

LES AUTEURS



Keith DUNKER est biophysicien à l'École de médecine de l'Université de l'Indiana, aux États-Unis, où il dirige le Centre de biologie computationnelle et de bio-informatique. Richard KRIWACKI est biologiste à l'Hôpital pour enfants de St Jude à Memphis.

✓ BIBLIOGRAPHIE

Jensen *et al.*, *Intrinsic disorder in measles virus nucleocapsids*, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 108, pp. 9839-9844, 2011.

Peter Tompa *et al.*, *Structural disorder throws new light on moonlighting*, *Trends in Biochemical Sciences*, vol. 30, n° 9, pp. 484-489, 2005.

H. Jane Dyson et Peter E. Wright, *Intrinsically unstructured proteins and their functions*, *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, vol. 6, pp. 197-208, 2005.

A. Keith Dunker *et al.*, *Identification and functions of usefully disordered proteins*, *Advances in Protein Chemistry*, vol. 62, pp. 25-49, 2002.

Richard W. Kriwacki *et al.*, *Structural studies of p21Waf1/Cip1/Sdi1 in the free and Cdk2-Bound state : conformational disorder mediates binding diversity*, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 93, n° 21, pp. 11504-11509, 1996.

Base de données de protéines non structurées connues : www.disprot.org
Base de données de protéines structurées : www.rcsb.org/pdb

plaident aussi en faveur de l'ancienneté des protéines déstructurées. Selon l'une des principales hypothèses, les premiers organismes vivants étaient fondés sur l'ARN et non sur l'ADN. Cet ARN agissait à la fois comme molécule catalytique et comme réservoir de l'information génétique – les rôles qui, dans les cellules actuelles, sont respectivement joués par les protéines et l'ADN.

Dans cette théorie d'un « monde à ARN », une difficulté majeure tient au fait que l'ARN se replie difficilement dans sa forme active et reste souvent figé dans des conformations inactives. Dans les cellules actuelles, des protéines dites chaperonnes assurent un repliement correct de l'ARN et d'autres le stabilisent dans sa conformation active. Ces deux types de protéines n'ont pas de structure stable avant de se lier à l'ARN. Leur apparition aurait ainsi permis de résoudre l'épineux problème du repliement de l'ARN.

Une épée à double tranchant

L'analyse de l'origine du code génétique conforte encore l'hypothèse de l'apparition précoce des protéines non structurées. Le code génétique est l'ensemble des règles utilisées par les cellules pour transcrire l'information codée dans les acides nucléiques (ARN et ADN) en une séquence d'acides aminés. Certains acides aminés auraient été codés très tôt au cours de l'évolution, alors que d'autres seraient apparus plus tard.

Les acides aminés hydrophobes, volumineux, qui poussent une protéine à se replier, seraient apparus tardivement, et donc les protéines constituées des premiers acides aminés devaient très probablement rester dépliées quand elles étaient seules. Si ces hypothèses sur l'évolution du code génétique sont correctes, alors les premières protéines apparues sur Terre se repliaient mal ou pas du tout. Les acides aminés apparus ultérieurement ont manifestement permis aux protéines de se structurer. Elles ont alors acquis des sites enzymatiques actifs de type clé-serrure et, dès lors, ont assuré les fonctions remplies par les ARN dans les cellules pendant des millions d'années.

Étant donné le rôle central que jouent les protéines en biologie, il n'est pas surprenant que beaucoup d'entre elles soient impliquées dans les maladies. Cette

nouvelle conception du désordre intrinsèque des protéines modifiera certainement la façon dont nous comprenons et traitons les maladies. Tout d'abord, dans certains cas, le manque de structure d'une protéine peut être nuisible : quand une cellule produit en excès des protéines non structurées, ces dernières forment des agrégats. Dans le cerveau, ces plaques sont incriminées dans des maladies neurodégénératives telles la maladie d'Alzheimer, la maladie de Parkinson et la chorée de Huntington.

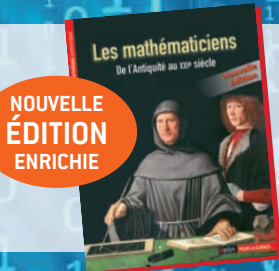
Plus généralement, il semble que la production des protéines non structurées doive être rigoureusement contrôlée pour assurer le fonctionnement normal de l'organisme. Une étude à grande échelle sur la levure, la souris et l'homme, dirigée par Madan Babu, du Laboratoire de biologie moléculaire du Centre de recherche médicale de Cambridge, en Grande-Bretagne, a montré, en 2008, que les cellules régulent les protéines désordonnées plus étroitement que les protéines rigides.

Sachant que les protéines intrinsèquement désordonnées peuvent être impliquées dans certaines maladies, on imagine de nouvelles pistes thérapeutiques. Les protéines qui interagissent avec des protéines non structurées offrent souvent à leurs partenaires des points d'ancrage où les chercheurs pourraient fixer des molécules qui, par exemple, bloqueraient des interactions délétères ou, au contraire, avantageuses. Ainsi, en empêchant un gène suppresseur de tumeur d'interagir avec l'un de ses régulateurs, des biologistes ont obtenu certains succès dans la lutte contre le cancer chez des animaux de laboratoire. Des essais cliniques vont commencer chez l'homme pour tester ces molécules. R. Kriwacki et ses collègues mettent au point une stratégie similaire pour traiter le rétinoblastome, un cancer de l'œil qui touche en particulier les enfants. Les premiers tests chez l'animal ont donné des résultats encourageants.

Le modèle clé-serrure qui a si longtemps expliqué la fonction des protéines a perdu sa toute-puissance. Aujourd'hui, on sait que certaines fonctions biologiques sont remplies par des protéines rigides, et d'autres par des protéines dont la structure fluctue. Mais plus de 100 ans après l'énonciation du dogme voulant que les protéines aient une structure rigide, l'histoire des liens entre la structure des protéines et leurs fonctions reste à écrire. ■

La librairie SCIENCE

Le savoir scientifique au fil des pages...



Les mathématiciens ■ Collectif

« Nul ne peut être mathématicien s'il n'a une âme de poète », disait Sophie Kowalevskaia. D'Archimède à Jacques Hadamard, cet ouvrage dresse les portraits d'une vingtaine de mathématiciens, autant artistes que scientifiques.

280 pages • 24 euros • ISBN 978-2-8424-5109-7



À contre-idées ■ Didier Nordon

Trouver du comique dans une idée sérieuse (et inversement), du local dans une idée générale (et inversement), de l'absurde dans une idée sensée (et inversement)... Au fil de ses billets d'humeur, Didier Nordon s'ingénie à bousculer les idées reçues.

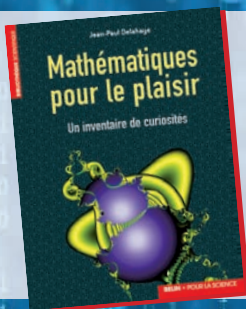
224 pages • 19 euros • ISBN 978-2-8424-5110-3



Au nom de l'infini ■ Jean-Michel Kantor, Loren Graham

Les auteurs retracent un épisode fascinant et dramatique de la création mathématique. Sur les traces de chercheurs russes et français du XX^e siècle, ils nous éclairent sur les liens étroits entre science, religion et politique.

288 pages • 24 euros • ISBN 978-2-8424-5107-3



Mathématiques pour le plaisir ■ Jean-Paul Delahaye

Les mathématiques ne se réduisent pas – heureusement – à ce qu'on nous en apprend à l'école. Partout présentes, elles sont une source de joie et d'épanouissement pour celui qui sait y consacrer un peu d'attention et d'esprit ludique. Dans cet ouvrage, découvrez pourquoi les mathématiques sont faciles et comment s'y adonner est un plaisir.

208 pages • 25 euros • ISBN 978-2-8424-5104-2



La physique buissonnière ■ Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

Une plante plus rapide qu'une mouche, un tuyau qui parle, une cape qui rend invisible, etc. La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique, les auteurs vous invitent à une promenade sur des chemins de traverse pour comprendre cette physique du quotidien.

160 pages • 22 euros • ISBN 978-2-8424-5105-9

Des livres à découvrir en librairie et sur www.pourlascience.fr

ABYSSES : un empire méconnu

Craig McClain

Loin d'être une étendue désertique, les grands fonds marins constituent un écosystème complexe : la faune très variée qui les peuple est directement tributaire du phytoplancton vivant en surface.

La Terre : un globe d'environ 510 millions de kilomètres carrés de surface, dont près de 64 pour cent sont situés sous plus de 200 mètres d'eau. À ces profondeurs, l'absence de lumière empêche la photosynthèse. Or ce processus biologique de conversion de l'énergie solaire est à la base de la plupart des relations trophiques, c'est-à-dire des échanges d'énergie et de matière entre les êtres vivants d'un milieu donné : sans photosynthèse, pas de nourriture ! Ainsi, sur notre planète, les habitats pauvres en nourriture prédominent.

Il y a deux siècles, les scientifiques en avaient déduit l'absence de toute forme de vie dans les profondeurs océaniques. Aujourd'hui, après des décennies d'explorations et d'avancées techniques, on s'aperçoit que l'écosystème des grands fonds est bien plus complexe qu'on ne l'imaginait : les abysses sont peuplés d'une grande diversité d'organismes vivants. La plupart d'entre eux ne subsistent que grâce à une seule source de nourriture, la « neige marine », particules constituées des excréments et des restes des organismes de surface et qui saupoudrent continuellement les fonds marins.

Les énigmes foisonnent en ces lieux. On estime que, chaque année, environ 16 giga-

tonnes de carbone organique produites par le phytoplancton *via* la photosynthèse coulent vers les fonds océaniques. Or seuls trois pour cent de ce carbone atteignent les fonds. Comment si peu de nourriture suffit-elle à alimenter toutes les formes de vie de cet habitat ? Comment une telle diversité a-t-elle pu persister ? Quelles stratégies adaptatives ont été développées par les différents organismes ? Pouvons-nous tirer de ces données un enseignement sur les adaptations évolutives du passé ?

De la vie dans les abysses ?

Au milieu des années 1800, les naturalistes pensaient que la vie marine ne pouvait exister à des profondeurs excédant 550 mètres. Cette hypothèse, dite « azoïque », formulée par le naturaliste britannique Edward Forbes, paraissait logique au regard des connaissances de l'époque : aucune espèce ne semblait en mesure de survivre sous les conditions extrêmes – pression élevée, obscurité et basses températures – caractérisant les profondeurs océaniques. Aussi l'hypothèse azoïque s'était-elle répandue rapidement dans la communauté scientifique.

Elle se révéla erronée, mais en la formulant, Forbes avait mis en exergue un aspect primordial en biologie marine : le lien étroit entre source de nourriture et vie sous-marine. Sans lumière et sans vie végétale, les profondeurs lui paraissaient inaptes à héberger une quelconque forme de vie. Il n'avait pas envisagé la possibilité que des matériaux organiques prove-

L'ESSENTIEL

✓ **Contrairement à ce que l'on pensait au XIX^e siècle, les grands fonds marins sont peuplés.**

✓ **La principale source de nourriture des abysses est la « neige marine », particules riches en carbone organique produites à partir de la photosynthèse du phytoplancton vivant à la surface des océans.**

✓ **Malgré la rareté de la nourriture, les profondeurs abritent une grande biodiversité.**

✓ **Pression de sélection, stratégies adaptatives et microhabitats sont les principales causes invoquées pour expliquer cette biodiversité complexe et méconnue.**

nant de la surface fournissent suffisamment de carbone pour que divers organismes se développent dans les fonds marins.

À la surface de l'océan, le phytoplancton transforme par photosynthèse le dioxyde de carbone de l'atmosphère en carbone organique, qu'il fixe dans ses tissus. D'autres organismes consomment ce phytoplancton et sont à leur tour consommés. Ce processus d'alimentation continu produit des excréments. Au bout d'un certain temps, les organismes meurent. Excréments, organismes morts et matériaux inorganiques alimentent ainsi continuellement les fonds marins, sous la forme de petits agrégats. Les polymères produits en tant que déchets par les bactéries et le phytoplancton assurent la cohésion de ces agrégats. Agglomérés, ceux-ci constituent la «neige marine», la principale source de nourriture dans les profondeurs océaniques.

Une faune nourrie de neige marine

La neige marine ne tombe pas uniformément sur le fond de la mer, tant dans l'espace que dans le temps. Dans les régions côtières, le phytoplancton produit plus de matière organique, car il bénéficie de la montée d'eaux riches en nutriments vers la surface. En général, plus la production est importante en surface, plus il y a de neige marine en profondeur. En outre, à mesure que l'on s'éloigne de la côte et que la profondeur croît, la neige marine doit traverser une plus grande quantité d'eau pour atteindre le fond de la mer, ce qui augmente les chances que toutes sortes d'organismes – des bactéries aux poissons osseux – la consomment en totalité ou en partie sur son trajet.

Forbes ne pouvait connaître la neige marine ; celle-ci ne fut décrite que bien après sa mort. Deux autres éléments, qui constituent aujourd'hui le pivot de la théorie moderne des écosystèmes des grandes profondeurs, lui avaient aussi échappé. Le premier est que, sur le fond de la mer, la biomasse, la masse totale de tous les êtres vivants, est reliée à la quantité de

1. HABITANTES DES PROFONDEURS, les femelles des poissons de la famille des *Ceratiidae*, les baudroies, attirent leurs proies avec un leurre, de la lumière bleue émise par des bactéries symbiotiques. C'est là une des nombreuses stratégies adaptatives des animaux des abysses.

© Visuals Unlimited/Corbis. Pour la Science





Craig McClain

2. QUELQUES-UNES des nombreuses espèces d'organismes macrofauniques extraites d'une carotte de seulement sept centimètres de diamètre et dix centimètres d'épaisseur prélevée dans les grands fonds. Une surface d'un demi-mètre carré environ peut contenir plus de 300 espèces.

carbone à la surface de l'océan et à la quantité de neige marine qui s'ensuit. En 2007, avec mes collègues, nous avons ainsi observé que les augmentations et les réductions de la biomasse sur le fond de l'Atlantique Nord sont étroitement liés aux variations de la production de plancton à la surface de l'océan. Par conséquent, la biomasse la plus élevée se retrouve près des régions côtières et à de faibles profondeurs – inférieures à quelques centaines de mètres. Forbes a joué de malchance sur ce point : il a choisi comme terrain d'étude les fonds de l'Est de la Méditerranée, une zone qui, on le sait aujourd'hui, produit très peu de carbone organique en surface.

Le second point est que les bateaux dragueurs utilisés pour échantillonner les fonds marins étaient alors inefficaces pour capturer de petits organismes et laissaient échapper une part importante de la faune très diverse des mers profondes. Quelques décennies seulement après l'affirmation de Forbes, ces petits organismes étaient observés. Selon le naturaliste britannique Henry Nottidge Mosely, certains animaux semblaient même avoir rapetissé dans les conditions des grandes profondeurs. Et, en 1975, Hjalmar Thiel, de l'Université de Hambourg, a montré qu'avec l'augmentation de la profondeur, les petits organismes deviennent prédominants.

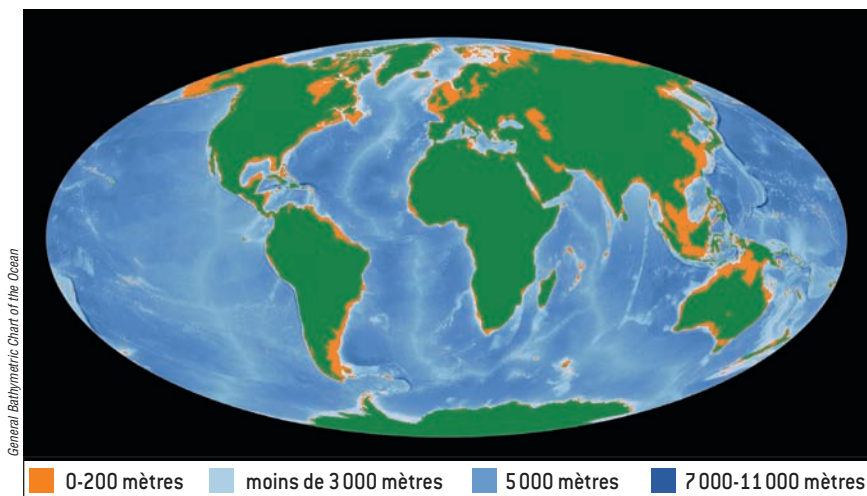
Les grands fonds, dont la neige marine constitue la seule source de nourriture, privilégieraient-ils les petits organismes ? La situation, nous allons le voir, n'est pas aussi simple. Les formes de vie dans les

grandes profondeurs peuvent être classées en quatre catégories en fonction de leur taille : la mégafaune, c'est-à-dire les organismes tels les poissons, les crabes, les homards, les étoiles de mer, les oursins, les concombres de mer (ou holothuries), les éponges et les coraux, qui sont suffisamment grands pour être photographiés ou capturés dans des chaluts ; la macrofaune, comprenant les polychètes (des vers annélides), de petits crustacés et de petits mollusques, qui peuvent être capturés avec des filets à maille fine, mais sont rarement observés à l'œil nu ; la méiofaune, incluant les foraminifères, les copépodes et les nématodes, qui sont retenus uniquement par des mailles de très petite taille ; et, enfin, les bactéries, les plus petits de tous ces organismes.

Des être miniaturisés... ou géants

H. Thiel a observé que la mégafaune et la macrofaune diminuent plus rapidement avec la profondeur que la méiofaune ou les bactéries. De fait, avec l'augmentation de la profondeur, la méiofaune et les bactéries dominent de plus en plus. Ainsi, à des profondeurs supérieures à quatre kilomètres, dans les vastes plaines abyssales où la nourriture est très limitée, il y a un net basculement vers des tailles minuscules. En voici un exemple frappant : mon directeur de thèse Michael Rex, de l'Université du Massachusetts à Boston, et moi-même avons calculé que notre collection entière de plus de 20 000 gastéropodes de mer profonde pêchés dans l'Ouest de l'Atlantique Nord pourrait entrer à l'intérieur d'un unique *Busyon carica*, une conque de la taille du poing.

Cela ne signifie pas pour autant que tous les animaux des profondeurs sont « miniaturisés ». S'il y a bien une diminution globale de la taille des invertébrés vivant à grande profondeur, certains groupes d'animaux (taxons) présentent au contraire des tailles supérieures à mesure que l'on s'enfonce, approchant le gigantisme. Par exemple, si les gastéropodes des eaux profondes sont plus petits que leurs homologues de surface, leur taille augmente avec la profondeur. Mais le schéma inverse a aussi été observé chez d'autres types de gastéropodes, dont la taille diminue avec la profondeur. Le même phénomène est apparu chez d'autres taxons, tels certains crustacés. Quels processus bio-



General Bathymetric Chart of the Ocean

3. PRÈS DE 64 POUR CENT DE LA SURFACE TERRESTRE se trouvent sous plus de 200 mètres d'eau. Le manque de lumière à ces profondeurs empêche la photosynthèse et la prolifération de végétaux, qui constituent la base des tissus nourriciers sur terre et en eaux peu profondes.

logiques ont engendré ces tendances opposées dans l'évolution de la taille ?

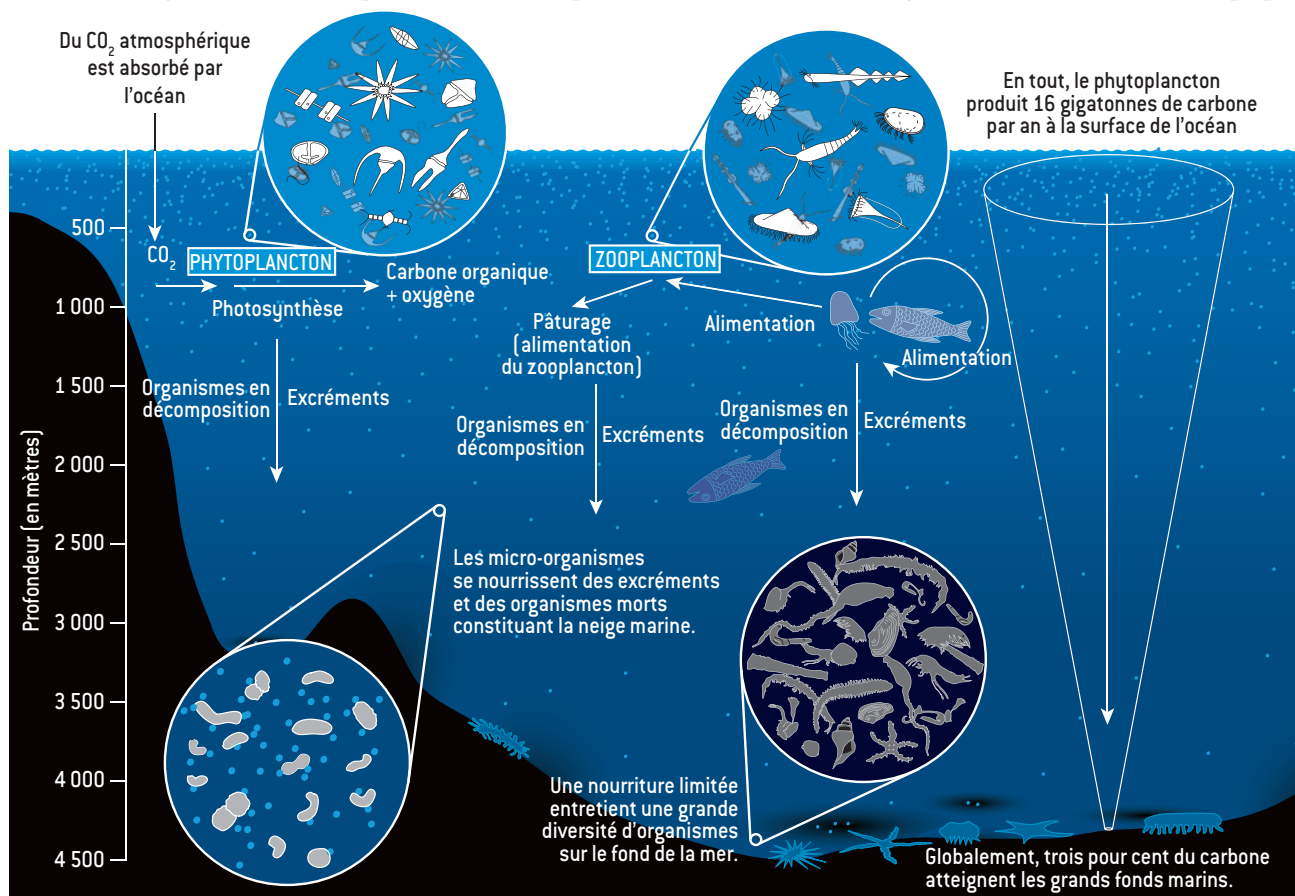
Pour répondre à cette question, je suis passé du plus vaste habitat de la Terre (les océans) à l'un des plus petits – les îles. L'existence de tailles extrêmes est bien documentée dans différentes îles. Le petit kiwi et l'énorme moa (un oiseau disparu mesurant plus de deux mètres) en Nouvelle-Zélande, le colossal dragon de Komodo sur l'île de Komodo en Indonésie, les éléphants pygmées (aujourd'hui disparus) sur les îles de la Méditerranée, la grenouille de la taille d'une fourmi des Seychelles, le cafard siffleur géant de Madagascar et la tortue géante des îles Galápagos ne sont que quelques-unes des multiples anomalies de taille rencontrées dans les îles. En 1964, le biologiste canadien John Bristol Foster a montré que, sur les îles, les grands mammifères rapetissent avec le temps. À l'inverse, les petits mammifères tendent vers le gigantisme. Les causes possibles de ces trajectoires évolutives originales sont multiples :

moins de prédateurs, moins de compétition avec d'autres espèces, un habitat réduit et des sources de nourriture potentiellement marginales.

Pénurie de nourriture, facteur de sélection

En 2006, nous avons découvert un schéma similaire dans les océans. Quand des gastéropodes d'eaux peu profondes ont évolué pour devenir des habitants d'eaux profondes, les petites espèces sont devenues plus grandes et les grandes espèces sont devenues plus petites. Nous avons aussi remarqué que leur taille n'avait pas évolué de façon symétrique : les taxons plus grands se sont bien plus miniaturisés que les petits n'ont grandi. Les deux types d'espèces ont donc convergé vers une taille légèrement inférieure à celle correspondant à une évolution symétrique. Depuis, j'ai observé ce schéma dans des taxons très différents, tels les bivalves et les requins.

Les îles et les océans profonds ont peu de choses en commun. Le fait que l'on observe une évolution des tailles similaire dans ces deux habitats si différents suggère que sa cause réside dans une caractéristique unique qu'ils partagent : la pénurie de nourriture. Dans les îles, la quantité de nourriture disponible est faible, car les végétaux, à la base de la chaîne alimentaire, ont peu de place pour prospérer. Ainsi, dans les deux habitats, la quantité de carbone organique produit serait probablement insuffisante pour entretenir une population constituée uniquement d'animaux géants. D'un autre côté, les organismes plus petits sont aussi désavantagés : ils sont incapables de se déplacer sur de longues distances pour rechercher leur nourriture ou de stocker d'importantes réserves de graisse pour jeûner pendant les périodes de pénurie alimentaire. Si ces pressions de sélection étaient égales, la taille évoluerait vers une valeur intermédiaire. La taille moyenne légèrement inférieure observée s'explique



4. LA VIE PRÈS DE LA SURFACE DE LA MER est la principale source d'approvisionnement en nourriture des habitants des profondeurs. Quand le phytoplancton, le zooplancton et les organismes qui s'en nourrissent rejettent des déchets ou meurent à la surface de la mer, ces restes – que l'on nomme la neige marine – coulent vers le fond de la mer. Les particules riches en carbone s'agrègent en « flocons » en chemin ; leur cohésion est assurée par du mucus et d'autres matériaux produits en partie par les bactéries qui s'en nourrissent au cours de leur chute. Une grande partie de la neige marine est consommée en route. On estime que seulement trois pour cent du carbone produit près de la surface atteignent le fond de la mer.

alors par une sélection plus forte au détriment des tailles supérieures.

Face à la faible quantité de nourriture disponible, nombre d'organismes des abysses présentent des nouveautés évolutives. Un des grands habitants des profondeurs est l'isopode géant *Bathynomus giganteus*, un parent marin (de 36 centimètres de long, voir la figure 5a) du cloporte commun. Cet animal, le plus grand de l'ordre des *Isopoda* et l'un des plus grands crustacés connus, se déplace avec rapidité et efficacité : des pièges à appâts disposés sur le fond de la mer attirent en moins d'une heure des dizaines de ces nécrophages affamés. Chez les mammifères et les poissons, les animaux plus grands se déplacent plus vite et couvrent plus efficacement une surface donnée. La taille de l'isopode géant pourrait être une adaptation lui permettant d'accaparer la nourriture dans les grands fonds marins, tout en lui procurant une zone plus vaste de recherche de nourriture.

Autre caractéristique, l'isopode géant peut survivre huit semaines entre deux prises de nourriture. De même, en aquarium, le gastéropode *Neptunea amianta*, un escargot de la taille d'une balle de tennis, survit jusqu'à trois mois entre deux repas. Ce potentiel de jeûne traduit la capacité des grands organismes à constituer d'importantes réserves de lipides. *Neptunea amianta* a développé une autre stratégie adaptative : les femelles déposent des « casiers » robustes contenant des mil-

liers d'œufs. Le premier jeune à éclore rampe autour du casier d'œufs et dévore ses frères et sœurs non nés !

Les femelles de la famille des *Ceratiidae* (les baudroies, ou lottes de mer) assurent leur survie dans cet environnement pauvre en nourriture grâce à un long pédoncule (dérivé par évolution des épines de la nageoire dorsale) qui part de l'avant de la tête et agit comme un leurre. À l'extrémité de ce leurre, des bactéries symbiotiques émettent une lumière bleue qui attire les proies vers la gueule grand ouverte de la femelle (voir la figure 1). Les siphonophores du genre *Erenna*, organismes proches des méduses, utilisent aussi la lumière pour attirer les proies. De la lumière rouge, une rareté parmi les organismes luminescents, est émise lorsque le siphonophore agit ses tentacules, les faisant ressembler à des copépodes, une source de nourriture pour de nombreux petits poissons.

La bioluminescence compenserait aussi la faible disponibilité en nourriture dans un autre domaine vital – la sexualité. Trouver un partenaire dans une population peu nombreuse (du fait de la pénurie alimentaire) constitue un défi. Ainsi, de nombreux poissons utilisent un organe bioluminescent parmi leurs signaux sexuels. Chez les baudroies, la difficulté de trouver un partenaire sexuel se traduit par une autre nouveauté évolutive. Les baudroies mâles, minuscules comparés aux femelles, vivent pour trouver une partenaire et s'accoler à

elle. Les mâles recherchent les femelles grâce à un système olfactif très développé. Lors du contact, des enzymes fusionnent leur bouche au corps de la femelle, puis tous leurs organes s'atrophient, excepté leurs gonades. Ces mâles parasites deviennent alors une source durable de sperme pour les femelles parasitées.

Une diversité variant avec la profondeur

La grande variété d'adaptations à ces conditions extrêmes de rareté de la nourriture à de grandes profondeurs s'accompagne d'une riche biodiversité qui aurait choqué Edward Forbes. En 1968, l'étude comparative des fonds marins réalisée par Howard Sanders, de l'Institut océanographique de Woods Hole, aux États-Unis, a montré que la biodiversité des grands fonds marins dépasse la biodiversité côtière dans la zone tempérée et s'approche de la biodiversité des eaux tropicales peu profondes. Des travaux plus récents suggèrent que la diversité de la macrofaune dans les profondeurs pourrait même rivaliser avec celle des forêts tropicales humides. Dans des zones relativement petites, le nombre d'espèces coexistant sur les fonds marins surprend : une zone de la taille d'une table basse contiendrait plus de 300 espèces !

Cependant, cette biodiversité est paradoxale. Dans des habitats comme les récifs



Robert Carney, Université d'État de Louisiane

5. POUR SURVIVRE EN EAUX PROFONDES, certains animaux ont développé des caractéristiques nouvelles. Grâce à sa taille, l'isopode géant *Bathynomus giganteus*, nécrophage, se déplace rapidement vers des sources de



Monterey Bay Aquarium Research Institute, 2005

nourriture éphémères et stocke des graisses pour les périodes de pénurie alimentaire (a). Le siphonophore du genre *Erenna* peut produire une luminescence rouge aux extrémités de ses tentacules qui les fait ressembler à

coralliens et les forêts tropicales humides, la biodiversité importante observée traduit la grande variété des environnements et des ressources disponibles en ces lieux. Cette variété soutient de multiples niches écologiques, sources d'une population riche et complexe. Par contraste, le fond de la mer, plat et boueux, sans récifs ou forêts pour apporter de la complexité, apparaît plus homogène. Comment cet habitat et son unique source de nourriture conduisent-ils à une telle biodiversité ?

Une réponse a été proposée en 1973 par H. Sanders et son collègue Fred Grassle : les deux biologistes ont suggéré que le fond marin était composé d'un patchwork de microhabitats de quelques centimètres carrés. Dans leur hypothèse, chaque élément de cette mosaïque fournit un ensemble spécifique de caractéristiques environnementales – les microhabitats – qui permet la vie d'un ensemble particulier d'espèces macrofauniques. Depuis, les caractéristiques de ces microhabitats sont devenues plus claires, tout comme les raisons pour lesquelles ils sont plus courants dans les profondeurs. Certains organismes assez grands, tels les oursins, les étoiles et concombres de mer, les vers et les crabes, construisent des terriers, tunnels et monticules dans les grands fonds marins et se déplacent à travers les sédiments. Ils créent ainsi une topographie à petite échelle qui structure le sol en microhabitats. Les grands fonds étant bien moins

souvent balayés par des courants rapides et constants que les eaux peu profondes, ces microhabitats y persistent plus longtemps et se développent.

Sur cette structure inégale, la neige marine ne se dépose pas uniformément : la microtopographie du fond marin la retient vraisemblablement dans les dépressions, tout comme la surface irrégulière d'une pelouse est recouverte d'un manteau neigeux inégal. La neige marine peut aussi s'agréger avant son arrivée sur le fond de la mer. Les Larvacés, un type de plancton, sécrètent autour d'eux une enveloppe de mucus qui filtre l'eau, retenant les particules. Ces enveloppes s'obstruent facilement et les Larvacés s'en dépouillent toutes les quatre heures. Les enveloppes obstruées

teau continental, à petite profondeur, la diversité des gastéropodes est faible. Lorsque la profondeur augmente (entre 200 et 2 000 mètres) et que l'apport en carbone diminue, leur diversité s'accroît sur les fonds marins. Puis, à des profondeurs d'environ deux à trois kilomètres, la diversité décline rapidement.

L'explication la plus vraisemblable de la décroissance conjointe de la productivité de carbone organique et de la diversité dans les abysses est l'effet Allee (du nom de son auteur, l'écologue américain Warder Allee) : moins la nourriture est disponible et moins d'individus de toutes les espèces sont entretenus. Quand le nombre d'individus d'une population décroît fortement, l'espèce concernée est plus susceptible de s'éteindre

LA BIODIVERSITÉ DES GRANDS FONDS MARINS dépasse la biodiversité côtière dans la zone tempérée et s'approche de la biodiversité des eaux tropicales peu profondes.

constituent alors une source de nourriture riche en carbone, qui arrive sur le fond marin groupée en masses compactes.

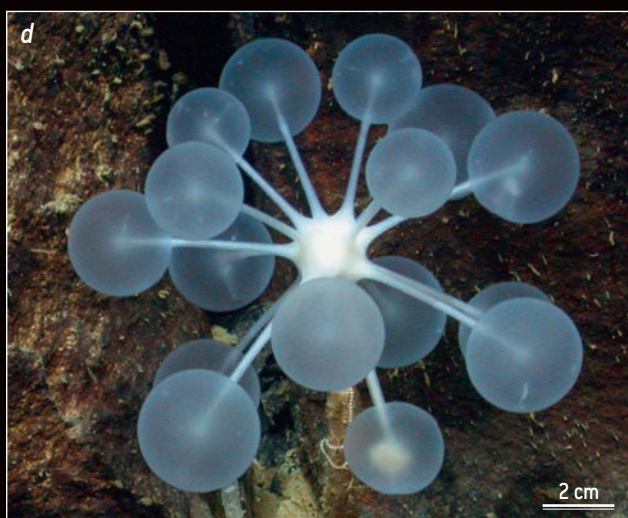
Ce schéma de la disponibilité en nourriture gouverne la biodiversité non seulement à petite échelle, mais aussi à des échelles plus grandes. En 1973, M. Rex a publié la première étude montrant la complexité de la répartition de la biodiversité en fonction de la profondeur. Sur le pla-

localement en raison de perturbations environnementales aléatoires, ce qui réduit la diversité totale d'une région.

Cependant, il reste une énigme : pourquoi, au tout début des grandes profondeurs – sur les fonds marins situés aux alentours de 200 mètres de profondeur –, une grande disponibilité en nourriture soutiendrait-elle moins d'espèces qu'à 1 000 ou 2 000 mètres ? On a avancé une



des copépodes, petits crustacés dont se nourrissent nombre de petits poissons (b). La femelle du gastéropode *Neptunea amianta* dépose des milliers d'œufs dans des « casiers ». Ils serviront de source de nourriture aux



premiers petits éclos (c). *Chondrocladia lampadiglobus*, ou éponge lampion, est carnivore (d). Alors qu'en général, les éponges filtrent l'eau pour se nourrir, celle-ci piège ses proies grâce à de minuscules crochets externes.

vingtaine d'hypothèses pour expliquer cette tendance, fondées sur divers éléments empiriques. En 2010, avec Jim Barry, de l'Institut de recherche de l'Aquarium de Monterey Bay, j'ai publié une étude qui pourrait résoudre l'énigme. Dans les canyons sous-marins – des vallées étroites qui entaillent le plateau continental de quelques centaines de mètres à plus de 2000 mètres –, la nourriture peut s'accumuler à la base des parois abruptes. Nous avons découvert qu'une mégafaune très mobile – par exemple les oursins, concombres de mer, crabes et étoiles de mer – converge vite dans ces zones et monopolise la nourriture. Comme ces animaux sont nombreux, leur activité remue intensément les sédiments. Cette perturbation et le manque de nourriture créent des conditions très rudes pour la macrofaune de ce milieu. Les espèces de la macrofaune sont donc moins nombreuses à survivre dans ces conditions. Les vers qui construisent des terriers dans les sédiments, notamment, ont peu de chance de survivre, car leurs terriers seraient vite détruits. Ainsi, à ces profondeurs intermédiaires où la dis-

ponibilité en carbone est élevée, la mégafaune, plus abondante, pourrait réduire la diversité de la macrofaune.

De façon générale, explique Nadine Le Bris, directrice du Laboratoire d'écogéochimie des environnements benthiques (CNRS-UPMC) de l'Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer, on constate que le nombre d'espèces est plus limité dans les écosystèmes abyssaux liés à des sources locales d'énergie – sources hydrothermales, sources de méthane, canyons, bois et os coulés. Mais à l'instar des crustacés abyssaux géants, la taille souvent exceptionnelle de ces organismes reflète une adaptation particulièrement efficace aux formes d'énergie disponibles.

Regards vers le passé

La façon dont l'océan réagit aujourd'hui au gradient de nourriture sur les fonds marins nous renseigne aussi sur le développement de la faune marine tout au long de l'histoire de la vie sur Terre, plus précisément sur les conditions environnementales (quantité de nourriture disponible,

c'est-à-dire de carbone) qui ont pu permettre ce développement.

Il y a environ 200 à 100 millions d'années, la révolution marine du Mésozoïque a constitué l'une des plus spectaculaires réorganisations de la vie sur notre planète. À cause d'une forte augmentation de la prédation dans les océans, certaines espèces ont décliné, tandis que d'autres, mieux adaptées (par exemple des gastéropodes possédant une coquille particulièrement solide), se sont diversifiées. En 1995, Richard Bambach, de l'Institut polytechnique et de l'Université d'État de Virginie, aux États-Unis, a suggéré que les besoins alimentaires des animaux marins s'étaient accrus durant cette période : plusieurs études montraient une augmentation de la prédation, de la mobilité, du fouissage, des morphologies anti-prédateurs, de l'incrustation d'organismes dans des roches immergées, de l'érosion due à des organismes sous-marins et de la taille de la faune. Selon R. Bambach, cette augmentation de l'activité dans les océans n'a pu avoir lieu que grâce à un apport suffisant en énergie. Donc, conclut-il, l'océan a forcément augmenté sa productivité en

DES ABYSES À LA BIODIVERSITÉ DES TROPIQUES

L'étude des grandes profondeurs peut éclairer notre compréhension d'autres types d'habitats. La biodiversité est importante sous les tropiques et décroît vers les pôles. Ce gradient de diversité des espèces en fonction de la latitude est observé chez une grande variété d'organismes dans des écosystèmes marins, terrestres et d'eau douce. Toutefois, les explications de ce gradient sont aussi variées que les organismes qui le suivent. Les différentes théories mettent en avant la variabilité du climat, la rudesse des conditions climatiques, la température, les rythmes de spéciation et d'extinction, le parasitisme, la prédation, la compétition entre espèces et la disponibilité en nourriture.

En 1993, Michael Rex, de l'Université du Massachusetts à Boston, a étudié, pour la première fois, le gradient de diversité des espèces en fonction de la latitude en mer profonde. M. Rex et ses collègues ont découvert un accroissement de la diversité des mollusques et des crustacés

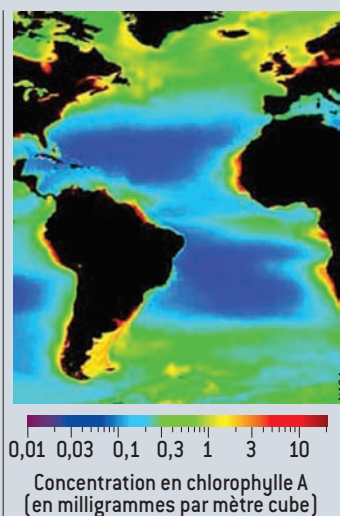
de l'océan Atlantique près de l'équateur et une réduction de celle-ci près des pôles. Des travaux ultérieurs ont montré que les foraminifères suivent également ce schéma. Ces résultats indiquent que les gradients de diversité des espèces en fonction de la latitude ne sont probablement pas liés à la température. En effet, les couches profondes de l'océan varient peu en température – seulement de 4°C – et peuvent être uniformes sur de vastes zones.

Or un autre élément varie bien avec la latitude : la quantité et la production de plancton à la surface de l'océan. De fait, deux séries de travaux ont montré que la dynamique de la disponibilité en nourriture peut entraîner des changements de la biodiversité des profondeurs sur des échelles de temps tant géologiques qu'annuelles.

Dans la première série d'études, Moriaki Yasuhara, de l'Institut *Smithsonian*, et ses collègues ont étudié l'histoire de crustacés minuscules, les ostracodes, sur les 500 000 der-

nières années dans les eaux profondes tropicales, à l'aide d'échantillons provenant de l'*Ocean Drilling Program*, un programme scientifique international d'exploration et d'étude des fonds marins. Ce dernier demi-million d'années a vu quatre cycles climatiques (succession de périodes glaciaires et de périodes interglaciaires) qui ont modifié radicalement la température en surface, les courants et la production de plancton des océans. La diversité des ostracodes dans l'océan tropical profond a chuté durant les périodes glaciaires, avec un abaissement concomitant de la production de plancton en surface. En conséquence, au cours de ces périodes, le gradient de diversité des ostracodes en fonction de la latitude a disparu. À l'inverse, durant les périodes interglaciaires, la diversité des ostracodes est devenue particulièrement riche.

La seconde série d'études concerne des échelles de temps beaucoup plus courtes – de l'ordre de la décennie. Les cycles de El Niño et de



La température de l'océan varie peu avec la latitude, contrairement à la production de phytoplancton, évaluée par la concentration de chlorophylle mesurée en surface, et donc de carbone organique. Cette variabilité de production de nourriture à la surface des océans pourrait être l'un des facteurs de la biodiversité accrue observée sous les tropiques, tant en surface qu'en profondeur.

carbone organique durant cette période, sinon il n'aurait pu fournir l'énergie nécessaire à toutes ces innovations.

Dans un article récent, Seth Finnegan, de l'Université Stanford et de l'Institut de technologie de Californie, et ses collègues, dont je suis, avons tenté d'expliquer cette révolution marine du Mésozoïque sous un autre angle. Nous avons étudié, au cours du temps, les besoins énergétiques ou les demandes en nourriture probables d'un groupe prédominant dans les témoignages fossiles : les gastéropodes. Pour ce faire, nous avons combiné les informations issues des traces fossiles marines, des océans actuels – peu profonds comme profonds –, des données physiologiques provenant des espèces vivantes et, enfin, des équations mathématiques estimant la consommation d'énergie nécessaire à la vie d'un animal, c'est-à-dire l'énergie dont il a besoin pour son métabolisme.

Pour chiffrer les besoins de populations de gastéropodes dans un passé lointain, nous avons fait des extrapolations à partir de nos connaissances sur les gastéropodes actuels. En comparant les gastéropo-

des vivant avant et après la révolution marine du Mésozoïque, nous avons découvert que le besoin en énergie par individu s'était élevé d'environ 150 pour cent – un changement attribué en grande partie à l'augmentation de la taille des individus. Et si l'on ajoute à cette demande énergétique ne serait-ce que celle des carnivores marins, plus coûteux en énergie et dont la présence s'est accrue au Mésozoïque, on constate que le besoin en énergie après la révolution marine du Mésozoïque a dû être bien plus élevé.

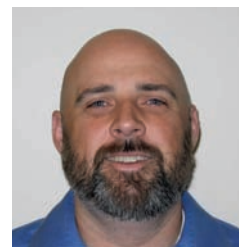
Nous avons montré en outre que cette augmentation de la demande énergétique s'est produite des profondeurs océaniques jusqu'aux eaux côtières. Par conséquent, pour permettre cette augmentation, la productivité de l'océan a forcément dû s'accroître considérablement il y a 200 à 100 millions d'années.

Un avenir incertain

Aujourd'hui, la Terre entre dans une nouvelle période de turbulences. Alors que les émissions de gaz à effet de serre modifient le climat de notre planète, de plus en plus de preuves indiquent que nous avons déjà modifié la production et les flux du carbone dans les océans. Des travaux récents montrent des réductions de 50 pour cent de la production de phytoplancton dans certaines régions océaniques et des augmentations de 50 pour cent dans d'autres. Daniel Boyce, de l'Université Dalhousie, aux États-Unis, et ses collègues ont récemment rapporté que la production de phytoplancton a globalement décliné au cours du siècle dernier. Cette redistribution et la diminution de la quantité de carbone à la surface de l'océan pourraient modifier la nature des fonds marins de façon importante ces prochaines décennies, aux côtés de la surpêche, de la pollution, de l'exploitation minière, du réchauffement et de l'acidification.

Les organismes des profondeurs vivent dans des conditions environnementales extrêmes de température, de pression et, bien sûr, d'alimentation. À l'échelle des individus comme à celle des écosystèmes, des transformations écologiques et évolutives extraordinaires ont permis une adaptation à ces conditions extrêmes. Alors que l'activité humaine modifie toujours plus les fonds marins, les espèces qui les peuplent vont-elles s'adapter ou disparaître ? La question est ouverte. ■

L'AUTEUR



Craig McCLAIN est directeur scientifique adjoint du Centre national de synthèse sur l'évolution de Durham, en Caroline du Nord aux États-Unis, et rédacteur en chef du blog scientifique *Deep-Sea News*, deepseanews.com.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

La Niña, qui changent les températures de surface de l'océan Pacifique tropical, peuvent aussi modifier la répartition de la production planctonique en surface. Auraient-ils par là-même une influence sur la diversité de la faune ? Pour le savoir, un site appelé station M – situé à 4000 mètres de profondeur, au large de Santa Barbara, en Californie – a été surveillé pendant presque deux décennies. Des travaux effectués à la station M par Henry Ruhl et Ken Smith, de l'Institution Scripps d'océanographie et de l'Institut de recherche de l'Aquarium de Monterey Bay, aux États-Unis, montrent que lorsque des oscillations, dues à El Niño et à La Niña, apparaissent dans les températures de surface du Pacifique, la quantité de plancton varie de façon concordante. Et la diversité et l'abondance de la mégafaune et de la macrofaune des profondeurs changent également.

Ces deux séries d'études exceptionnelles confortent l'idée que les gradients de diversité des espèces en fonction de la latitude sont en partie dues à la variabilité de production du plancton en surface. Elles ont aussi mis au jour une répartition de la biodiversité dans les profondeurs en fonction du temps qui établit un lien encore plus fort entre la production en surface et la vie en eaux profondes.

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Finnegan *et al.*, Escargot through time : an energetic comparison of marine gastropod assemblages before and after the Mesozoic Marine Revolution, *Paleobiology*, vol. 37, pp. 252-269, 2011.

C. McClain et J. Barry, Habitat heterogeneity, biogenic disturbance, and resource availability work in concert to regulate biodiversity in deep submarine canyons, *Ecology*, vol. 91, pp. 964-976, 2010.

C. McClain *et al.*, The island rule and the evolution of body size in the deep sea, *Journal of Biogeography*, vol. 33, pp. 1578-1584, 2006.

H. A. Ruhl et K. L. Smith, Shifts in deep-sea community structure linked to climate and food supply, *Science*, vol. 305, pp. 513-515, 2004.

P. Geistdoerfer, La vie dans les abysses, Belin, 1995.

Plongés dans le noir par un virus ?

David Nicol

Des virus informatiques ont mis hors service certains systèmes de contrôle industriels. Le réseau électrique pourrait être la prochaine cible.

Durant l'été 2010, les médias ont révélé qu'un virus avait paralysé les installations d'enrichissement d'uranium iraniennes de Natanz, pourtant hautement sécurisées. La plupart des virus se répandent partout où ils le peuvent, mais celui-ci, nommé *Stuxnet*, avait une cible bien particulière, non connectée à Internet. *Stuxnet* a été placé sur une clef USB, remise à un technicien qui ne se doutait de rien et qui l'a branchée sur un ordinateur faisant partie d'une installation sécurisée. Une fois introduit, le virus s'est répandu silencieusement pendant des mois, à la recherche d'un ordinateur connecté à un composant électronique banal : un contrôleur logique programmable. C'est un petit boîtier en plastique rempli d'électronique, couramment utilisé pour contrôler les rouages des installations industrielles : valves, engrenages, moteurs et autres interrupteurs.

Les contrôleurs électroniques dans lesquels *Stuxnet* s'est introduit étaient associés aux centrifugeuses à uranium, élément clef des ambitions nucléaires iraniennes. Des milliers de ces centrifugeuses traitent le minerai d'uranium pour en extraire l'uranium enrichi nécessaire à la fabrication d'armes nucléaires. Dans

L'ESSENTIEL

✓ Tous les composants du réseau de distribution de l'électricité sont aujourd'hui contrôlés par ordinateur. C'est la plus grande infrastructure physique interconnectée par de l'électronique.

✓ Le virus *Stuxnet*, qui a endommagé des installations nucléaires iraniennes, a montré à quel point les machines sont vulnérables face à un logiciel malveillant.

✓ Le réseau électrique, plus vaste, a encore plus de points faibles. Une attaque coordonnée pourrait mettre à terre une grande partie du réseau électrique d'un pays.

✓ Des mesures commencent à être prises pour renforcer la sécurité.

les conditions de fonctionnement normal, ces centrifugeuses tournent tellement vite que leurs bords externes se déplacent juste au-dessous de la vitesse du son (environ 1 230 kilomètres par heure). *Stuxnet* a accéléré la rotation des centrifugeuses jusqu'à ce que leur bord atteigne pratiquement 1 600 kilomètres par heure, vitesse où le rotor a de fortes chances de voler en éclats. Et pendant ce temps, il envoyait de faux signaux aux systèmes de contrôle, indiquant que tout était normal. De fait, bien que l'étendue exacte des dégâts iraniens reste floue, le virus a au moins en partie atteint sa cible : l'Iran a dû remplacer début 2010 environ 1 000 centrifugeuses sur le site d'enrichissement de Natanz.

Le virus *Stuxnet* illustre à quel point les installations industrielles sont vulnérables face à la menace d'une cyberattaque. Le virus a visé et détruit des équipements sécurisés, et il a échappé à la détection pendant des mois. Cette attaque serait l'œuvre d'Israël, peut-être avec l'aide des États-Unis. Mais de nombreux États ou groupes terroristes pourraient utiliser une technologie similaire contre des infrastructures civiles critiques n'importe où dans le monde.