

Mais tous les effets de cette molécule ne seraient pas bénéfiques. Les chercheurs doivent encore vérifier si l'une des voies activées par le resvératrol n'accélérerait pas la mort de certains neurones.

Depuis, d'autres recherches ont complété ces études. Elles indiquent que la durée de stress dans une cellule est déterminante pour qu'une cellule en tire profit ou non. Des exercices physiques intenses doivent être ponctués d'un temps de repos nécessaire à la croissance et à la réparation cellulaire; c'est la même chose en ce qui concerne la consommation des toxines végétales. Lorsqu'on consomme des fruits et légumes, l'organisme entre dans un mode de résistance au stress, caractérisé par une réduction générale de la fabrication de nouvelles protéines, une élimination accrue des molécules endommagées et la production de protéines spécifiquement nécessaires à la survie de la cellule.

Les périodes de repos sont importantes

Les cellules peuvent endurer cet état un certain temps avant d'avoir besoin de fabriquer des protéines ayant d'autres fonctions que la résistance au stress et d'être altérées par ce surplus de stress. Lorsque celui-ci disparaît, la synthèse de protéines reprend, les cellules entrent en croissance et réparent les dommages moléculaires qui sont apparus. Dans le cas des neurones, de nouvelles connections se forment entre les cellules pendant la période de récupération. Des études suggèrent que la consommation de fruits et légumes ou la pratique d'exercices physiques suivis d'une période de repos stimulent la synthèse de nouveaux neurones à partir des cellules souches. Les nouveaux neurones forment des connexions avec les neurones existants, stimulant efficacement l'apprentissage et la mémorisation. En pratique, un temps de sommeil normal la nuit suffit pour que les cellules récupèrent après un effort physique ou une consommation de toxines végétales.

Des chercheurs voient dans l'hormèse une piste de nouveaux médicaments, voire d'explication du mécanisme de certains médicaments déjà sur le marché. C'est le cas de la galantamine, la molécule extraite des fleurs blanches du genre *Galanthus* telles que les perce-neige, prescrite aux patients atteints de la maladie d'Alzheimer. Cette molécule est censée améliorer, certes



LE BROCOLI ET LE RAISIN contiennent des toxines, respectivement le sulforaphane et le resvératrol, qui stressent les cellules de l'organisme et lui permettent de lutter contre certaines maladies. De tels composés sont omniprésents dans les fruits et les légumes.

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Yun et T. Finkel, *Mitohormesis*, *Cell Metabolism*, vol. 19, n° 5, pp. 757-766, 2014.

J. Xu et al., *Neurotrophic natural products: chemistry and biology*, *Angewandte Chemie Int. Ed.*, vol. 53, n° 4, pp. 956-987, 2014.

A. M. Stranahan et M. P. Mattson, *Recruiting adaptive cellular stress responses for successful brain ageing*, *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 13, pp. 209-216, 2012.

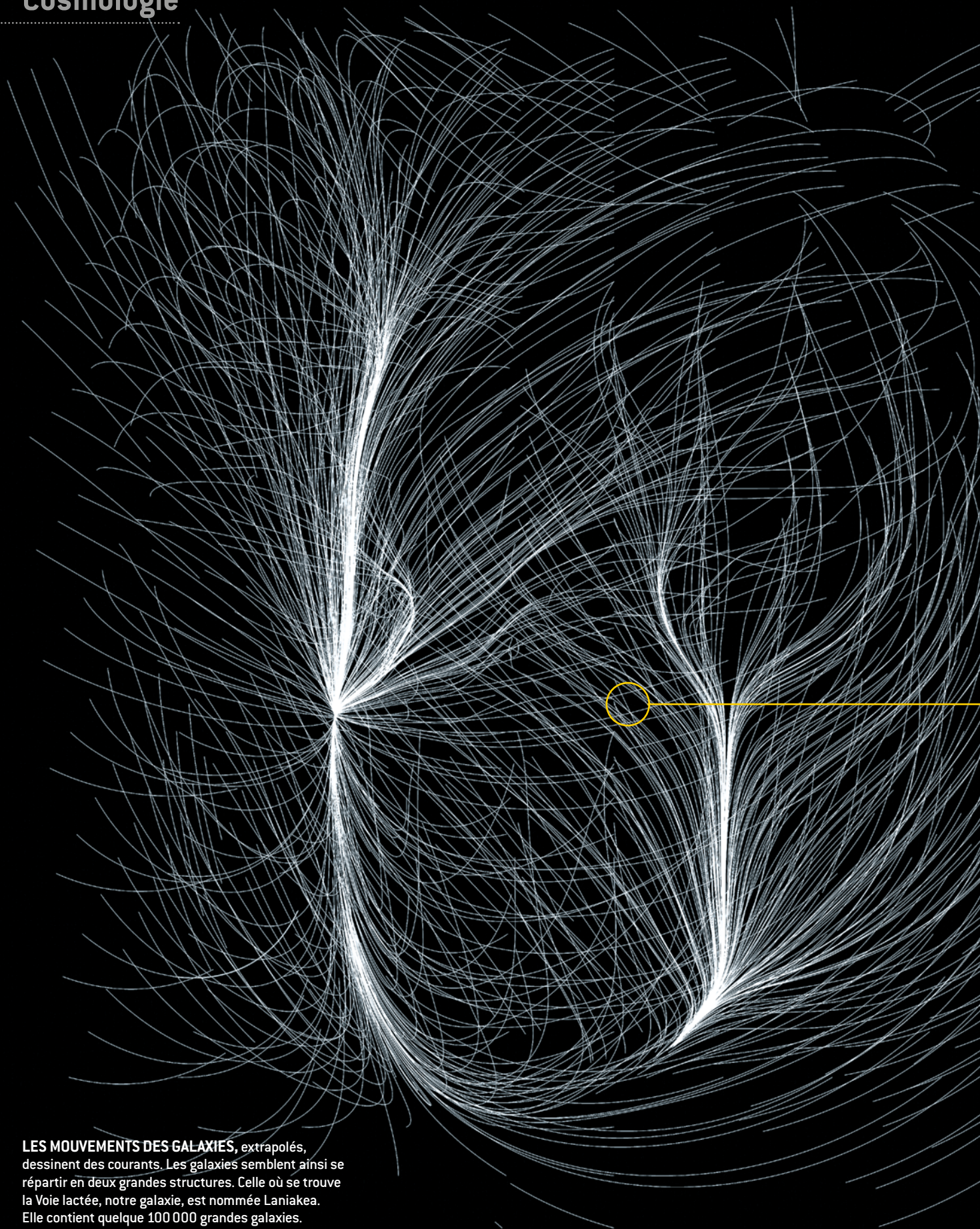
modestement, la mémoire des patients en augmentant la concentration d'acétylcholine (une molécule qui joue un rôle dans la communication entre les neurones) dans les cellules. Elle produit un certain stress dans les neurones qui semble les protéger de la neurodégénérescence tout en améliorant leur capacité à user de molécules et de signaux électriques pour communiquer.

D'autres pistes viendront peut-être de la médecine traditionnelle à base de plantes. Une substance connue sous le nom d'uwhangchungsimwon est utilisée dans la pharmacopée coréenne pour prévenir l'AVC. Elle protégerait les neurones en induisant une réponse au stress favorisant la fabrication de protéines, telle Bcl-xL, qui empêchent les cellules de mourir.

Le concept d'hormèse n'échappe pas à son lot de controverses. Certains chercheurs se demandent si les méthodes employées pour déterminer la dose à laquelle les effets bénéfiques disparaissent sont réellement adéquates. Le seuil exact à partir duquel une réaction toxique commence peut varier entre les individus. Évaluer les effets bénéfiques potentiels de l'hormèse requiert des essais cliniques contrôlés. Actuellement, de nombreuses plantes sont commercialisées en tant que médicaments accompagnés de revendications infondées sur leurs bienfaits. Le Centre américain pour la santé complémentaire et intégrative a été établi en 1998 en partie pour aider à financer des études sur de tels composés.

Ces défis ne devraient pas décourager les scientifiques de poursuivre leurs recherches sur l'hormèse. Car les toxines qui induisent un stress cellulaire pourraient avoir des avantages par rapport aux médicaments classiques, qui présentent parfois des effets secondaires dérégulant le fonctionnement normal des neurones.

Certains laboratoires, dont le mien, poursuivent leurs recherches sur les médicaments hormétiques et ont obtenu des résultats encourageants sur des modèles animaux de plusieurs maladies neurodégénératives humaines. De précédentes recherches indiquent que ces médicaments protègent les neurones de la mort en les rendant plus résistants à une attaque de radicaux libres et à d'autres lésions moléculaires. Dans un futur proche, une peau de pomme, des noix ou de la poudre de curcuma deviendront peut-être la base d'une génération radicalement nouvelle de traitements contre les maladies du cerveau. ■



LES MOUVEMENTS DES GALAXIES, extrapolés, dessinent des courants. Les galaxies semblent ainsi se répartir en deux grandes structures. Celle où se trouve la Voie lactée, notre galaxie, est nommée Laniakea. Elle contient quelque 100 000 grandes galaxies.

Où sommes-nous dans l'Univers ?

Noam Libeskind et Brent Tully

La Voie lactée fait partie d'un énorme superamas de galaxies qui constitue l'une des plus grandes structures connues de l'Univers. Cette découverte découle d'un effort de cartographie cosmique qui ne fait que commencer.

L'ESSENTIEL

- Les étoiles se regroupent en galaxies, les galaxies en amas, et les amas en superamas. Ces derniers constituent les plus grandes structures connues de l'Univers.
- Les mouvements de milliers de galaxies proches ont révélé que le superamas où réside la Voie lactée est plus étendu qu'on ne le pensait. Ce superamas a été nommé Laniakea.
- Une cartographie plus détaillée de Laniakea et des superamas voisins aidera à mieux comprendre la formation des galaxies et à éclaircir les mystères de la matière noire et de l'énergie sombre.

NOUS
SOMMES
ICI

Daniel Pomarède, CEA Saclay/IRFU

Imaginez que, en visite dans une galaxie lointaine, vous vouliez écrire à vos amis restés sur Terre. L'adresse commence par le numéro de la maison, le nom de la rue et de la ville, quelque part sur notre monde, la troisième planète en partant du Soleil. Il vous faut ensuite indiquer l'emplacement du Soleil dans le bras d'Orion, un bras spiral des faubourgs de la Voie lactée, puis la localisation de la Voie lactée dans le Groupe local qui contient plus d'une cinquantaine de galaxies et s'étend sur quelque sept millions d'années-lumière. Le Groupe local lui-même se trouve à la périphérie de l'amas de la Vierge, un amas de plus d'un millier de galaxies situé à 50 millions d'années-lumière et qui représente une petite partie de ce que l'on nommait jusqu'ici le « Superamas local » : une région d'environ 100 millions d'années-lumière de diamètre contenant plusieurs centaines d'amas de galaxies. On pense que les superamas de ce type sont les plus vastes structures de l'Univers. Dans ces superamas, les galaxies dessinent des filaments, voire des nappes à deux dimensions. Et les superamas contiennent aussi d'immenses espaces presque entièrement vides de galaxies.

Jusqu'à récemment, le Superamas local était considéré comme la dernière ligne de notre adresse cosmique. Toute indication supplémentaire aurait été vaine, pensait-on, car à une échelle plus vaste, le tissu des superamas se fond en un contenu homogène dépourvu de structures discernables : les galaxies y semblent distribuées de façon régulière. Toutefois, en 2014, l'un de nous (Brent Tully) et trois chercheurs, dont Hélène Courtois, de l'université de Lyon, et Daniel Pomarède, du CEA, avons découvert que nous faisons partie d'une structure si immense que nos représentations en ont été bouleversées. Il s'avère en effet que ce que l'on avait identifié comme le Superamas local n'est qu'un lobe d'un superamas rassemblant 100 000 grandes galaxies et

s'étendant sur une distance dix fois plus grande de 500 millions d'années-lumière. L'équipe qui a découvert ce superamas gigantesque l'a nommé Laniakea (« horizon céleste immense » en langue hawaïenne) en l'honneur des premiers Polynésiens qui ont exploré les immensités de l'océan Pacifique en se guidant aux étoiles. La Voie lactée se trouve loin du centre de Laniakea, quelque part dans une de ses provinces reculées.

Laniakea n'est pas juste une ligne de plus dans notre adresse cosmique. En étudiant l'architecture et la dynamique de cette structure immense, nous pouvons en apprendre davantage sur le passé de l'Univers et sur son avenir. La répartition des galaxies et leur mouvement dans Laniakea nous renseignent non seulement sur la manière dont les structures de galaxies se forment et croissent, mais aussi sur la « matière noire », cette substance invisible dont les physiciens supposent qu'elle constitue près de 80 % de la matière du cosmos. Laniakea pourrait aussi nous aider à comprendre la nature de l'« énergie sombre », cette composante de l'Univers découverte en 1998 qui serait à l'origine d'une accélération de l'expansion cosmique, déterminante pour prédire le destin ultime de l'Univers.

Finalement, ce superamas pourrait ne pas être la dernière ligne de notre adresse cosmique : il pourrait faire lui-même partie d'une structure plus vaste encore à découvrir.

Sonder l'Univers grâce aux mouvements des galaxies

L'équipe qui a découvert Laniakea ne le cherchait pas. Ses travaux visaient initialement à répondre à des questions persistantes sur la nature fondamentale de l'Univers.

Les scientifiques ont constaté depuis près d'un siècle que le cosmos est en expansion : l'espace enfle et les galaxies s'éloignent les unes des autres comme des points à la surface d'un ballon que l'on gonfle. Cependant, au cours des dernières décennies, il est apparu que la plupart des galaxies ne font pas que s'éloigner les unes des autres, soumises à la seule action de l'expansion cosmique. Une autre force, locale celle-là, est à l'œuvre : l'attraction gravitationnelle exercée par les amas de matière voisins et susceptible de retenir

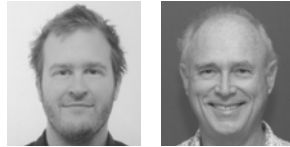
une galaxie à contrecourant du flot de l'expansion. On qualifie de « vitesse particulière » la différence entre le mouvement d'une galaxie lié à l'expansion cosmique et son mouvement lié à son environnement gravitationnel.

En comptabilisant toutes les étoiles de toutes les galaxies visibles et en y ajoutant tout le gaz et les autres formes de matière ordinaire qu'elles doivent contenir, on obtient une masse totale très insuffisante (il s'en faut d'un ordre de grandeur) pour expliquer les vitesses particulières observées. La masse manquante est qualifiée de « matière noire » par les physiciens, un terme qui ne fait essentiellement que mettre un nom sur l'inconnu. On suppose que cette matière noire est constituée de particules qui sont pratiquement insensibles aux forces telles que l'électromagnétisme et qui n'interagissent avec le reste de l'Univers que *via* la gravitation. La matière noire exerce la force gravitationnelle « manquante » nécessaire pour rendre compte des vitesses observées. Les scientifiques pensent que les galaxies s'agglutinent au sein de régions riches en matière noire, qui constitue l'échafaudage invisible du cosmos.

Notre équipe d'astronomes a vite compris qu'en cartographiant l'écoulement des galaxies à partir de leurs vitesses particulières, on pourrait en déduire la distribution cachée de la matière noire dans le cosmos, les plus grandes concentrations de cette mystérieuse substance étant trahies par leur influence gravitationnelle sur le mouvement des galaxies. Si, par exemple, des galaxies convergent vers un point donné, c'est qu'elles y sont attirées gravitationnellement car il s'agit d'une région à forte densité de matière.

Nous nous sommes aussi rendu compte que la détermination précise de la densité et de la distribution de toutes les formes de matière dans l'Univers nous aiderait à résoudre un autre mystère encore plus profond : le fait que le cosmos est non seulement en expansion, mais en expansion accélérée. Ce comportement va à l'encontre de l'intuition : c'est comme si une pierre lancée en l'air partait en flèche vers l'espace plutôt que de retomber sur Terre. On parle d'« énergie sombre » pour désigner ce qui se cache derrière ce phénomène étrange, qui a des implications profondes pour l'avenir de l'Univers. L'expansion accélérée du cosmos suggère que la plupart des galaxies s'éloigneront les unes

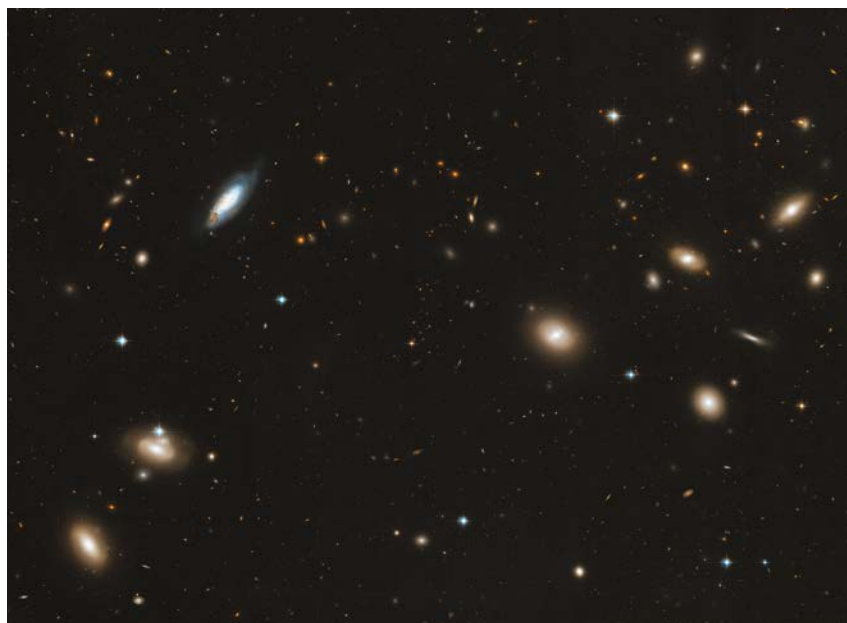
■ LES AUTEURS



Noam I. LIBESKIND est cosmologiste à l'institut Leibniz d'astrophysique de Potsdam, en Allemagne. Il modélise l'évolution de l'Univers et la formation des galaxies, en particulier la Voie lactée et les galaxies naines qui l'entourent.

R. Brent TULLY est astronome à l'université de Hawaï. Il est spécialiste de la cartographie et de la distribution des galaxies.

LES AMAS DE GALAXIES tels que celui de la Chevelure de Bérénice (*ci-contre*) sont les éléments de base des plus grandes structures de l'Univers. Distant de plus de 300 millions d'années-lumière et contenant un millier de grandes galaxies, l'amas de la Chevelure de Bérénice fait partie d'une structure encore plus grande, le superamas de la Chevelure de Bérénice, qui se trouve hors des frontières de Laniakea.



NASA, ESA and Hubble Heritage Team STScI/AURA

des autres à des vitesses sans cesse plus élevées. Mais pour savoir précisément comment tout cela se terminera, il faut déterminer non seulement en quoi consiste l'énergie sombre, mais aussi combien de matière il y a dans l'Univers : si la densité de matière est suffisante, dans un futur lointain, l'expansion pourrait ralentir et laisser place à un effondrement de l'Univers sur lui-même sous l'effet de la gravitation de sa propre masse.

Ainsi, le mouvement des galaxies dans l'Univers n'est pas sans rappeler celui de liquides qui coulent des hauteurs vers le fond des vallées, qui seraient ici les zones de forte densité. C'est au cours de cette cartographie des écoulements galactiques visant à mesurer la densité de la matière ordinaire et de la matière noire que Laniakea a finalement été mis en évidence.

Hydrographie cosmique

La cartographie de ces écoulements galactiques nécessite de connaître pour chaque galaxie à la fois le mouvement dû à l'expansion cosmique et le mouvement lié à la matière avoisinante.

Dans un premier temps, les astronomes mesurent le décalage vers le rouge d'une galaxie (l'étirement de la longueur d'onde du rayonnement qu'elle émet tandis qu'elle s'éloigne de nous du fait de l'expansion). Le son d'une sirène qui s'éloigne de nous est plus grave que lorsqu'elle s'approche, parce que les ondes sonores sont étirées

par le mouvement et donc décalées vers des longueurs d'onde plus grandes et des fréquences plus basses. Par un phénomène similaire, les ondes lumineuses d'une galaxie qui s'éloigne de nous sont étirées vers des fréquences plus basses et des longueurs d'onde plus grandes, d'où l'expression « décalage vers le rouge » (c'est bien ce qui arrive à la lumière visible, mais l'expression est utilisée de façon générale pour un décalage vers des plus grandes longueurs d'onde). Et plus la galaxie s'éloigne vite, plus ce décalage vers le rouge est important. Ainsi, le décalage vers le rouge d'une galaxie fournit aux astronomes une mesure de sa vitesse globale, ainsi qu'une première estimation de sa distance (parce que, en principe, la vitesse d'éloignement d'une galaxie sous l'effet de l'expansion est proportionnelle à la distance qui nous en sépare).

Pour déterminer quelle part de la vitesse d'une galaxie résulte de l'attraction gravitationnelle locale, il faut mesurer sa distance par une autre méthode, indépendante du décalage vers le rouge. Par exemple, d'après des estimations rigoureuses du taux d'expansion de l'Univers, une galaxie située à 3,25 millions d'années-lumière devrait s'éloigner de nous à environ 70 kilomètres par seconde. Si, au lieu de cela, le décalage vers le rouge de la galaxie indique une vitesse de 60 kilomètres par seconde, on en déduit que les concentrations de matière autour d'elle lui confèrent une vitesse propre de 10 kilomètres par seconde par rapport à la trame de l'Univers.

Les techniques utilisées pour fournir des mesures de distance indépendantes de la vitesse reposent essentiellement sur le fait que l'intensité de la lumière décroît comme l'inverse du carré de la distance à sa source. En d'autres termes, si vous voyez deux phares dont vous savez qu'ils sont identiques, mais que l'un d'entre eux apparaît quatre fois moins brillant, vous pouvez en conclure que ce dernier se trouve deux fois plus loin. En astronomie, ces phares identiques sont qualifiés de « chandelles cosmiques ». Ce sont des objets astrophysiques dont on connaît bien les propriétés lumineuses. Parmi ces chandelles figurent certains types d'étoiles périodiques nommées céphéides, un type particulier d'explosion d'étoiles en supernova, ou même des galaxies massives comme l'ont proposé, en 1977, Brent Tully et l'Américain Richard Fisher.

Ces deux astronomes ont en effet déterminé une relation (dite de Tully-Fisher) reposant sur le fait que les galaxies massives sont à la fois plus lumineuses et tournent plus vite sur elles-mêmes que les petites galaxies : elles contiennent plus d'étoiles et doivent donc tourner plus vite pour ne pas s'effondrer sous l'effet de leur auto-gravité, plus intense. Mesurez la vitesse de rotation de la galaxie et vous aurez une estimation du nombre d'étoiles qu'elle contient et donc de sa luminosité intrinsèque. Comparez cette luminosité avec sa luminosité apparente dans le ciel, et vous aurez sa distance.

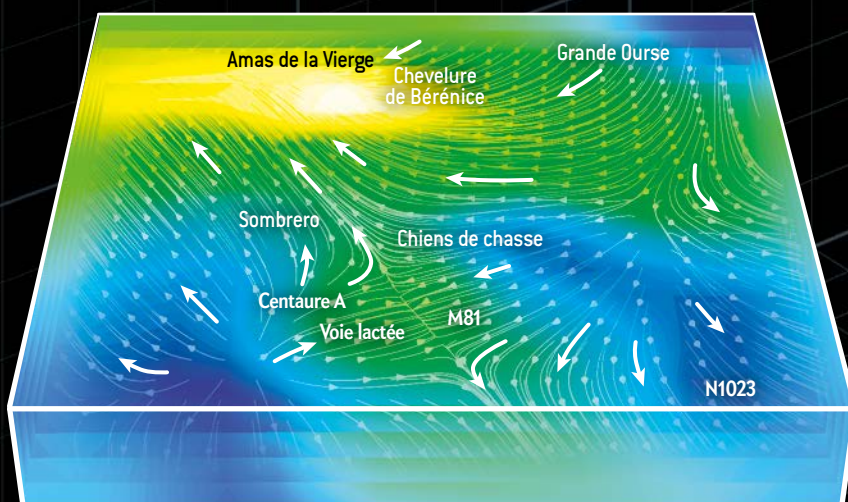
Les galaxies, composées de centaines de milliards d'étoiles, ne sont pas les plus grandes structures de l'Univers. Liées par la gravité, les galaxies se regroupent parfois par centaines en amas de galaxies. La gravité peut ensuite concentrer ces amas pour former des superamas contenant des centaines de milliers de galaxies. Dans cette hiérarchie, l'adresse cosmique du Système solaire est traditionnellement la suivante : galaxie de la Voie lactée, Groupe local, amas de la Vierge, et enfin Superamas local. Des recherches récentes montrent que le Superamas local ne représente en fait qu'une portion d'un autre superamas plus de 100 fois plus gros. Ce vaste superamas est nommé Laniakea (« horizon céleste immense » en langue hawaïenne).

1 CARTOGRAPHIER LE SUPERAMAS LANIAKEA

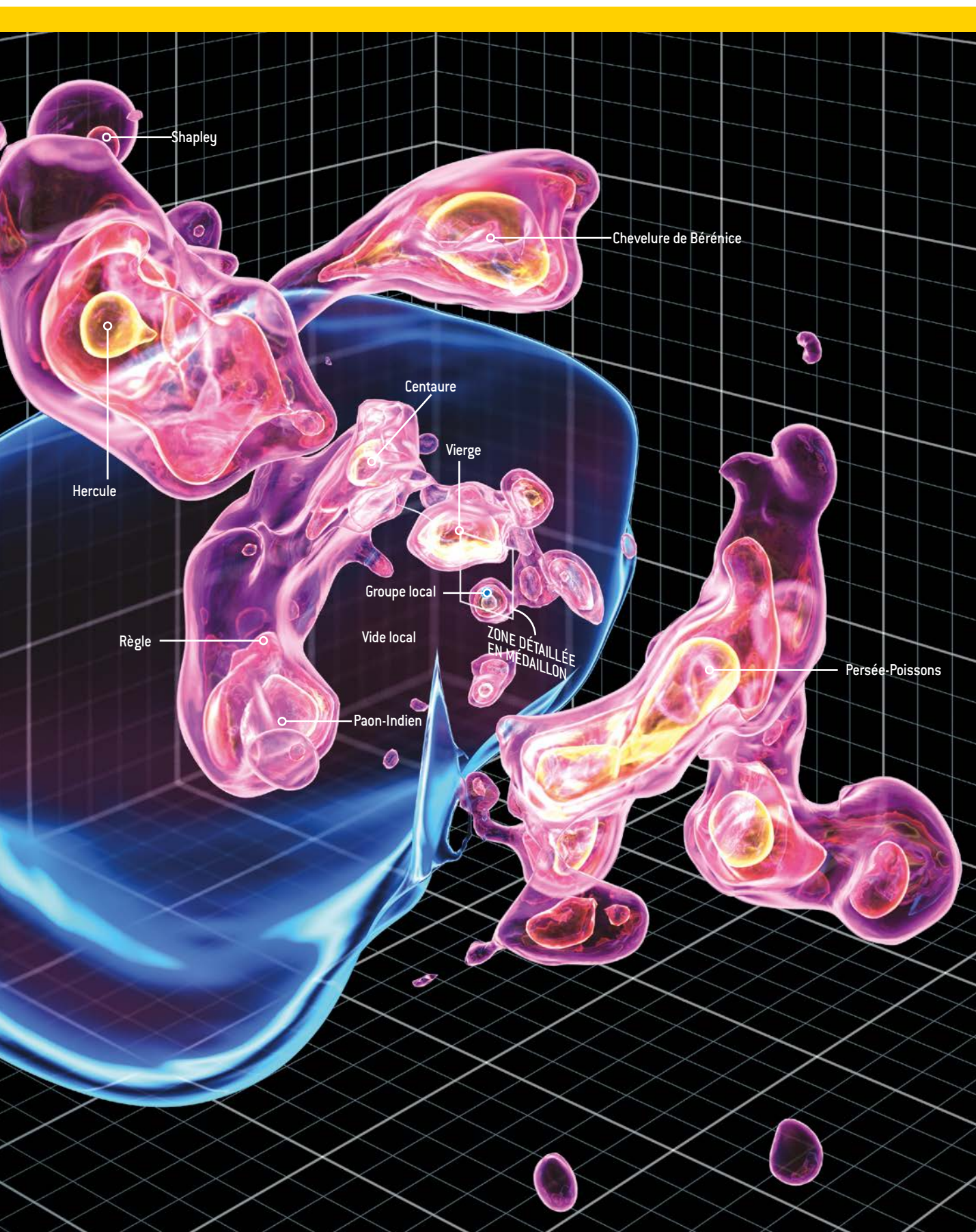
Les frontières des superamas délimitent des régions où la force convergente de la gravité commence à entraver de façon significative le mouvement divergent des galaxies dû à l'expansion cosmique. Ici, les positions de plus de 8 000 galaxies sont cartographiées et colorées en fonction de leur mouvement relatif (leur vitesse et leur trajectoire). Les contours en couleurs chaudes (*jaune et rose*) représentent les amas de galaxies qui convergent rapidement. Les contours de Laniakea apparaissent en bleu, délimitant la région où les amas convergent le plus lentement. Laniakea s'étend sur près d'un demi-milliard d'années-lumière, et ses frontières englobent un ensemble d'amas galactiques qui, en l'absence d'expansion cosmique, convergeraient pour devenir une structure unique liée par sa propre gravité. Au-delà des frontières de Laniakea, on devine des superamas voisins, par exemple ceux de Shapley, d'Hercule ou de Persée-Poissons.

2 SUIVRE LE MOUVEMENT

Un zoom à l'intérieur de Laniakea révèle la distribution de matière noire et le processus d'évolution galactique. Prenons par exemple une tranche tridimensionnelle de Laniakea contenant la Voie lactée et le Groupe local qui l'abrite (*détail ci-dessous*). Les flèches correspondent au mouvement des galaxies, qui s'écoulent vers des zones où la matière est dense et la gravité forte (*représentées par des couleurs chaudes*) et s'éloignent des régions de basse densité (*couleurs froides*). Les mesures de flux réalisées par Noam Libeskind ont montré que le Groupe local tombe le long d'un filament de matière noire long de 50 millions d'années-lumière vers l'amas de la Vierge (*en jaune*), un assemblage de plus d'un millier de galaxies entassées dans un volume de 13 millions d'années-lumière. On pense que de tels filaments jouent un rôle important dans la formation des galaxies.



LANIAKEA





© NRAO

Selon l'ordre de grandeur des distances mesurées, chaque type de chandelle cosmique est plus ou moins bien adapté. On ne peut bien observer les céphéides que si les galaxies qui les abritent sont proches de la Voie lactée. Elles ne conviennent donc pas pour la mesure de grandes distances. La relation de Tully-Fisher est applicable à de nombreuses galaxies spirales, mais elle fournit des estimations de distance dont l'incertitude peut dépasser 20 %. Quant aux supernovæ de type Ia, elles donnent des mesures deux fois plus précises et sont visibles sur des distances cosmiques très grandes, mais elles sont rares : une par siècle environ dans une galaxie moyenne.

À partir d'un échantillon assez grand de galaxies dont on connaît les vitesses propres, les astronomes sont en mesure d'établir une carte des écoulements galactiques aux plus grandes échelles. À ces échelles immenses, le mouvement des galaxies est comparable à l'écoulement d'un réseau de rivières qui serpentent à travers une sorte de « bassin horographique cosmique » où les lignes de partage des eaux ne seraient plus définies par le relief du paysage, mais par les attractions gravitationnelles des

LE TÉLESCOPE DE GREEN BANK, en Virginie-Occidentale, aux États-Unis, est le plus grand radiotélescope orientable du monde. Sa surface collectrice mesure 100 mètres par 110 mètres. L'équipe d'Hélène Courtois et Brent Tully a utilisé certaines observations de ce télescope pour établir le catalogue *Cosmicflows*. Les données spectroscopiques collectées ont été utilisées pour mesurer la vitesse de rotation de galaxies spirales. Cette vitesse, reliée à la luminosité intrinsèque des galaxies par la loi de Tully-Fisher, permet de calculer la distance de la galaxie considérée.

grandes structures voisines. Dans ces cartes cosmographiques, les galaxies s'écoulent le long de courants, tourbillonnent dans des zones de remous ou s'amassent dans des bassins, révélant indirectement la structure, la dynamique, les origines et l'avenir des plus grandes accumulations de matière de l'Univers (voir l'encadré pages 64-65).

La découverte de Laniakea

Pour répondre à nos questions sur la matière noire et l'énergie sombre, il fallait établir des cartes à des échelles aussi grandes que possible et compiler les meilleures données disponibles provenant d'un grand nombre de programmes d'observation. En 2008, Brent Tully, Hélène Courtois et leurs collègues ont publié le catalogue *Cosmicflows*, qui compilait divers ensembles de données pour détailler la dynamique de 1 800 galaxies à moins de 130 millions d'années-lumière de la Voie lactée. L'équipe a prolongé ses efforts en 2013 avec le catalogue *Cosmicflows-2*, qui compile les mouvements d'environ 8 000 galaxies dans un volume d'environ 650 millions d'années-lumière de diamètre.

L'un des membres de l'équipe, Yehuda Hoffman, de l'université hébraïque de Jérusalem, a développé des méthodes pour déduire précisément la distribution de matière noire à partir des vitesses propres contenues dans les données *Cosmicflows*.

Le catalogue s'étoffant, nous avons eu la surprise de découvrir un motif inattendu caché dans la masse des données : les contours d'une nouvelle structure cosmique qui n'avait jamais encore été observée. Les amas de galaxies d'une région large de plus de 400 millions d'années-lumière se déplaçaient tous ensemble au sein d'un « bassin d'attraction » local, comme l'eau qui s'accumule au point topographique le plus bas d'un paysage. S'il n'y avait pas l'expansion continue de l'Univers, ces galaxies finiraient par s'agréger en une structure compacte liée par la gravitation. Ce vaste essaim de galaxies constitue le superamas Laniakea.

Jusqu'à présent, l'étude du mouvement des galaxies au sein de Laniakea est en parfait accord avec les modèles les plus consensuels de distribution de la matière noire. De surcroît, la densité totale de matière visible et noire dans Laniakea suggère que, comme le pensaient les théoriciens de l'énergie sombre, l'Univers est destiné à subir une perpétuelle expansion accélérée.

Ces conclusions restent provisoires. La tâche immense de cartographie des écoulements galactiques ne fait que commencer. Actuellement, on ne dispose d'une estimation des vitesses propres que pour 20 % des galaxies situées à moins de 400 millions d'années-lumière, et de nombreuses mesures de distance faites grâce aux chandelles cosmiques sont encore entachées d'incertitudes élevées. De surcroît, les cartes actuelles ne couvrent qu'un millionième du volume de l'Univers observable. Néanmoins, ces premières esquisses de notre voisinage galactique donnent une perception nouvelle de notre position dans les bassins cosmographiques et les vastes étendues de l'Univers.

Un voisinage complexe

Faisons le tour des torrents tumultueux qui composent notre foyer céleste récemment découvert, Laniakea, en partant de l'élément qui nous est le plus familier : nous. Quelle que soit la vitesse à laquelle nous voyageons sur Terre en lisant cet article, nous tournons autour du Soleil avec le reste de la planète à environ 30 kilomètres

par seconde. Le Soleil, quant à lui, tourne autour du centre de la Voie lactée à quelque 200 kilomètres par seconde. Et l'ensemble des galaxies du Groupe local, dont la Voie lactée, se précipitent vers une mystérieuse concentration de masse dans la direction de la constellation du Centaure à une vitesse supérieure à 600 kilomètres par seconde (nous reviendrons sur ce point). Vous n'imaginiez probablement pas qu'il était possible de se déplacer aussi vite rien qu'en lisant un article, voire en ne faisant rien du tout !

Mais au lieu de nous laisser emporter par la Terre, prenons notre envol pour avoir une vue d'ensemble sur notre voisinage. Nous quittons d'abord la Voie lactée, et notre périple à travers les étendues de Laniakea commence par la rencontre avec deux galaxies naines, les Petit et Grand Nuages de Magellan, situés à des distances comprises entre 180 000 et 220 000 années-lumière « seulement ». On peut discerner les Nuages de Magellan depuis l'hémisphère Sud de la Terre, mais le meilleur point de vue est en Antarctique, pendant l'hiver. La seule autre galaxie visible à l'œil nu est la spirale géante d'Andromède, bien qu'elle n'apparaisse guère que comme une tache floue par une nuit très sombre.

Andromède se trouve à 2,5 millions d'années-lumière et vient à la rencontre de la Voie lactée à une vitesse propre de quelque 110 kilomètres par seconde. Dans quatre milliards d'années environ, les deux galaxies se rencontreront lors d'une collision frontale au cours de laquelle elles fusionneront en une galaxie elliptique unique, homogène et constituée de vieilles étoiles rouges. Il est peu probable que le Système solaire soit affecté par ce carambolage cosmique : la distance entre les étoiles est tellement grande qu'il n'y a pratiquement aucune chance que deux étoiles s'approchent suffisamment l'une de l'autre pour entrer en collision. La Voie lactée, Andromède et une cinquantaine d'autres galaxies sont membres du Groupe local, une région où la gravité a gagné la bataille contre l'expansion cosmique et qui est en cours d'effondrement. Comme la Voie lactée et ses Nuages de Magellan, chacune de ces grandes galaxies est accompagnée d'un cortège de galaxies naines.

Juste au-delà du Groupe local, à l'intérieur d'un volume d'environ 25 millions d'années-lumière, toutes les galaxies de cette région, dont la nôtre, font partie de ce que faute d'imagination on a nommé la « Feuille locale ». Comme l'indique le

Cosmicflows, un catalogue de galaxies en expansion

Le premier catalogue de galaxies *Cosmicflows* a été élaboré en 2008. Il répertorie la position des galaxies les plus proches de la Voie lactée et leur vitesse propre.

La deuxième version du catalogue, *Cosmicflows-2*, a été publiée en 2013. Elle contient 8 000 galaxies.

Une prochaine version fournira les caractéristiques de près de 13 000 galaxies. L'augmentation du nombre de galaxies permettra d'esquisser avec encore plus de précision les contours de Laniakea.

terme de « feuille », c'est une structure de faible épaisseur, environ 3 millions d'années-lumière. Elle se trouve dans le plan équatorial de ce qu'on appelle le système de coordonnées supergalactique. Au-dessous de ce plan, après une région vide, se trouvent un filament de galaxies, l'Éperon du Lion, ainsi que l'amas de galaxies de la Machine pneumatique (en latin *Antlia*) et de la Dorade, du nom des constellations où on les trouve, vues de la Terre. Au-dessus du plan, il n'y a pratiquement rien à proximité : c'est la région connue sous le nom de Vide local.

Si l'on ne considère que les galaxies contenues dans la Feuille locale, la situation est sans surprise. Ces galaxies s'éloignent les unes des autres au rythme de l'expansion et ne présentent que de faibles vitesses propres dues aux interactions locales. C'est aussi le cas au-dessous de la Feuille locale pour les galaxies de la Machine pneumatique, de la Dorade et du Lion. Cependant, elles s'approchent toutes ensemble à grande vitesse de la Feuille locale. Le coupable est probablement le Vide local. Avec l'expansion de l'Univers, les vides gonflent comme des ballons et la matière, qui s'écoule des régions moins denses vers les régions plus denses, tend à s'accumuler à leurs frontières. Nous comprenons désormais que la Feuille locale est une paroi du Vide local dont l'expansion est en train de nous pousser vers les nuages de la Dorade, de la Machine pneumatique et du Lion.

Des amas aux superamas

En continuant à prendre du recul, nous rencontrons l'amas de la Vierge, qui contient 300 fois plus de galaxies que le Groupe local, entassées dans un volume de 13 millions d'années-lumière de diamètre. Les galaxies de l'amas de la Vierge y tournoient à des vitesses de l'ordre de 700 kilomètres par seconde, et toutes les galaxies situées à moins de 25 millions d'années-lumière de l'extérieur de l'amas tombent vers lui et l'intégreront d'ici 10 milliards d'années. Notre Voie lactée, située à 50 millions d'années-lumière, est donc juste en dehors de cette zone de capture.

Laniakea
apporte un éclairage
sur la formation des structures
de galaxies, mais aussi
sur la matière noire
et l'énergie sombre

À l'échelle suivante, la grande région autour de l'amas de la Vierge qui contient notre propre voisinage est nommée le Superamas local (aussi nommé superamas de la Vierge). Il y a près de trente ans, un groupe d'astronomes surnommés depuis les « Sept samourais » – Sandra Faber, de l'université de Californie à Santa Cruz, et six collègues – a découvert que la Voie lactée n'était pas la seule à filer en direction de la constellation du Centaure à plusieurs centaines de kilomètres par seconde. En fait, ce mouvement est celui de l'intégralité du Superamas local. Ils ont donné le nom de Grand Attracteur à la masse mystérieuse qui attire toutes ces galaxies. À de nombreux égards, le Grand Attracteur n'est pas si mystérieux : la densité de matière dans cette direction du cosmos doit être à l'évidence élevée puisqu'elle contient sept amas comparables à celui de la Vierge dans une sphère de 100 millions d'années-lumière de diamètre. Trois parmi les plus gros de ces amas sont la Règle, le Centaure et l'Hydre.

Si l'on définit les superamas comme des « bassins versants » cosmiques délimités par des « lignes de partage des eaux » au-delà desquelles les galaxies sont destinées à s'éloigner irrémédiablement, le « Superamas local » est mal nommé. Il ne représente qu'une partie d'un ensemble plus vaste (à savoir Laniakea) qui englobe d'autres grandes structures, telles que le superamas du Paon-Indien (du nom de deux constellations de l'hémisphère Sud) et l'amas d'Ophiuchus. Si Laniakea était une grande cité, la région du Grand Attracteur en serait le centre-ville embouteillé. Comme pour la plupart des noyaux urbains, il est difficile d'en préciser le centre exact, mais on peut le placer approximativement quelque part entre les amas de la Règle et du Centaure.

Une telle position relègue notre Voie lactée aux faubourgs reculés, non loin des frontières d'un autre superamas adjacent, dit de Persée-Poissons. Cette frontière est tellement proche en termes cosmiques que nous pouvons l'étudier en détail pour déterminer que Laniakea a une forme globuleuse, plutôt ronde et s'étend sur près d'un demi-milliard d'années-lumière. Au total, les frontières de Laniakea englobent une masse de matière ordinaire et noire

équivalente à quelque 100 millions de milliards de soleils.

Les astronomes entrevoient depuis plusieurs décennies les contours de ce qui pourrait se trouver au-delà de Laniakea. Peu après la découverte du Grand Attracteur par les Sept samourais, quelque chose d'encore plus grand a émergé du brouillard intergalactique. Derrière le Grand Attracteur, mais trois fois plus loin, se trouve une gigantesque accumulation d'amas – la plus dense que nous connaissions dans l'Univers local. Cette lointaine et énorme superstructure porte le nom de superamas de Shapley, du nom de Harlow Shapley, l'astronome qui a détecté les premiers signes de son existence dans les années 1930. (Soit dit en passant, tout comme la Feuille locale, l'amas de la Vierge et la bande principale du Superamas local, le Grand Attracteur et le superamas de Shapley reposent tous sur l'équateur supergalactique. Imaginez une immense crêpe de superamas galactiques, et vous aurez une bonne représentation de notre voisinage cosmique à très grande échelle.)

■ BIBLIOGRAPHIE

N. Libeskind *et al.*, **Planes of satellite galaxies and the cosmic web**, *MNRAS*, vol. 452(1), pp. 1052-1059, 2015.

R. B. Tully *et al.*, **The Laniakea supercluster of galaxies**, *Nature*, vol. 513, pp. 71-73, 2014.

N. Libeskind, **Les galaxies naines et la toile cosmique**, *Pour la Science*, n° 439, mai 2014.

H. M. Courtois *et al.*, **Cosmography of the Local Universe**, *Astronomical Journal*, vol. 146(3), article n° 69, 2013.

S. Gregory et L. Thompson, **La distribution des galaxies : vides et superamas**, *Pour la Science*, n° 55, mai 1982.

Quelle est donc la cause de la vitesse propre – 600 kilomètres par seconde – de notre Superamas local ? Le complexe du Grand Attracteur joue un rôle non négligeable, mais nous devons aussi prendre en compte l'attraction du superamas de Shapley, situé dans la même direction, certes trois fois plus loin, mais qui contient quatre fois plus d'amas densément peuplés.

Cependant, d'après l'inventaire *Cosmicflows-2* (ce même catalogue qui a révélé Laniakea), ce n'est pas tout. Les vitesses propres des 8000 galaxies de ce catalogue indiquent un écoulement cohérent en direction du superamas de Shapley. Cet écoulement englobe tout le volume du catalogue *Cosmicflows-2*, soit 1,4 milliard d'années-lumière de bout en bout. Cela s'arrête-t-il là ? Nous ne le savons pas encore. Seuls des relevés plus larges, cartographiant des portions d'Univers plus vastes encore, pourront révéler la source attractive ultime (et la structure ultime) qui provoque cet épique écoulement des galaxies de notre Univers local. ■



{ Partagez
les savoirs }

**LES
RENDEZ-
VOUS DU
MUSÉUM**

Entrée
gratuite

**Au Jardin
des Plantes**

Détails sur mnhn.fr, rubrique :
"Les rendez-vous du Muséum"

SCIENCE

COURS PUBLICS

Établissement du cadre chronostratigraphique du Quaternaire et de l'évolution de l'Homme

Jeudi 2 février - 18h : La révolution du radiocarbone
Jeudi 9 février - 18h : Le cadre chronostratigraphique en 2017
Avec *J. Bahain*, géochronologue, professeur du Muséum.

Grand Amphithéâtre du Muséum — 57 rue Cuvier, Paris 5^e

Cycle en lien avec l'Année internationale du Tourisme durable pour le développement

Lundi 20 février - 18h : Qu'est-ce qu'un tourisme responsable ? Les paroxysmes
Animée par *J. Siblet*, directeur du Service du Patrimoine naturel, Muséum. Avec *L. Guérin*, Président de Hop ! Biodiversité, Air France, *A. Horellou*, Responsable Autorité scientifique CITES France, Service du Patrimoine naturel, Muséum, *G. Macava*, ambassadeur du Costa Rica en France.

FILMS

Cycle Pousse-Pousse (pour les enfants à partir de 2 ans)

Samedi 25 février -16h : Les contes de la mer (45', 2015)
Un programme de trois films d'animation pour découvrir différemment le monde de la mer, en famille !

UNE EXPO / DES DÉBATS

Lundi 27 février -18h : Comment l'hibernation chez les ours inspire la recherche médicale
Avec *E. Lefai*, biologiste INRA, Laboratoire biomédicale, Université de Lyon, *Y. Le Maho*, écophysiologiste, Université de Strasbourg, *J. Terrien*, spécialiste des mécanismes adaptatifs et évolution, Muséum.

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution — 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e



Le retour de la forêt

Au XIX^e siècle, deux lois reposant sur un discours environnemental catastrophiste ont permis à l'État d'asseoir son autorité sur les espaces ruraux... en favorisant le reboisement.

Guillaume Decocq, Bernard Kalaora et Chloé Vlassopoulos

Novembre 1843. De retour d'un voyage dans les Alpes, l'économiste Adolphe Blanqui, livre ses inquiétudes sur le déboisement des montagnes dans un rapport de l'Académie des sciences morales et politiques. Pour lui, si le pays ne se reboise pas vite, il court à sa perte :

Le sol dépouillé d'herbes et d'arbres par l'abus du pacage et par le déboisement, porphyrisé par un soleil brûlant, sans cohésion, sans point d'appui se précipite alors dans le fond des vallées, tantôt sous forme de lave noire, jaune ou rougeâtre, tantôt par courant de galets et même de blocs énormes qui bondissent avec un horrible fracas et produisent dans leur course impétueuse les plus étranges bouleversements. Il n'y a pas de temps à perdre, ou bien, dans cinquante ans d'ici, la France sera séparée du Piémont comme l'Égypte de la Syrie : par un désert.

Hormis son lyrisme désuet, ce tableau apocalyptique ressemble fort aux discours que l'on entend depuis quelques années, alors que le réchauffement climatique induit par l'émission des gaz à effet de serre est une préoccupation grandissante dont se sont emparées les politiques publiques, nationales et internationales.

En France, l'heure est à la dynamisation de la sylviculture et au remplacement des vieux arbres par de nouveaux :

il faut rajeunir les forêts en les exploitant plus intensément, de manière à piéger davantage de CO₂. Tel est, en substance, le propos sur les forêts de la loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt du 13 octobre 2014. À l'échelle internationale, la marchandisation du carbone lancée par le protocole de Kyoto, en 1997, place la forêt au premier plan dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Certes, les faits sont indiscutables : *ex aequo* avec l'agriculture, la foresterie constitue la quatrième cause mondiale d'émission de gaz à effet de serre après l'énergie, l'industrie et les transports, selon le rapport du programme des Nations unies pour l'environnement de 2012. La déforestation est la première source incriminée, avant les feux de tourbe et de forêts. En 2014, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) a estimé que la perte annuelle nette de superficie forestière entre 2000 et 2005 dans le monde s'élevait à 7,3 millions d'hectares (ha) par an. Or d'une part, les forêts constituent des puits de carbone naturels : ensemble, les forêts boréales, tempérées et tropicales représentent près de la moitié du carbone stocké par la biosphère et 77 % du stock constitué par la biomasse aérienne. D'autre part, la destruction des forêts est source d'émission de

L'ESSENTIEL

■ En France, au XIX^e siècle, les génies forestier et civil rivalisent d'arguments pour convaincre du rôle protecteur de la forêt contre les aléas climatiques.

■ Ignorant les récentes avancées scientifiques, le discours joue sur la fibre émotionnelle et patriotique de l'opinion.

■ Il aboutit aux lois de 1860 et 1882, qui conduisent au boisement de 250 000 hectares de montagne au détriment des sociétés paysannes locales.

■ En écho, le « marché du carbone » mondialisé du XXI^e siècle présente de nouveau la forêt comme un remède miracle contre le réchauffement climatique.

© Bibliothèque municipale de Toulouse - Domaine public

