



Astrophysique

Les bienfaits des trous noirs

Caleb Scharf

Le monstre supermassif qui engloutit de la matière
au centre de la Voie lactée a peut-être joué
un rôle clef dans l'apparition de conditions propices
à la vie dans notre région de la Galaxie.

Dans quelle mesure l'apparition de la vie sur notre planète est-elle liée à l'état actuel et à l'évolution passée de ce vaste agencement d'étoiles qu'est notre Galaxie ? De nombreux phénomènes cosmiques sont susceptibles d'influer sur l'existence de la vie, mais certains comptent un peu plus que d'autres. Les trous noirs supermassifs – des monstres de millions, voire de milliards de masses solaires tapis au cœur de certaines galaxies – en font partie. Aucun autre objet dans l'Univers ne convertit avec autant d'efficacité la matière en énergie. Aucun n'est capable d'expulser de la matière à une vitesse proche de celle de la lumière, sur des dizaines de milliers d'années-lumière. Et aucun n'engloutit avec autant de voracité la matière environnante, dans de ponctuels, mais pantagruéliques repas, plutôt que par un grignotage continu.

Le gaz qui tombe sur un trou noir n'a pas une fin tranquille. Il tourne en spirale à très haute vitesse en s'approchant de l'horizon des événements du trou noir (la frontière en deçà de laquelle même la lumière ne peut échapper à l'attraction gravitationnelle de l'astre), et décrit des boucles hyper-rapides si le trou noir est lui-même en rotation. Lorsque le matériau qui tourne rencontre autre chose en chemin, la collision libère une énorme énergie cinétique, convertie en particules accélérées et en rayonnement énergétique. S'ils sont engendrés bien avant l'horizon des événements, ces particules et ces photons peuvent échapper au trou noir et déferlent alors dans l'Univers. C'est un peu comme le bruit d'une baignoire qui se vide : une partie de l'énergie cinétique de rotation de l'eau qui s'engouffre dans la bonde est convertie en ondes sonores à cause des frottements. Ces ondes sonores, plus rapides que l'eau, s'échappent. Dans le cas d'un trou noir, l'énergie expulsée au cours de ces festins de gaz peut avoir des effets à l'échelle de la galaxie tout entière.

Les astronomes qualifient de « cycle d'activité » l'enchaînement des périodes d'activité et des plages de repos d'un trou noir, par analogie avec les cycles d'une machine à laver. La durée du cycle d'activité d'un trou noir décrit la vitesse à laquelle il passe d'une phase d'accrétion

intense de matière à une phase de disette, où il n'a rien à engloutir, et inversement. Le trou noir supermassif au centre de la Voie lactée est aujourd'hui au repos, mais on sait désormais qu'il se réveille de temps en temps. Son cycle serait corrélé à l'évolution globale de la Galaxie. L'histoire du trou noir central éclaire également celle du Système solaire et des conditions propices à la vie qui y règnent.

L'étude des grands relevés de galaxies indique que le cycle d'activité d'un trou noir supermassif est lié au profil de population stellaire de la galaxie qui l'abrite. Les processus qui alimentent en matière le trou noir central influent vraisemblablement sur le type d'étoiles qui peuplent la galaxie, et l'énergie dégagée par un trou noir durant son pic d'activité stimule l'évolution du contenu en étoiles de la galaxie. La population d'étoiles est un indicateur clef pour déterminer la nature d'un système galactique. Les étoiles peuvent être plus ou moins rouges ou bleues. Les étoiles bleues sont les étoiles les plus massives ; elles consomment leur combustible nucléaire à un rythme effréné dans une débauche d'énergie et meurent après quelques millions d'années seulement. Les étoiles rouges, à l'inverse, sont plus petites, moins lumineuses, et vivent au bas mot plusieurs milliards d'années.

Trou noir et vieilles étoiles

Si on additionne la lumière issue de toutes les étoiles d'une galaxie, la couleur globale tend soit vers le rouge, soit vers le bleu. Les galaxies rouges sont généralement des galaxies elliptiques, vieilles et massives, tandis que les galaxies plus bleues sont souvent des galaxies spirales, plus actives et plus modestes. Entre ces deux extrêmes, il existe une plage de transition, regroupant peut-être les galaxies dont les étoiles jeunes et bleues meurent et ne sont plus remplacées, entraînant ainsi un rougissement général de la population stellaire. De façon un peu ironique, les astronomes nomment cette zone intermédiaire la « vallée verte ».

Durant le dernier milliard d'années, ce sont les trous noirs centraux des plus grandes galaxies spirales de la vallée verte qui ont eu les cycles d'activité les plus intenses. Dans ces galaxies se trouvent les trous noirs géants qui grossissent et rayonnent de la façon la plus

L'ESSENTIEL

- **Les trous noirs supermassifs situés au cœur des galaxies ne font pas qu'engloutir la matière environnante. Ils rayonnent aussi une grande énergie et expulsent de la matière à vitesse très élevée.**
- **L'activité d'un trou noir central a une influence directe sur sa galaxie hôte. L'énergie libérée agit sur la formation stellaire et régule ainsi le vieillissement de la population d'étoiles.**
- **La Voie lactée abrite un trou noir de quatre millions de masses solaires, assez actif pour modérer la formation d'étoiles, mais pas assez pour l'étouffer complètement. Un juste milieu sans lequel la vie n'aurait probablement pas pu se développer.**

1. LA MATIÈRE QUI TOMBE en tourbillonnant sur un trou noir supermassif rayonne de façon intense. Une partie est expulsée à très grande vitesse dans la galaxie.

régulière dans l'Univers actuel. La population d'étoiles de chacune d'elles est de l'ordre de 100 milliards de masses solaires. Dans une telle galaxie, il y a beaucoup plus de chances d'apercevoir les signes d'un trou noir en train d'engloutir de la matière que dans tout autre type de galaxie. Une sur dix environ abrite un trou noir supermassif actif. En termes statistiques, ces trous noirs s'alimentent et s'éteignent en permanence.

Le lien entre le fait qu'une galaxie soit située dans la vallée verte et le comportement de son trou noir central est une énigme. La vallée verte est une zone de transition, et la plupart des galaxies sont plutôt rouges ou plutôt bleues. Une galaxie qui se trouve dans la vallée verte est en

mer les flammes. Les effets gravitationnels et les ondes de pression dus à cette galaxie naine incidente peuvent aussi atténuer ou réprimer la formation stellaire ailleurs dans le reste de la galaxie. Ces phénomènes pourraient expliquer pourquoi l'activité d'un trou noir supermassif est grossièrement corrélée avec l'âge des étoiles de sa galaxie hôte, donc avec la couleur de celle-ci.

Or les astronomes se sont récemment rendu compte que la Voie lactée est elle-même une de ces grandes galaxies de la vallée verte. Cela suggère que le trou noir central devrait avoir un cycle d'activité rapide, ce qui est une surprise. En effet, le trou noir de notre Galaxie ne semble pas particulièrement actif. Invisible, il trahit surtout sa présence par son attraction gra-

En 2010, une équipe de l'Université Harvard a annoncé la découverte d'une structure ténue, mais gigantesque, dans le rayonnement gamma provenant de l'intérieur de la galaxie. Cette structure ressemble à deux énormes bulles prenant naissance au cœur de la Voie lactée et s'étendant sur 25 000 années-lumière de part et d'autre du disque galactique. Ces bulles sont sans doute le reliquat de l'éjection de matière par le trou noir central il y a moins de 100 000 ans, lors d'un épisode d'intense activité et de croissance.

Les indices s'accumulent et livrent un tableau cohérent de notre environnement galactique. Si la Voie lactée obéit aux mêmes règles que celles constatées dans des dizaines de milliers d'autres galaxies, elle doit abriter un trou noir qui s'active régulièrement. Ce n'est peut-être pas le plus gros, ni celui qui dégage le plus d'énergie quand il engloutit de la matière, mais c'est un objet actif, une tempête à notre porte. Cette machine gravitationnelle peut se rallumer à tout moment.

La Voie lactée et son trou noir central semblent avoir dans l'Univers actuel un statut à part, qui indique un lien possible entre l'environnement cosmique et l'apparition de la vie. Les conditions nécessaires à la vie dans l'Univers font l'objet d'un débat philosophique. Selon les partisans du « principe anthropique », notre existence impose que l'Univers respecte certaines conditions propices à la vie, puisque nous sommes là. Cela nous place dans une position privilégiée : il suffirait que certaines lois fondamentales ou certaines constantes de la physique soient légèrement différentes pour que l'Univers soit incompatible avec la vie.

De nombreux scientifiques refusent cependant cette interprétation, et sont attachés au principe copernicien selon lequel nous n'avons rien de particulier. De même que la Terre n'est pas au centre du Système solaire, il n'existe pas de région privilégiée dans l'Univers, qui est semblable dans toutes les directions.

Une solution pour évacuer ce problème est de faire appel à l'idée des univers multiples. Si notre Univers n'est qu'un parmi une infinité d'autres dans un multivers plus vaste, alors nous existons peut-être simplement dans celui où règnent les conditions propices à la vie. Il n'aurait rien de spécial : ce serait juste comme une île jouissant du bon climat, parmi d'autres moins hospitalières.

DANS LA VALLÉE VERTE, UNE GALAXIE SUR DIX environ abrite un trou noir supermassif en activité. Il ferait évoluer la galaxie du bleu vers le rouge.

train de changer ; il se peut que les étoiles cessent de s'y former. Les trous noirs supermassifs peuvent avoir cet effet dans d'autres environnements, tels les amas de galaxies et les grandes galaxies jeunes. Ils pourraient faire évoluer les galaxies du bleu vers le rouge, en passant par la vallée verte. À moins que ce ne soient les facteurs responsables de la transformation d'une galaxie qui aient aussi pour effet d'alimenter le trou noir en matière.

En étudiant les galaxies spirales voisines, les astronomes ont en effet trouvé des signes indiquant que les trous noirs les plus actifs ont influé sur leurs galaxies hôtes à des milliers d'années-lumière à la ronde. Dans certains cas, l'intense rayonnement ultraviolet et X émanant du disque d'accrétion des trous noirs peut chauffer des nuages de gaz environnants et les propulser vers l'extérieur. Ces « vents » balayent alors les régions de formation stellaire, à la façon de fronts chauds s'abattant sur un pays. On ne sait pas exactement comment cela influe sur la production d'étoiles, mais c'est une force puissante.

De même, des événements qui déclenchent l'activité du trou noir peuvent aussi agir à grande échelle sur la galaxie. Par exemple, la chute d'une galaxie naine capturée par le puits de gravité d'une galaxie plus grande remue du matériau galactique, qui va alors tomber vers le trou noir et l'alimenter. C'est un peu comme souffler sur les braises d'un feu pour rani-

virationnelle, qui influe sur l'orbite des étoiles du noyau galactique. L'analyse de leurs trajectoires suggère que le trou noir central de la Voie lactée ne ferait que quatre millions de masses solaires. Un freluquet. Et pourtant, à en croire les observations des autres galaxies, ce devrait être l'un des plus actifs.

Nous sommes bien sûr tentés d'afficher un certain scepticisme : rien ne nous avait jusqu'ici laissé penser que notre Galaxie accueillait un trou noir supermassif particulièrement affamé. Mais peut-être que tout cela n'est qu'un « hasard du calendrier », l'échelle de temps humaine étant très brève par rapport à celle du cosmos.

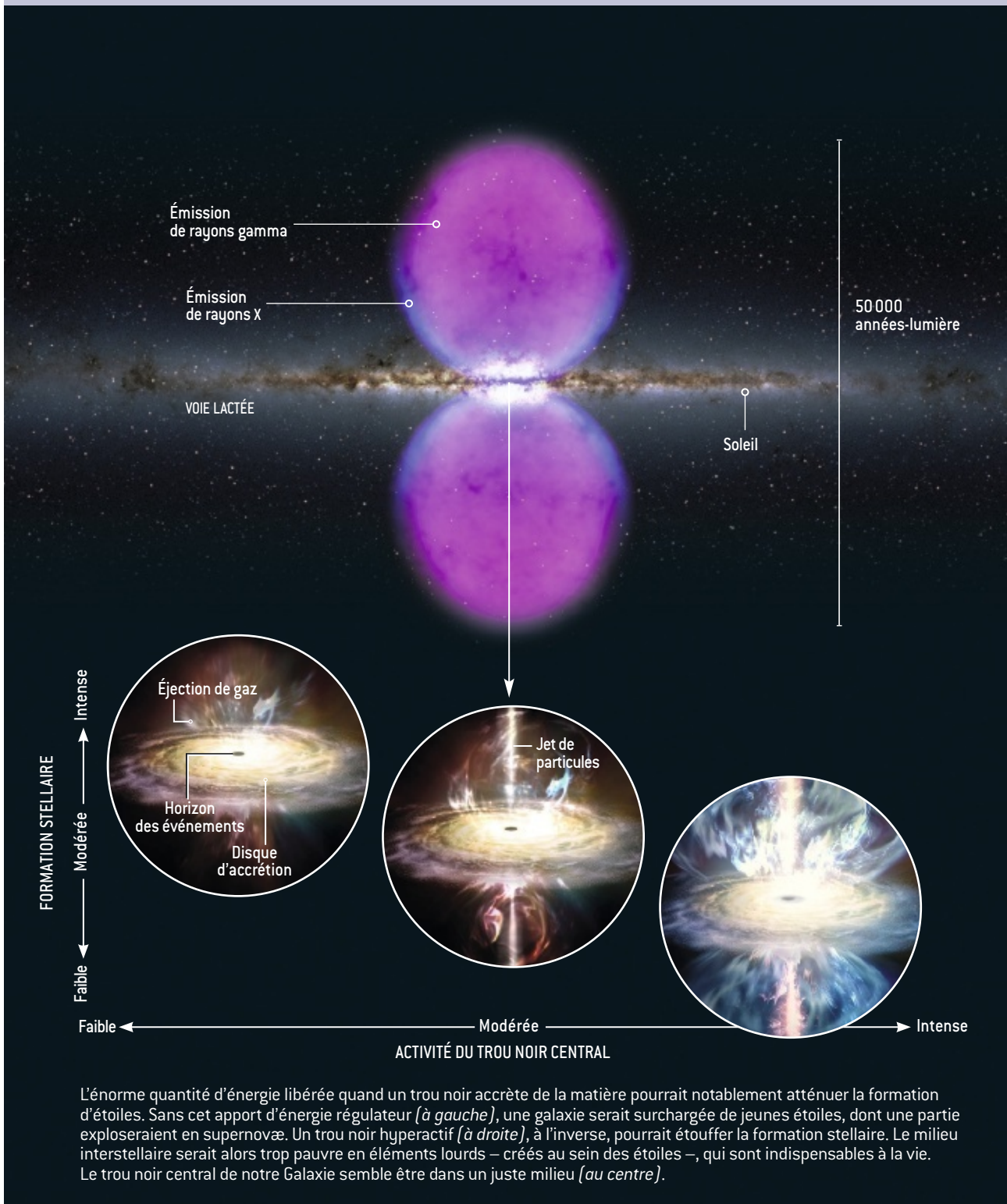
Des indices d'une activité récente

Il semble en effet que les choses étaient très différentes il n'y a pas si longtemps. Il y a quelques années, une émission X intense provenant de nuages interstellaires de gaz distants de 300 années-lumière du centre galactique a été observée. Ces nuages n'ayant aucune raison de briller en rayons X par eux-mêmes, il s'agissait d'un rayonnement par réflexion. Et la configuration de ces nuages indique que la source se situe près du centre galactique : on déduit de l'intensité de l'émission par réflexion observée aujourd'hui que le trou noir central était un million de fois plus brillant 300 ans plus tôt.

LES EFFETS À GRANDE ÉCHELLE DES TROUS NOIRS

Le trou noir supermassif de la Voie lactée n'est qu'un point à l'échelle de la galaxie. Mais avec quatre millions de masses solaires, c'est un point qui pèse, et qui fait de temps en temps un coup d'éclat. En 2010, les astronomes ont identifié deux bulles émettrices de rayons gamma s'étendant sur 25 000 années-lumière de part et d'autre du centre galactique, où réside le trou

noir supermassif. Ces bulles seraient les vestiges d'un sursaut d'activité du trou noir dans un passé assez récent, durant lequel une partie de la matière engloutie a été éjectée sous forme de rayonnement énergétique et de particules accélérées. Heureusement, cette bouffée n'était pas dirigée vers les marges du disque galactique, où réside le Système solaire.



Cela nous amène à préciser la longue liste des facteurs propices à l'apparition de la vie. Il est frappant que la Voie lactée se trouve juste dans la situation favorable où son trou noir supermassif est actif. Il est possible que ce ne soit pas une simple coïncidence.

■ L'AUTEUR



Caleb SCHARF est directeur du Département d'astrobiologie à l'Université Columbia,

aux États-Unis.

Il tient le blog *Life, Unbounded* pour *Scientific American*.

Article adapté de C. Scharf, *Gravity's Engines: How Bubble-Blowing Black Holes Rule Galaxies, Stars and Life in the Cosmos*, Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, 2012.
©Caleb Scharf, 2012.

■ BIBLIOGRAPHIE

C. Scharf, *Gravity's Engines: How Bubble-Blowing Black Holes Rule Galaxies, Stars and Life in the Cosmos*, Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, 2012.

K. Weaver, *Les trous noirs supermassifs*, *Dossier Pour la Science* n° 75, avril-juin 2012.
http://bit.ly/doss75_trousnoirs

J. Greene, *À la recherche des trous noirs de masse intermédiaire*, *Pour la Science* n° 413, mars 2012.
http://bit.ly/413_greene

W. Tucker et al., *Le souffle des trous noirs*, *Pour la Science* n° 354, avril 2007.
http://bit.ly/354_tucker

A. Barger, *Cosmos: la crise de l'âge mûr*, *Pour la Science* n° 328, février 2005.
http://tiny.cc/328_barger

Le calme règne en banlieue galactique

Notre Système solaire subit-il des conséquences directes de l'activité d'un trou noir situé à quelque 25 000 années-lumière ? Ce dernier favoriserait-il la formation de planète dans notre banlieue galactique ? Quand le trou noir central s'active, avalant de la matière et recrachant de l'énergie, il n'est probablement pas très lumineux vu depuis notre voisinage. Les énormes bulles émettrices de rayons gamma qui s'étendent à l'extérieur du disque galactique trahissent certes une débauche d'énergie considérable, mais pas dirigée vers nous. Si des événements plus importants se sont produits, cela devait être dans un passé lointain, peut-être avant la formation de notre Système solaire il y a 4,5 milliards d'années. Depuis, le monstre central n'a vraisemblablement eu qu'un impact limité sur les lointaines banlieues galactiques telles que la nôtre.

Du point de vue de la vie, cela pourrait être une bonne chose. La Terre serait perturbée par une forte augmentation du bombardement ambiant de particules et de photons très énergétiques, originaires du centre galactique. Un tel rayonnement peut avoir un effet délétère sur les organismes et même affecter la structure et la composition de l'atmosphère et des océans. Nous serions peut-être relativement épargnés à 25 000 années-lumière du centre galactique, mais si nous habitons plus près, cela serait une autre affaire. Le fait que nous n'habitons pas sur une planète plus centrale n'est peut-être pas une coïncidence. De même, nous ne devrions peut-être pas nous étonner de nous trouver ici maintenant, et non pas des milliards d'années plus tôt ou plus tard.

Notre Galaxie a, comme tant d'autres, coévolué avec son trou noir supermassif. De fait, le rapport entre les trous noirs supermassifs et leurs galaxies nous fournit un véritable outil pour évaluer l'histoire galactique. Les quasars, des trous noirs supermassifs extrêmement puissants que l'on observe dans l'Univers lointain, se trouvent en général dans les plus grosses

galaxies elliptiques, situées au centre des amas de galaxies. Ces galaxies se sont formées de façon violente, rapide et précoce ; aujourd'hui, leurs étoiles sont vieilles et le gaz qu'elles renferment est trop peu dense et trop chaud pour former de nouveaux systèmes stellaires. D'autres galaxies elliptiques semblent s'être formées plus tard par fusion de galaxies. Un certain phénomène y a mis en somme la formation d'étoiles. Le dégagement d'énergie des trous noirs supermassifs est un excellent candidat pour ce rôle de régulateur. Les galaxies spirales dotées de bulbes centraux d'étoiles bien marqués présentent également les signes d'une histoire commune avec leurs trous noirs centraux. Elles partagent certains traits avec les galaxies elliptiques. Dans les unes comme dans les autres, la masse du trou noir central vaut environ un millième de la masse du bulbe ou des étoiles qui l'entourent. Ainsi, le bulbe imposant de notre voisine Andromède contient un trou noir 20 fois plus massif que celui de la Voie lactée.

Plus bas dans la hiérarchie, il y a les galaxies sans bulbe, comme c'est le cas de nombreuses spirales. Bien que la Voie lactée soit une grande galaxie, elle abrite un trou noir assez chétif. La quasi-absence de bulbe stellaire est un mystère : soit la galaxie avait initialement moins de matière brute à disposition pour former un bulbe d'étoiles, soit le trou noir n'a jamais joué son rôle régulateur, soit trop peu de petites galaxies satellites ont été absorbées au fil du temps.

Les galaxies naines sont, pour leur part, dépourvues de trous noirs centraux. Enfin, les véritables microbes du zoo galactique sont des objets rassemblant à peine quelques dizaines de millions d'étoiles, et presque dénuées de gaz ou de poussière susceptibles d'en former de nouvelles. Et celles qui sont riches en gaz sont extrêmement pauvres en étoiles.

La Voie lactée fabrique encore des étoiles, à un rythme d'environ trois masses solaires par an. Ce n'est pas beaucoup à l'échelle d'une vie humaine, mais cela fait quelque dix millions de nouvelles étoiles depuis que nos ancêtres se sont redressés pour marcher quelque part en Tanzanie. C'est une productivité honorable pour une région d'un univers qui a 13,7 milliards d'années. Les galaxies géantes de l'univers jeune, brillant du feu des quasars qui dévorait leur cœur, se sont assoupies depuis longtemps. Les débordements d'énergie de leurs trous noirs



023

2. LA GALAXIE ELLIPTIQUE CENTAURUS A abrite un trou noir central dont la masse est estimée à 55 millions de fois celle du Soleil. Il est à l'origine de ces immenses jets de matière qui s'échappent du centre galactique et qui sculptent de gigantesques bulles dans le milieu interstellaire, visibles en rayons X (*en bleu*) et en infrarouge (*en orange*). Le disque de poussière [visible en infrarouge] qui barre la galaxie témoigne de l'absorption récente d'une galaxie.

centraux ont étouffé la formation de nouvelles étoiles ; les ondes de pression de leurs bulles d'éjectats empêchent le milieu interstellaire de se refroidir et de se condenser en étoiles et en planètes. Pendant ce temps, la Voie lactée continue d'avancer à son train de sénateur.

Un trou noir ni trop actif ni trop endormi

Le fait que nous vivions dans une grande galaxie dotée d'un bulbe stellaire peu développé et d'un trou noir central modeste suggère que les galaxies les mieux adaptées à la vie sont celles qui n'ont pas passé leur temps à faire croître des trous noirs colossaux et à subir les effets des forces déchaînées par le processus. De nouvelles étoiles continuent à se former dans notre Galaxie, mais pas avec la même vigueur que dans d'autres. La plupart des nouvelles étoiles se forment sur les bords des bras spiraux, sous l'effet des ondes de pression à grande échelle qui balayent le disque de gaz et de poussière. Les étoiles se forment également plus loin du centre galactique que dans le passé. Nous vivons dans une région de formation stellaire modérée. Une formation stellaire intense produit un environnement très chaotique. Des étoiles massives naissent, qui épuisent rapidement leur combustible et meurent bientôt dans de colossales explosions de

supernovæ. Les atmosphères planétaires peuvent être soufflées par le rayonnement intense de ces étoiles, et les particules énergétiques accélérées peuvent pilonner la surface des planètes. Même le flux de neutrinos libérés par les explosions d'étoiles suffirait à porter atteinte à la vie. Et ce ne sont que les effets modérés : trop près d'une supernova, un système planétaire risque d'être purement et simplement vaporisé.

Et pourtant, ces mécanismes sont aussi ceux par lesquels le riche mélange chimique engendré au sein des étoiles est disséminé dans le cosmos. Ce matériau est celui dont sont faites les étoiles et les planètes. Il s'agit de planètes comportant des hydrocarbures et de l'eau, brassés par la chaleur produite par les radio-isotopes, ayant devant elles des milliards d'années d'évolution géophysique. Ainsi, quelque part entre la région où les jeunes étoiles se forment à foison et celle où dorment les vieilles étoiles, il y a un endroit « juste comme il faut », suffisamment éloigné du centre galactique vieillissant, mais pas trop près des zones agitées de formation stellaire. Notre Système solaire s'y trouve.

La contrainte que font peser les trous noirs supermassifs sur la possibilité de la vie est simple : une galaxie contenant un trou noir de taille modérée qui s'alimente de façon régulière et sans excès a plus de chance d'abriter une zone « tempérée » qu'une galaxie dotée d'un colosse autre-

fois vorace, mais assoupi depuis longtemps. L'existence de galaxies telles que la Voie lactée est intimement liée aux processus contraires d'accrétion et d'éjection de matière par les trous noirs centraux. Trop d'activité, et la formation d'étoiles serait faible. La production d'éléments lourds cesserait alors. Trop peu d'activité, et les jeunes étoiles explosives seraient trop abondantes, ou au contraire, le milieu interstellaire ne serait pas assez brassé pour donner naissance à quoi que ce soit. Si l'on modifie un tant soit peu cet équilibre, on modifie tout le processus de formation d'étoiles et d'évolution des galaxies.

La chaîne d'événements qui a conduit à la vie serait différente, voire inexistante, sans la coévolution des galaxies avec les trous noirs supermassifs et leur effet régulateur. Le nombre d'étoiles, la proportion de petites et de grosses étoiles, la forme des galaxies, leur structure, les régions stérilisées ou au contraire dynamisées par le rayonnement et les ondes de pression – tout cela serait différent sans les trous noirs supermassifs.

Notre petit coin fertile du cosmos a subi les influences de tout ce qui s'est passé autour de lui, y compris du comportement du trou noir niché au centre de la Voie lactée. Ces objets, eux-mêmes coupés du reste de l'Univers, ont joué un rôle majeur dans son évolution. Nous leur devons beaucoup. ■

L'art de la construction chez les insectes sociaux

Guy Theraulaz, Andrea Perna et Pascale Kuntz

Les termitières et les fourmilières sont des prouesses architecturales. Pourtant, chaque ouvrier bâtisseur n'a qu'une perception locale du nid qu'il construit. Des modèles simples révèlent leurs secrets.

1. DES TERMITES de l'espèce *Hopliotermes hospitalis* (Sarawak, Malaisie) transportent des boulettes de lichen et de mousse qui leur serviront de nourriture ou de support pour cultiver des champignons. Comme tous les insectes sociaux, les termites coopèrent pour se nourrir, mais aussi pour bâtir des nids à l'architecture étonnante. Les éthologues étudient les mécanismes coopératifs conduisant à ces structures.