

son homologue : dans ce processus, l'enzyme échange la partie détériorée d'un brin d'ADN avec le fragment équivalent d'un brin homologue intact. Une troisième enzyme, l'exonucléase, excise totalement des morceaux d'ADN endommagé.

Les rayonnements de haute énergie et la dessiccation produisent un autre type de dommage génétique, consistant en une cassure des deux brins d'ADN. La cellule irradiée réagit à cette destruction en produisant plus de protéines RecA. Cette protéine se lie à l'ADN simple brin et enclenche une cascade de réactions qui conduit à la réparation de la cassure et au retour de l'ADN sous sa forme de double hélice.

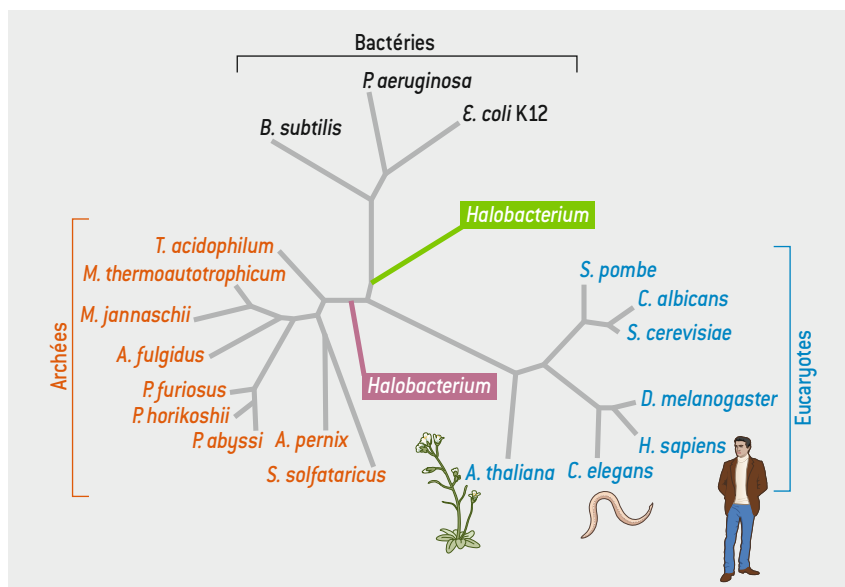
Les métaux toxiques et les concentrations fluctuantes en ions sont également des stress importants pour la cellule : *Halobacterium* NRC-1 y résiste grâce à plusieurs gènes. Par exemple, les cellules contrecarrent les effets de l'arsenic (qui bloque la production d'énergie et l'activité des protéines) en activant un groupe de gènes codant des enzymes qui modifient l'état d'oxydation du métal et le préparent à un transport actif hors de la cellule. Un autre gène ferait partie d'un second système de détoxification, qui transforme l'arsenic en une forme volatile, la triméthylarsine.

Enfin, l'une des conditions les plus stressantes pour les haloarchées est le manque ou l'absence d'oxygène, car la production d'énergie utilisant l'oxygène devient alors impossible. NRC-1 réagit de plusieurs façons. L'une d'elles consiste à élaborer des vésicules emplies de gaz grâce auxquelles les cellules flottent et rejoignent donc des zones aérobies en surface. Dans ces conditions, NRC-1 fabrique plus de bactériorhodopsine et améliore la capture de la lumière.

En avant... Mars

Cependant, en l'absence irrémédiable d'oxygène, les cellules optent pour un autre mode de conversion de l'énergie, qui utilise le diméthyle sulfoxyde produit par d'autres microbes et le triméthylamine N-oxyde produit par les poissons (dans le cas où NRC-1 vit en mer), pour effectuer la « respiration anaérobie ».

Nous ne savons pas encore comment NRC-1 régule les différents groupes de gènes en fonction de l'environnement, mais nous avons proposé un mécanisme qui explique une partie de cette complexité.



6. LA POSITION DE HALOBACTERIUM NRC-1 sur l'arbre phylogénétique pose encore des problèmes. Selon les parties du génome étudiées, le micro-organisme est soit une bactérie (en vert), soit une archée (en violet).

Nous pensons que deux facteurs de transcription généraux, TBP et TFB, agissent eux-mêmes en tant que régulateurs. Les facteurs de transcription sont des protéines qui régulent l'expression d'un gène, ce qui augmente ou diminue la quantité intracellulaire de protéine codée par ce gène. Bien que les protéines TBP et TFB soient habituellement codées chacune par un seul gène chez les archées et les eucaryotes, *Halobacterium* NRC-1 contient six gènes codant le facteur TBP et sept codant le TFB, augmentant le nombre de combinaisons possibles de TBP et TFB au cours de la transcription. Des paires spécifiques pourraient activer des ensembles de gènes destinés à travailler de concert, par le biais de séquences régulatrices trouvées près des gènes en question. Notre hypothèse est étayée par de récents travaux mettant en évidence un nouveau mécanisme régulateur de ce type chez les haloarchées.

Grâce à leur machinerie cellulaire complexe, probablement empruntée en partie à d'autres organismes, les haloarchées font preuve d'une remarquable robustesse en survivant dans des milieux pour le moins inhospitaliers. On peut même les conserver plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines d'années dans des cristaux de sel ! Ces formidables adaptations aux milieux difficiles rappellent les conditions qui règnent sur... Mars. Alors, à quand la découverte d'une forme de vie semblable sur la planète rouge ?

L'AUTEUR



Shiladitya DASSARMA travaille au Centre de biotechnologie marine, à l'Université du Maryland.

Nous remercions la revue *American Scientist* de nous avoir autorisés à publier cet article.

BIBLIOGRAPHIE

L. DeVeaux *et al.*, Extremely radiation-resistant mutants of a halophilic archaeon with increased single-stranded DNA binding protein (RPA) gene expression, *Radiation Res.*, vol. 168, pp. 507-514, 2007.

J. Coker *et al.*, Genetic and transcriptomic analysis of transcription factor genes in the model halophilic Archaeon : Coordinate action of TbpD and TfbA, *BMC Genetics*, vol. 8, p. 61, 2007.

S. DasSarma, Extreme halophiles are models for astrobiology, *Microbe*, vol. 1, pp. 120-12, 2006.

LES LIMITES DE LA SCIENCE

Nourrir la planète : quelles limites ?

Dans une quarantaine d'années, la population mondiale dépassera neuf milliards de personnes. Comment les nourrir ? Ce défi se heurte à de nombreuses limites, notamment augmenter la production agricole tout en respectant l'environnement.

Entretien avec Hervé GUYOMARD, directeur scientifique à l'Institut national de la recherche agronomique, INRA.

→ Pour la Science

Dans l'histoire de l'humanité, les famines ont été fréquentes et dévastatrices. Aujourd'hui, quelles sont les populations les plus exposées ?

→ Hervé Guyomard

Durant les dernières décennies, c'est principalement l'Afrique qui a été touchée, les épisodes de famine les plus récents étant ceux du Darfour en 2004, du Niger en 2005, du Zimbabwe aujourd'hui. En ce début du XXI^e siècle, la faim dans le monde est plus une question d'accès à l'alimentation qu'un manque de nourriture à l'échelle de la planète. C'est en premier lieu un problème de répartition déséquilibrée des ressources alimentaires qui pénalise les pays les plus pauvres.

→ Pour la Science

En laissant les famines de côté, quelle est la proportion de la population mondiale souffrant de sous-nutrition ?

→ Hervé Guyomard

Il n'y a plus de famines dans les pays développés (États-Unis, Europe, Australie, Japon, etc.). Ce constat ne doit cependant pas occulter le fait que même dans les pays dits riches, une proportion non négligeable de la population (environ dix pour cent) souffre encore, plus ou moins régulièrement, de la faim. À l'échelle mondiale, la sous-nutrition concerne essentiellement le monde en développement, notamment les pays les plus pauvres. Sur les six milliards d'habitants que compte la planète, près d'un milliard souffrent de sous-nutrition et un milliard de maladies non

transmissibles liées à une alimentation excessive ou déséquilibrée, en premier lieu l'obésité. Nous sommes face à un paradoxe, désigné sous le terme de double fléau : les pays en développement sont simultanément face à des problèmes de sous-nutrition et de surnutrition.

→ Pour la Science

La révolution verte a permis d'accroître la production agricole dans les pays en développement, surtout dans les pays asiatiques. Comment s'est passée cette transition ?

→ Hervé Guyomard

Dans les pays développés de l'Organisation de coopération et de développement économiques, l'OCDE, on associe la « révolution agricole » à la diffusion du machinisme au début du siècle dernier. Le tracteur a permis non seulement d'accroître les surfaces cultivées, mais aussi et surtout d'augmenter la productivité du travail agricole, c'est-à-dire le nombre d'hectares mis en valeur par un seul homme. La force de travail ainsi libérée a pu satisfaire les besoins de main-d'œuvre du secteur industriel alors en expansion. Les machines sont progressivement devenues de plus en plus performantes. En même temps, les progrès en matière de sélection des variétés cultivées et le recours croissant aux engrais minéraux et aux produits de traitement des cultures pour lutter contre les mauvaises herbes, champignons, ravageurs, etc., ont permis d'augmenter les rendements. En Europe et aux États-Unis, ce mouvement de modernisation et d'in-

dustrialisation de l'agriculture s'est accéléré au lendemain de la Seconde Guerre mondiale. En Asie, l'évolution fut plus tardive. Connue sous le nom de révolution verte, l'Asie est parvenue à augmenter les rendements (comme indiqué précédemment via la sélection de variétés performantes, l'emploi d'engrais et de produits de traitement des cultures, et/ou le recours à l'irrigation) ; en revanche, la mécanisation a joué ici un rôle moins important. Jusqu'à présent, l'Afrique est restée à l'écart de ce mouvement. Aujourd'hui, nous sommes confrontés à deux défis agricoles : dans les pays où les rendements sont d'ores et déjà élevés, comment maintenir les niveaux actuels de production, voire les augmenter, tout en réduisant les pressions négatives sur l'environnement liées à une utilisation souvent excessive de substances chimiques ? Dans les pays en développement, plus particulièrement en Afrique, comment accroître la production et protéger les ressources naturelles ?

→ Pour la Science

Existe-t-il des espèces végétales particulièrement adaptées pour répondre à ce défi ?

→ Hervé Guyomard

Très peu d'espèces cultivées – environ une trentaine – assurent l'essentiel de notre nourriture. En outre, le nombre d'espèces cultivées a tendance à diminuer, de même que le nombre de variétés au sein de chaque espèce. Les céréales viennent en tête avec un total mondial d'un peu plus de deux milliards de tonnes (essentiellement