

formation d'étoiles et par l'émission X ou radio issue des environs d'un trou noir supermassif. Nous devons prendre ces deux processus en flagrant délit. Et c'est peut-être cela que nous avons fait récemment.

Il y a une dizaine d'années, Charles Steidel, de l'Institut de technologie de Californie, et ses collaborateurs ont découvert une nouvelle classe d'objets qui semble être une signature observationnelle du refroidissement : les nuages Lyman-alpha. Lyman- α désigne l'une des raies d'émission lumineuse de l'hydrogène.

Grosses masses nuageuses

Ces objets semblent être des masses nuageuses et lumineuses pouvant atteindre 300 000 années-lumière de diamètre, beaucoup plus que notre galaxie, la Voie lactée, ce qui les place parmi les plus gros objets lumineux de l'Univers jeune. Les astronomes en ont, depuis, découvert des quantités. Le rayonnement Lyman- α observé ressemble étonnamment à la signature radiative prédite théoriquement pour un écoulement de gaz froid en direction de jeunes galaxies.

Cependant, de nombreux autres processus astrophysiques pourraient être responsables de l'émission Lyman- α . Par exemple, la lumière ultraviolette ou le vent galactique pourraient « pomper de l'énergie » dans les nuages et les faire briller. À l'aide de *Chandra*, mes collègues et moi avons montré que de nombreux nuages Lyman- α contiennent des galaxies pourvues de trous noirs en phase de croissance active qui brillent fortement dans le domaine X. Cette activité s'accompagne souvent d'une intense formation d'étoiles, mise en évidence par l'émission infrarouge au milieu des couches de poussière qui obscurcissent les pouponnières stellaires. Nous avons calculé que l'énergie libérée par ces processus est plus que suffisante pour alimenter l'émission Lyman- α . Il se peut donc que la lueur des nuages résulte non pas d'un refroidissement, comme beaucoup le pensent, mais d'un chauffage.

Plutôt que de clarifier la situation, les nuages Lyman- α ont donc encore davantage brouillé les pistes. Nous devons maintenant concevoir et effectuer de nouvelles observations pour essayer de dévoiler ce qui se passe vraiment. Dans un cas comme dans l'autre, les nuages Lyman- α sont un

type d'objets susceptible de combler certaines lacunes dans notre compréhension de l'origine des galaxies.

L'observation que le milieu intergalactique entourant les galaxies jeunes et actives est inondé de rayonnement pourrait contribuer à résoudre un autre problème des modèles de formation des galaxies. D'après des simulations à très haute résolution de la matière noire, les galaxies telles que la Voie lactée devraient être accompagnées de milliers de galaxies naines tournant autour d'elles comme des abeilles autour d'une ruche. La Voie lactée a certes quelques compagnons nains, mais bien moins nombreux que ne le prédisent les simulations.

Une solution possible à ce problème est que les galaxies naines se sont effectivement formées dans l'Univers jeune, mais que leurs galaxies-parents les ont soufflées par leur rayonnement et leurs vents. Ce tir de barrage a dépouillé de baryons les galaxies naines ayant réussi à en accumuler, ce qui n'a laissé que des masses de matière noire dénudées, errant depuis à la périphérie des galaxies-parents.

Classiquement, nous nous représentons les galaxies lumineuses comme des univers-îles isolés et discrets, pour reprendre les termes du philosophe allemand Emmanuel Kant. D'une certaine manière, c'est vrai. Mais les îles galactiques lumineuses sont juste la partie visible d'un océan beaucoup plus vaste de matière baryonique qui nous échappe encore. Ce matériau imprègne tout l'Univers, distribué et mis en forme par une vaste architecture sous-jacente de matière noire, en constante évolution sous l'effet de la gravité.

Une nouvelle vision des galaxies

Tous ces baryons ont connu le même état initial : un milieu brûlant tout neuf qui a rapidement formé les premiers éléments, hydrogène et hélium, ainsi que de petites quantités de deutérium et de lithium. Ce que nous appelons des galaxies s'est formé à partir de cette matière première, concentrée par la gravité. Mais ces structures baryoniques ne sont pas figées. La matière se déplace le long de ces structures dans le cadre d'un vaste cycle en place depuis le Big Bang. Les influences concurrentes de la gravité et de la rétroaction galactique entraînent le refroidissement du gaz tombant sur les galaxies, puis son éjection hors des galaxies.

De récentes simulations numériques, réalisées par Rob Crain, de l'Université Swinburne de technologie de Melbourne, en Australie, Benjamin Oppenheimer, de l'Université de Leyde aux Pays-Bas, et leurs collaborateurs, suggèrent que jusqu'à la moitié des baryons aujourd'hui contenus dans les galaxies de l'Univers local sont passés au moins une fois dans le milieu intergalactique, et souvent de nombreuses fois. Les baryons dont notre corps est composé prennent part à ce cycle depuis 14 milliards d'années ; de la matière de notre ongle, par exemple, a pu être formée au sein d'étoiles d'autres galaxies, puis s'exiler durant des milliards d'années dans l'espace intergalactique avant de trouver asile dans notre Système solaire. Nous ne sommes qu'une phase éphémère, l'hôte d'un instant de cette rare substance que nous qualifions d'ordinaire.

Cette idée de cycle baryonique est à la base d'une nouvelle vision de l'évolution des galaxies, où celles-ci ne sont qu'une petite composante de l'évolution à grande échelle du milieu intergalactique. L'Univers baryonique est essentiellement gazeux, et non galactique. Le milieu intergalactique est le champ de bataille de diverses forces, et au milieu de ce maels-tröm se forment des galaxies. Les galaxies ne constituent qu'une étape de traitement au cours d'un cycle qui fait constamment passer les baryons d'une phase à l'autre, et à tout instant, la plupart des baryons se trouvent en dehors des galaxies.

Nous avons, peut-être sentimentalement, une considération particulière pour les galaxies : la Voie lactée est notre habitat cosmique, une vaste demeure brillante et complexe plongée dans l'obscurité du cosmos. D'un point de vue anthropique, nous avons la chance d'exister à un moment où les baryons qui constituent la Terre sont sous une forme froide et stable. Cela ne sera pas toujours le cas. La mort du Soleil, dans cinq milliards d'années environ, fera brûler les planètes internes, s'évaporer les planètes externes, et redispersera progressivement les éléments lourds résultants dans le milieu interstellaire. À moins que l'humanité ne réussisse à se sortir de ce cycle en développant la capacité technique de s'échapper du Système solaire, les cendres de tout ce qui a jamais existé sur Terre sont vouées à être restituées, enrichies, au cosmos. Et c'est ainsi que le cycle se poursuivra. ■

Des hallucinogènes médicaments

Roland Griffiths et Charles Grob

Les hallucinogènes, telle la psilocybine extraite de champignons, modifient l'humeur. Ils sont à nouveau étudiés chez l'homme, car ils pourraient diminuer l'anxiété ou soulager la douleur.

Au printemps 2004, Sandy Lundahl, 50 ans, s'est présentée au Centre de recherche de biologie comportementale de la Faculté de médecine à l'Université Johns Hopkins, aux États-Unis. Elle était volontaire pour une série d'expériences sur les hallucinogènes, la première autorisée aux États-Unis depuis plus de 30 ans. Elle a rempli des questionnaires, discuté avec les deux expérimentateurs qui allaient rester près d'elle pendant les huit heures que devait durer l'expérience et s'est installée dans l'espace aménagé à cette fin. Elle a alors avalé deux comprimés et s'est allongée sur le divan, avec un masque sur les yeux et des écouteurs diffusant de la musique classique sélectionnée pour qu'elle se détende.

Les capsules contenaient une quantité importante de psilocybine, la principale substance active des champignons hallucinogènes (voir la figure 3). À l'instar du LSD et de la mescaline, la psilocybine produit des changements de l'humeur et de la perception, mais rarement de vraies hallucinations. À la fin de l'expérience, lorsque

L'ESSENTIEL

✓ Des centaines d'études sur les hallucinogènes ont été publiées dans les années 1950 et 1960. Ces molécules pourraient soulager des patients souffrant de divers troubles psychiatriques.

✓ Les expériences chez l'homme ont dû s'arrêter à cause de restrictions sur la recherche, imposées suite à l'usage illicite de ces drogues.

✓ Aujourd'hui, on teste si les hallucinogènes, notamment la psilocybine, peuvent soulager l'anxiété des patients cancéreux ou aider les personnes dépendantes à se libérer de leur addiction.

les effets de la psilocybine se sont dissipés, S. Lundahl, qui n'avait jamais consommé d'hallucinogènes au préalable, a rempli de nouveaux questionnaires. Elle a indiqué qu'elle avait vécu une expérience de type mystique, semblable à celle rapportée par des personnes en quête de spiritualité dans certaines cultures. Elle s'était alors sentie heureuse et avait perdu le sens du temps et de l'espace. Mais l'état modifié de conscience qu'elle avait vécu durant quelques heures allait changer durablement son humeur.

Des états modifiés de conscience

Un an plus tard, S. Lundahl précisa qu'elle pensait tous les jours à cette expérience et qu'elle était désormais de meilleure humeur et plus satisfaite de sa vie. S. Lundahl était l'une des 36 volontaires ayant participé à notre étude, commencée en 2001 et achevée en 2006, avec un suivi des participants pendant deux ans. La majeure partie de la communauté scientifique a alors salué la renaissance de ce



domaine de recherche, abandonné pendant des dizaines d'années.

À l'Université Johns Hopkins, les travaux sur la psilocybine s'effectuent selon deux axes. Le premier explore les effets psychologiques de cette molécule chez des volontaires sains. Le second évalue si les états modifiés de conscience provoqués par les hallucinogènes peuvent soulager diverses maladies mentales et comportementales, pour lesquelles les traitements actuels sont peu efficaces.

La substance utilisée dans ces études est la psilocybine, un hallucinogène dit classique. Comme les autres molécules de cette classe – la psilocine (le principe actif de la psilocybine), la mescaline, la diméthyltryptamine ou DMT et le LSD –, la psilocybine a une structure chimique proche d'un neurotransmetteur, la sérotonine (voir la figure 2). Cette molécule de communication entre neurones agit dans diverses régions cérébrales et régule plusieurs fonctions importantes, dont l'humeur, la mémoire, l'appétit, la sexualité et le sommeil. Ces hallucinogènes se lient aux récepteurs neuronaux de la sérotonine.

D'autres substances – également nommées hallucinogènes par le grand public et les études épidémiologiques – appartiennent à d'autres classes pharmacologiques que la psilocybine et exercent des effets différents. Ce sont par exemple la kétamine, la MDMA (nommée « ecstasy » en France), la salvinorine A et l'ibogaïne. Ces composés ont aussi un potentiel thérapeutique.

Des tests scientifiques avec des volontaires

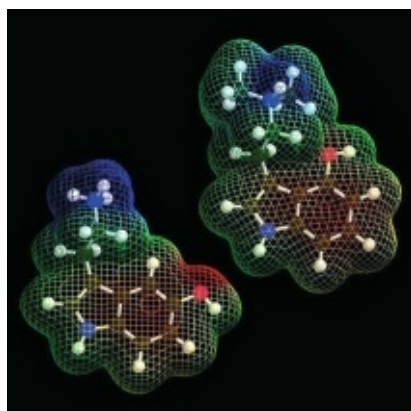
Les premières études concernant le rôle thérapeutique des hallucinogènes datent des années 1950 et ont impliqué des milliers de participants. Certaines suggéraient que les hallucinogènes pourraient traiter la dépendance aux drogues et soulager la détresse psychologique de malades condamnés.

Mais cette recherche s'est arrêtée au début des années 1970, quand l'utilisation des hallucinogènes, notamment le LSD, à des fins récréatives se développa. En 1963, Timothy Leary et Richard Alpert,

1. LES HALLUCINOGENES engendrent des états modifiés de conscience, qui peuvent changer durant plusieurs heures l'humeur et le comportement de la personne qui les a consommés.

de l'Université Harvard, ont été licenciés, car ils avaient été accusés de s'être livrés à des expériences non conventionnelles avec des hallucinogènes, et d'avoir fourni de la psilocybine à un étudiant. Ce domaine de recherche a pâti de cette affaire. Puis une loi promulguée aux États-Unis sur le contrôle des drogues en 1970 a placé les hallucinogènes classiques dans le tableau des stupéfiants ; de nouvelles limites ont été imposées à la recherche chez l'homme, les financements publics ont été interrompus et les chercheurs de ce domaine ont été marginalisés.

Plusieurs décennies se sont écoulées avant que des études scientifiques rigoureuses chez l'homme ne soient à



Heffter Research Institute, Santa Fe, USA

2. LES STRUCTURES MOLÉCULAIRES de la sérotonine (*en bas*) et de la psilocine (*en haut*), le principe actif de la psilocybine, sont proches. C'est aussi le cas du LSD, de la DMT et de la mescaline.

nouveau autorisées. Ce sont les états modifiés de conscience engendrés par les hallucinogènes qui intéressent les chercheurs, car ils provoquent des changements positifs, rapides et durables de l'humeur et du comportement – des modifications que des psychothérapies seraient plus longues à obtenir.

À l'Université Johns Hopkins, nous avons montré que de telles expériences peuvent être pratiquées au laboratoire chez de nombreuses personnes. Elles permettent, pour la première fois, des analyses scientifiques rigoureuses et prospectives, et les volontaires sont suivis avant et après la consommation de l'hallucinogène. Les chercheurs peuvent ainsi observer

La recherche psychédélique en France et en Europe

L'Association française *Arthemoc*, qui a organisé à Paris plusieurs colloques internationaux en partie consacrés à la recherche contemporaine sur les hallucinogènes, ou psychédéliques, a remis en 2009 un rapport de prospective destiné à l'Agence nationale de la recherche. Pourtant, en France, il n'existe aujourd'hui aucun programme scientifique, malgré des études pionnières réalisées sur la psilocybine.

Le mycologue Roger Heim (1900-1979), alors directeur du Muséum national d'histoire naturelle de Paris, coordonna en 1958 une première étude multidisciplinaire intitulée *Les champignons hallucinogènes du Mexique*. Des spécimens mexicains cultivés au Muséum ont été envoyés au chimiste suisse Albert Hofmann, qui isola et synthétisa la molécule de psilocybine en un temps record. L'intérêt de Heim dépassait le cadre de la mycologie : il entra en contact avec le psychiatre et neurologue français Jean Delay (1907-1987) de l'Hôpital Saint-Anne, qui coordonna un programme d'expérimentations thérapeutiques avec la psilocybine. En 1961, lors d'une conférence de l'Association médico-psychologique royale de Londres, ayant pour thème *Les drogues hallucinogènes et leur usage thérapeutique*, des experts internationaux de diverses disciplines présentaient des résultats encourageants, suggérant les effets bénéfiques des psyché-

déliques dans diverses pathologies. En 1967, l'Assemblée mondiale de la santé adopta une résolution dont l'application mit un frein à la recherche psychédélique chez l'homme. En France, la plupart des psychédéliques sont classés comme stupéfiants et sont considérés comme des substances ayant un fort potentiel d'abus, des effets nocifs importants et n'ayant pas de valeur thérapeutique notable.

Bénéfiques pour la santé ?

Pourtant, les études récentes montrent diverses applications thérapeutiques et une relative innocuité quand leur administration est encadrée. Dans certains cas, ces substances permettraient de traiter des maladies invalidantes. Par exemple, des scientifiques de Harvard ont fait état de l'efficacité de la psilocybine et du LSD pour traiter les algies vasculaires de la face (des céphalées extrêmement violentes et douloureuses) chez certains patients ne répondant à aucun traitement classique. Ils testent actuellement le 2-bromo LSD, qui a une structure semblable au LSD, mais qui n'est pas psychoactif.

Ainsi, chez l'homme, la recherche sur les psychédéliques a lieu en majorité aux États-Unis et est surtout financée par deux associations : l'Institut Heffter et la Maps (*Multi-disciplinary association for psychedelic studies*). En Europe, il existe peu de fonds et d'intérêt pour ces tra-

vaux, et les rares études menées dans ce domaine sont aussi financées par ces associations américaines.

La fondation *Beckley*, située en Angleterre, est une exception. Elle finance entre autres une étude du Département de neuropsychopharmacologie à l'*Imperial College* de Londres : grâce à l'imagerie cérébrale par résonance magnétique fonctionnelle, les chercheurs observent les effets de la psilocybine. Leurs résultats préliminaires montrent une modulation du cortex cingulaire ventromédian, une structure impliquée dans la dépression qui réprimerait des données inconscientes. Une étude en cours examine l'effet possible de la psilocybine sur la dépression et les souvenirs refoulés. À Barcelone, l'équipe de Jordi Riba étudie depuis une dizaine d'années les effets de l'ayahuasca, une décoction psychoactive amazonienne. Elle a montré que cette substance n'est pas toxique et qu'elle interagit avec les systèmes neuro-naux responsables de l'intéroception (la sensibilité liée aux stimulus internes) et des émotions.

En Allemagne, Torsten Passie participe à l'étude de Harvard sur le 2-bromo LSD. À l'Université de Cologne, l'équipe d'Euphrosyne Gouzoulis-Mayfrank travaille sur la mescaline, la psilocybine et la DMT ; elle étudie notamment leurs effets neurobiologiques et cognitifs. À l'Hôpital universitaire de Zurich, le groupe de Franz Vollenweider effectue de-

puis plus de dix ans un travail pionnier dans la neuropsychopharmacologie de la MDMA, de la psilocybine, de la DMT et de la kétamine. Il a montré que les psychédéliques modulent les réseaux neuronaux impliqués dans les troubles de l'humeur et de l'affect ; ils pourraient en diminuer les symptômes. Quant au psychiatre suisse Peter Gasser, il mène une étude clinique sur la psychothérapie associée au LSD pour soulager l'anxiété de patients en phase terminale de cancer, la première avec le LSD depuis 35 ans. Enfin, en Suisse, Peter Oehen réalise en ce moment un essai thérapeutique avec de la MDMA pour traiter le trouble du stress post-traumatique. L'armée américaine, consciente de l'enjeu, vient de donner le feu vert à des essais thérapeutiques sur des vétérans souffrant de stress post-traumatique lié à la guerre.

Les usages thérapeutiques supervisés de ces substances permettront-ils de lutter contre des problèmes de santé publique majeurs, tels que la dépression et la dépendance ? Les résultats actuels sont prometteurs, mais des études complémentaires à grande échelle seraient nécessaires. Les chercheurs, les méthodes et les équipements existent, mais le soutien institutionnel et financier fait défaut.

Alexandre Lehmann

est postdoctorant à l'Université de Montréal et cofondateur de l'Association *Arthemoc*