

HOMO SAPIENS INFORMATICS chronique de Gilles Dowek

L'achat hors-ligne bientôt une activité de luxe !

Avec des coûts réduits, l'achat ou l'enseignement en ligne rendront-ils les mêmes activités hors-ligne prohibitives ?



Les frimas sont revenus et nous allons bientôt partir à la chasse aux cadeaux, au pas de charge, à perdre haleine, d'une boutique en ligne à une autre. À la même saison, l'homme du XX^e siècle courait lui aussi d'une boutique à une autre, mais dans les rues verglacées et dans les allées des centres commerciaux.

En France, le commerce électronique représente aujourd'hui 7 % du commerce de détail sur l'année. Et les courses de Noël, 20 % de ces ventes en ligne. Les avantages de cette forme de commerce sont bien connus : l'effort physique moindre, l'offre plus vaste — essayez, par exemple, de trouver *L'homme invisible* de H. G. Wells dans une librairie de quartier —, la possibilité d'acheter un objet à toute heure du jour et de la nuit, le temps d'hésiter avant de se décider, les prix plus bas, etc. Et ses inconvénients également : le délai de livraison parfois long, l'impossibilité de voir, toucher, palper les objets avant de les acheter, etc.

Pour certains objets, tels les billets de train ou d'avion, les avantages priment, si bien que l'essentiel des ventes s'effectue désormais en ligne. Pour d'autres, ce sont plutôt les inconvénients qui dominent. Ainsi, nous préférons souvent acheter un steak tartare chez le boucher plutôt que de nous le faire livrer par la Poste trois jours plus tard.

L'un des avantages du commerce électronique, nous l'avons dit, est que les prix sont souvent plus bas que dans les boutiques en ville. Cela s'explique, en partie, par le coût élevé de ces boutiques : il faut payer un loyer, le salaire des vendeurs et immobiliser un

stock important, qui risque en outre de rester invendu. Pour des objets volumineux ou qui se vendent à un faible débit, par exemple les meubles, ce coût, en valeur relative, est plus élevé encore. Ainsi, il n'est pas surprenant que le prix d'un canapé dans une boutique en ville soit plus élevé que celui de ce même canapé dans une boutique en ligne. Pourtant, un meuble est typiquement un objet



LE CHIFFRE D'AFFAIRES du commerce électronique français a progressé de 15 % au deuxième trimestre 2016, pour atteindre 17,4 milliards d'euros.

que nous aimons voir et toucher avant de l'acheter. Cela mène donc à une segmentation du marché : les meubles de luxe sont vendus en ville à des clients prêts à dépenser de l'argent pour qu'ils puissent les voir et les toucher avant de les acheter, et les meubles ordinaires sont vendus en ligne.

Ce phénomène présente de nombreuses similitudes avec l'évolution du spectacle vivant au moment de l'apparition du cinéma,

puis de la télévision et de la diffusion de vidéos en ligne. Les coûts élevés d'un théâtre — le loyer du bâtiment, le cachet des comédiens, etc. — font qu'une place de théâtre coûte plusieurs dizaines d'euros, quand une place de cinéma n'en coûte que quelques-uns et la location d'un film en ligne presque rien. Et la différence est plus grande encore dans le cas d'un concert ou d'un opéra. Le spectacle vivant est ainsi devenu un luxe, ce qu'il n'était pas avant l'apparition du cinéma et du phonographe, en l'absence de concurrence. Il suffit pour s'en convaincre de comparer les bruyants spectacles de théâtre de foire du XVII^e siècle au silence compassé aujourd'hui de rigueur dans nos théâtres.

L'université devrait elle-même être bientôt concernée. Même dans les pays développés, suivre un enseignement a longtemps été un privilège réservé à un tout petit nombre. Il s'est ensuite démocratisé, mais, avec le développement de l'enseignement en ligne, une concurrence apparaît et suivre un cours donné par un professeur vivant redeviendra peut-être un jour un luxe : les étudiants suivront les cours ordinaires en ligne et ils iront de temps en temps à l'université.

Ainsi, courir d'une boutique à l'autre, voir et toucher les objets avant de les acheter, deviendront peut-être bientôt un luxe, comme le foie gras et le chapon. ■

Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner



Des énigmes pas si anodines

Certaines devinettes s'appuient sur l'usage statistique que, inconsciemment, nous faisons de la langue. Il faut s'affranchir de ce conditionnement pour les résoudre.

Tout le monde connaît ce type de petite énigme qui peut distraire les convives autour d'un repas : « Je peux tourner sans bouger : que suis-je ? » Supposons que vous y pensiez un moment avant de vous jeter sur la réponse. Si vous ne connaissiez pas déjà cette devinette, il est probable qu'elle vous a un peu déconcerté... « Tourner sans bouger », cela paraît contradictoire. Tout l'amusement repose là-dessus, bien entendu.

En réalité, l'incommodité que nous ressentons vient d'un usage statistique de la langue. En d'autres termes, lorsque nous utilisons le verbe « tourner », c'est en général pour désigner quelque chose qui est en mouvement (la Terre, une toupie, un derviche...). Nous ne saurions en établir un calcul clair, mais une technique d'échantillonnage implicite savonne la pente d'une difficulté intellectuelle sur laquelle mise le concepteur de l'énigme. Comment s'en sortir ? Toujours de la même façon avec ce type d'énigme : en se demandant quel autre usage on peut faire du verbe « tourner ». On peut tourner un film par exemple, mais le lait aussi peut tourner... et voilà que nous trouvons la bonne réponse à l'énigme.

Sans en avoir l'air, la confusion mentale que nous ressentons dans ce cas révèle un fonctionnement très profond de notre cerveau et sa façon d'apprendre. La langue en est justement un exemple parfait. Ainsi, en 1998, les psychologues cognitifs Sébastien Pacton, Michel Fayol et Pierre Perruchet ont étudié avec des élèves de classe de CE2 comment certaines règles du langage

pouvaient être connues des plus jeunes sans qu'ils les aient apprises (S. Pacton et al., « Acquérir l'orthographe du français : apprentissages implicite et explicite », dans A. Florin et J. Morais [éd.], *La maîtrise du langage*, Presses Universitaires de Rennes, pp. 95-118, 2002). « Comment écririez-vous les mots se prononçant *barivo* et *barilo* ? », leur ont-ils notamment demandé.

niveau nouveau
travaux dévot
caveau écheveau
prévôt cerveau
caniveau bravo

EN FRANÇAIS, LE SON /VO/ s'écrit le plus souvent « veau ». Un enfant l'apprend inconsciemment assez vite.

Ces deux mots n'existent pas dans la langue française. L'orthographe choisie allait-elle être aléatoire ? Non. Parmi toutes les façons d'écrire en français le son /o/ – « o », « au », « eau », etc. –, la graphie « eau » choisie par les élèves de CE2 pour le mot *barivo* est aussi celle qui s'impose dans 62,5 % des cas après un v (par exemple « caniveau »), alors qu'elle n'est présente que dans 4,4 % des cas après la lettre l (comme dans « rouleau »). Ces élèves, sans en avoir pleinement conscience, ont appliqué une règle implicite apprise par fréquentation de régularités.

C'est cette même règle qui nous conduit à être troublés lorsque nous lisons les énigmes : « J'ai deux jambes, mais je ne marche pas », « Je réfléchis sans réfléchir ». Les deux réponses – un pantalon et un miroir – révèlent, là aussi, l'usage statistique que nous faisons de la langue. Afin de résoudre ce type d'énigmes, il faut donc repérer la polysémie d'un terme et en examiner les différents usages possibles, pour révéler celui qui fait disparaître les anomalies de l'énoncé.

La procédure nous permet de revenir sur notre jugement initial du cadre mental qui s'impose naturellement dans la compréhension d'un énoncé, donc de nous libérer de l'emprise intellectuelle qui résulte de l'apprentissage de la langue et de révéler la formidable plasticité de notre esprit. Ainsi, alors que cette réalité du langage s'est installée en nous après un nombre colossal d'expériences, il n'est pas impossible de s'affranchir de ce qui pourrait être un esclavage cognitif.

Cette emprise peut aussi résulter d'une forme d'énoncé qui a de fortes chances d'être interprété de façon erronée. Ainsi, pour conclure en beauté, voici une dernière petite énigme fondée sur le même ressort : « Je commence par un e, je termine par un e, pourtant je ne contiens qu'une lettre... et je ne suis pas la lettre e ». Là encore, cherchez la polysémie et vous trouverez la solution (indiquée verticalement dans la marge de ce texte).

Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.

À Toulouse & sur internet
laclefdesetoiles.com

La Clef des ETOILES

ASTRONOMIE

Télescopes, Lunettes, Jumelles géantes, Astrophotographie

OBSERVATION NATURE

Jumelles, Longues-vues, Trépieds, Digiscopie

IMAGERIE

Caméras CCD, Caméras vidéos,
Adaptation APN, Autoguidage,
Spectroscopie, Logiciels

LIBRAIRIE & CADEAUX

Météorites, Globes terrestres, Globes
planétaires, Bijoux solaires, Posters



La Clef des ÉTOILES

Sur internet > www.laclefdesetoiles.com

À Toulouse > 3 rue Romiguières 31000 TOULOUSE

Email > contact@laclefdesetoiles.com

Téléphone > 05 61 22 58 55 Fax > 05 61 22 62 57

Astrophysique

L'endroit le plus vide

En cherchant à expliquer pourquoi une zone de l'Univers est anormalement froide, des astrophysiciens ont découvert une vaste région où la matière se fait rare.

István Szapudi



de l'Univers

Afin d'apercevoir la lumière la plus ancienne de l'Univers, il suffit de régler un vieux poste de télévision entre deux chaînes : les minuscules points qui dansent sur l'écran correspondent au fait que l'antenne est bombardée en permanence par des photons dont certains ont été émis environ 380 000 ans après le Big Bang, il y a quelque 13,8 milliards d'années. Ces photons volent à travers l'espace dans toutes les directions, et correspondent à une température moyenne de 2,7 kelvins ($-270,45^{\circ}\text{C}$). Ils forment le fond diffus cosmologique. La carte bidimensionnelle de ce rayonnement est en quelque sorte la première photographie de l'Univers, dans sa prime jeunesse.

Cette photo présente de petites imperfections. La température fluctue d'environ 10^{-5} à 10^{-4} kelvin autour de la valeur moyenne. On parle d'anisotropies du fond diffus. Ainsi, certaines régions de la carte semblent un peu plus froides, d'autres plus chaudes. Les cosmologistes analysent ces anisotropies pour déterminer certaines caractéristiques de l'Univers primordial.

Plus grave, la carte du fond diffus cosmologique souffre aussi d'anomalies que

les théories cosmologiques standard ne peuvent expliquer entièrement. La plus grande de ces anomalies, initialement repérée en 2004 sur la carte du fond diffus établie par la sonde WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), est le « point froid », une zone du ciel couvrant environ vingt fois la largeur de la pleine lune, où les photons sont inhabituellement froids. Pour certains, cette structure casse la majestueuse symétrie du fond diffus ; pour d'autres, elle met en valeur les traits de l'Univers et ajoute à son mystère. Je fais partie du second camp : dès sa découverte, cette anomalie et ce qu'elle cache m'ont fasciné.

Cette énigme a suscité beaucoup de débats parmi les chercheurs. Une première explication est tout simplement qu'elle serait le fruit du hasard, une accumulation fortuite de photons froids sans cause spécifique. Par analogie, cette idée revient à tirer dix fois de suite pile avec une pièce non truquée : la probabilité est faible, mais non nulle. Dans le cas du point froid, la probabilité que le hasard en soit à l'origine est faible, de l'ordre de 0,5 %. D'autres explications ont été proposées, des plus triviales aux plus fantaisistes, allant de problèmes techniques avec les instruments qui analysent le cosmos à la suggestion que la région froide serait un portail vers un autre univers ou vers des dimensions cachées.

En 2007, avec d'autres astrophysiciens, nous avons proposé l'idée qu'un tel point

CE NUAGE MOLÉCULAIRE opaque masque la lumière venant de l'arrière-plan. La tache noire qu'il crée donne l'illusion d'une zone vide dans l'Univers. Mais c'est bien une véritable région cosmique vide que traquent les astrophysiciens.

© Ken Brown/Mondolitic Studios

■ L'AUTEUR



István SZAPUDI est chercheur à l'Institut d'astronomie de l'université d'Hawaï. Il étudie

la cosmologie et la structure de l'Univers aux grandes échelles.

froid pouvait se former s'il existait dans la même région du ciel un supervide, c'est-à-dire une vaste région d'espace relativement dépourvue de matière et de galaxies. Ce vide serait le lieu le plus vide de l'espace, un désert gigantesque entouré d'un environnement plus dense. Depuis, mes collègues de l'université d'Hawaï et moi-même avons confirmé l'existence du vide, et nous avons trouvé des indices tendant à prouver qu'il pourrait bien rendre compte du point froid.

La traversée d'un vide

Nous en sommes venus à envisager l'existence d'un supervide en considérant la manière dont nous pensons que la lumière interagit avec les vides plus petits. Le supervide postulé serait extrême, mais les vides ordinaires de taille moyenne (des zones contenant relativement peu de galaxies) sont assez répandus dans l'Univers. C'est aussi le cas de leurs contraires, les amas, qui sont de grandes congrégations rassemblant jusqu'à un millier de galaxies.

Les cosmologistes pensent que les germes des vides et des amas sont apparus très tôt dans l'Univers, quand des processus quantiques aléatoires ont produit une légère surdensité de matière dans certaines parties de l'espace et une sous-densité dans d'autres. La masse plus importante des régions de surdensité a produit une attraction gravitationnelle plus forte qui a attiré davantage de matière vers elles au fil du temps, au détriment des régions de sous-densité. Les premières ont fini par devenir des amas, et les secondes des vides.

Pour comprendre l'effet de ces vides contenant peu de matière sur la lumière qui les traverse, partons d'une analogie. Ces vides se comportent avec tout ce qui les traverse comme des collines parcourues par une balle (voir l'encadré pages 28 et 29). Dans un premier temps, quand une particule pénètre dans le vide, elle s'éloigne de régions environnantes de densité supérieure qui exercent une force gravitationnelle tendant à la retenir. Elle ralentit comme une balle qui roulerait en remontant la pente. Dans un second temps, alors que la particule commence à sortir du vide, elle se rapproche de zones denses qui l'attirent. La particule accélère comme une balle dévalant la colline.

Les photons du fond diffus se comportent de manière analogue, sans pour autant changer de vitesse (la vitesse de la lumière est toujours constante) : ils perdent

de l'énergie puis en gagnent, ce qui se traduit par une variation de leur longueur d'onde, qui est directement proportionnelle à leur température. Quand un photon pénètre dans un vide, il grimpe la colline et perd de l'énergie, en d'autres termes il se refroidit. En descendant la colline de l'autre côté, le photon récupère son énergie. Par conséquent, il arriverait de l'autre côté avec la même température qu'il avait au départ... si l'Univers était statique ou en expansion constante (auquel cas l'effet serait infime).

Or ce n'est pas le cas. Depuis les travaux d'Edwin Hubble, il est clair que l'Univers est en expansion. Mais ces deux dernières décennies, grâce à l'étude des supernovae de type Ia (des explosions d'étoiles particulières), les chercheurs ont découvert que cette expansion accélère. La plupart des cosmologistes attribuent cette accélération à l'énergie sombre, un élément de nature inconnue présent dans tout l'espace qui semble contrer l'attraction gravitationnelle.

L'accélération de l'Univers complique le scénario de la colline : dans la perspective de notre photon du fond diffus, cela signifie que pendant qu'il traverse le vide, celui-ci s'est agrandi, mais aussi tout l'espace qui l'entoure. En d'autres termes, quand le photon arrive de l'autre côté, il trouve un espace de densité énergétique inférieure à celle qu'il avait quittée en entrant dans le vide, ce qui revient à dire que la plaine entourant la colline s'est surélevée, de telle sorte que le sol plat de l'autre côté est désormais plus haut que ne l'était le sol du côté de départ. Par conséquent, le photon ne récupère pas toute l'énergie qu'il a perdue en grimpant la colline.

L'effet net est que les photons du fond diffus perdraient de l'énergie en traversant un vide. Et nous verrions donc des régions plus froides dans le fond diffus cosmologique près des régions de faible densité. Ce phénomène est nommé effet Sachs-Wolfe intégré. L'effet s'applique aussi aux superamas, mais dans ce cas, les photons gagnent de l'énergie en traversant de vastes régions contenant un supplément de masse et sont donc un peu plus chauds.

L'effet Sachs-Wolfe intégré est normalement infime. Même pour de grands vides, il occasionne typiquement des variations de température inférieures aux fluctuations moyennes du fond diffus. Or celles-ci, dues aux légères différences de densité au sein de l'Univers naissant – au moment où la lumière a été émise –, ne varient guère

L'ESSENTIEL

■ Le fond diffus cosmologique – la lumière émise par l'Univers à l'âge de 380 000 ans – présente un étrange « point froid », une zone où la température associée aux photons est inférieure à la moyenne.

■ Une explication possible serait une vaste région d'espace relativement vide. La lumière qui la traverserait aurait tendance à perdre de l'énergie (devenir plus froide) à cause d'un effet produit par l'expansion accélérée de l'Univers.

■ Les astronomes ont récemment découvert un tel supervide s'étendant sur 1,8 milliard d'années-lumière et aligné avec le point froid.



LES RELEVÉS DU CIEL par le télescope PS1 du projet Pan-STARRS (*Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System*), à Hawaï, ont permis aux astronomes d'identifier une immense étendue d'espace relativement vide (un « supervide ») qui expliquerait la présence d'un énigmatique point froid dans la lumière la plus ancienne de l'Univers.

plus que de une partie pour 10 000. Mais nous avons réalisé que dans le cas d'un vide véritablement énorme, un supervide, la différence suffirait à produire le point froid. Trouver un supervide dans la région du point froid permettrait d'expliquer ce dernier. Mais pas uniquement; nous aurions une preuve, différente de l'observation des supernovæ, de l'accélération de l'expansion de l'Univers, car l'effet Sachs-Wolfe intégré n'est notable que dans cette situation.

La chasse au supervide

Les astronomes ont commencé à chercher un supervide coïncidant avec le point froid en 2007. La détection d'une structure aussi vaste est plus difficile qu'il n'y paraît. La plupart des relevés astronomiques produisent des images bidimensionnelles du ciel, sans données sur la distance des objets observés. Les galaxies que nous voyons pourraient aussi bien être toutes regroupées, ou très espacées, le long de la ligne de visée. Les astronomes doivent donc recueillir des informations supplémentaires sur chaque galaxie pour estimer

sa distance, une tâche laborieuse et d'un coût souvent prohibitif.

En 2007, à partir du catalogue NVSS (*NRAO VLA Sky Survey*) de galaxies, Lawrence Rudnick, de l'université du Minnesota, et ses collaborateurs ont découvert qu'une région de l'espace à peu près alignée avec le point froid contient moins de galaxies que la moyenne. Bien que le catalogue NVSS ne comporte pas de données concernant les distances spécifiques des galaxies du relevé, les astronomes savaient que la plupart des galaxies NVSS sont très éloignées de nous. Sur la base de ces données, ils ont émis l'hypothèse qu'un supervide se trouverait à 11 milliards d'années-lumière.

Cette distance posait une difficulté: la lumière qui nous parvient maintenant aurait traversé ce supervide lointain il y a près de 8 milliards d'années. (Cette traversée ne remonte pas à 11 milliards d'années car il faut prendre en compte que l'Univers a doublé de taille depuis que la lumière a été émise.) À une époque cosmique aussi reculée, l'énergie sombre ne représentait qu'une composante mineure de l'Univers – d'abord dominé par le rayonnement, puis

la matière – et donc influait beaucoup moins sur la dynamique cosmique qu'aujourd'hui, et l'effet Sachs-Wolfe intégré était trop faible pour produire le point froid.

Les travaux de Lawrence Rudnick, même s'ils n'ont pas confirmé le scénario imaginé, ont retenu mon attention. Avec Ben Granett et Mark Neyrinck, alors respectivement étudiant en thèse et postdoctorant à l'université d'Hawaï, nous avons mené une analyse statistique afin de déterminer si des petites structures du fond diffus (des zones relativement chaudes ou froides, mais moins extrêmes que le point froid) coïncidaient souvent avec de petits amas ou des vides connus de l'Univers. Nous avons trouvé que ces recouvrements étaient fréquents. Même si aucune de ces structures connues ne correspondait au point froid, les résultats nous ont convaincus de poursuivre la recherche d'un supervide dans la direction du point froid.

Nous avons alors utilisé le télescope du CFHT (Observatoire Canada-France-Hawaï) pour cibler plusieurs petites zones du ciel dans la région du point froid et nous avons compté le nombre de galaxies à l'intérieur de chacune d'elles. Nous avons effectué ces observations début 2010, mais nous n'avons pas trouvé de signe de supervide à la distance prédite par Lawrence Rudnick. Nous avons même exclu la présence d'un supervide au-delà d'environ trois milliards d'années-lumière. Grâce à d'autres observations, Malcolm Bremer, de l'université de Bristol, en Angleterre, et ses collaborateurs sont arrivés à la même conclusion. Et dans le même temps, l'incertitude statistique des résultats de Lawrence Rudnick, réévaluée par des pairs, s'est révélée beaucoup plus importante qu'on ne le pensait. Ainsi, pendant un moment, nous nous sommes demandé s'il fallait abandonner l'idée d'expliquer le point froid par l'effet Sachs-Wolfe intégré.

Mais il restait un petit espoir! Dans nos données, un indice suggérait la possibilité qu'un supervide se trouve plus près de nous. Paradoxalement, il est plus difficile de trouver un supervide proche avec les données du CFHT: chaque zone observée est un cône dont nous constituons le sommet et qui s'élargit à mesure que l'on regarde loin. Plus la distance est grande et plus la région physique couverte est vaste, ce qui nous a permis d'avoir un décompte précis des galaxies des zones éloignées. Mais près de nous, l'aire couverte est petite et, par conséquent, la marge d'erreur plus

importante. Il y avait ainsi seulement 75% de chances que le faible nombre de galaxies obtenu à courte distance corresponde à un supervide – un résultat insuffisamment fiable selon les critères scientifiques. Pour trancher la question, il fallait observer une zone beaucoup plus grande, couvrant toute la région du point froid. À l'époque, les télescopes à notre disposition ne nous le permettaient pas. Depuis, Ben Granett a obtenu son doctorat et travaille maintenant à l'observatoire astronomique de Brera en Italie, et Mark Neyrinck est parti à l'université Johns-Hopkins.

Une heureuse percée

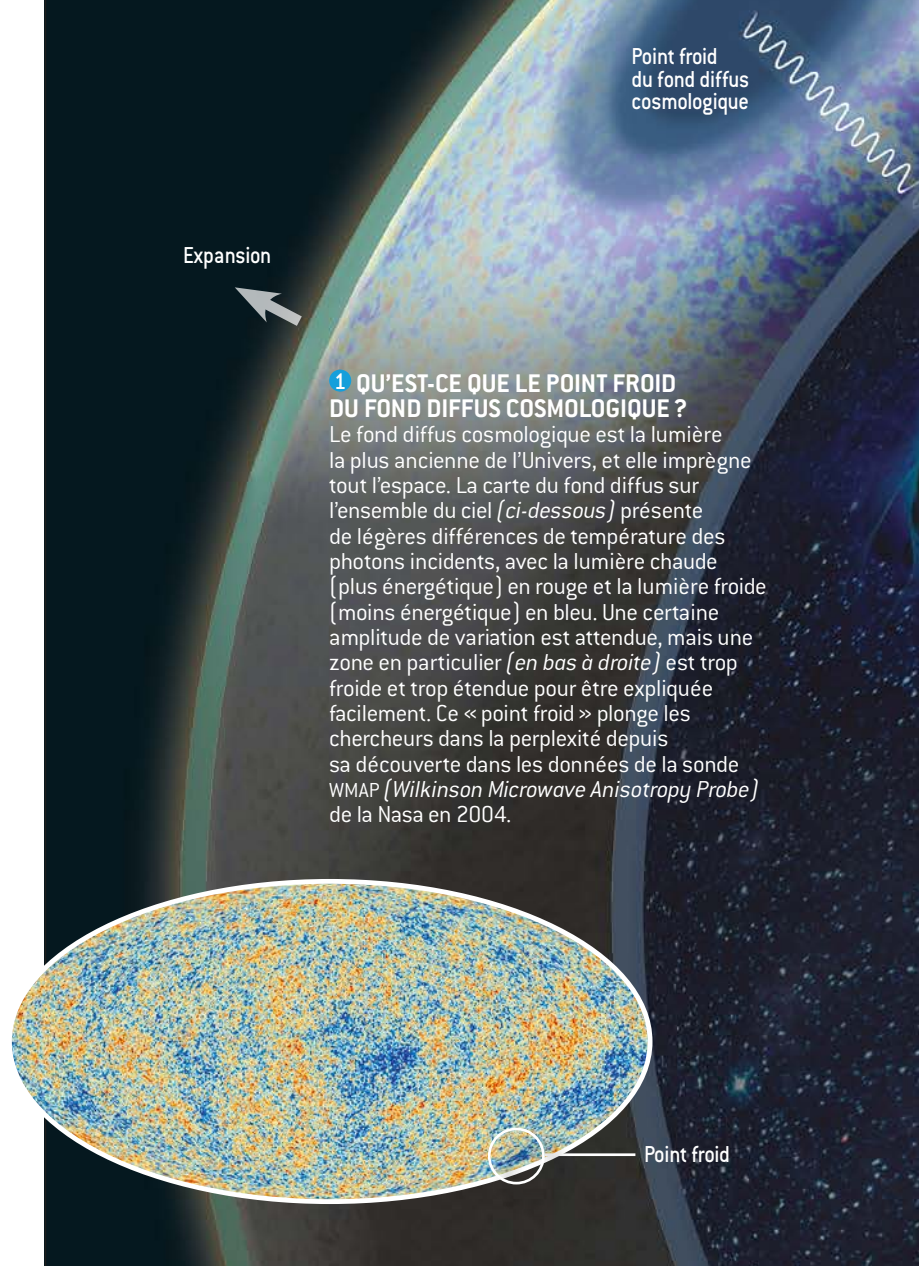
Par chance pour moi, je n'ai pas attendu trop longtemps pour obtenir de nouvelles données. Au moment où je disais au revoir à mes collègues, l'Institut d'astronomie de l'université d'Hawaï achevait la construction d'un nouveau télescope: PS1, le premier observatoire du projet Pan-STARRS (*Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System*, télescope de relevé panoramique et système de réponse rapide). C'était exactement ce dont j'avais besoin. Équipé de la plus grande caméra du monde avec 1,4 gigapixel, le télescope est situé à 3 000 mètres d'altitude au sommet du volcan Haleakalā, sur l'île de Maui.

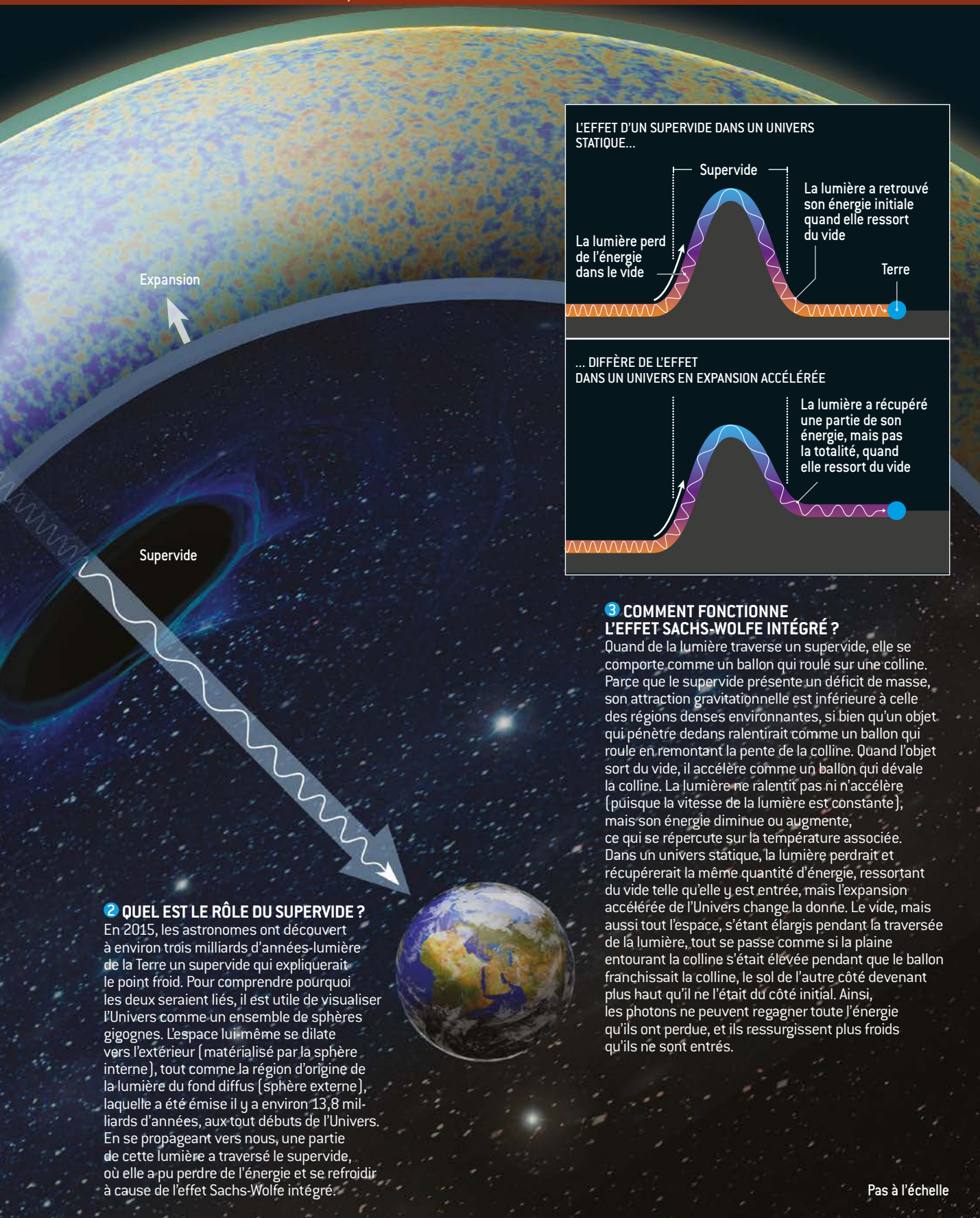
En mai 2010, au sein d'un consortium rassemblant plusieurs autres universités, mes collègues et moi avons commencé à cartographier les trois quarts du ciel à l'aide de PS1. Je me rappelle avoir essayé de convaincre Nick Kaiser, alors responsable scientifique de Pan-STARRS, que nous devions cartographier la région du point froid avant toute autre chose, dès la mise en service de l'instrument. Même si cela ne s'est pas fait, la région faisait partie de la zone observée durant les premières années de service du télescope, et les mesures dont j'avais besoin allaient arriver peu à peu.

Tandis que nous attendions avec impatience ces nouvelles données, j'ai commencé à travailler avec un étudiant, András Kovács, sur les données publiques des observations du fond diffus par les satellites *Planck* et WMAP, ainsi que sur les données du satellite WISE (*Wide-field Infrared Survey Explorer*) portant sur des galaxies récemment observées en lumière infrarouge.

András Kovács étudiait à l'université Loránd Eötvös, à Budapest. Nous avions des téléconférences hebdomadaires et, à

Les astrophysiciens ont découvert un vaste supervide: une région d'espace pauvre en galaxies. L'auteur suggère qu'il pourrait expliquer un mystérieux « point froid » découvert il y a plusieurs années dans le fond diffus cosmologique. La lumière du fond diffus a été émise peu après le Big Bang et se propage vers nous depuis lors. Quand une partie de cette lumière a traversé le supervide, elle a pu perdre de l'énergie par le processus dit de Sachs-Wolfe intégré, ce qui aurait entraîné son refroidissement.





Expansion

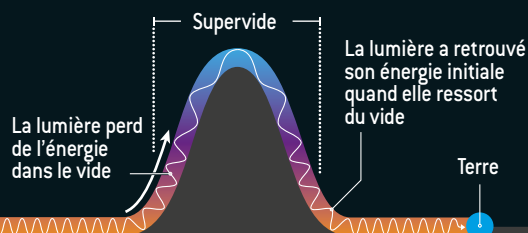
Supervide

2 QUEL EST LE RÔLE DU SUPERVIDE ?

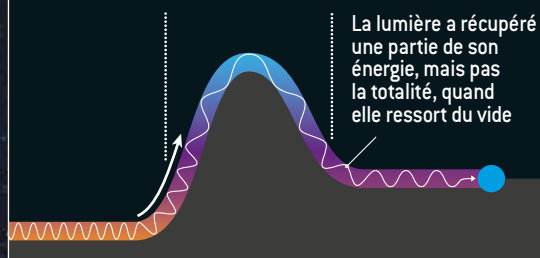
En 2015, les astronomes ont découvert à environ trois milliards d'années-lumière de la Terre un supervide qui expliquerait le point froid. Pour comprendre pourquoi les deux seraient liés, il est utile de visualiser l'Univers comme un ensemble de sphères gigognes. L'espace lui-même se dilate vers l'extérieur (matérialisé par la sphère interne), tout comme la région d'origine de la lumière du fond diffus (sphère externe), laquelle a été émise il y a environ 13,8 milliards d'années, aux tout débuts de l'Univers. En se propageant vers nous, une partie de cette lumière a traversé le supervide, où elle a pu perdre de l'énergie et se refroidir à cause de l'effet Sachs-Wolfe intégré.



L'EFFET D'UN SUPERVIDE DANS UN UNIVERS STATIQUE...



... DIFFÈRE DE L'EFFET DANS UN UNIVERS EN EXPANSION ACCÉLÉRÉE



3 COMMENT FONCTIONNE L'EFFET SACHS-WOLFE INTÉGRÉ ?

Quand de la lumière traverse un supervide, elle se comporte comme un ballon qui roule sur une colline. Parce que le supervide présente un déficit de masse, son attraction gravitationnelle est inférieure à celle des régions denses environnantes, si bien qu'un objet qui pénètre dedans ralentirait comme un ballon qui roule en remontant la pente de la colline. Quand l'objet sort du vide, il accélère comme un ballon qui dévale la colline. La lumière ne ralentit pas ni n'accélère (puisque la vitesse de la lumière est constante), mais son énergie diminue ou augmente, ce qui se répercute sur la température associée. Dans un univers statique, la lumière perdrait et récupérerait la même quantité d'énergie, ressortant du vide telle qu'elle y est entrée, mais l'expansion accélérée de l'Univers change la donne. Le vide, mais aussi tout l'espace, s'étant élargi pendant la traversée de la lumière, tout se passe comme si la plaine entourant la colline s'était élevée pendant que le ballon franchissait la colline, le sol de l'autre côté devenant plus haut qu'il ne l'était du côté initial. Ainsi, les photons ne peuvent regagner toute l'énergie qu'ils ont perdue, et ils ressurgissent plus froids qu'ils ne sont entrés.

Pas à l'échelle

cause du décalage de douze heures entre Honolulu et Budapest, nos conversations se poursuivaient souvent tard dans la nuit européenne. Au cours d'une de ces sessions, je lui ai demandé de trouver les plus grandes régions de basse densité, ou vides, dans le catalogue WISE de galaxies. Quelques jours plus tard, il m'a envoyé un courriel avec les images et les coordonnées des plus grands vides du catalogue. En lisant son message, j'ai remarqué que l'un des vides qu'il avait repérés coïncidait avec la région du ciel où se trouve le point froid. Or je n'avais pas encore parlé à András Kovács de mon intérêt pour un lien éventuel entre un supervide et le point froid. Sa découverte ne pouvait donc pas

être biaisée par l'espoir d'établir ce lien. Parce que WISE observe un grand nombre de galaxies plus proches que NVSS, nous avions là un second indice que peut-être nous devrions chercher le supervide à proximité.

Il nous restait donc à confirmer que nous tenions là un supervide. Plusieurs années ont été nécessaires pour rassembler les données des différents programmes d'observation et établir de façon certaine la découverte. Nous avons utilisé un ensemble de données provenant de WISE, de Pan-STARRS et de 2MASS (*Two Micron All Sky Survey*, relevé de tout le ciel à deux micromètres).

Mais nous avons besoin d'attribuer des distances aux galaxies observées.

Une manière de les mesurer est d'observer le « décalage vers le rouge » d'un objet (lorsqu'une source lumineuse s'éloigne de l'observateur, sa lumière est détectée avec un décalage vers de plus grandes longueurs d'onde, vers le rouge dans le cas du spectre visible). Plus une galaxie est éloignée, plus elle s'éloigne vite de nous, et plus son décalage vers le rouge est important. Même si nous ne disposons pas de mesures précises de décalage vers le rouge pour les galaxies, nous pouvions suffisamment bien l'estimer pour attribuer une distance à chacune d'elles dans la direction du point froid. Nous avons créé une série de tranches tomographiques: des images planes de l'Univers correspondant à différentes

LA RECHERCHE D'UN SUPERVIDE

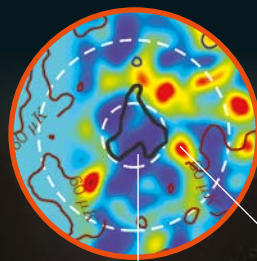
La recherche d'un supervide nécessite d'établir une carte en trois dimensions de la distribution des galaxies ①, d'isoler les galaxies à la même distance ② et d'y chercher les régions de faible densité ③.

① MESURER LES DISTANCES

Les astronomes ont analysé le catalogue de galaxies du satellite WISE et du projet Pan-STARRS. Ce catalogue indique la position des galaxies sur l'ensemble du ciel, mais pas leur distance, un paramètre indispensable pour établir une carte tridimensionnelle de la distribution des galaxies. Pour évaluer leur distance, les chercheurs ont analysé les couleurs optiques de chaque galaxie, ce qui a fourni, pour chacune, une estimation du degré de décalage vers le rouge que sa lumière a subi. Cet effet est la conséquence de l'expansion de l'Univers : quand l'espace s'étire pendant que la lumière le traverse, la longueur d'onde des photons de lumière s'étire elle aussi. Plus le décalage vers le rouge d'une galaxie est important, plus elle est éloignée de la Terre. En combinant les positions des galaxies sur le ciel avec leurs distances estimées, les astronomes ont créé une carte tridimensionnelle de la densité de galaxies dans la direction du point froid.

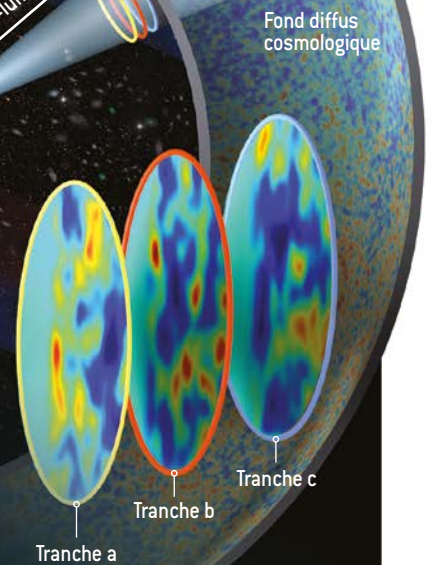
② DÉCOUPER L'UNIVERS EN TRANCHES

Les chercheurs ont décomposé leur carte tridimensionnelle de densité en une série de tranches montrant la répartition des galaxies à différentes distances de la Terre. Pour chaque tranche, les zones rouges correspondent aux régions denses avec beaucoup de galaxies et les régions bleues, aux zones plutôt vides. Le contour noir au centre correspond au point froid dans le fond diffus cosmologique.



③ COMPARER LES TRANCHES

Les astronomes ont créé des cartes montrant la densité des galaxies dans trois plages de distances : jusqu'à 1,24 milliard d'années-lumière de distance (a), entre 1,5 et 1,9 milliard d'années-lumière (b) et entre 2,3 et 2,9 milliards d'années-lumière (c). La tranche la plus proche ne révèle pas de vide, et la plus lointaine semble indiquer un petit vide un peu trop excentré pour correspondre au point froid. Mais la tranche du milieu révèle une vaste zone vide essentiellement centrée sur le point froid.



Pas à l'échelle

distances à la Terre. Le premier jeu d'images révélait un supervide approximativement sphérique et plus poussé près du centre. Ce vide géant se cache très près de nous, à environ trois milliards d'années-lumière, ce qui explique pourquoi il a été si difficile à mettre en évidence lors de nos premiers essais de détection.

Après plusieurs mois d'analyse, nous étions convaincus d'avoir des preuves solides de l'existence du supervide. En d'autres termes, nous étions certains de l'existence d'une région de basse densité dans la direction du point froid. Ce supervide est même énorme ; avec 1,8 milliard d'années-lumière de diamètre, c'est peut-être la plus grande structure jamais identifiée. L'objet est probablement très rare : les théories cosmologiques suggèrent qu'il n'y en aurait tout au plus que quelques autres dans tout l'Univers observable.

Nous avons enfin trouvé notre supervide aligné avec la plus grande anomalie du fond diffus cosmologique, le point froid. L'énigme était-elle donc résolue ? Pas tout à fait. Le supervide et le point froid pouvaient être alignés par hasard, sans lien de cause à effet, même si, d'après nos calculs, une telle coïncidence était 20 000 fois moins probable que la possibilité que le supervide ait créé le point froid.

Un supervide pas encore assez grand ?

Cependant, nous avons un problème plus sérieux. Bien que le supervide soit au bon endroit pour expliquer le point froid, il n'a pas exactement la bonne taille. Pour rendre compte de la température du point froid, bien plus basse que la température moyenne du fond diffus, le supervide devrait être encore plus grand qu'il ne semble l'être, peut-être d'un facteur deux à quatre. Ce désaccord entre la théorie et les observations est si important que certains chercheurs pensent que le chevauchement du supervide avec la région du point froid est un pur hasard. Et que d'autres explications sont donc à chercher, comme la possibilité que les galaxies émettent moins de rayonnement dans l'espace que nous ne le supposons, ce qui crée des biais dans

Le supervide nous permettrait de tester

des théories alternatives à la relativité générale

■ BIBLIOGRAPHIE

I. Szapudi et al., *Detection of a supervoid aligned with the cold spot of the cosmic microwave background*, *MNRAS*, vol. 450, n° 1, pp. 288-294, 2015.

C. Deffayet, *Énergie sombre ou gravité modifiée ?*, *Pour la Science*, n° 443, septembre 2014.

G. Starkman et D. Schwartz, *L'Univers est-il désaccordé ?*, *Pour la Science*, n° 335, septembre 2005.

la carte du fond diffus cosmologique – un phénomène qui pourrait, dans une certaine mesure, imiter l'effet Sachs-Wolfe intégré. Par ailleurs, même si nos observations prouvent l'existence du supervide, nous ne pouvons pas connaître sa taille, sa forme et sa position avec assez de précision pour calculer en détail les effets qu'il devrait avoir sur le fond diffus. En particulier, le supervide pourrait être allongé dans notre direction, ou composé de plusieurs vides sphériques juxtaposés et alignés dans la direction du point froid (comme un bonhomme de neige) – autant de configurations qui influent sur l'effet Sachs-Wolfe intégré. Ainsi, nous ne savons pas encore dans quelle mesure la taille du supervide met en difficulté notre théorie.

Nous avons déjà prévu de recommencer notre étude avec les nouvelles données de PS1, plus complètes que celles que nous avons utilisées précédemment, et en utilisant des observations que les astronomes ont encore affinées. Nous pourrions alors quantifier l'écart entre les mesures et la théorie afin de déterminer si l'hypothèse de l'effet Sachs-Wolfe intégré et du supervide est à écarter définitivement. Une étude menée par Seshadri Nadathur et Robert Crittenden, de l'université de Portsmouth, en Angleterre, suggère, grâce à des données récentes du *Sloan Digital Sky Survey*, que notre supervide ne peut pas expliquer le point froid.

Si le désaccord devait persister, il pourrait être révélateur d'un phénomène d'une autre nature. Par exemple, il existe des théories alternatives à la relativité générale d'Einstein dont certaines se manifestent par une signature unique qui n'apparaîtrait que dans les vides. Si l'une de ces théories est celle qui décrit correctement la force gravitationnelle, le mécanisme Sachs-Wolfe intégré pourrait opérer différemment. Notre supervide nous offrirait un indice allant dans le sens de ces théories. Nous aurions là une piste passionnante pour comprendre l'Univers à un niveau plus profond qu'il n'est possible aujourd'hui.

Dans tous les cas, la découverte des supervides est cruciale. Et les prochaines années devraient nous en apprendre encore davantage sur eux – et donc sur la nature de l'Univers. ■

« Avec les vides cosmiques, nous testerons bientôt divers modèles d'énergie sombre »

Les régions les plus vides de l'Univers cachent de nombreuses informations sur l'évolution du cosmos et sur l'énergie sombre. Stéphanie Escoffier nous explique comment les catalogues les plus récents de galaxies commencent à ouvrir une nouvelle fenêtre sur l'Univers.



Stéphanie ESCOFFIER est chargée de recherche CNRS au Centre de physique des particules de Marseille et membre de la collaboration BOSS.

POUR LA SCIENCE

Pour commencer, qu'est-ce qu'un vide cosmique et comment se forme-t-il ?

STÉPHANIE ESCOFFIER : En vertu du principe cosmologique, l'Univers est homogène et isotrope, c'est-à-dire identique quel que soit l'endroit où l'on se place ou la direction dans laquelle on regarde. Si on regarde de plus près, ce n'est pas le cas, l'Univers semble composé de grandes structures : les galaxies se regroupent en amas et superamas, formant eux-mêmes de grands filaments. Entre ces structures, on trouve les « vides » cosmiques, d'immenses espaces pratiquement déserts où la densité en galaxies est très faible. La taille des vides est variable, du supervide énorme de plus d'un milliard d'années-lumière de rayon, à des tout petits. Je travaille principalement sur des vides de 50 à 400 millions d'années-lumière de rayon.

L'origine des vides se cache dans le plasma de l'Univers primordial. Des fluctuations quantiques qui s'y manifestaient ont créé des zones de surdensité de matière, où la matière ordinaire et la matière noire (dont la nature est encore inconnue) se sont accumulées et ont donné naissance aux galaxies et aux amas de galaxies. Les zones de sous-densité de matière ont formé les vides cosmiques.

PLS

Comment les détecte-t-on ?

S. E. : Les premiers ont été découverts en 1978 par Stephen Gregory et Laird Thompson, de l'observatoire américain de Kitt Peak. Les vides sont définis à partir des amas et des filaments qui les cloisonnent, donc nous avons besoin de catalogues de galaxies relevées sur un vaste champ du ciel. Nous appliquons alors un algorithme qui isole et recense les vides. Mon équipe utilise la carte tridimensionnelle la plus riche en galaxies, qui est celle du programme BOSS (*Baryon Oscillation Spectroscopic Survey*) lié au relevé SDSS III (*Sloan Digital Sky Survey*), réalisé avec un télescope de 2,5 mètres de diamètre situé au Nouveau-Mexique, aux États-Unis. Le relevé a été effectué entre 2009 et 2014 et comprend 1,5 million de galaxies. Nous y avons détecté plusieurs centaines de vides.

PLS

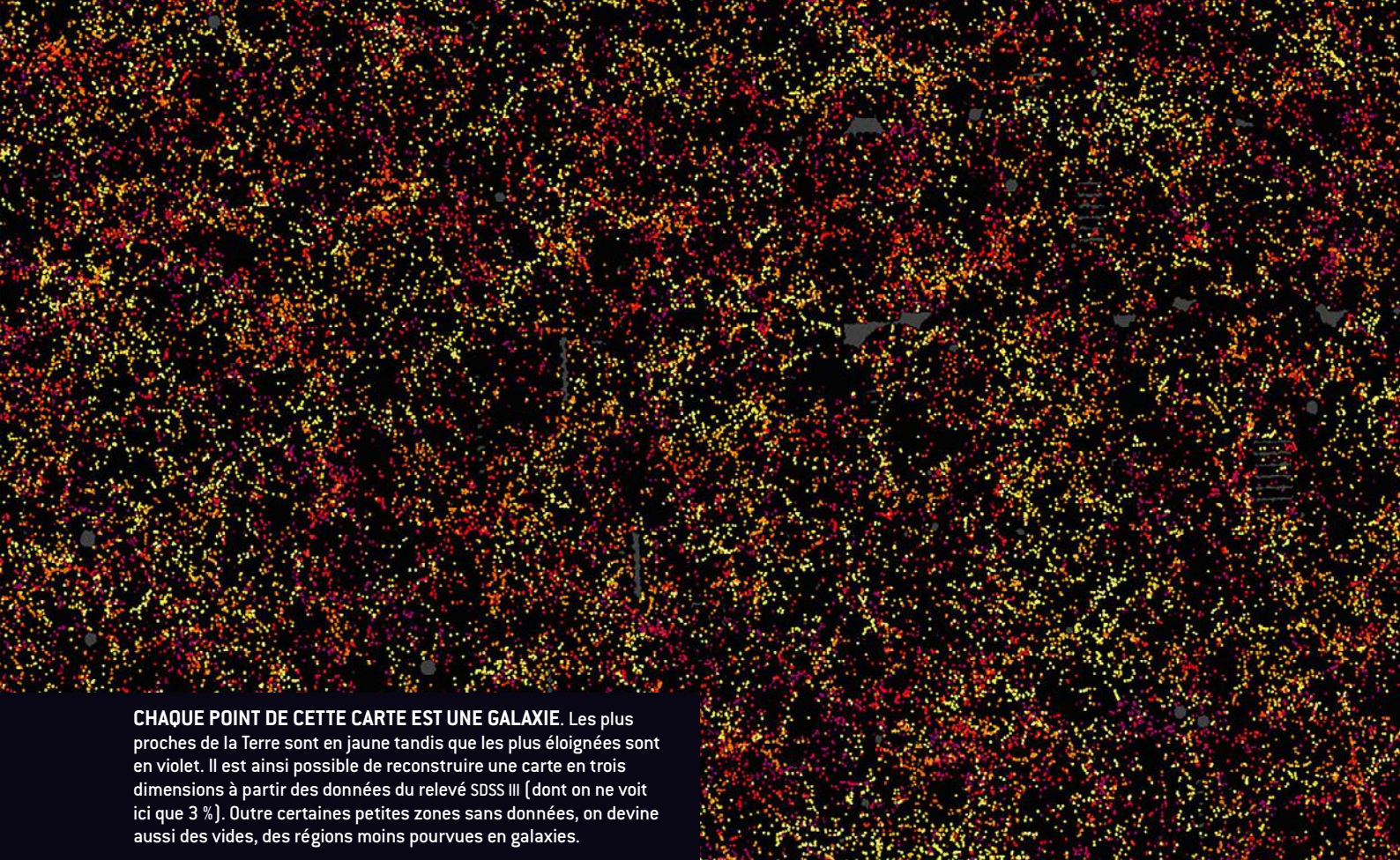
Quelles informations les vides cosmiques apportent-ils dans l'étude de l'Univers ?

S. E. : Les vides nous renseignent sur de nombreux aspects de l'Univers : le processus de formation des grandes structures, des effets de lentille gravitationnelle en champ faible ou certaines anomalies du

fond diffus cosmologique, tel le point froid (voir l'article d'István Szapudi, pages 24 à 31).

Les vides nous permettent aussi d'étudier l'expansion accélérée de l'Univers. En 1998, en utilisant des supernovæ de type Ia, plusieurs équipes ont montré que l'expansion du cosmos accélère depuis environ 7 milliards d'années. Pour expliquer cette dynamique, il faut supposer que l'Univers contient de l'énergie sombre ou qu'il faut modifier les lois de la relativité générale d'Einstein. La nature de l'énergie sombre reste inconnue, mais, si elle existe, elle représenterait près de 70% du contenu de l'Univers.

Avec les vides cosmiques, nous commençons depuis peu à tester les modèles d'énergie sombre et de gravité modifiée. L'idée d'utiliser les vides pour répondre à ces questions n'est pas nouvelle, mais cette approche était confrontée à un obstacle expérimental important : la difficulté de sonder de grandes portions du ciel profondément, avec une bonne précision sur les mesures de distance des galaxies. L'avènement des grands sondages cosmologiques tels que le programme BOSS ont stimulé l'intérêt des vides pour la cosmologie. En effet, les vides cosmiques, qui remplissent la majeure partie de l'Univers, contiennent très peu de matière, et pourraient être composés principalement d'énergie sombre. Ces régions



CHACQUE POINT DE CETTE CARTE EST UNE GALAXIE. Les plus proches de la Terre sont en jaune tandis que les plus éloignées sont en violet. Il est ainsi possible de reconstruire une carte en trois dimensions à partir des données du relevé SDSS III (dont on ne voit ici que 3 %). Outre certaines petites zones sans données, on devine aussi des vides, des régions moins pourvues en galaxies.

se présentent donc comme un laboratoire idéal pour tester les scénarios d'énergie sombre ou les théories de gravité modifiée, des alternatives à la relativité générale.

PLS

Les vides commencent-ils à révéler leurs secrets ?

S.E.: Petit à petit. Une étude récente menée par Nico Hamaus, de l'université de Munich, et à laquelle j'ai participé, s'est concentrée sur la vitesse des galaxies au sein des vides. Cette démarche présente une difficulté observationnelle, car la vitesse que nous mesurons pour une galaxie donnée a deux composantes difficiles à dissocier. La première est liée à l'expansion de l'Univers, le fameux décalage vers le rouge, qui conduit toutes les galaxies à s'éloigner de la Voie lactée. La seconde provient du fait que les galaxies sont dotées d'une vitesse propre au sein d'un vide. En moyenne, elles devraient se déplacer dans toutes les directions. Cependant, les régions denses en matière, qui bordent les vides, attirent les galaxies du vide. En isolant cette dernière composante de vitesse, Nico Hamaus et son équipe ont estimé avec une bonne précision la densité moyenne de matière dans l'Univers et ils ont évalué le taux de croissance des grandes structures.

Cette approche permet aussi de mettre à l'épreuve la relativité générale d'Einstein dans les vides, ces régions de faible densité. Une déviation des observations par rapport aux calculs théoriques serait un indice qu'il faut modifier les lois de la gravitation. Pour l'instant, la conclusion est que la relativité générale tient bon.

PLS

Vous vous intéressez aussi à un autre aspect des vides cosmiques, leur forme. En quoi consiste cette approche ?

S.E.: Avec ma post-doctorante Alice Pisani (qui a récemment obtenu une bourse « L'Oréal-Unesco pour les femmes et la science »), nous nous intéressons à l'effet Alcock-Paczynski appliqué aux vides cosmiques. Ceux-ci n'ont pas de raison particulière d'être de forme sphérique. Cependant, si l'Univers est homogène et isotrope à grande échelle, et que nous regardons un grand nombre de vides, leur forme moyenne doit être sphérique, dans l'espace réel. Or, lorsque nous construisons une carte tridimensionnelle des galaxies, nous ne mesurons pas directement leur position, nous enregistrons le décalage vers le rouge de leur spectre lumineux. Pour effectuer la conversion en distance et revenir dans l'espace réel, nous devons choisir un modèle

cosmologique. Et si le modèle choisi n'est pas correct, la forme moyenne des vides ne sera pas sphérique. Nous avons là un moyen de tester un grand nombre de modèles, c'est le test d'Alcock-Paczynski. Cette approche est prometteuse et devrait bientôt donner ses premiers résultats.

PLS

Quelles sont les perspectives dans le domaine des vides cosmiques ?

S.E.: Depuis 2014, le programme BOSS est devenu *eBOSS* (*e* pour *extended*). L'idée est de chercher des galaxies à plus grande distance que BOSS. C'est très excitant pour nous car, en étudiant des vides plus lointains, nous regardons l'Univers plus jeune et nous pouvons voir si la dynamique de l'énergie sombre a changé au cours du temps. Cela permettra de mettre à l'épreuve les prévisions de certains modèles d'énergie sombre.

Un autre programme très attendu est *Euclid*, un satellite européen prévu pour 2020. L'objectif est d'observer plus de 10 milliards d'objets dont 50 millions de galaxies très précisément. Avec un aussi vaste catalogue, les vides auront encore beaucoup de choses à nous révéler. ■

Propos recueillis par Sean Bailly

DES BEAUX LIVRES DE

Pour fêter cette fin d'année,
découvrez la science sous
ses plus belles formes !



Qu'ont de commun le dieu Hermès,
l'ange Gabriel et l'informaticien Turing ?
Tous trois tissent la trame d'un conte
moderne : par eux, les flux, les réseaux,
les télécommunications sont nés !

À la lumière du mythe, les progrès techniques
et scientifiques qui ont révolutionné
nos modes de vie acquièrent une charge
poétique et bouleversante...

23 x 27,5 cm – 240 pages – 39 €

En partenariat avec les éditeurs

Belin:
editions-belin.com



editions-lepommier.fr

Tous ces livres sont
disponibles en librairie.