

Plus récemment, en 2016, mon équipe a montré que l'interféron γ , une cytokine que produisent des lymphocytes T des méninges, interagit avec les neurones du cortex préfrontal, une région du cerveau impliquée notamment dans le comportement social. Curieusement, cette cytokine n'agit pas *via* les cellules immunitaires qui résident dans le cerveau, la microglie, mais *via* des neurones contrôlant les circuits associés au comportement social. En fait, elle est essentielle au fonctionnement de ces circuits: en l'absence de lymphocytes T ou de l'interféron γ , ces neurones ne régulent pas correctement les circuits, qui deviennent alors hyperactifs – une perturbation associée à des déficits sociaux. Ainsi, une cytokine que des cellules immunitaires produisent dans les méninges est capable de modifier l'activité des neurones, altérant la fonction du circuit neuronal associé et modifiant le comportement sous-jacent.

L'interféron γ n'est pas la seule cytokine qui perturbe la fonction cérébrale. Mario de Bono, du laboratoire de biologie moléculaire MRC, à Cambridge, en Angleterre, et ses collègues ont montré qu'une autre, l'IL-17, active les neurones sensoriels chez le ver *Caenorhabditis elegans* et modifie son comportement de détection de l'oxygène. Et des travaux récents de Gloria Choi, de l'institut de technologie du Massachusetts, et ses collègues, ont prouvé chez la souris que l'IL-17 est capable d'interagir avec les neurones du cortex cérébral et de modifier des comportements liés au trouble du spectre autistique.

INFORMER LE CERVEAU

On peut se demander pourquoi un organe aussi puissant que le cerveau a besoin du soutien du système immunitaire pour fonctionner. J'ai développé une hypothèse pour expliquer pourquoi les deux systèmes sont si étroitement liés. Nous avons cinq sens établis: l'odorat, le toucher, le goût, la vue et l'ouïe. Le sens de la position et du mouvement, ou proprioception, est souvent appelé le sixième sens. Ces sens rendent compte au cerveau de nos environnements externe et interne, fournissant ainsi une base sur laquelle il détermine l'activité nécessaire à la survie. Les microorganismes abondent dans ces environnements, et la capacité de les détecter – et de s'en défendre si nécessaire – est elle aussi essentielle. Or notre système immunitaire excelle précisément dans ces tâches. Je propose que son rôle déterminant soit de détecter les microorganismes et d'en informer le cerveau. Si, comme je le prédis, le système immunitaire est connecté au cerveau, cela en ferait un septième sens.

Il existe des moyens de tester cette hypothèse. Comme tous les circuits du cerveau sont interconnectés, une interférence avec l'un d'eux tend à perturber les autres. Par exemple, la nourriture a un goût différent lorsque notre

odorat est altéré. Si l'on montre qu'une interférence avec l'immunité perturbe d'autres circuits, on aura un argument en faveur de l'idée que la réaction immunitaire est un septième sens. Le comportement maladie fournit une

Le système immunitaire excelle à détecter les microorganismes. Est-il un septième sens?

piste dans ce sens. Il se pourrait que, lors d'une maladie, l'afflux massif de signaux du septième sens informant le cerveau de l'infection déborde et perturbe les circuits qui modulent le sommeil, la faim, etc., conduisant à ce syndrome. Alternativement, l'information sur les microorganismes que le système immunitaire relaye au cerveau pourrait inciter le cerveau à déclencher un comportement maladie – lequel protégerait l'individu malade en minimisant son exposition à d'autres agents pathogènes et en économisant son énergie.

Notre connaissance du lien entre le cerveau et le système immunitaire n'en est qu'à ses débuts. Il est possible que les dix ou vingt prochaines années révèlent ces deux systèmes sous un jour complètement différent. J'espère, cependant, que ces avancées ne renverseront pas notre compréhension actuelle, mais la préciseront. Une priorité consistera à cartographier comment les composants immunitaires et les circuits neuronaux sont connectés, interagissent et sont interdépendants en matière de santé et de maladie. La connaissance de ces relations permettra de cibler la signalisation immunitaire dans la recherche de traitements contre les troubles neurologiques et mentaux. Il est plus facile de cibler le système immunitaire que le système nerveux central. Qui sait, peut-être traitera-t-on un jour les maladies cérébrales en réparant le système immunitaire par thérapie génique ou même en remplaçant un système immunitaire défectueux au moyen d'une greffe de moelle osseuse? Par ailleurs, une myriade de perturbations immunitaires accompagnent les troubles cérébraux. Cette diversité recèle peut-être encore d'autres surprises sur le fonctionnement du cerveau... ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Da Mesquita et al., **Functional aspects of meningeal lymphatics in ageing and Alzheimer's disease**, *Nature*, en ligne le 25 juillet 2018.

J. Kipnis, **Immune system : The « seventh sense »**, *J. Exp. Med.*, vol. 215(2), pp. 397-398, 2018.

S. Antila et al., **Development and plasticity of meningeal lymphatic vessels**, *J. Exp. Med.*, vol. 214(12), pp. 3645-3667, 2017.

J. Kipnis, **Multifaceted interactions between acquire immunity and the central nervous system**, *Science*, vol. 253, pp. 766-771, 2016.

M. Nedergaard et S. A. Goldman, **Comment le cerveau évacue ses déchets**, *Pour la Science*, n° 467, pp. 58-63, 2016.

A. Louveau et al., **Structural and functional features of central nervous system lymphatic vessels**, *Nature*, vol. 523, pp. 337-341, 2015.

L'ESSENTIEL

> Dans l'Univers lointain, on observe des quasars, des galaxies très brillantes dont le centre est occupé par un trou noir supermassif.

> On comprend mal comment de tels monstres se sont formés en moins d'un milliard d'années après le Big Bang.

> Selon un scénario proposé récemment, ces trous noirs seraient issus de l'effondrement de vastes nuages de gaz primordiaux.

> Le futur télescope spatial *James-Webb*, prévu pour 2020, devrait détecter certaines signatures caractéristiques de ce scénario.

L'AUTEURE



PRIYAMVADA NATARAJAN
astrophysicienne
à l'université Yale,
aux États-Unis

Le paradoxe des jeunes quasars

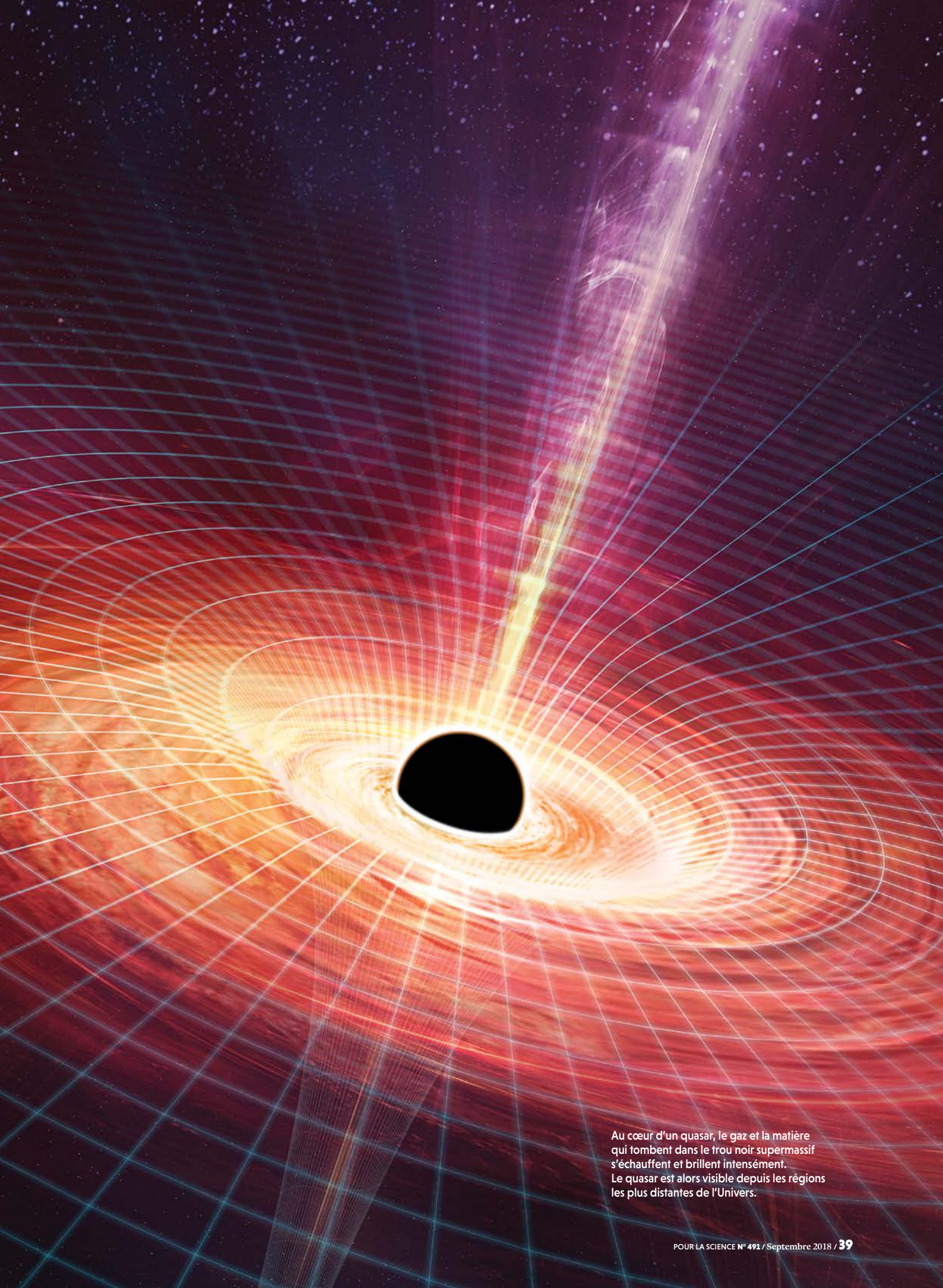
Des trous noirs supermassifs occupent le centre des quasars les plus anciens, objets nés moins d'un milliard d'années après le Big Bang. Mais les astrophysiciens ignorent comment ces trous noirs ont pu grandir autant en si peu de temps. Une énigme qu'un scénario récemment proposé pourrait résoudre.

Lorsqu'on observe le ciel la nuit, on y voit des étoiles, des galaxies... Il n'en a pas toujours été ainsi. Ces objets ont mis, après le Big Bang, des centaines de millions d'années à se former.

L'Univers était initialement rempli d'un mélange chaud et dense de particules, qui s'est progressivement refroidi du fait de son expansion. Environ 380 000 ans après le Big Bang, les noyaux atomiques et les électrons se sont appariés pour constituer des atomes neutres, emplissant tout l'espace d'un gaz d'hydrogène (et d'hélium). Quelques centaines de millions d'années plus tard, le gaz s'est effondré sur lui-même, ce qui a formé les premières étoiles. Celles-ci se sont rassemblées au sein des galaxies, dont les plus anciennes traces datent de 400 millions d'années après la naissance de l'Univers. Mais les astrophysiciens ont aussi eu la surprise de voir qu'une autre classe d'objets est apparue à peu près à cette période: les quasars.

Les quasars sont des galaxies où de grandes quantités de gaz tombent dans le trou noir supermassif situé en leur centre. En raison des frottements internes, le gaz s'échauffe et émet de la lumière. Ainsi, les quasars sont parmi les objets les plus brillants de l'Univers et sont visibles depuis les régions les plus reculées du cosmos. À partir de 2001, grâce au programme de relevé astronomique SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*), les astronomes ont commencé à voir des quasars dans l'Univers très jeune. Le plus vieux quasar connu, détecté en décembre 2017, était présent seulement 690 millions d'années après le Big Bang.

La formation de ces quasars les plus anciens est une énigme pour les chercheurs. Pour être visibles alors qu'ils sont extrêmement lointains, les quasars doivent héberger des trous noirs particulièrement massifs, d'environ un milliard de fois la masse du Soleil. Or les théories classiques de formation et de croissance des trous noirs sont incapables d'expliquer >



Au cœur d'un quasar, le gaz et la matière qui tombent dans le trou noir supermassif s'échauffent et brillent intensément. Le quasar est alors visible depuis les régions les plus distantes de l'Univers.

> comment des trous noirs aussi gros se seraient formés en moins de un milliard d'années.

De nombreux astronomes pensent que les premiers trous noirs – les trous noirs «graines» – sont les restes de l'explosion en supernova des premières générations d'étoiles. Mais de tels trous noirs ne devraient pas avoir une masse de plus de quelques centaines de masses solaires. Il est alors difficile d'imaginer un scénario dans lequel les trous noirs supermassifs des quasars ont grandi à partir de précurseurs aussi petits.

Pour résoudre cette énigme, avec des collègues, j'ai proposé une piste où les trous noirs gagnent assez en masse pour expliquer les premiers quasars sans invoquer la naissance et la mort d'étoiles. À la place, ces trous noirs se seraient formés directement à partir du gaz d'hydrogène. Nous les nommons trous noirs à effondrement direct. Dans un environnement favorable, ces trous noirs à effondrement direct seraient nés avec une masse comprise entre 10 000 et 100 000 masses solaires quelques centaines de millions d'années après le Big Bang. Bien plus massifs que ceux du scénario classique, ces trous noirs ont très bien pu grandir pour atteindre 1 milliard voire 10 milliards de fois la masse du Soleil, comme dans les quasars qui intriguent depuis près de vingt ans les astronomes. Le défi est de prouver que ce scénario a bien eu lieu. Le télescope spatial *James-Webb*, dont le lancement est prévu pour 2020, devrait nous permettre de le savoir.

LES PREMIÈRES GRAINES

Les trous noirs sont des objets astrophysiques énigmatiques, des régions où la concentration de matière est si grande qu'elle déforme l'espace-temps de telle façon que même la lumière ne peut s'en échapper. Les chercheurs se sont longtemps demandé si les trous noirs étaient une simple curiosité mathématique des équations de la relativité générale d'Einstein. Avec les quasars, les astronomes observent la lumière émise par la matière qui chute dans les trous noirs, confirmant bien la réalité de ces derniers.

La plupart des trous noirs naissent de la mort d'étoiles très massives (de plus de 10 masses solaires). Au cœur d'une étoile, les atomes légers fusionnent et produisent assez d'énergie pour contrer la gravité de l'étoile qui tend à contracter cette dernière. Lorsque ce carburant nucléaire est épuisé, l'étoile s'effondre sur elle-même et déclenche une explosion cataclysmique, une supernova. L'astre laisse alors derrière lui un cœur extrêmement compact, un trou noir.

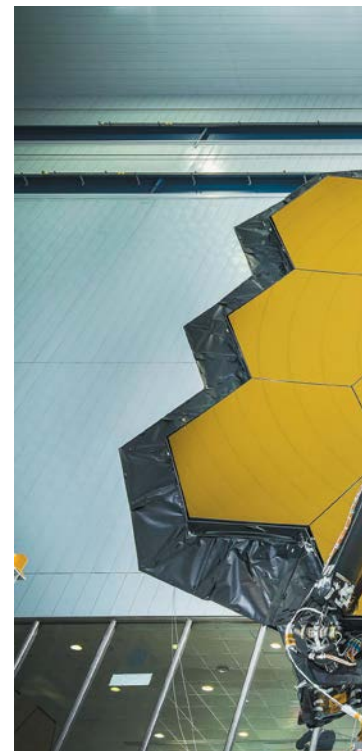
Les astronomes ont d'abord supposé que les trous noirs à l'origine des premiers quasars s'étaient aussi formés de cette façon. Ils seraient les héritiers de la première génération d'étoiles de l'Univers (les étoiles dites de population III). Ces astres se sont formés lorsque le gaz d'hydrogène s'est refroidi et a commencé à constituer

des zones de surdensité, 200 millions d'années après le Big Bang. Les étoiles de population III étaient probablement bien plus massives que les étoiles des générations suivantes. Elles auraient alors laissé derrière elles des trous noirs de plusieurs centaines de masses solaires. Et comme ces étoiles se seraient formées dans des amas denses, il est possible que les trous noirs produits lors de leur mort ont fusionné entre eux pour donner naissance à des trous noirs de plusieurs milliers de masses solaires. Mais même de tels trous noirs restent très insuffisants pour alimenter le cœur des quasars.

D'autres théoriciens suggèrent que des trous noirs primordiaux auraient émergé même plus tôt dans l'histoire de l'Univers, quand l'espace subissait une expansion exponentielle lors d'une brève phase cosmique nommée inflation. De petites fluctuations de densité dans l'Univers auraient été amplifiées durant l'inflation pour produire ces trous noirs primordiaux. Cependant, ces trous noirs devraient avoir une masse comprise entre 10 et 100 masses solaires, d'où le même problème que le cas des étoiles de population III.

Les explications proposées dans ces deux scénarios sont confrontées au même obstacle: les trous noirs graines peuvent grandir en absorbant de la matière, mais ils devraient le faire à un rythme extraordinaire pour atteindre la masse des trous noirs centraux des quasars durant le premier milliard d'années de l'histoire cosmique et ainsi créer les premiers quasars. Et ce que nous savons de la croissance des trous noirs nous permet de penser que ce scénario est peu probable.

Notre compréhension actuelle de la physique suggère qu'une grandeur, la limite d'Eddington, est le rythme maximal auquel un trou noir gagne de la masse de façon efficace. Un trou noir se nourrissant au rythme indiqué par la limite d'Eddington aurait une croissance exponentielle: sa masse doublerait tous les 10 millions d'années environ. Dès lors, pour atteindre 1 milliard de masses solaires, un trou



À la limite d'Eddington,
un trou noir double
de masse tous
les 10 millions d'années



noir graine de 10 masses solaires devrait avaler du gaz et des étoiles à la limite d'Eddington pendant 1 milliard d'années. Il est cependant difficile d'expliquer comment toute une population de trous noirs se serait alimentée en continu de façon aussi efficace.

Une solution possible serait d'imaginer qu'un trou noir né d'une étoile de population III se soit nourri à un rythme supérieur à la limite d'Eddington. Il est théoriquement possible de dépasser cette limite dans des conditions particulières, par exemple dans un environnement très dense et riche en gaz. De telles conditions ont pu exister dans l'Univers primordial, mais elles n'auraient pas été fréquentes, et elles n'auraient perduré que très brièvement.

En plus, une croissance exceptionnellement rapide peut provoquer une sorte d'étranglement. Lors de ces phases d'alimentation extrême, dites super-Eddington, le rayonnement émis par la matière qui tombe dans le trou noir crée une pression de radiation qui perturbe, voire bloque, le flot de matière. Le trou noir est alors privé de nourriture et arrête de grandir. Avec de telles contraintes, il est possible que ces repas gloutons expliquent quelques quasars, mais ils ne peuvent pas être la règle et rendre compte de tous les quasars que nous observons.

Les premiers trous noirs supermassifs se seraient-ils formés d'une autre façon ? Inspirés par les travaux précurseurs de plusieurs équipes, mon collègue Giuseppe Lodato, de l'université de Milan, et moi-même avons publié plusieurs articles entre 2006 et 2007, dans lesquels nous

Le télescope spatial James-Webb sera assez puissant pour trouver des preuves de l'existence des trous noirs à effondrement direct. Son lancement, initialement prévu pour 2019, a été reporté d'un an.

proposons un nouveau mécanisme capable de produire, dès le début, des trous noirs graines plus massifs. Le point de départ de notre scénario consiste en de grands disques de gaz primordiaux. En général, ces disques se sont refroidis, puis se sont fragmentés et ont donné naissance aux étoiles et aux galaxies. Nous avons montré que telle n'a pas toujours été leur destinée. Si quelque chose perturbe le processus normal de refroidissement du disque et empêche la formation des étoiles, le disque devient gravitationnellement instable. La matière migre alors en grandes quantités vers le centre, de façon assez similaire à l'eau du bain qui s'écoule vers la bonde. Cet effondrement du gaz donne naissance à des trous noirs graines de 10000 à 1 million de masses solaires.

De façon générale, les disques se refroidissent plus efficacement si leur gaz est constitué d'hydrogène moléculaire (H_2 , deux atomes d'hydrogène liés) et non d'hydrogène atomique (H , constitué d'atomes isolés). Si un rayonnement émis par les étoiles d'une galaxie voisine atteint le disque, il peut briser les liaisons de l'hydrogène moléculaire et le réduire en hydrogène atomique. Le processus de refroidissement est alors ralenti et le disque reste trop chaud pour former des étoiles. Dénué d'étoiles et de température plus élevée, le disque devient instable et la matière migre vers son centre, conduisant rapidement à la formation d'un trou noir à effondrement direct.

Comme ce scénario nécessite la présence d'étoiles dans le voisinage proche du disque, nous nous attendons à ce que les trous noirs à effondrement direct se forment généralement dans des galaxies satellites évoluant autour de galaxies parents plus grandes où des étoiles de population III se seraient déjà formées.

Les simulations décrivant la formation des grandes structures et la dynamique du gaz aux plus grandes échelles cosmiques étayent les hypothèses du modèle des trous noirs à effondrement direct. Dès lors, l'idée que des trous noirs graines très massifs se soient formés dans l'Univers jeune semble plausible. En partant de telles graines, il n'y a alors plus de problème pour produire, en un temps raisonnable, des trous noirs supermassifs au cœur des quasars.

À LA RECHERCHE DE PREUVES

Le fait que les trous noirs à effondrement direct soient théoriquement possibles ne suffit pas pour affirmer que le modèle est juste. Pour le savoir, nous devons trouver des preuves observationnelles.

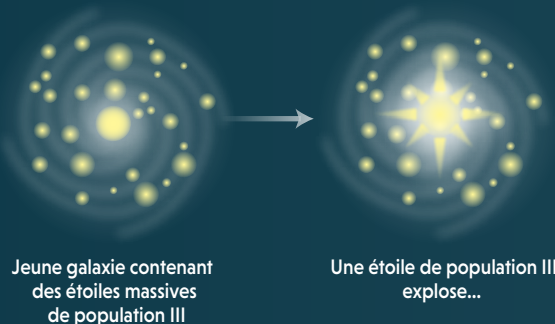
En absorbant de la matière, ces trous noirs ressembleraient à de petits quasars dans l'Univers jeune. En particulier, on s'attend à ce que cette graine fusionne avec la galaxie parent, et elle brillerait alors intensément. Cet événement serait assez fréquent car, dans notre modèle, les ➤

COMMENT SONT NÉS LES TROUS NOIRS SUPERMASSIFS

Dans le schéma classique, la formation des trous noirs supermassifs (en haut) commence avec la mort des premières étoiles. Mais ce scénario ne semble pas pouvoir expliquer l'énorme masse des trous noirs sis au cœur des quasars les plus anciens. Des astrophysiciens ont proposé une nouvelle idée : ces trous noirs naîtraient de l'effondrement direct de nuages de gaz (en bas).

SCÉNARIO CLASSIQUE

Lorsque les premières étoiles (population III) ont épuisé leur carburant nucléaire, elles ont explosé en supernova, laissant derrière elles des trous noirs. En absorbant rapidement le gaz et les étoiles environnantes, ces trous noirs sont devenus beaucoup plus massifs.



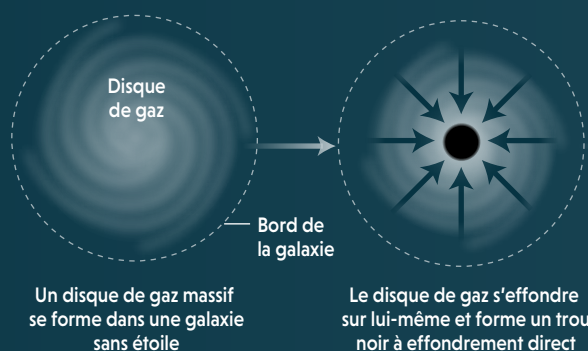
Big Bang

~ 180 millions d'années

~ 270 millions d'années

SCÉNARIO À EFFONDREMENT DIRECT

Si, dans une protogalaxie, la formation des étoiles est bloquée, tout le gaz pourrait s'effondrer vers le centre du disque et produire un trou noir. En entrant ensuite en collision avec une galaxie voisine, le trou noir grossirait très vite par absorption du gaz et des étoiles de cette galaxie. On obtiendrait une « galaxie à trou noir obèse », qui serait détectable par les télescopes.



➤ trous noirs à effondrement direct se sont formés dans des galaxies satellites de galaxies plus grandes. Une fusion galactique fournirait au trou noir graine une nouvelle source de gaz à engloutir, entretenant sa croissance. Il devrait alors se transformer rapidement en un quasar qui brille plus que toutes les étoiles de sa galaxie.

Ces trous noirs ne seraient pas seulement plus brillants que l'ensemble des étoiles environnantes, ils seraient aussi plus lourds – ce qui n'est en général pas le cas. Le plus souvent, les étoiles d'une galaxie pèsent au total plus que le trou noir central, d'un facteur 1000 environ. Mais lors de la fusion avec la galaxie parent, la masse du trou noir en pleine croissance dépasse rapidement celle des étoiles. La galaxie est alors qualifiée de galaxie à trou noir obèse. Et une telle structure devrait présenter un spectre électromagnétique particulier, notamment dans l'infrarouge, entre 1 et 30 micromètres de longueur d'onde. Or les instruments MIRI (*Mid-Infrared Instrument*) et NIRC*am* (*Near-Infrared Camera*) du télescope spatial *James-Webb* sont très sensibles à ces longueurs d'onde.

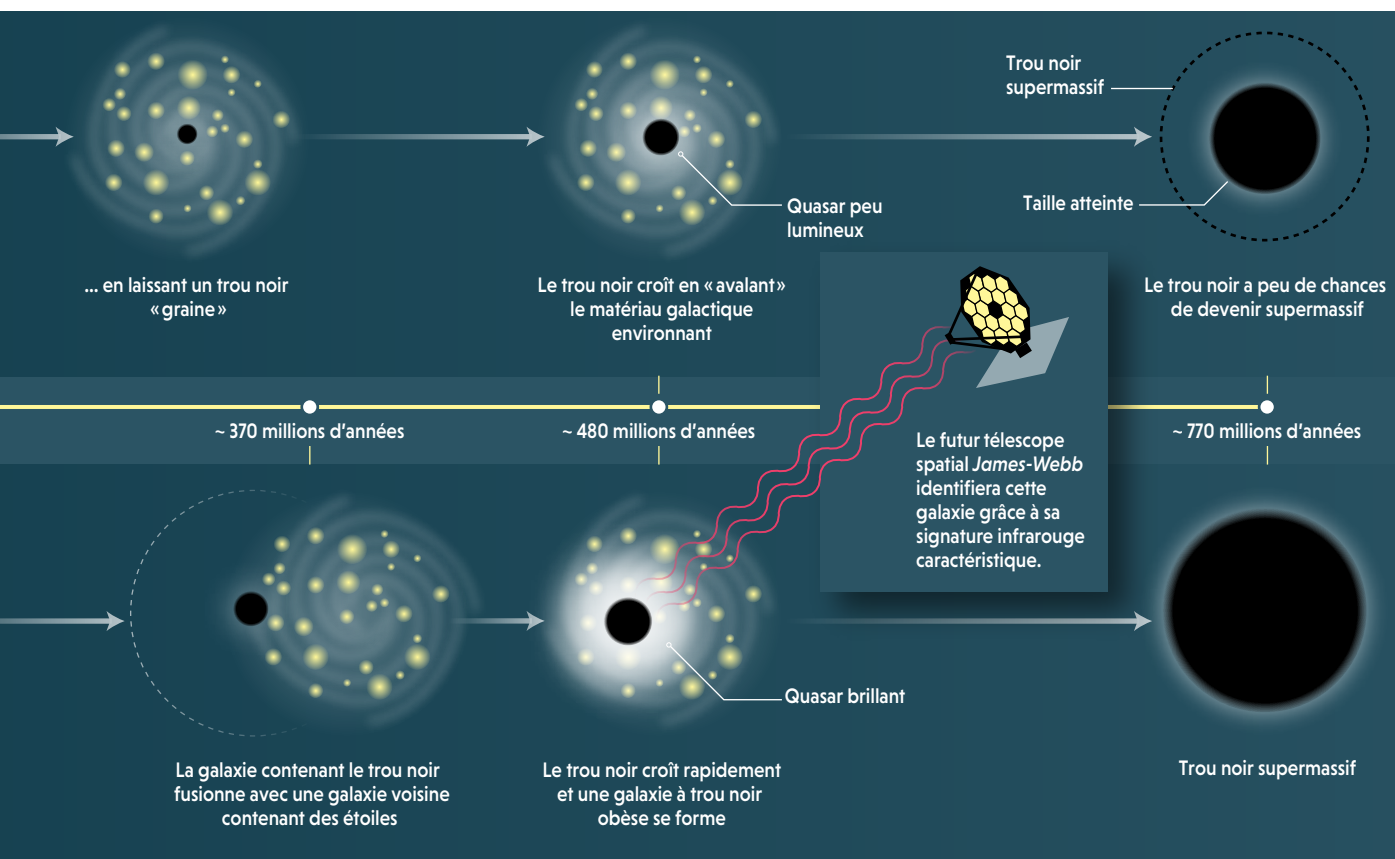
Ce télescope sera l'instrument le plus puissant que les astronomes auront jamais eu pour plonger leur regard dans la jeunesse de l'Univers. Si le télescope détecte des galaxies à trou noir obèse, ce serait un indice fort en faveur de

la théorie des trous noirs à effondrement direct. À l'inverse, les trous noirs graines, nés de la mort d'étoiles, seront bien trop pâles pour être visibles par le télescope *James-Webb*, ou n'importe quel autre.

D'autres types d'observations pourraient aussi fournir des indices en faveur de notre théorie. Dans les rares cas où la galaxie parent hébergerait un trou noir central, les deux trous noirs entreraient en collision en libérant d'importantes ondes gravitationnelles. Le futur interféromètre spatial *Lisa*, des agences spatiales européenne (l'ESA) et américaine (la Nasa), prévu pour les années 2030, devrait être en mesure de détecter un tel événement.

UN PORTRAIT PLUS PRÉCIS

Il est tout à fait possible que les scénarios des trous noirs à effondrement direct et les graines nourries à un rythme super-Eddington aient tous les deux coexisté dans l'Univers primordial. La question serait alors : lequel des deux a produit la majorité des quasars les plus anciens observés par les astronomes ? Résoudre cette énigme fera plus que préciser la chronologie de l'Univers jeune. Les astronomes auront aussi une meilleure compréhension de l'évolution des galaxies, car les trous noirs supermassifs y jouent un rôle important.



Les données suggèrent par exemple que le trou noir central influencerait sur la production d'étoiles de la galaxie où il se trouve. D'une part, la matière tombant dans le trou noir libère de l'énergie qui chauffe le gaz proche du centre galactique. Elle l'empêche ainsi de se refroidir et de former des étoiles. Cette influence serait aussi sensible à grande portée, bien au-delà du centre de la galaxie, sous la forme de jets de rayonnement de haute énergie. Ces jets, que les astronomes observent dans le domaine radio, chaufferaient le gaz des régions externes de la galaxie et y bloqueraient la formation stellaire. Ces effets sont complexes à modéliser, mais les astronomes espèrent mieux les comprendre: trouver les premières graines préciserait comment les relations entre ces trous noirs et leurs galaxies hôtes ont évolué au cours du temps.

Les perspectives de recherche présentées ici s'inscrivent dans une évolution importante de nos capacités à étudier et comprendre les trous noirs de toutes les tailles. Quand, par exemple, l'interféromètre *Ligo* a réalisé la première détection d'ondes gravitationnelles en 2015, les scientifiques ont pu déterminer que les deux trous noirs qui avaient fusionné pesaient respectivement 36 et 29 masses solaires, des cousins poids plumes des trous

noirs supermassifs au cœur des quasars. La poursuite des projets pour détecter d'autres ondes gravitationnelles permettra d'obtenir de nouveaux et fascinants détails sur ce qui se passe quand des trous noirs fusionnent et font vibrer l'espace-temps autour d'eux.

Par ailleurs, le télescope *Event Horizon* compte utiliser les observatoires radio disséminés partout à la surface de la Terre pour acquérir une image du trou noir au centre de la Voie lactée. Les chercheurs espèrent observer une « ombre » en forme d'anneau autour des bords du trou noir, un phénomène prédit par la relativité générale. Tout écart entre les mesures du télescope *Event Horizon* et les prévisions de la relativité générale serait un défi à notre compréhension des trous noirs. Enfin, des astrophysiciens veulent utiliser un réseau de pulsars, des étoiles émettant du rayonnement de façon régulière, pour détecter le bruit de fond cosmique des ondes gravitationnelles dû à l'accumulation de signaux émis par la coalescence de trous noirs dans l'Univers. Mais à plus court terme, c'est le télescope *James-Webb* qui ouvrira une nouvelle fenêtre sur la recherche des trous noirs dans l'Univers jeune.

De nombreuses découvertes sont à prévoir dans un futur proche. Et notre compréhension des trous noirs pourrait en être transformée. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Natarajan et al., **Unveiling the first black holes with JWST : Multi-wavelength spectral predictions**, *Astrophysical Journal*, vol. 838(2), article 117, 2017.

D. Psaltis et S. S. Doeleman, **Tester la relativité avec les trous noirs**, *Pour la Science*, n° 457, novembre 2015.

P. Natarajan, **Seeds to monsters : Tracing the growth of black holes in the Universe**, *General Relativity and Gravitation*, vol. 46(5), article 1702, 2014.

E. Treister et al., **New observational constraints on the growth of the first supermassive black holes**, *Astrophysical Journal*, vol. 778(2), article 130, 2013.

LES AUTEURS



JONAS BERKING
géographe à
l'université libre
de Berlin,
en Allemagne



BRIGITTA SCHÜTT
géographe à
l'université libre
de Berlin



WIEBKE BEBERMEIER
géographe à
l'université libre
de Berlin



STEPHAN SCHMID
archéologue à
l'université
Humboldt, à Berlin



Cette citerne, construite dans le désert du Néguev, à Bom Havarim, en Israël, illustre le savoir-faire hydraulique des Nabatéens, dont les cités ont prospéré malgré les conditions arides.