

CARNETS
DE
SCIENCES

Juliette Ravaux,
Sébastien Duperron

La vie en milieu extrême

éditions
Quæ

Juliette Ravaux,
Sébastien Duperron

La vie en milieu extrême

Éditions Quæ

Dans la collection **Carnets de science**

Petite et grande histoire des céréales et légumes secs

Éric Birlouez
2022, 192 p.

Le vol chez les animaux

Jacques Blondel et Vincent Albouy
2021, 160 p.

Le peuple microbien

Laurent Palka
2020, 176 p.

Un avenir pour nos abeilles et nos apiculteurs

Vincent Albouy, Yves Le Conte
2020, 168 p.

Petite et grande histoire des légumes

Éric Birlouez
2020, 176 p.

Oiseaux marins, entre ciel et mers

Fabrice Genevois, Christophe Barbraud
2020, 200 p.

Nos abeilles en péril

Vincent Albouy, Yves Le Conte
2019, 192 p.

Les secrets des algues

Véronique Vêto-Leclerc, Jean-Yves Floc'h
2019, 168 p.

Éditions Ouæ
RD 10

78026 Versailles Cedex, France
www.quae.com

© Éditions Ouæ, 2022

ISBN (papier) : 978-2-7592-3538-4

e-ISBN (pdf) : 978-2-7592-3539-1

x-ISBN (ePub) : 978-2-7592-3540-7

ISSN : 2110-2228

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction partielle du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

SOMMAIRE

<i>Voyage aux confins de la vie</i>	5
Les champions de l'extrême : des adaptations remarquables	9
La tolérance au manque d'eau	9
Certains l'aiment chaud.....	18
Chaud et froid, même combat ?	32
La vie dans le noir.....	42
Quand le pH s'en mêle, les microbes raflent la mise	52
Quand les extrêmes s'additionnent.....	55
Aux limites discutées de la biosphère	57
Les microbes sont (aussi) dans l'air !	57
Voyage microbien au centre de la Terre	69
Des milieux extrêmes insoupçonnés	79
Des forêts tropicales dans la mer	79
Une fois la mer retirée, sur la plage abandonnés.....	89
Mares provisoires et rivières éphémères.....	97
Fabriquons-nous des milieux extrêmes ?	107
Ce que les milieux extrêmes nous apprennent	121
La vie est-elle née dans les enfers ?	121
Des sources d'innovation... et d'inspiration !.....	130
La Terre... une planète d'extrêmes !	141
Bibliographie	143
Remerciements.....	143
Crédits iconographiques	144





VOYAGE AUX CONFINS DE LA VIE

« C'est la plaine qui donne du relief à la montagne ! »
L'abbé de Vilecourt dans le film *Ridicule*
réalisé par Patrice Leconte, 1996.

Pour beaucoup, les milieux extrêmes évoquent des environnements extraordinaires : les vastes étendues des pôles, battues par des vents glacés ; la surface aride et caillouteuse d'un désert, sous un soleil de plomb ; ou encore les profondeurs obscures et insondables des abysses. Des endroits emblématiques au bout du monde, longtemps accessibles aux seuls explorateurs dont l'histoire retient les aventures : des expéditions polaires d'Ernest Shackleton au début du siècle dernier aux exploits plus récents de Jean-Louis Étienne, en passant par les explorations du désert avec Théodore Monod, ou encore les plongées dans les abysses d'Auguste Piccard ou de James Cameron. Dans l'imaginaire populaire, les milieux extrêmes correspondent ainsi à des lieux hostiles et difficiles d'accès pour les humains. Cette définition a le mérite d'être simple, mais est-elle satisfaisante ?

Rien n'est moins sûr, car d'explorations en découvertes, les scientifiques se sont progressivement rendu compte que les êtres vivants avaient colonisé une multitude de ces milieux hostiles à notre espèce. Les deux derniers siècles ont vu émerger et s'installer l'idée que les environnements varient, et que la vie s'adapte ! Au milieu du xx^e siècle, par exemple, en étudiant les origines de la vie sur Terre, le géologue américain Preston Cloud a révélé que notre planète n'a pas toujours eu une atmosphère riche en oxygène comme aujourd'hui. Avant cela, les travaux de Charles Darwin, relatés dans son *Origine des espèces* (1859), ont imposé l'idée que les formes de vie ont évolué au cours des temps géologiques, en s'adaptant à leur environnement. En parallèle, grâce à l'exploration de plus en plus approfondie de notre planète, nous avons

Page de gauche
Comment imaginer qu'une multitude de microorganismes peuple ces eaux acides et brûlantes du parc national de Yellowstone ?



L'artémie,
Artemia salina,
évolue en milieu
hypersalin.



découvert que la vie existait jusque dans les océans les plus profonds et les eaux les plus chaudes, au cœur des cristaux de glace ou de sel, et à l'intérieur des nuages. Elle y est même florissante... Ces milieux peuplés d'espèces adaptées peuvent-ils alors être considérés comme extrêmes ? Il devient nécessaire de dépasser notre vision anthropocentrée en proposant une définition objective et universelle d'un milieu extrême. On pourrait ainsi le définir comme un milieu où les conditions environnementales s'approchent des limites tolérables par le vivant. Cette définition est celle que nous avons adoptée dans ce livre pour vous proposer un fabuleux voyage aux confins de la vie.

Alors partons à la découverte de ces environnements extrêmes ! Dans les pages qui suivent, nous irons à la rencontre d'organismes dont les stratégies défient l'imagination, tels que les scarabées buveurs de brouillard, les poissons des glaces et les crevettes aveugles, qui évoluent dans des environnements notoirement extrêmes comme les déserts, les pôles ou l'océan profond. Nous partirons ensuite en quête des limites du vivant, au-delà des nuages et dans les profondeurs de la Terre, et élargirons notre conception des extrêmes pour découvrir des environnements insoupçonnés dont certains sont proches, voire intimement liés à nous. Finalement, nous verrons ce que les milieux extrêmes ont à nous apprendre sur la vie, et surtout comment les organismes de l'extrême peuvent inspirer nos sociétés pour affronter les défis de demain. Et si nous étions tous des explorateurs des milieux extrêmes ?

Page de droite

Le lac rose du parc naturel de la Mata-Torrevieja, en Espagne, est aussi riche en sel que la mer Morte et doit sa couleur à la présence de l'algue *Dunaliella salina*.







Les champions de l'extrême : des adaptations remarquables

Jusqu'où la vie s'étend-elle sur Terre ? Ce sont des extrêmes physiques et chimiques qui mettent les organismes à l'épreuve et définissent l'« espace habitable » dans lequel la vie s'installe. Ces limites de résistance et de tolérance ne sont pas universelles, loin de là : elles sont très différentes pour les animaux, les plantes, les champignons, les bactéries ou les archées. Pour les êtres vivants, s'approcher de ces limites revient à vivre en conditions extrêmes. Ces limites sont repoussées au gré des nouvelles découvertes, et les records enregistrés sont battus année après année. Découvrons les champions de l'adaptation !

■ La tolérance au manque d'eau

La vie sur Terre est limitée par des paramètres physiques, tels que les conditions de température, de pression et de lumière, et des paramètres chimiques, comme la salinité et l'acidité. S'il est difficile d'établir avec certitude les limites exactes de la vie en matière de température ou de rayonnement, la communauté scientifique s'accorde sur la nécessité de la présence d'eau. En effet, chez toutes les formes de vie connues actuellement, les réactions chimiques du métabolisme se déroulent en présence d'eau liquide. C'est d'ailleurs à partir de cette contrainte que les astronomes et les exobiologistes définissent une « zone habitable » dans les systèmes planétaires : celle-ci comprend les planètes ni trop éloignées, ni trop proches de leur étoile. Ils recherchent donc des traces d'eau liquide, ou les conditions favorables à sa présence. Selon toute probabilité, la présence d'eau liquide est une condition nécessaire (mais pas suffisante) à l'apparition de la vie.

Page de gauche
Colonie de manchots royaux (*Aptenodytes patagonicus*) dans une tempête de neige, Antarctique.



Sur Terre, l'eau n'est pas abondante dans tous les environnements, et de nombreux organismes doivent faire face à la rareté de cette ressource. Ils ont ainsi développé des capacités exceptionnelles pour s'approvisionner et limiter les pertes. Chez eux, une véritable économie de l'eau s'est mise en place !

Quand l'eau est rare, certains boivent le brouillard...

Peu avant minuit, sur une dune du désert de Namibie, un petit scarabée grimpe maladroitement la pente. Lui qui ne sort habituellement de son refuge souterrain que pendant la journée, affronte la fraîcheur de la nuit pour atteindre le sommet à temps. Une fois sur la crête, il tend ses pattes arrière, baisse la tête, déploie ses ailes, puis reste ainsi incliné, immobile. Qu'attend-il dans cette posture singulière ? Il n'attend pas : il boit ! Le vent froid et humide en provenance de l'océan Atlantique recouvre en effet de brume les dunes chaudes du désert. Les gouttelettes d'eau microscopiques qui la constituent représentent une véritable manne liquide pour le scarabée ténébrion, qui les attrape au passage. Il n'y a pas un instant à perdre : dans quelques heures, peu après l'aube, le brouillard aura disparu. En Namibie, cette brume nocturne déferle jusqu'à une centaine de kilomètres à l'intérieur des terres, plus de trente jours par an. Dans ces régions où la pluie ne tombe que quelques jours par an, cette source d'eau est la plus fiable et la plus abondante, et elle est essentielle pour ce buveur de brouillard.

Attraper le brouillard n'est pas à la portée de tous. La morphologie de ce petit scarabée est un atout : ses pattes postérieures, plus longues que les deux paires de pattes antérieures, l'aident à tenir la position inclinée, avec l'abdomen



Un scarabée ténébrion, un « buveur de brouillard », dans le désert de Namibie.





Un spécimen de *Welwitschia mirabilis* dans le désert de Namibie.

relevé et la tête baissée. Très efficace pour positionner les ailes perpendiculairement au vent sans trop d'effort ! La paire d'ailes antérieures ne sert pas à voler. Sa surface, rigide, est en outre hydrophobe : l'eau ne la « mouille » pas, mais glisse dessus. Ainsi, les microgouttelettes d'eau s'y condensent, et une fois une certaine taille atteinte, dégoulinent sur la surface de l'aile le long de rainures qui les amènent jusqu'à la bouche de l'animal. Simple et ingénieux, ce système est parfaitement adapté pour récolter le brouillard.

Cette technique de récolte d'eau n'est cependant pas la seule adaptation chez les ténébrions du désert de Namibie. Elle est même relativement peu répandue, et seules de rares espèces la pratiquent, dont l'emblématique *Onymacris unguicularis*. Face à une même contrainte, le manque d'eau, tout un panel de solutions diverses s'est mis en place dans ce groupe. D'autres espèces, à la morphologie similaire, n'utilisent pas leur corps pour récolter le brouillard, mais boivent tout simplement les gouttelettes déposées sur la végétation. Le scarabée soucoupe volante, un ténébrion à la morphologie très différente, construit quant à lui des « pièges à brouillard » dans le sable. Il creuse des tranchées, bordées par des crêtes qui concentrent l'humidité, et boit l'eau ainsi capturée au sommet de ces dunes artificielles miniatures. Grâce à cette multitude de stratégies, actives ou opportunistes, les ténébrions colonisent avec succès cet environnement désertique aride.

La récolte de brouillard reste malgré tout l'exception chez les scarabées du désert. Seules 26 des 200 espèces de ténébrions de Namibie la pratiquent. Quoi qu'il en soit, la grande majorité des espèces dépend du brouillard sans pour autant le récolter directement. Car si l'apport d'eau par le brouillard est un bonus non négligeable, les espèces du désert de Namibie, comme beaucoup d'espèces désertiques, s'hydratent principalement... en mangeant ! L'eau



contenue dans leur nourriture constitue l'essentiel de leurs apports. Les plantes, à la base de ces réseaux alimentaires, récoltent, elles aussi, l'eau atmosphérique.

Une plante des plus étranges profite ainsi de cette brume providentielle : *Welwitschia mirabilis*. Cette plante à la longévité exceptionnelle, qui atteint parfois l'âge canonique de 2 000 ans, porte le nom de son découvreur, le botaniste autrichien Friedrich Welwitsch, qui a sillonné l'Angola vers la moitié du XIX^e siècle. Les deux uniques feuilles de cette plante, qui dépassent plusieurs mètres de longueur et se divisent en lanières tordues et effilochées pour les plus grands spécimens, condensent les gouttelettes apportées par la brume à leur surface. Un réseau très dense de fines racines s'étend à la surface du sol dans un rayon de 1,5 mètre autour de la plante, et récupère également l'humidité déposée par le brouillard. La plante multiplie les stratégies pour s'approvisionner en eau, et elle plonge aussi sa racine principale profondément dans le sous-sol pour y puiser l'humidité. L'eau ainsi récoltée est ensuite transmise aux animaux qui consomment *Welwitschia*. Qui dîne boit !

... quand d'autres ne boivent pas une goutte

L'eau déjà présente dans la nourriture ne suffit pas pour satisfaire les besoins des espèces désertiques. Certaines dépendent fortement d'une source complémentaire : leur propre production d'eau.

Pour le découvrir, changeons de décor et rendons-nous au sud-ouest de l'Arizona, dans les dunes du plus grand désert nord-américain. Au cœur du désert de Sonora, la pluie ne tombe que rarement. Seulement 10 centimètres d'eau par an ; par comparaison, dans le même laps de temps, il en tombe cinq à vingt fois plus en France métropolitaine. Dans cet environnement aride vit un animal qui est le champion de l'économie d'eau : le rat-kangourou de Merriam. Ce petit rongeur nocturne se réfugie dans des terriers pendant la journée, mais les galeries souterraines sont loin de lui fournir un havre de fraîcheur : il y règne une température supérieure à 30 °C pendant toute la saison chaude. Plus que la plupart des animaux terrestres, le rat-kangourou se trouve donc confronté à un problème majeur : la déshydratation. Rappelons qu'en milieu aérien, les organismes perdent de l'eau en permanence, et doivent compenser leurs pertes par des apports équivalents en eau. Tout déséquilibre dans ce bilan entraîne une déshydratation qui peut s'avérer fatale.

Pour mieux apprécier la situation du rat-kangourou, comparons-la avec la nôtre. Un être humain adulte perd quotidiennement 2,5 litres d'eau sous forme de vapeur d'eau et de sueur par la peau, par la respiration et via le rejet d'urine et de fèces. Pour éviter la déshydratation, nous devons boire quotidiennement 1,5 litre d'eau en moyenne. Notre nourriture apporte également une fraction importante de la ration d'eau journalière, et le reste



De nombreuses espèces de cactus peuplent le désert de Sonora.



Le rat-kangourou de Merriam, *Dipodomys merriami*, ne boit jamais !

est produit à l'intérieur du corps. Chaque jour, notre corps fabrique 300 à 350 millilitres d'eau, soit l'équivalent d'une canette. Cette eau, appelée eau métabolique, se forme grâce à des réactions chimiques dites « d'oxydation » qui produisent des molécules d'eau à partir de graisses, de sucres et de protéines. Si cette eau ne représente qu'une faible proportion des apports en eau chez l'être humain (entre 12 et 14 %), elle devient vitale pour la survie en milieu désertique.

Et elle est particulièrement vitale pour le rat-kangourou de Merriam... qui ne boit jamais ! Dans le désert de Sonora, l'animal ne peut pas compter sur des sources d'eau de boisson ; il dépend exclusivement de sa nourriture pour lutter contre la déshydratation. Les plantes et les insectes dont il se nourrit lui apportent directement environ 60 % de ses besoins en eau, et les 40 % restants sont donc obtenus par la production d'eau métabolique. De plus, quand l'eau est rare, on l'économise, et le rat-kangourou est un champion dans ce domaine. L'eau nécessaire à l'évacuation des déchets est en effet réduite au maximum. Son urine est jusqu'à cent fois plus concentrée que la nôtre, et ses fèces ne contiennent qu'une quantité négligeable d'eau. En absence d'eau potable dans le désert, le rat-kangourou s'est donc adapté : sa survie tient à ses capacités à produire son eau lui-même, et à l'économiser.

Comme on le voit, chez les animaux du désert, le maintien de l'équilibre hydrique met en jeu différentes stratégies coordonnées : récupérer l'eau atmosphérique, consommer des aliments gorgés d'eau, produire de l'eau métabolique, ou encore économiser l'eau.



Des plantes grasses astucieuses qui s'acidifient la nuit

Dans les climats chauds et secs, les déperditions d'eau menacent la survie des plantes. Si certaines sont adaptées à la collecte d'eau comme *Welwitschia*, d'autres ont développé une façon particulière de réaliser la photosynthèse. Alimentée par le Soleil, la photosynthèse n'est efficace que le jour, aux heures les plus chaudes. Or, si la voie métabolique qu'elle emprunte fonctionne dans une large gamme de températures, depuis le point de congélation jusqu'au-delà de 50 °C pour les plantes des déserts, elle entraîne la perte d'une grande quantité d'eau. En effet, pour capter le dioxyde de carbone (CO_2), la plante doit laisser pénétrer l'air dans ses feuilles au travers d'ouvertures, appelées stomates, situées sur leur face inférieure. Par ces ouvertures, l'eau contenue dans la plante s'évapore aussi : c'est le phénomène d'évapotranspiration.

Qu'à cela ne tienne : certaines plantes adaptées aux milieux arides, comme les cactus, contournent le problème. Elles ouvrent leurs stomates (d'ailleurs peu nombreux) la nuit, aux températures plus fraîches, pour laisser entrer le CO_2 dont elles ont besoin ; et de jour, les stomates demeurent fermés, ce qui limite la perte d'eau. Mais puisque l'énergie lumineuse nécessaire à la photosynthèse n'est pas disponible la nuit, comment font-elles ? Ces plantes font appel à une « cuisine chimique » qui se déroule en deux temps. De nuit, une fois parvenu dans la cellule végétale, le CO_2 s'associe à une molécule à trois atomes de carbone, le phosphoénolpyruvate ou PEP, pour former une molécule à quatre atomes de carbone, le malate. Ce malate est ensuite dissous sous forme d'acide malique dans la vacuole de la cellule végétale, une petite

Des plantes du genre *Sedum* aux feuilles charnues, pratiquant le métabolisme acide crassulacéen.





poche contenant la réserve d'eau de la cellule, qui s'acidifie donc. Voilà le CO_2 stocké : il ne reste plus à la plante qu'à attendre le soleil ! Le jour venu, l'acide malique présent dans la vacuole restitue le CO_2 grâce à une réaction enzymatique. Ce CO_2 est alors transporté dans le chloroplaste, le compartiment de la cellule où se déroule la photosynthèse. Et le tour est joué ! En séparant dans le temps l'acquisition du CO_2 de la photosynthèse, les déperditions d'eau sont donc limitées. Ainsi, quand la majorité des plantes perd entre 250 et 500 grammes d'eau pour fixer 1 gramme de CO_2 , une plante dotée de ce métabolisme n'en perd que 50 à 100 grammes.

On rencontre le plus souvent ce processus en deux temps chez des plantes d'aspect charnu, dites « plantes grasses », notamment les cactus et les euphorbes qui ont des vacuoles volumineuses. Décrit pour la première fois chez une crassulacée, le kalanchoé, ce métabolisme particulier est qualifié de « métabolisme acide crassulacéen » en raison de l'accumulation d'acide malique la nuit. Seule ombre au tableau : ce type de photosynthèse est coûteux en énergie, et moins efficace que la photosynthèse classique. Ces plantes croissent donc lentement, ce qui limite leur succès écologique à des milieux particuliers, chauds, arides, riches en sel, mais avec des nuits fraîches. De nombreuses orchidées, y compris européennes, ainsi que des broméliacées comme l'ananas le pratiquent également. Tout comme *Welwitschia*, que nous avons évoquée plus haut. Certaines espèces basculent même vers une photosynthèse classique quand les conditions sont moins stressantes.

LE SAVIEZ-VOUS ?

La photosynthèse est le processus qui permet aux plantes, ainsi qu'aux algues et aux cyanobactéries, d'utiliser le dioxyde de carbone (CO_2) de l'air et de le transformer en matière organique. Les plantes exploitent pour cela une série de réactions chimiques appelée cycle de Calvin (plus précisément cycle de Calvin-Benson-Bassham, du nom de ses trois découvreurs en 1950). Le moteur de la photosynthèse est l'énergie lumineuse, absorbée par la chlorophylle. L'enzyme clé initiant la photosynthèse dans les plantes est la Rubisco, certainement la protéine la plus abondante sur Terre.

La mer Morte est-elle vraiment morte ?

Notre planète bleue est avant tout une planète salée : elle est recouverte d'océans contenant en moyenne 35 grammes de sel par litre d'eau. Mais il existe naturellement sur Terre des eaux bien plus salées. Au fond des océans, par exemple, des résurgences crachent des fluides contenant plus de 200 grammes de sel par litre. Et sur les continents, dans des zones désertiques où l'évaporation est forte, des bassins fermés deviennent hypersalés, à l'image de la mer Morte. Ce lac situé entre Israël et la Jordanie, avec ses 342 grammes de sel par litre, approche de la saturation à partir de laquelle le sel cristallise (environ 357 grammes par litre à 20 °C). Dans ces conditions, malgré la présence d'eau liquide, la salinité est telle que cette eau n'est pas disponible pour les organismes : l'eau a naturellement tendance à traverser la membrane cellulaire pour passer du milieu le moins concentré vers le milieu le



La mer Morte, en Israël : un lac salé qui abrite la vie.

LE SAVIEZ-VOUS ?

On distingue les eucaryotes, les organismes dont les cellules abritent leur matériel génétique dans un noyau, des procaryotes, des organismes dont les cellules sont dépourvues de noyau.

Un producteur primaire est un organisme capable de convertir la matière inorganique comme le CO_2 en matière organique ; on dit qu'il est autotrophe. Les plantes sont ainsi les principaux producteurs primaires sur les continents.

plus concentré, et ce phénomène devient difficile à contrecarrer lorsque les écarts de concentration sont élevés. Attirer l'eau et la conserver dans ses cellules devient très difficile. Cela conduit à une situation paradoxale : celle d'un milieu aquatique dans lequel les organismes manquent d'eau.

La mer Morte en est un exemple frappant. Elle doit son nom à l'absence d'animaux et de plantes de grande taille, mais ne vous y laissez pas prendre : elle est loin d'être dépourvue de toute vie. Des microorganismes y ont été découverts dès les années 1930. Les conditions y sont cependant si extrêmes que certains de ceux ayant été décrits à l'époque, notamment des eucaryotes unicellulaires ciliés, ont déjà disparu en raison de l'élévation de la salinité de 20 % au cours des dernières décennies. La vie microbienne existe donc à des concentrations de sel allant jusqu'à saturation. On appelle ces microorganismes « halophiles » ou « halotolérants », selon qu'ils ont besoin de ces salinités élevées ou qu'ils se contentent de les tolérer. La limitation va ici dépendre de la quantité totale d'ions présents dans la solution, et de la disponibilité en eau pour assurer leur métabolisme.

L'algue eucaryote unicellulaire *Dunaliella* est le seul producteur primaire connu dans la mer Morte, et illustre cette adaptation à une haute salinité. *Dunaliella* est présente dans de nombreux environnements aquatiques, et même dans l'eau douce, mais elle est particulièrement tolérante à une salinité élevée, ce qui explique qu'elle prédomine dans la mer Morte. Et encore, cette dominance est occasionnelle. *Dunaliella* s'y développe parfois massivement et dépasse rapidement le million de cellules par litre à la suite des fortes pluies qui apportent du phosphore dans l'eau de surface et la diluent, abaissant légèrement la salinité. Des efflorescences particulièrement intenses ont ainsi été observées en 1980 et 1992. La mer Morte est alors devenue rouge ! La dégradation de la matière organique produite par *Dunaliella* a ensuite favorisé le développement de nombreux autres microorganismes. En dehors de ces épisodes très irréguliers, *Dunaliella* développe une paroi épaisse et interrompt



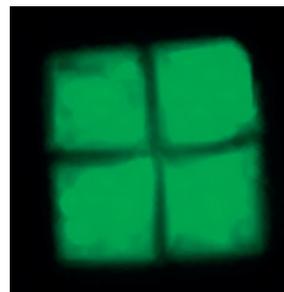
son métabolisme. Cette forme dite « enkystée » se dépose au fond, dans l'attente du prochain événement favorable à son développement.

Pourquoi *Dunaliella* tolère-t-elle si bien des salinités élevées ? Sa résistance est liée à plusieurs particularités. Tout d'abord, sa paroi cellulaire est souple, et change donc de forme facilement. L'algue régule ainsi efficacement son contenu en eau en gonflant et se dégonflant pour équilibrer la concentration des solutés entre l'intérieur de la cellule et l'extérieur. À l'aide de protéines situées sur sa membrane, elle évalue la teneur en sel de son environnement et produit des osmolytes, de petites molécules comme le glycérol grâce auxquelles la concentration des molécules se stabilise à l'intérieur de la cellule en limitant la déshydratation. Toujours afin de conserver l'eau dans la cellule, ses protéines sont enrichies en acides aminés hydrophiles, capables de lier et retenir des molécules d'eau. Enfin, *Dunaliella* se protège efficacement du rayonnement solaire, intense dans cette région, en produisant des pigments caroténoïdes antioxydants en très grande quantité, jusqu'à 14 % de son poids, ce qui lui confère une teinte rouge (les caroténoïdes, très répandus dans la nature, sont par exemple responsables des teintes de la carotte et de la tomate). Ces pigments aux pouvoirs antioxydants évitent que le rayonnement UV, qui favorise le stress oxydatif, ne détériore les molécules comme l'ADN ; ils tiennent en quelque sorte le rôle d'une crème solaire. Cette forte production de pigments trouve d'ailleurs des applications, *Dunaliella* étant cultivée pour l'industrie agronomique (colorants alimentaires) et cosmétique (antioxydants).

Il faut noter qu'aucun développement massif de *Dunaliella* n'a été observé depuis 1992. Dans d'autres lacs moins salés, comme le Grand Lac Salé aux États-Unis, qui atteint 270 grammes de sel par litre, *Dunaliella* est présente dans la colonne d'eau toute l'année.

Parmi les halophiles encore plus extrêmes figurent des archées capables de se développer jusqu'à plus de 460 grammes de sel par litre, dont certaines ont une forme rectangulaire tout à fait remarquable, telle *Haloquadratum walsbyi*. Parmi les stratégies qu'elles partagent avec *Dunaliella*, citons la production de pigments, d'osmolytes, et de protéines hydrophiles qui forment de nombreuses liaisons avec la molécule d'eau. Certaines vont encore plus loin et laissent entrer le sel dans la cellule, y concentrant les ions potassium pour l'équilibrer avec les ions sodium du dehors ; tandis que d'autres utilisent des pompes situées sur leur membrane cellulaire pour évacuer efficacement les ions sodium.

L'absence de plantes et d'animaux résidents, autour de la mer Morte et des grands lacs hypersalés, confirme que ces milieux sont extrêmes. Ils nécessitent des adaptations particulières que seuls les microorganismes semblent posséder, adaptations grâce auxquelles ces derniers atteignent, malgré tout, des biomasses élevées. La chaleur souvent associée à ces habitats, qui



L'archée hyperhalophile *Haloquadratum walsbyi* vue au microscope à fluorescence.



Le grand salar d'Acatama, au Chili, s'étend sur une superficie équivalente à celle du département du Rhône.

accélère les métabolismes, ainsi que l'absence de prédateurs, semblent clairement avantageuses pour les microorganismes qui ont appris à fonctionner dans ces conditions. Ces environnements sont finalement assez fréquents sur notre planète : l'assèchement des étendues d'eau salée par évaporation est un phénomène courant dans les zones arides. Le salar d'Atacama, qui s'étend sur une surface de 3 000 kilomètres carrés au nord du Chili, en est un représentant emblématique : dans ce désert blanc et plat, le sel cristallise en créant des formes hexagonales caractéristiques.

■ Certains l'aiment chaud...

La température est l'un des facteurs les plus contraignants pour les êtres vivants. Chaque espèce s'épanouit dans une gamme qui lui est propre, appelée optimum de température. Entre les bornes de cet optimum, les performances en matière de locomotion, nutrition, croissance, reproduction, développement et survie sont maximales. Lorsque les températures grimpent ou plongent hors de cette fenêtre, les performances déclinent jusqu'aux limites supportables par l'espèce : la température critique maximale et la température critique minimale. Ces températures critiques définissent la gamme de tolérance thermique de l'espèce : au-delà, les organismes ne survivent pas plus de quelques minutes.

Certaines espèces vivent dans des environnements où la température atteint des extrêmes, non seulement par rapport à leur propre tolérance thermique, mais plus généralement par rapport aux limites thermiques du vivant. Si les températures extrêmes de survie sont bien documentées pour de nombreux organismes, définir les températures limites de la vie est plus difficile, en particulier dans les environnements où la température est variable,