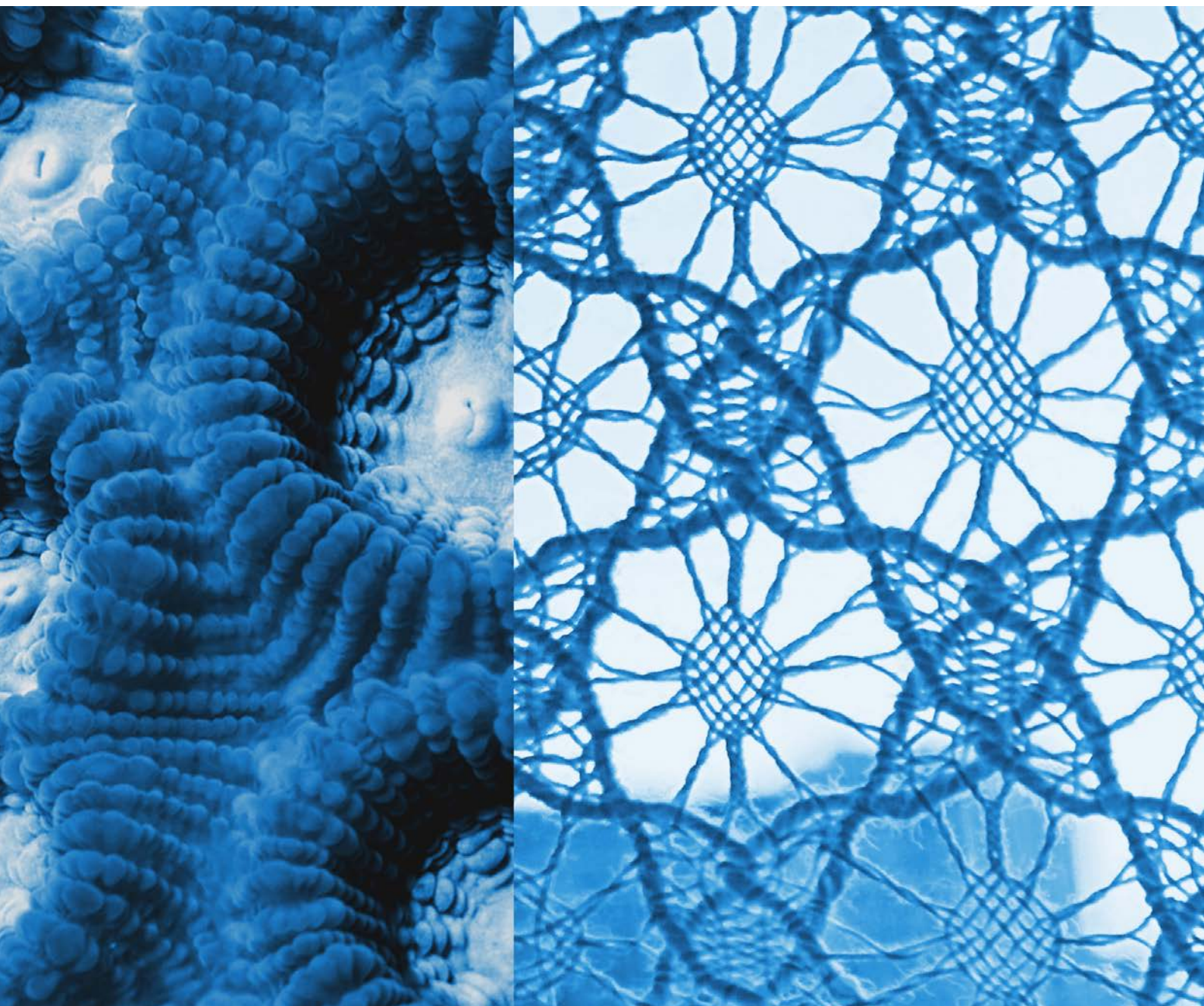
Ce point traditionnel, inventé il y a 450 ans au Puy-en-Velay, est la réplique exacte du squelette d'un certain type de corail (*voir les images*). De cette passerelle jetée entre deux domaines *a priori* très éloignés sont nés deux projets. D'abord, pour le festival, Jérémie Gobé réalise avec Fontanille une œuvre monumentale, une sculpture à partir de 1,5 kilomètre carré de dentelle – la blancheur de cette dernière renvoyant au blanchissement qui frappe les

La structure
du corail (à gauche)
et le point d'esprit
de la dentelle (à droite)
sont très similaires.



récifs. L'objectif, précise le plasticien, est de «sensibiliser sur le savoir-faire de la dentelle et sur l'état des récifs coralliens: les deux sont en train de disparaître à cause de l'activité humaine.» Plusieurs sculptures, entre dentelle et corail, ont été confectionnées par l'artiste et sont régulièrement exposées.

L'autre projet consiste à venir en aide au corail. La dentelle, grâce à ses similarités avec celui-ci, pourrait-elle aider à la régénération des récifs en fournissant un support sur lequel les larves coralliennes pourraient se fixer? L'idée a convaincu Isabelle Domart-Coulon, du laboratoire Molécules de communication et



adaptation des microorganismes au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Elle étudie l'affinité du corail, plus précisément des larves, pour la dentelle, un matériau biodégradable mieux adapté que le béton ou le métal généralement utilisés pour régénérer (ces supports fonctionnent à court terme, mais polluent les océans et dégradent les coraux à long terme). Les premiers résultats sont très encourageants.

Des expérimentations de plus grande ampleur, avec des fragments de corail (des boutures), sont entreprises à l'aquarium tropical du palais de la Porte Dorée, à Paris. Et, depuis septembre, des tests *in*

situ ont lieu sur une île des Philippines, en partenariat avec la fondation Sulubaaï.

Pour améliorer l'efficacité du procédé, différents points de dentelle, toujours produits par Fontanille, sont testés. Il s'agira également d'envisager d'autres matériaux que le coton, comme les fibres de bananier, pour s'adapter aux contraintes locales, et ainsi impliquer les populations dans le projet.

Jérémy Gobé travaille à la conception d'un nouveau type de béton, en commençant comme toujours par réaliser des sculptures avant d'engager un protocole de recherche scientifique et industriel. Des premières œuvres

réalisées en collaboration avec Saint-Gobain Weber dans un matériau contenant moins de 8% de ciment seront présentées à la fondation Bullukian, dans le cadre de la Biennale de Lyon, jusqu'en janvier 2020. L'occasion de se rendre compte que l'art est un vecteur émotionnel idéal pour sensibiliser le public aux enjeux de notre époque. ■

Le site du projet : www.corailartefact.com
Le site de la Biennale de Lyon :
www.biennaledelyon.com

L'auteur a publié :
**Pollock, Turner, Van Gogh,
Vermeer et la science...**
(Belin, 2018)



L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne Université, à Paris

LA MYXINE

UN VERTÉBRÉ SANS VERTÈBRES?

Les myxines, nécrophages des fonds marins, n'ont pas de vertèbres. Cela signifie-t-il que ce ne sont pas des vertébrés? Non...

Dépourvues de nageoires latérales, le corps allongé et souple comme celui d'une anguille, une bouche sans mâchoires mais ornée de plusieurs rangées de dents, les myxines, nécrophages des fonds marins, ressemblent beaucoup aux lamproies... à un détail près: elles n'ont pas de vertèbres. Doit-on en conclure pour autant que les myxines ne sont pas des vertébrés? La réponse n'est pas aussi simple et nombre d'évolutionnistes ont buté sur cette énigme. Jusqu'à ce que, tout récemment, un nouveau fossile fournisse la solution.

La question est d'importance, certes pour réaliser la classification la plus pertinente de l'embranchement des vertébrés au sein de l'arbre du vivant, mais surtout pour dévoiler un joyau jusque-là enfoui dans le passé: l'hypothétique ancêtre commun aux vertébrés. Or, pour en débusquer les caractères, il faut connaître avec certitude la succession des premières émergences, les plus éloignées dans le temps, donc les plus difficiles à établir. Un problème d'autant plus fascinant qu'il concerne «notre» embranchement.

Au début du XIX^e siècle, la question ne se posait pas. Les zoologistes avaient séparé les vertébrés en quatre classes: les mammifères, les oiseaux, les amphibiens

et les poissons. Et parmi ces derniers, ils distinguaient deux groupes suivant la présence de mâchoires: les gnathostomes en avaient, les agnathes en étaient dépourvus. Les gnathostomes se divisaient ensuite en deux taxons: les poissons à squelette cartilagineux (les chondrichthyens) et ceux à squelette osseux (les ostéichthyens). Les agnathes, quant à eux, comprenaient les lamproies et les myxines. En 1806, vu la ressemblance entre lamproies et myxines, le zoologiste français Constant Duméril, dans sa *Zoologie analytique*, les rassembla dans un groupe qu'il appela «cyclostomes» («bouche ronde» en grec). Concernant les organismes actuels, cyclostomes et agnathes signifient la même chose, mais ce n'est plus le cas si l'on introduit les fossiles.

LES VERTÈBRES, POSTÉRIEURES AUX MYXINES?

Avec l'avènement de la théorie de l'évolution de Charles Darwin, cependant, la classification du vivant est devenue, à la fin du XIX^e siècle, une phylogénie, c'est-à-dire l'étude des liens de parenté des espèces, avec l'idée de construire un arbre où chaque branche représenterait un taxon monophylétique, constitué par un ancêtre et l'ensemble de ses descendants. Depuis, les vertébrés ne sont plus séparés en deux classes, mais constitués de deux groupes:

les cyclostomes, rassemblant les lamproies, les myxines et divers fossiles proches, et les gnathostomes, avec tous les autres vertébrés. Mais les cyclostomes forment-ils un taxon monophylétique?

Surprise, les phylogénies des années 1990, fondées sur des descriptions morphologiques d'une grande précision, l'ont infirmé et ont proposé une première émergence des myxines, suivie de celle des lamproies (voir l'encadré page 94). Deux nœuds successifs seraient apparus: celui des craniates (myxines et vertébrés), puis celui des vertébrés (lamproies et gnathostomes). Dans ce modèle, les myxines ont acquis une place privilégiée, qui paraît d'ailleurs cohérente: les vertèbres seraient apparues après l'émergence de leur groupe. Or, au même moment, les biologistes ont disposé d'assez de séquences d'ADN pour réaliser des phylogénies moléculaires fiables. Et, cette fois, ils ont obtenu que les cyclostomes étaient monophylétiques, donnant raison à Duméril!

Qui avait raison? Le doute s'est porté d'abord sur les phylogénies moléculaires, pour lesquelles on commençait à bien comprendre plusieurs artefacts qui faussaient les arbres. Mais certains chercheurs, comme Christopher Braun, de l'université de Californie à San Diego, en 1998, se sont aussi penchés sur la description des caractères morphologiques des lamproies et des ➤