

Par Kim-Anh Lim

Ni animal ni végétal, mais participant des deux, le champignon, cet organisme étrange, est à juste titre aussi célébré que craint. Il serait surtout, selon certains, appelé à sauver le monde. Excessif ? C'est à voir...



Ce que l'on nomme généralement champignon est le « fruit », ou sporophore (« qui porte les spores »), d'un organisme, le fungi, aussi appelé mycota ou mycète, dont la partie végétative est un enchevêtrement de filaments fins (le mycélium) enfouis dans la terre ou la matière qu'il décompose. Les champignons se reproduisent de façon sexuée ou asexuée, ou par simple division cellulaire.

S

il existe un domaine encore largement inexploré où les découvertes vont bon train, c'est bien celui de la mycologie. On estime à environ 1 500 000 espèces le nombre de vrais champignons¹, alors que 100 000 seulement sont décrites à ce jour selon les critères de la taxinomie. Au-delà de la pure description, ce sont surtout les étonnantes propriétés des champignons, que l'on découvre à peine, qui suscitent l'intérêt et l'espoir.

Menace à l'échelle planétaire

Le 30 avril dernier, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) publiait son premier rapport sur la résistance aux antibiotiques², notamment de dernier recours sur des maladies graves et courantes telles que les septicémies, les diarrhées, les pneumonies, les infections des voies urinaires et la gonorrhée. Les données recueillies dans 114 pays montrent que « cette grave menace n'est plus une



Les champignons sauveront-ils le monde ?

prévision, mais bien une réalité dans chaque région du monde, et que tout un chacun, quels que soient son âge et son pays, peut être touché³ ». Le Dr Keiji Fukuda, sous-directeur général pour la sécurité sanitaire, lance cette alerte : « À moins que les nombreux acteurs concernés agissent d'urgence, de manière coordonnée, le monde s'achemine vers une ère postantibiotiques, où des infections courantes et des blessures mineures qui ont été soignées depuis des décennies pourraient à nouveau tuer. »

Un champignon, encore ?

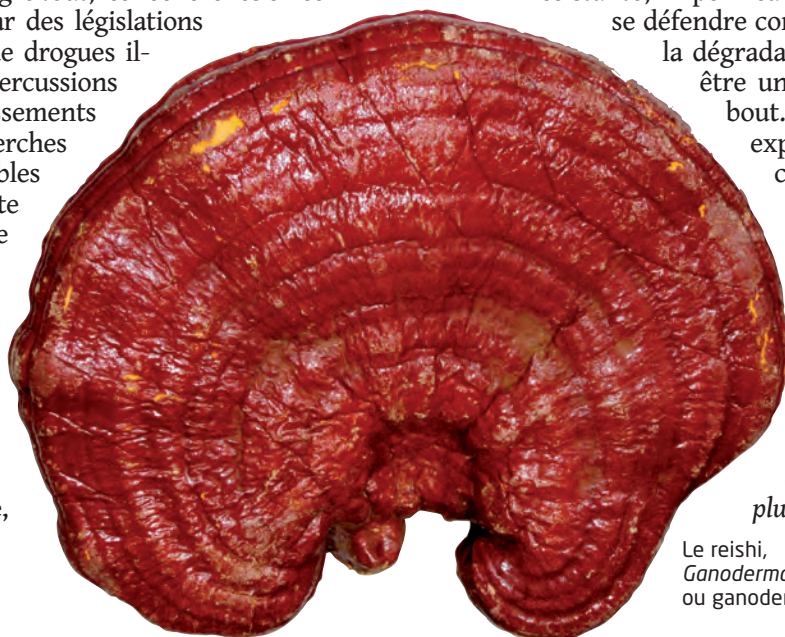
Deux mois plus tard, la revue scientifique *Nature* publiait les résultats d'une découverte peut-être cruciale. Comme chacun le sait, c'est à des champignons que nous devons des antibiotiques comme la pénicilline et la céphalosporine, et c'est encore un champignon qui pourrait nous sauver la mise. En effet, une équipe de biologistes du Canada et du pays de Galles a découvert qu'*Aspergillus versicolor*,

ramassé en Nouvelle-Écosse, sécrétait « un inhibiteur puissant et rapide » de l'enzyme NDM-1 (New Delhi métallobêta-lactamase⁴), lequel enzyme permet à plusieurs pathogènes de contrecarrer la stratégie d'antibiotiques majeurs⁵. La pénicilline ou les carbapénèmes (une catégorie d'antibiotiques à très large spectre utilisée seulement en milieu hospitalier) agissent grâce à leur noyau bêta-lactame qui empêche les bactéries de fabriquer leur paroi cellulaire quand elles se reproduisent. Certaines bactéries ont trouvé la parade avec la fameuse NDM-1, qui contient du zinc qui va briser le noyau bêta-lactame, rendant ainsi inopérants les antibiotiques. Or, le professeur Gerry Wright, directeur de l'Institut de recherche Michael-G.-DeGrootte sur les maladies infectieuses à l'université McMaster (Canada), et son équipe ont découvert une molécule attirée par le zinc, l'aspergillomarasmine A (AMA), qui, en se collant aux ions de zinc de la NDM-1, empêche ces derniers d'agir contre les antibiotiques, qui conservent alors toute leur efficacité. En leur injectant un cocktail d'aspergillomarasmine et de carbapénème, les chercheurs ont ainsi vu survivre 95 % des souris infectées par des superbactéries.

Panacée... ou presque

Les capacités médicinales des champignons semblent sans limites. Études scientifiques à l'appui⁵, nombre de champignons se sont révélés : antibactériens, anti-candida, anti-inflammatoires, antioxydants, antitumoraux, antiviraux, régulateurs de la pression artérielle, du taux de sucre sanguin, des fonctions cardiovasculaires, mais aussi réducteurs du cholestérol, du stress, et stimulateurs des fonctions immunitaires, rénales, hépatiques, respiratoires, neurologiques ou sexuelles. Un champignon fait même tout cela à la fois, à l'exception de la stimulation sexuelle, c'est le reishi (le ganoderme luisant - *Ganoderma lucidum*), bien connu de la pharmacopée asiatique traditionnelle.

On a même trouvé de quoi soigner dans les champignons hallucinogènes. La psilocybine, le principe actif de certains « champignons magiques », a fait ses preuves dans des études contrôlées pour calmer des patients souffrant de TOC (troubles obsessionnels compulsifs), de dépression grave ayant résisté à plusieurs traitements, ainsi que d'algie vasculaire de la face, une céphalée aiguë surnommée « céphalée suicidaire » tant sa douleur est extrême, et pour laquelle on n'a pas de traitement. Malgré tout, les recherches en ce domaine sont freinées par des législations rigoureuses en matière de drogues illicites, ce qui a des répercussions directes sur les investissements des laboratoires. Ces recherches sont pourtant indispensables parce que même si cette substance n'entraîne pas de phénomènes de dépendance, de potentiels effets secondaires existent bien (distorsions visuelles ou auditives, visions, troubles de l'humeur, paranoïa grave et durable, parfois dès la première prise, anxiété, etc.⁶).



Le reishi, *Ganoderma lucidum*, ou ganoderme luisant.

Les quatre catégories de champignons

On appréhende mieux l'étendue du champ d'action des champignons en comprenant leur mode de nutrition, lequel permet de différencier quatre catégories :

1 - Les saprophytes ou saprotrophes sont des décomposeurs. Ils se nourrissent de la matière organique morte ou en décomposition (feuilles, bois, animaux, excréments) et la font disparaître en la recyclant.

2 - Les parasites s'attachent à une matière organique vivante (végétaux, animaux, hommes ou même champignons), la mettant en danger en vivant à ses dépens. (*Beauveria bassiana* et *Metarhizium anisopliae*, par exemple, sont fatals au moustique (l'anophèle) qui véhicule le parasite du paludisme, et *Botrytis cinerea*, « la pourriture grise », tue son hôte végétal pour s'en nourrir.)

3 - Les mycorhizes ou symbiotiques vivent en association avec un végétal. Celui-ci procure au champignon les éléments organiques qu'il synthétise, en échange de l'eau, des minéraux ou d'une protection contre les parasites que lui apporte le champignon. Certains mycéliums ne font que toucher les racines, d'autres pénètrent dedans. Plus de 95 % de tous les végétaux dotés de vaisseaux abritent des mycorhizes (la chanterelle, le bolet ou la truffe en font partie, c'est pourquoi on les trouve au pied d'arbres spécifiques).

4 - Les endophytes se développent à l'intérieur des végétaux, entre leurs cellules, et occupent toutes leurs parties (tiges, feuilles, etc.). Invisibles à l'œil nu, et de ce fait assez méconnus, on sait maintenant qu'ils protègent la plante en produisant des molécules qui peuvent être antibiotiques, insecticides, anti-appétantes pour les insectes, neurotoxiques pour les herbivores ou hormonales pour stimuler la croissance du végétal. Les endophytes peuvent devenir pathogènes quand une plante malade ou stressée ne les contrôle plus.

Super-héros

Mais tout autant, si ce n'est plus, que dans le domaine médical, c'est dans celui de l'environnement que les champignons font des miracles. L'une des fonctions principales des champignons est la décomposition. Le mycélium sécrète des acides et des enzymes extracellulaires qui, pour certains, sont capables de désassembler des molécules pourtant très coriaces comme la lignine (l'un des principaux composants du bois), qui est tout à la fois résistante, imperméable et chimiquement apte à

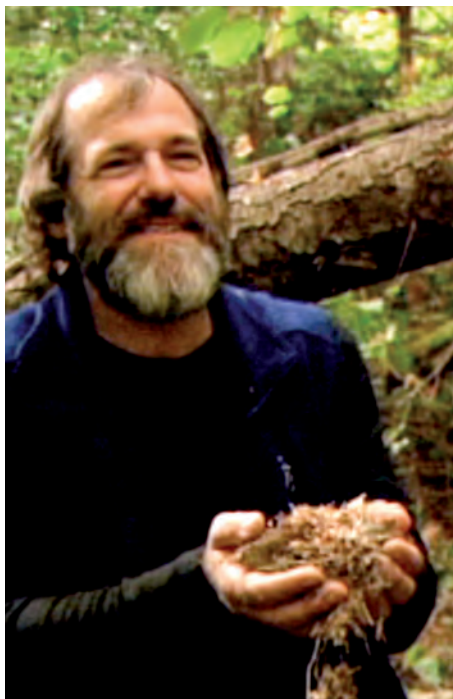
se défendre contre les agents chimiques ou la dégradation biologique. Bref, il faut être un mycélium pour en venir à bout. Or, de nombreux polluants, explique Paul Stamets, un mycologue américain de renommée internationale, sont structurellement similaires aux matériaux auxquels s'attaquent naturellement certains champignons, qui « sont adaptés, en tant que désassembleurs, à transformer des molécules récalcitrantes à longues chaînes en produits chimiques plus simples et moins toxiques.⁷ »

Ces mycéliums produisent des enzymes, des peroxydases, qui brisent les liaisons carbone-hydrogène, les mêmes qui assurent la cohésion de la majorité des chaînes complexes des produits fabriqués par l'industrie pétrochimique: diesel, essence, pesticides, herbicides, etc. Ce faisant, le mycélium libère des sous-produits sous la forme primaire d'eau et de dioxyde de carbone.

Mangeur de pétrole

Paul Stamets a ainsi mené différentes études sur la capacité des champignons à restaurer des zones très polluées. L'une d'elles, en association avec les laboratoires Battelle, s'est déroulée à Bellingham (Washington, États-Unis), sur un site où la Washington State Department of Transportation (WSDOT) a assuré pendant plus de trente ans la maintenance de ses camions. L'huile et le diesel avaient contaminé la terre à un niveau comparable à la pollution de l'*Exxon Valdez* sur certaines plages de l'Alaska. Au printemps 1998, la WSDOT a disposé quatre tas de 10 m² de terre fortement contaminée, sur

Paul Stamets a mené des études sur la capacité des champignons à restaurer des zones très polluées.



Paul Stamets

quatre bâches en plastique. Un tas a été placé entre deux couches de mycélium, deux tas ont reçu des ajouts de bactéries, et le dernier a été laissé tel quel. Tous ont été recouverts. Au bout de quatre semaines, trois étaient nauséabonds tandis que le quatrième, traité avec du mycélium, abritait des centaines de pleurotes, dont certains de 30 cm de diamètre; le type de récolte que l'on a quand la nourriture est abondante. La terre était d'un brun clair, et elle ne sentait ni l'huile ni le diesel. Après encore cinq semaines, des plantes sont apparues. Entre-temps, les pleurotes avaient sporulé, puis disparu, ce qui avait attiré des insectes qui ont pondus. Les larves avaient attiré des oiseaux, qui à leur tour ont apporté des graines, si bien que ce tas de terre était devenu une oasis de vie! Après analyse, plus de 95 % des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP*) avaient disparu de la terre, et les champignons n'en contenaient pas. Les HAP avaient été dégradés en dioxyde de carbone et en vapeur d'eau.



Un règne à part

Ah, qu'il était confortable et simple le monde du temps d'Aristote! Les « *êtres vivants* » se répartissaient en quatre catégories: le minéral, le végétal, l'animal et l'homme. Les champignons appartenaient au règne végétal, et il en a été ainsi jusqu'en 1969, date à laquelle le botaniste américain Robert Harding Whittaker (1920-1980) en fit un règne à part. Whittaker classe le monde vivant en cinq groupes, selon leurs différents niveaux d'organisation cellulaire ou leur mode de nutrition: les monères (organismes les plus simples, comme les bactéries, qui sont seuls à ne pas avoir un noyau pour renfermer leur matériel génétique), les protistes (organismes unicellulaires, comme l'amibe et la paramécie), les champignons (ils se nourrissent à partir de matière organique vivante ou en décomposition), les végétaux (ils élaborent leurs propres matières organiques à partir d'éléments minéraux puisés par les racines et assimilés grâce à la photosynthèse) et les animaux (ils mangent d'autres organismes). Pourquoi un règne à part? Parce qu'à la suite des progrès technologiques et conceptuels, qui ont permis de passer du microscope simple au microscope à émission ionique ou de la première observation des spores - on a longtemps cru que les champignons naissaient par génération spontanée - à la phylogénie moléculaire*, on a découvert peu à peu que les champignons tenaient plus des animaux que des plantes. La paroi des cellules des champignons n'est pas constituée de cellulose

comme chez les plantes, mais de chitine, une substance que l'on trouve dans la carapace des insectes et des crustacés, et de glucane (un assemblage de sucre). La réserve énergétique des champignons ne se fait pas sous forme d'amidon, comme chez les végétaux, mais de glycogène, qui permet de libérer rapidement du glucose, comme chez les animaux. Contrairement aux plantes, les champignons n'ont pas de chlorophylle et ne peuvent donc utiliser la photosynthèse pour s'alimenter. Ils doivent, comme les animaux, se nourrir de matière organique, en l'occurrence des matériaux ligneux et celluloseux ou des déchets forestiers, agricoles ou industriels. Enfin, dans certains champignons, on trouve de l'urée, la principale composante solide de l'urine des mammifères. Ce que les champignons ont en commun avec les plantes, c'est qu'ils sont immobiles et poussent toute leur vie. Ils absorbent leur nourriture au lieu de l'ingérer, et ils doivent vivre sur leur nourriture comme les végétaux. Cependant, à la différence de ces derniers, qui se nourrissent par assimilation, les champignons envoient des enzymes dans leur substrat et absorbent les molécules digérées. Comme certaines plantes, les champignons peuvent aussi être carnivores en piégeant dans leur mycélium des vers microscopiques.

*La phylogénie moléculaire est l'utilisation de séquences de macromolécules biologiques pour obtenir des informations sur l'histoire évolutive des êtres vivants, et notamment sur leurs liens de parenté (leur phylogénie).

Plastique, quand tu nous tiens

Même le plastique ne fait pas peur aux champignons ! Le plastique, stable, imputrescible, économique et ayant pour certains une bonne résistance aux agents chimiques, aux chocs et à l'abrasion, se paye au prix fort : une fois mis au rebut, il reste des siècles dans l'environnement. C'est ainsi que nos océans abritent des continents-plastique ou continents-poubelles, des plaques translucides de particules de déchets stagnant juste sous la surface de l'eau, et de ce fait indétectables par les satellites. Découverts en 1997, pour celui du Pacifique Nord, et en 2010, pour celui de l'Atlantique Nord (il y en a vraisemblablement cinq, un dans chacun des principaux vortex planétaires), leur existence n'est pourtant pas récente, puisque ce dernier était déjà décrit en 1869 par Jules Verne⁹. À l'époque, les déchets charriés étaient biodégradables, alors qu'aujourd'hui 90 % sont en plastique. Ces plastiques absorbent des polluants comme les POP (polluants organiques persistants) ou le DDT (dichlorodiphényltrichlo-

Même le plastique ne fait pas peur aux champignons !



roéthane). Ils sont avalés par les poissons et les oiseaux marins, ce qui conduit ces animaux à l'empoisonnement et à la famine parce que leur estomac est plein de matières indigestes. Greenpeace rapporte que plus d'un million d'oiseaux marins et cent mille mammifères marins et tortues de mer sont tués chaque année, d'une manière ou d'une autre, par ce plastique, mettant à mal plus de 267 espèces marines¹⁰. Cent millions de tonnes de plastique sont produites par an. En France, à peine un quart des emballages plastique est recyclé.

Plastidépendant

Face à ce constat, deux scientifiques indiens, le professeur Mukesh Doble et Trishul Artham, de l'Indian Institute of Technology Madras, ont mis au point, en 2010, une dégradation du polycarbonate (qui contient le bisphénol A) par des champignons (*Engyodontium album*, *Phanerochaete chrysosporium* et *Penicillium sp.*). Cette technique présentait un désavantage : il fallait au préalable traiter le plastique aux UV et à la chaleur¹¹. Pourtant, tout à fait par hasard, en 2011, un groupe d'étudiants en biochimie de l'université Yale (Connecticut, États-Unis), voulant évaluer la résistance aux résidus de plastiques de plusieurs champignons récoltés par leur soin en Équateur, a découvert que *Pestalotiopsis microspora* désassemblait les chaînes de polyuréthane pour s'en repaître¹². Ce plastique, qui sert à fabriquer des mousses ou des colles, protège aussi de la corrosion, de l'abrasion et de l'érosion

C'est le champignon qui décide

Une équipe mixte de l'Inra et de l'université de Lorraine, le département américain de l'Énergie (DOE) et l'université de Western Sydney ont mis en évidence que la coopération entre l'arbre et le champignon, la mycorhize, n'était pas toujours aussi souhaitée qu'on se l'imaginait. L'histoire se passe entre le peuplier et le laccaire bicolore (*Laccaria bicolor*). Les scientifiques ont découvert que ce n'est qu'en bloquant la défense du peuplier que le champignon peut « coopérer » avec celui-ci. « *Nous qui pensions que la mycorhize constituait une sorte d'aimable commerce équitable, nous sommes obligés de constater aujourd'hui qu'il s'agit plutôt d'une agression dont le champignon sort vainqueur* », commente Francis Martin, qui dirige l'unité mixte de recherche de Nancy. À moins qu'il s'agisse d'un réflexe de l'arbre, vite regretté !

Jonathan M. Plett, & al., *Effector MiSSP7 of the mutualistic fungus Laccaria bicolor stabilizes the Populus JAZ6 protein and represses jasmonic acid (JA) responsive genes*, edited by Jeffery L. Dangl, Howard Hughes Medical Institute and The University of North Carolina at Chapel Hill, 2014.



Laccaria bicolor

des pièces sensibles (en aéronautique notamment). C'est donc une matière omniprésente, très difficilement recyclable, d'autant qu'il existe plusieurs types de polyuréthane, chacun exigeant son propre traitement. En outre, *Pestalotiopsis microspora* ne fait pas qu'escamoter le plastique, il en est dépendant pour son approvisionnement en carbone, et il a un autre atout majeur : il n'a pas besoin d'oxygène pour vivre, et pourrait donc être enfoui dans les décharges.

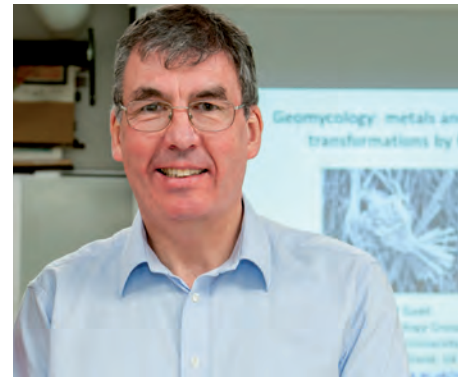
Radioactivité? Même pas peur!

Plus fort que le plastique, la radioactivité! En 2008, une équipe de chercheurs qui travaillaient sur des sites pollués par les essais de munitions à l'uranium appauvri et leur utilisation en Irak et dans les Balkans¹³ a découvert que certains champignons « bloquent » l'uranium appauvri dans une forme minérale, stoppant ainsi la contamination alentour. L'un de ces chercheurs, le professeur Geoffrey Gadd, de l'université de Dundee en Écosse, explique que ce résultat exige une combinaison de facteurs à la fois environnementaux et biologiques. Tout d'abord, l'uranium métalse couvrent d'une couche d'oxydes. L'humidité ambiante amplifie la



Champignons sur de la grenaille de plomb. Les minéraux de plomb sont transformés en une forme moins toxique (photo Geoff Gadd).

« Nous avons montré pour la première fois que les champignons peuvent transformer l'uranium métal en minéraux capables de retenir l'uranium à long terme. »
Geoff Gadd



Geoff Gadd.

Des champignons et des sangliers toxiques

Du fait qu'ils se nourrissent par absorption, les champignons sont dotés d'une puissante capacité d'extraction et de stockage, qui peut tourner à leur désavantage... quand passe un nuage radioactif. Les chiffres de l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire¹) montraient qu'après l'accident nucléaire de Tchernobyl en 1986, la radioactivité des champignons était 5 à 10 fois plus élevée que celle du lait ou des céréales, et elle diminue beaucoup moins vite. Selon le type d'enzyme produit par le champignon, son habitat (prairie, forêts, etc.), son lieu de nutrition (sol, souches, système racinaire des arbres, etc.), et s'il dispose d'un mycélium profond ou superficiel, la contamination au césium, par exemple, va être plus ou moins rapide et durable. La CRIIRAD (Commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité²) a tout mis en œuvre pour alerter et informer les consommateurs. De 1986 à 1997, elle a notamment analysé 900 champignons prélevés dans diverses régions françaises, et a classé les espèces étudiées en trois groupes : faiblement contaminées, avec un taux inférieur à 10 becquerels par kilo de matière fraîche (coprin chevelu, rosé-des-prés ou champignon de Paris, etc.) ou à 60 becquerels (faux-mousseron, morille comestible, morille conique, coulemelle, cèpe d'été); modérément contaminées, avec un taux allant de 65 à 350 becquerels (lactaire sanguin, russule charbonnière, trompette-des-morts, cèpe de Bordeaux, bolets orangé, rude et à pied rouge, tête-de-nègre, etc.) et de 400 à 1 000 becquerels (bolet moucheté, lactaire délicieux, girolle ou chanterelle, etc.); et les espèces les plus contaminées avec plus de 1 000 becquerels (chanterelle jaunissante, pied-de-mouton, chanterelle en tube, bolet bai, bolet à chair jaune, laqué améthyste, petit-gris, etc.).

Cela dit, en tant que consommateurs, ce sont les sangliers qui détiennent le record de radioactivité en se nourrissant de truffes des cerfs, des champignons à fructification souterraine qui concentrent davantage la radioactivité. La législation allemande a même imposé une analyse de radioactivité pour tout sanglier chassé dans la forêt du Palatinat, l'une des plus atteintes par les retombées radioactives³.

Ce que les champignons font avec le césium, ils le font aussi depuis longtemps avec les métaux lourds, à tel point que l'on détecte des teneurs plus élevées dans les champignons que dans le sol environnant. Lors d'une enquête menée par *60 millions de consommateurs*, 46 des 87 champignons sauvages récoltés présentaient des teneurs « non satisfaisantes » en métaux lourds (plomb, mercure et cadmium⁴): « Les cèpes sont particulièrement concernés, car ils sont riches en acides aminés soufrés, qui favorisent l'absorption du mercure présent dans le sol. »

1. Établissement public à caractère industriel et commercial français (EPIC) fonctionnant sous la tutelle conjointe des ministres chargés de la Défense, de l'Environnement, de l'Industrie, de la Recherche et de la Santé. L'IRSN est l'expert public en matière de recherche et d'expertise sur les risques nucléaires et radiologiques.

2. Cette association, qui possède son propre laboratoire d'analyses, est née en mai 1986, au lendemain de la catastrophe de Tchernobyl, à l'initiative d'un groupe de citoyens révoltés par les mensonges officiels et désireux de connaître la vérité sur la contamination réelle du territoire français.

3. En France, la viande de certains sangliers a affiché jusqu'à 2 000 becquerels par kilo alors que le taux autorisé est de 600.

4. « Des champignons un peu trop pollués », *60 millions de consommateurs*, septembre 2003.



Trichoderma reesei

Trichoderma reesei transforme la cellulose en sucres permettant la production « d'éconol », un éthanol produit en particulier à partir de déchets agricoles ou ménagers.

corrosion, ce qui favorise la colonisation fongique, qui produit des substances acides. Ensuite, entre en jeu une interaction entre les formes solubles de l'uranium et du phosphate, qui conduit à la formation de nouveaux minéraux d'uranium qui se déposent autour de la biomasse fongique. « Nous avons montré pour la première fois, explique le professeur Gadd, que les champignons peuvent transformer l'uranium métal en minéraux capables de retenir l'uranium à long terme. » Cela dit, la radioactivité a fait de si gros dégâts à Tchernobyl que les arbres ne se décomposent pas, ce qui favorise les feux de forêt. En 1992, des centaines d'hectares sont partis en fumée, propulsant dans l'air les éléments radioactifs contenus dans les plantes et les sols.

Sauveur du monde?

Ainsi, la mycoremédiation¹⁴, qui vise à utiliser les champignons pour purifier l'environnement terrestre, aquatique ou aérien, est une voie prometteuse. Paul Stamets a mené de nombreuses expériences sur les hydrocarbures, mais également sur les fertilisants, les herbicides, les pesticides, les armes chimiques et leurs résidus, les teintures, les œstrogènes de synthèse, etc. Porté par ses découvertes en ce domaine, comme en agriculture et en mycologie (il a lui-même découvert quatre nouvelles espèces de champignons), Stamets a dressé la liste de six moyens par lesquels les champignons peuvent sauver le monde, ou nous y aider, chacune des espèces ayant sa spécialité: ils restaurent les sols (par exemple, en aidant au reboisement de zones devenues désertiques comme au Sénégal ou au Maroc¹⁵), fertilisent les plantes potagères, dépolluent, agissent en pesticides naturels (par contact ou par ingestion¹⁶), fournissent des antibiotiques et d'autres médicaments et, enfin, fabriquent des carburants. *Trichoderma reesei*, par exemple, un champignon microscopique qui produit en quantité particulièrement importante des enzymes, transforme la cellulose en sucres permettant la production « d'éconol » (ainsi que l'a nommé Paul Stamets), un éthanol produit en particulier à partir de déchets agricoles ou ménagers. Mais dès qu'on parle de carburant, les esprits s'échauffent. Des recherches sont en cours pour ajouter à *Trichoderma reesei* des gènes afin qu'il soit capable de s'attaquer aussi à la lignine tout en supportant des températures plus importantes pour augmenter son rendement. Bien sûr, on nous assure qu'il n'y aura pas de fuites dans l'environnement d'organismes assez voraces et incontrôlables pour s'attaquer à tous nos arbres!

Notes

1. Les vrais champignons (les eumycètes) ont une paroi chitineuse, ils absorbent leur nourriture et ils font des spores ; les faux champignons (les pseudomycètes) ont une paroi cellulosique. Ils sont plus apparentés aux algues. Les agents du mildiou, par exemple, relèvent de cette deuxième catégorie, c'est pourquoi la plupart des antifongiques sont inefficaces sur eux.

2. « Antimicrobial resistance: global report on surveillance » (Résistance aux antimicrobiens : rapport mondial sur la surveillance), OMS, avril 2014, 257 p.

3. Premier rapport de l'OMS sur la résistance aux antibiotiques : une menace grave d'ampleur mondiale, communiqué de presse, 30 avril 2014.

4. La NDM-1 (New Delhi métallobêta-lactamase) est un enzyme qui confère aux bactéries qui le synthétisent une résistance aux antibiotiques de la famille des carbapénèmes, habituellement réservés au traitement des infections multirésistantes.

5. Stamets Paul, *Mycelium Running: How Mushrooms Can Help Save the World*, Ten Speed Press, octobre 2005, p. 35 à 53.

6. Chambon Olivier, *La Médecine psychédélique. Le pouvoir thérapeutique des hallucinogènes*, Éditions Les Arènes, 2009.

7. Stamets Paul, *op. cit.*, p. 86.

8. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des molécules constituées d'atomes de carbone et d'hydrogène qui montrent une forte toxicité. Ils sont sur la liste des polluants prioritaires de l'agence de protection de l'environnement des États-Unis depuis 1976. Aujourd'hui, ils font également partie des listes de l'OMS (Organisation mondiale de la santé) et de la Communauté européenne.

9. François Galgani, responsable de projets environnementaux en Méditerranée à l'Ifremer, a déclaré: « Dans le cas de l'Atlantique Nord, la zone de concentration, correspondant à la mer des Sargasses, est déjà décrite en 1869 par Jules Verne ! Elle concentrait alors ces algues brunes flottantes, dont elle tire son nom, et les débris naturels provenant du Mississippi. » « Vers une surveillance spécifique », interview de François Galgani par Dominique Guillot, *Les Nouvelles de l'Ifremer*, 20 septembre 2013.

10. The trash vortex, Greenpeace, 1^{er} mars 2014.

11. Trishul Artham and Mukesh Doble, « Biodegradation of Physicochemically Treated Polycarbonate by Fungi », *Biomacromolecules*, 2010.

12. Jonathan R. Russell *et al.*, « Biodegradation of Polyester Polyurethane by Endophytic Fungi », *Applied and Environmental Microbiology*, 2011.

Les champignons sont aussi cause de gros dégâts, comme la méréule, qui peut détruire une maison en quelques semaines.

Catastrophes majeures

Même lors de catastrophes naturelles majeures, les champignons peuvent venir à notre secours dans de multiples domaines. Ils peuvent nous aider à recycler efficacement les débris et les substances toxiques, dépolluer les sols et les eaux contaminés et participer à l'assainissement. De plus, ils sont capables de produire en quelques jours de la nourriture de survie, des médicaments et des compléments immunodéfensifs et, à plus long terme, de fabriquer de la matière organique pour l'agriculture.

Un fléau redoutable ?

Les champignons sont aussi cause de maladies, comme les mycoses qui affectent la santé de l'homme, ou de gros dégâts environnementaux, comme la méréule, qui peut détruire une maison en quelques semaines. Matthew Fisher, de l'Imperial College de Londres, a calculé que les maladies fongiques détruisent chaque année pas moins de 125 millions de tonnes de nos cinq cultures principales (riz, blé, maïs, pommes de terre et soja), et que les champignons représentent par leur résistance et leur virulence une menace tant pour la biodiversité que pour la sécurité alimentaire¹⁷. Selon les calculs du chercheur, les spores pathogènes entraînent, pour les seules cultures de riz, de blé et



Méréule tremblante et ses dégâts.

de maïs, un manque à gagner de 60 milliards de dollars (47 milliards d'euros) par an. D'après lui, ce phénomène est en augmentation, et de nouveaux champignons sont impliqués dans plus de 70 % des infections responsables de la disparition d'une plante ou d'un animal (amphibiens – particulièrement touchés –, abeilles, tortues de mer, chauves-souris, etc.). « La hausse alarmante de destruction de végétaux et d'animaux provoquée par de nouveaux types de maladies fongiques montre que nous allons à toute allure vers un monde où les "pourris" sont les grands gagnants », déclare Matthew Fisher. En outre, les champignons seraient responsables de l'augmentation du dioxyde de carbone : 230 à 580 mégatonnes de CO₂ sont émises dans l'atmosphère, alors qu'elles auraient pu être absorbées par des arbres décimés par les moisissures.

C'est peut-être oublier un peu vite que les pathogènes fongiques virulents sont une infime partie d'un règne qui, rappelons-le, nous a donné la pénicilline et compte plusieurs milliers d'espèces qui toutes jouent un rôle vital dans l'écosystème de la Terre. De plus, comme le souligne Paul Stamets, « à cause des activités humaines, nous perdons de nombreuses espèces avant même de les identifier. En fait, à mesure que nous perdons des espèces, nous vivons une dévolution – nous inversons l'horloge de la biodiversité, nous prenons la pente glissante de l'effondrement écologique massif¹⁸. » Bref, la sentence suivante de Stamets est toujours d'actualité : « L'être humain va être confronté à deux choix : rester et trouver des solutions pour sauver l'écosystème ou alors tout simplement partir¹⁹. » 🍄

Kim-Anh Lim

13. Fomina Marina *et al.*, *Fungi Have A Hand In Depleted Uranium's Environmental Fate*, 6 mai 2008, Cell Press.

14. « Mycoremédiation » est un néologisme créé par Paul Stamets à partir du grec *mycos* = champignon, et du latin *remedium* = rétablissement de l'équilibre, remédiation. On parle aussi de fongoremédiation, mycorestoration, mycorétablissement ou de phytorestoration, ce dernier terme étant impropre puisque le champignon n'est pas une plante.

15. Soit par l'introduction en masse d'une souche fongique performante, soit par l'utilisation de plantes dites facilitatrices, ou « nurses », qui vont augmenter le potentiel mycorhizien du sol. Les chercheurs ont en effet montré, lors d'études menées au Sénégal et au Maroc, que ces pratiques améliorent la pousse des plantes dans les sols carencés en nutriments et en milieu aride : mortalité des plants diminuée, croissance en hauteur significativement plus élevée, meilleure croissance racinaire, utilisation des ressources en eau optimisée et donc meilleure résistance au stress hydrique. « La Grande Muraille Verte : comment stopper le désert ? », Gaëlle Courcoux, Fiche d'actualité scientifique n° 353, Institut de recherche pour le développement (IRD), juin 2010.

16. Il existe en effet des champignons entomopathogènes, c'est-à-dire fatals pour certains insectes. Stamets a ainsi débarrassé sa maison de ses termites

en une semaine, en faisant ingérer à ces derniers une forme non sporulante de *Metarhizium*.

Stamets Paul, *op. cit.*, p. 114 à 123. Plus couramment, les champignons agissent par simple contact. « Le champignon perce le tégument de l'insecte, puis se développe à l'intérieur ; il synthétise divers enzymes et toxines qui provoquent la mort du ravageur. [...] Les recherches sur ce type de produits se poursuivent à l'INRA ; elles portent sur l'identification de nouvelles toxines, l'amélioration de la durée de survie du champignon après épandage ou la création de souches hypervirulentes », fiche Bio-insecticides sur le site de l'Inra.

17. Fisher M. C. *et al.*, « Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health », *Nature*, 2012.

18. Stamets Paul, *op. cit.*, p. 11.

19. Paul Stamets présente 6 manières de changer le monde avec les champignons, conférence TED, enregistrée à Monterey, Californie (États-Unis), février 2008. Vidéo disponible en ligne en français avec ce QR code :



Une intelligence mycélienne ?

Le plus grand organisme vivant à l'heure actuelle est... un champignon ! Il a plus de 2 400 ans et a été découvert en 2000, dans une forêt de l'Oregon (États-Unis). Il s'agit d'un champignon géant, *Armillaria ostoyae*, mesurant 5,5 km de diamètre. Son mycélium couvre une superficie de 9 km², et plonge ses filaments sur une épaisseur d'un mètre environ. Il pèse 600 tonnes, soit plus de 4 baleines bleues, le plus gros animal vivant de nos jours. Des ancêtres lointains de son espèce, on ne sait pas grand-chose. Les plus anciens spécimens que nous connaissons ont été fossilisés dans de l'ambre. L'un a 100 millions d'années, il a été trouvé en Birmanie. L'autre, âgé de 92 à 94 millions d'années, se trouvait dans le New Jersey, aux États-Unis. Ces spécimens font partie de deux espèces disparues aujourd'hui, mais le règne des *Fungi*, lui, a bien perduré.

Internet avant l'heure

Au début des années 1990, Paul Stamets parle du mycélium, cette « membrane sensible » du champignon, comme de l'Internet naturel de la Terre : un réseau qui échange constamment des informations, qui réagit à chaque changement, qui est en perpétuelle communication (moléculaire) avec son environnement, et qui élabore des réponses (enzymatiques et chimiques) diversifiées. Le mycélium connecte entre elles les racines des arbres, et les arbres entre eux. Il sait où sont les excès et les manques, et il y remédie, et si une ramification casse, l'acheminement des nutriments et de l'information prend un parcours de substitution. Tout cela fait que le mycélium peut aussi être considéré comme le système immunitaire de notre Terre, comme une conscience fongique collective, une matrice ou une immense autoroute biomoléculaire. Ce que souligne également Stamets, c'est que le mycélium, toujours avide de nourriture et d'expansion, est doué de sensations. Lorsque nous nous promenons dans une forêt, il sait où nous sommes, et il se tient prêt à se jeter sur les débris accumulés sous nos pas (chaque pas influence plus de 500 km

es champignons occupant quasiment tous les écosystèmes terrestres (les champignons aquatiques sont rares) en faisant preuve d'une adaptabilité et de stratégies extrêmement efficaces, on s'est posé la question d'une intelligence mycélienne... et on l'a mise à l'épreuve.

de mycélium). Ce réseau est si efficace qu'il a survécu aux cataclysmes qui ont affecté notre planète depuis plus d'un milliard d'années, et ce jusqu'à pouvoir constituer la plus grande biomasse qu'un organisme vivant puisse produire. Cela est d'autant plus étonnant, souligne Stamets, si l'on songe que les filaments du mycélium ont l'épaisseur d'une paroi cellulaire (notre peau, elle, est constituée de plusieurs couches) qui est en contact direct avec une myriade d'organismes hostiles.

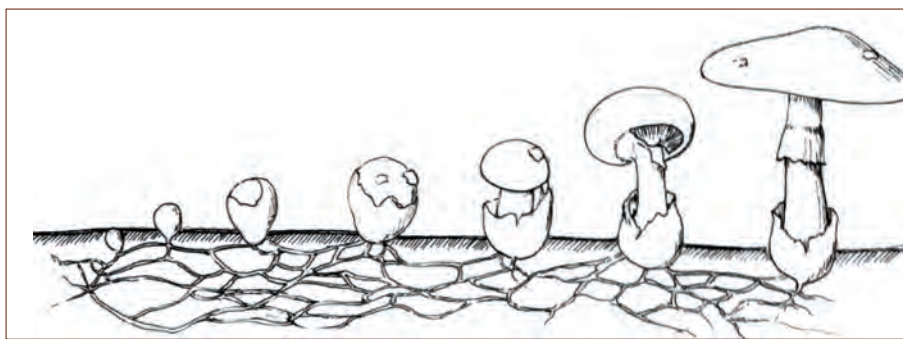
L'énigme du labyrinthe

De quelles compétences et peut-être de quelle intelligence cette capacité de survie peut-elle venir ? *Physarum polycephalum*¹, un organisme longtemps classé parmi les myxomycètes, peut nous aider à le comprendre.

En 2000, le biophysicien Toshiyuki Nakagaki, de l'université d'Hokkaido (Japon), fabrique dans son laboratoire un labyrinthe carré de 3 cm de côté découpé dans une feuille de plastique posée sur une plaque d'agar-agar². Puis, il coupe un *P. polycephalum* en 30 morceaux qu'il dispose en divers endroits de sa construction. Chaque morceau croît à raison de 1,35 centimètre par heure environ, envahissant peu à peu les couloirs humides d'agar-agar tout en évitant le plastique sec des « murs » du labyrinthe. Les différents morceaux finissent par se rejoindre et fusionner en un seul organisme unicellulaire. Puis, Nakagaki place deux petits tas de flocons d'avoine, la nourriture favorite de *P. polycephalum*, un à l'entrée et l'autre à la sortie du labyrinthe. Quatre heures plus tard, les parties de l'organisme situées dans les impasses du labyrinthe ou sur les trajets superflus étaient devenues filamenteuses, tandis que celles qui occupaient le plus court chemin entre les deux tas de nourriture étaient épaisses et vigoureuses.

Mémorisation et anticipation

Huit ans plus tard, des scientifiques de l'université d'Hokkaido, parmi lesquels Toshiyuki Nakagaki, ont publié une autre étude³ qui rendait compte de la capacité de



Le mycélium

Le mycélium est un réseau de filaments dotés d'un grand pouvoir de pénétration. Pour se nourrir, il sécrète des enzymes qui décomposent les matières organiques parfois très résistantes et absorbe les éléments carbonés. Il croît toujours en longueur, parfois jusqu'à 1 km par jour, ce qui lui permet d'explorer de très grands volumes de sol ou de racines (mille mètres de filaments mycéliens pour un mètre de racines).



Andy Adamatzky et Jeff Jones, deux informaticiens de l'université de Bristol, se sont livrés à différentes expériences en utilisant *P. Polycephalum* pour modéliser le réseau routier étasunien.

P. polycephalum – toujours, rappelons-le, unicellulaire, sans cerveau et sans système nerveux – à mémoriser et à anticiper des changements dans son environnement. Durant les dix premières minutes de chaque heure, les scientifiques abaissaient la température et l'humidité autour de *P. polycephalum*, qui ralentissait alors ses mouvements. Après trois vagues de froid successives, les scientifiques s'abstenaient de modifier tout paramètre, mais *P. polycephalum* se mettait quand même au ralenti. Il cessa de le faire quand les conditions furent durablement stables, mais il a suffi d'une seule autre vague de froid pour qu'il ralentisse de nouveau en se souvenant de l'intervalle de 60 minutes. Pour sa survie d'ailleurs, *P. polycephalum* a également montré qu'il ne se jetait pas sur n'importe quelle nourriture, même si toutes celles qu'on lui proposait étaient adaptées à son métabolisme, mais choisissait celle qui comportait l'équilibre optimal de nutriments⁴.

L'allié des ingénieurs

Comment aller plus loin ? Qu'il s'agisse de systèmes sociaux ou biologiques, les réseaux de transport sont cruciaux et omniprésents. Tous doivent répondre à des critères communs : performance dans le transport des ressources, des énergies et de l'information, fiabilité, efficacité, robustesse et « résilience intrinsèque » en cas de déconnexion accidentelle. La longévité millénaire et l'adaptabilité de certains réseaux biologiques, mycéliens notamment, démontrent leurs remarquables capacités en ce qui concerne le coût (là en énergie, mais pour nous aussi en argent), l'efficacité et la résilience. Pourquoi ne nous apporteraient-ils pas des solutions ? C'est ce raisonnement qui a incité une équipe de chercheurs japonais et anglais⁵, parmi lesquels encore Toshiyuki Nakagaki, à mettre en application pour la première fois en 2009 les capacités de *P. polycephalum*

sur les réseaux humains, en l'occurrence le réseau ferré de Tokyo. L'expérience principale a consisté, dans une boîte de Petri, à placer un tas de flocons d'avoine pour représenter Tokyo, et trente-six autres tas pour chacune des trente-six villes de l'agglomération tokyoïte. N'aimant pas la lumière, les zones de reliefs infranchissables ont été éclairées pour qu'elles soient contournées. *P. polycephalum* a commencé par s'étendre sur toute la surface disponible. Puis, une fois les points de nourriture localisés, il n'a développé que les artères les plus intéressantes, laissant toutefois un maillage léger, un réseau secondaire, entre tous les points de nourriture de manière à pallier une rupture de connexion. En 26 heures, *P. polycephalum* a tissé un réseau très semblable à l'actuel réseau ferré tokyoïte, qui a demandé bien plus d'heures de réflexion ! À partir de cette expérience, Atsushi Tero et son équipe ont élaboré un modèle mathématique, un algorithme, destiné à améliorer nos réseaux existants ou futurs (métro, autoroutes, téléphonie, distribution électrique, etc.). Par la suite, des expériences similaires ont été conduites par d'autres équipes tant avec *P. polycephalum* qu'avec son algorithme, sur les réseaux autoroutiers anglais, espagnol, étasunien. Plus généralement, il aide à la résolution des problèmes d'optimisation des réseaux de flux.

Reconsidérer l'intelligence

Comme le souligne Nakagaki, *P. polycephalum* est auto-organisé, puisqu'il n'a ni dirigeant ni conducteur, pas plus qu'il n'a de système nerveux ou de cerveau. Comment une seule cellule isolée peut-elle être capable de mémoriser et d'anticiper des schémas temporels ? Personne n'est en mesure de l'expliquer, mais Nakagaki conserve le pressentiment que *P. polycephalum* pourrait être plus malin que prévu, et il incite à aller plus loin en affirmant que

« les résultats de cette seule cellule sont peut-être une chance de reconsidérer ce qu'est l'intelligence⁶ ».

Aux fondements de l'humanité?

Par-delà tout ce que nous venons de voir, les champignons pourraient être à l'origine de notre dimension spirituelle. Les plus anciennes représentations de champignons que nous connaissons sont celles qui figurent parmi les gravures rupestres néolithiques des grottes du Tassili n'Ajjer (Algérie). Elles datent d'environ 8000 ans, et il s'agit de champignons hallucinogènes. Des chamans à têtes de champignon en tiennent dans leurs mains dans des scènes « hallucinées⁷ ». Celui qui a théorisé l'importance de ces champignons dans l'histoire humaine est l'écrivain et philosophe américain Terence McKenna (1946-2000). Ce proche à la fois de Timothy Leary (1920-1996), chercheur à l'université Harvard (Massachusetts, États-Unis), et du biochimiste et chercheur britannique Rupert Sheldrake se définissait comme un explorateur plutôt que comme un scientifique, même si ce domaine faisait partie de ses sujets de spéculation; spéculations que l'on est libre de suivre ou non, mais qui suscitent des interrogations qui ne manquent pas d'intérêt. Pour McKenna, la présence, au début accidentelle, de psilocybine dans l'alimentation de nos lointains ancêtres



Interprétation d'un détail d'une fresque du Tassili n'Ajjer (Algérie).

a engendré un certain nombre de bouleversements liés aux effets propres à cette substance. Sur le plan religieux, par exemple, l'ingestion rituelle de ces champignons a conduit à la religion générique. Toutes les autres sont des adaptations de celle-ci, née des effets de la psilocybine⁸ : « Dans ses manifestations paroxystiques, le chamanisme n'est pas simplement religion, mais connexion dynamique avec la totalité vivante de la planète. Partant du principe que les hallucinogènes agissent dans l'environnement naturel comme des messagers moléculaires, ou exophéromones, nous pouvons

Pour McKenna, la présence, au début accidentelle, de psilocybine dans l'alimentation de nos lointains ancêtres a engendré un certain nombre de bouleversements liés aux effets propres à cette substance.

Des domaines de recherche interdits ?

Plusieurs études récentes indiquent les bienfaits de substances psychédéliques lorsque les doses sont parfaitement maîtrisées. Le bannissement des produits classés comme stupéfiants, notamment par le gouvernement fédéral américain, complique énormément le travail des chercheurs, qui doivent obtenir des autorisations particulières pour étudier un produit. Ces règles s'assouplissent progressivement depuis quelques années et les premières études commencent à être publiées, avec des résultats passionnants. Dans les traitements de l'addiction, de la dépression ou du stress post-traumatique par exemple, des substances comme la psilocybine (extraites des « champignons magiques ») ou même la MDMA (« ecstasy ») ont montré des effets thérapeutiques significatifs et encourageants. Une étude de 2011¹ conduite à l'université Johns-Hopkins (Baltimore) a montré que la juste dose de psilocybine administrée à des volontaires permettait de vivre une expérience transcendante de grande valeur. Les effets restent sensibles 14 mois après et montrent une croissance psychologique durable. 94 % disent que cette expérience a été un des cinq moments les plus importants de leur vie. Roland Griffiths, l'auteur principal de l'étude, a souligné qu'ils avaient réussi à « optimiser les effets positifs persistants et

éviter la peur et l'anxiété qui peuvent survenir et être très perturbatrices ». Les volontaires avaient en moyenne 46 ans, étaient diplômés universitaires et orientés vers la spiritualité pour la plupart. Ces transformations sont hautement atypiques, soulignent les chercheurs, parce que les personnalités ont tendance à être très « définies » à cet âge. Une autre étude de 2010² a montré que la psilocybine présentait de l'intérêt pour les patients en phase terminale de cancer, en diminuant l'anxiété et réduisant significativement la dépression. Enfin, une étude de 2012³, publiée dans le *British Journal of Psychiatry*, a montré que la psilocybine jouait un rôle important dans le rappel de souvenirs, ce qui pouvait avoir un effet intéressant dans les traitements de souvenirs traumatisants ou de pensées intrusives.

Jocelin Morisson

1. Katherine A. Maclean *et al.*, « Mystical experiences occasioned by the hallucinogen psilocybin lead to increases in the personality domain of openness », *Psychopharmacology*, 2011.

2. Charles S. Grob *et al.*, « Pilot Study of Psilocybin Treatment for Anxiety in Patients With Advanced-Stage Cancer », *JAMA Psychiatry*, 2010.

3. Carhart-Harris R. L. *et al.*, « Implications for psychedelic-assisted psychotherapy: functional magnetic resonance imaging study with psilocybin », *Brit. J. Psychiatry*, 2012.

en conclure que la relation entre les primates et les plantes est un transfert d'informations d'une espèce à l'autre. [...] En l'absence de plantes hallucinogènes, le développement culturel d'une société, quand il a lieu, procède très lentement. En revanche, nous avons constaté qu'en présence d'hallucinogènes, une culture donnée gagne accès à des informations, des apports sensoriels et des schémas comportementaux sans cesse renouvelés, qui la poussent constamment vers des niveaux d'introspection plus élevée. Les chamans représentent l'avant-garde de cette procession, de cette progression créative. » Les changements fondamentaux apportés par les champignons sont loin de n'être que religieux. McKenna poursuit : « [...] les psychédéliques naturels ont été des agents de féminisation : ils ont tempéré et civilisé les valeurs égocentriques du chasseur solitaire par des préoccupations



féminines concernant la progéniture et la survie collective. L'exposition prolongée et répétée à l'expérience psychédélique et l'irruption de l'Autre Absolu dans la réalité ordinaire, à travers le rituel de l'extase hallucinatoire, érôdaient constamment la partie du psychisme humain qu'on appelle actuellement l'ego. Quel qu'ait été le lieu ou l'époque de son apparition, l'ego a agi comme une tumeur solide ou une obstruction dans le flux énergétique de la psyché⁹. » C'est à cette époque où notre régime alimentaire incluait de la psilocybine « que les valeurs de la communauté, l'altruisme, la langue, la planification à long terme, la conscience de cause à effet, toutes les choses qui nous distinguent ont été établies¹⁰. » Mais il y a quelques millénaires, explique McKenna, quand d'autres changements climatiques ont fait disparaître la psilocybine de notre régime alimen-

taire, n'ayant plus rien pour contrer la tendance naturelle à des hiérarchies de dominance mâle, nos comportements brutaux se sont exprimés à nouveau pour nous conduire là où nous sommes aujourd'hui.

Conclusion

Soyons clairs, nous ne faisons pas l'apologie de la consommation de psilocybine ou de toute autre drogue, qui ne sont qu'un instrument de contrôle, comme le démontre brillamment *Les États-Unis et la drogue. Une guerre sans fin*¹¹, un documentaire primé par le festival Sundance, le principal festival de cinéma indépendant. Cela d'autant plus qu'il existe une drogue puissante, sans effet secondaire délétère, accessible à tous – même aux plus fragiles –, qui peut faire peur à n'importe quel pouvoir, c'est... la méditation. Les neurosciences apportent en effet tous les jours la preuve qu'elle modifie durablement, comme toute drogue, les fonctions physiologiques et psychiques de l'individu. Cela dit, quels champs les scientifiques doivent-ils explorer pour trouver les racines de l'intelligence d'un organisme unicellulaire sans cerveau ni système nerveux? 🍄

Kim-Anh Lim

Notes

1. *Physarum polycephalum* est une espèce de myxomycètes de la famille des *Physaraceae*, vivant dans des zones fraîches et humides telles que les tapis de feuilles des forêts ou le bois mort. Cet organisme unicellulaire contient un grand nombre de noyaux. Il se présente généralement sous la forme d'une moisissure visqueuse de couleur jaune. Il se nourrit de spores de champignons, de bactéries et autres microbes. Très facile à cultiver *in vitro*, on l'utilise comme organisme modèle pour de nombreuses études sur les mouvements amiboïdes et la motilité cellulaire. L'une de ses particularités est son réseau de veines et de canaux dans lequel circule du cytoplasme. Aux extrémités du réseau se trouvent des « feuillets » dont la pointe peut explorer loin.
2. Toshiyuki Nakagaki, Hiroyasu Yamada & Ágota Tóth, « Intelligence: Maze-solving by an amoeboid organism », *Nature*, septembre 2000.
3. Saigusa Tetsu *et al.*, « Amoebae Anticipate Periodic Events », *Physical Review Letters*, 2008.
4. Dussutour A., Latty T., Beekman M., Simpson S. J., « Amoeboid organism solves complex nutritional challenges », Centre de recherches sur la cognition animale, université Paul-Sabatier, Toulouse, France. *National Academy of Sciences*, 2010.
5. Atsushi Tero *et al.*, « Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design », *Science*, 2010.
6. Jeremy Narby, *L'Intelligence dans la nature, en quête du savoir*, Buchet-Chastel, 2005.
7. Samorini G., « The oldest representations of hallucinogenic mushrooms in the world », *Integration*, 1992.
8. La psilocybine se retrouve dans environ 186 espèces de champignons

avec des doses très variables selon les espèces. On trouve ces dernières un peu partout dans le monde, mais certaines sont menacées ou ont déjà disparu à la suite de la destruction ou de l'homogénéisation des habitats (forestiers notamment, avec la raréfaction des arbres sénescents et des gros bois morts en forêt).

La psilocybine procure une vision décuplée, une meilleure compréhension de soi-même, une réceptivité à l'autre aiguisée, une sensation de liberté et d'harmonie, voire des révélations mystiques, ainsi que : introspection, désinhibition, euphorie, fou rire, réémergence des souvenirs oubliés (pour le meilleur ou pour le pire), hallucinations visuelles et sonores. Les mauvaises expériences consistent en crises d'angoisse et hallucinations terrifiantes, et elles peuvent engendrer un vrai traumatisme avec des angoisses incontrôlables, des phobies, un état confusionnel, des bouffées délirantes, qui peuvent être irréversibles. On parle alors de « syndrome post-hallucinatoire persistant ». Sur le plan purement physique, les risques sont : l'allergie respiratoire, mais aussi une arythmie pouvant conduire à la défaillance cardiaque et à l'infarctus.

9. McKenna Terence, *La Nourriture des dieux en quête de l'arbre de la connaissance originelle, une histoire révolutionnaire des plantes, des drogues et de l'évolution humaine*, Éditions Georg, 1999.

10. Interview réalisée en 1993 par Gracie et Zarkov, mais non publiée par Mondo 2000, comme il est souvent rapporté. Disponible sur le Web.

11. *Les États-Unis et la drogue. Une guerre sans fin*, titre original : *The house I Live In*, Eugene Jarecki, producteurs : Christopher St. John, Melinda Shoppin, Sam Cullman, Eugene Jarecki, 2012. Ce documentaire a remporté le grand prix du jury, la récompense la plus importante au Festival de Sundance 2012.

Pour en savoir plus

Silar Philippe, Malagnac Fabienne, *Les Champignons redécouverts*, Éditions Belin, 2013, 224 p.
Francis Martin, *Tous les champignons portent-ils un chapeau ?*, Éditions Quae, 2014, 182 p.
Stamets Paul, *Mycelium Running: How Mushrooms Can Help Save the World*, Ten Speed Press, octobre 2005, 356 p.

Stamets Paul, *Growing Gourmet and Medicinal Mushrooms*, Ten Speed Press, octobre 2000, 614 p.
Singh Harbhajan, *Mycoremediation: Fungal Bioremediation*, Wiley-Blackwell, décembre 2006, 592 p.
Jeremy Narby, *L'Intelligence dans la nature, en quête du savoir*, Buchet-Chastel, 2005, 292 p.