

La guerre biologique contre les drogues

En 1998, le Congrès américain a voté un budget de 150 millions de francs pour un programme de lutte contre la drogue. Ce programme comporte des recherches sur des agents pathogènes des plantes qui sont à l'origine de la cocaïne, de l'héroïne ou du haschich.

L'article I de la Convention de 1972 condamne la mise au point, la production et le stockage d'agents biologiques à des fins hostiles ou dans les conflits armés, mais il autorise les armes biologiques pour des objectifs prophylactiques, protecteurs ou pacifiques. La collaboration avec les États où les drogues sont produites serait requise.

Toutefois, le programme suscite des craintes : les épidémies provoquées pourraient-elles s'étendre à d'autres plantes ? Et les agents pathogènes des plantes seraient-ils toujours libérés avec le consentement

des pays traités ? Enfin, les connaissances recueillies lors de ce programme pourraient être détournées.



Plant de coca.

de la fine poudre des spores du champignon (environ 300 ans auparavant, les Britanniques usaient également de ruse en distribuant aux Indiens des couvertures contaminées par la variole). Les plumes libérées par la bombe devaient flotter vers le sol, emportées par le vent, et se répartir sur une vaste zone, où elles devaient contaminer les cultures par contact. D'après un rapport du Camp Detrick, où les «bombes à plumes» ont été testées, les plumes couvertes par dix pour cent (en masse) de spores de rouille des céréales et larguées par un adaptateur M16A1 modifié, de 400 à 550 mètres d'altitude, transportent assez de spores pour déclencher une épidémie.

Les Américains ont également pulvérisé des herbicides chimiques sur le Vietnam avec des avions d'assaut F-100, F-105 et F-4C, et ils ont mis au point des techniques de dissémination par ballons, sans équipage (voir la figure 2).

Une menace croissante ?

Alors que les États-Unis arrêtaient les travaux en 1969, l'Union soviétique semble avoir poursuivi son programme anticultures jusqu'à sa dissolution, en 1991. Les programmes de divers pays sont restés inconnus jusqu'en 1995, lorsque la Commission spéciale de l'Organisation des Nations unies a notamment fait connaître les travaux irakiens.

La menace de la guerre biologique reste donc considérable. Les pays

industrialisés ont les moyens financiers et techniques d'identifier précocement la survenue d'une maladie et d'enrayer l'épidémie à l'aide de pesticides, mais les pays en développement sont démunis.

Toutefois, les pays industrialisés seraient pénalisés par la forte standardisation de leur agriculture : un même agent pathogène pourrait détruire d'un coup toute une culture, et même s'ils enrayeraient une épidémie, le coût de la défense serait considérable.

Les recherches fondamentales sur le génome des plantes et leurs interactions avec les agents pathogènes visent à augmenter la productivité agricole, mais ces travaux pourraient être détournés vers la conception d'armes plus efficaces contre les cultures : à l'aide des techniques biologiques, on peut créer des organismes pathogènes plus robustes, résistant aux pesticides classiques ou survivant dans une large gamme de température ou d'humidité.

Selon un rapport de l'Organisation des Nations unies, dix maladies sont principalement à craindre ; la rouille du blé, le charbon de la canne à sucre et la piriculariose du riz sont les pires. Le maïs, les pommes de terre, de nombreuses variétés de haricots, divers fruits et le café seraient également menacés, tout comme les pins, économiquement importants pour le bois d'œuvre.

Depuis la fin de la guerre froide, les pressions politiques et les sanctions économiques sont devenues aussi

importantes que les conflits armés : le contrôle des armes anticultures devrait être renforcé.

Peu après la guerre du Golfe, à Genève, des négociations ont conclu qu'un protocole de contrôle efficace doit être établi. Une commission devrait pouvoir inspecter les installations capables d'élaborer des armes biologiques, et contrôler les déclarations des États. N'importe quel site devrait être accessible aux inspecteurs, à n'importe quel moment. En cas de violation présumée du traité, les enquêtes approfondies sur le terrain devraient être également autorisées.

L'Union européenne, les États-Unis et divers autres États sont en faveur de la création d'un tel protocole de contrôle avant 2001, date de la cinquième conférence d'examen de la Convention de 1972. Toutefois, le consensus n'est pas atteint : le détail des contrôles reste à définir, et les exigences en matière d'assistance scientifique et technique des pays industrialisés et des États en développement divergent. Le protocole lui-même ne doit pas favoriser l'accès des pays les moins avancés à l'arme biologique, mais il ne doit pas gêner les échanges scientifiques non militaires. D'importantes sociétés biotechnologiques redoutent également l'espionnage industriel pendant les visites et les inspections. Enfin, certains pays souhaitent peut-être conserver des programmes d'armement biologique.

En cas d'échec de la Convention sur les armes biologiques et les toxines, une part importante de l'armement de destruction en masse échapperait au contrôle international, au moment où les progrès scientifiques et techniques s'accroissent. Les cultures vivrières qui nourrissent les milliards de citoyens du monde seraient alors en danger.

Paul ROGERS, Simon WHITBY et Malcolm DANDO sont membres du Département d'études sur la paix de l'Université de Bradford, en Angleterre.

Simon WHITBY et Paul ROGERS, *Anti-Crop Biological Warfare – Implications of the Iraqi and US Programs*, in *Defense Analysis*, vol. 13, n° 3, pp. 303-318, 1997.

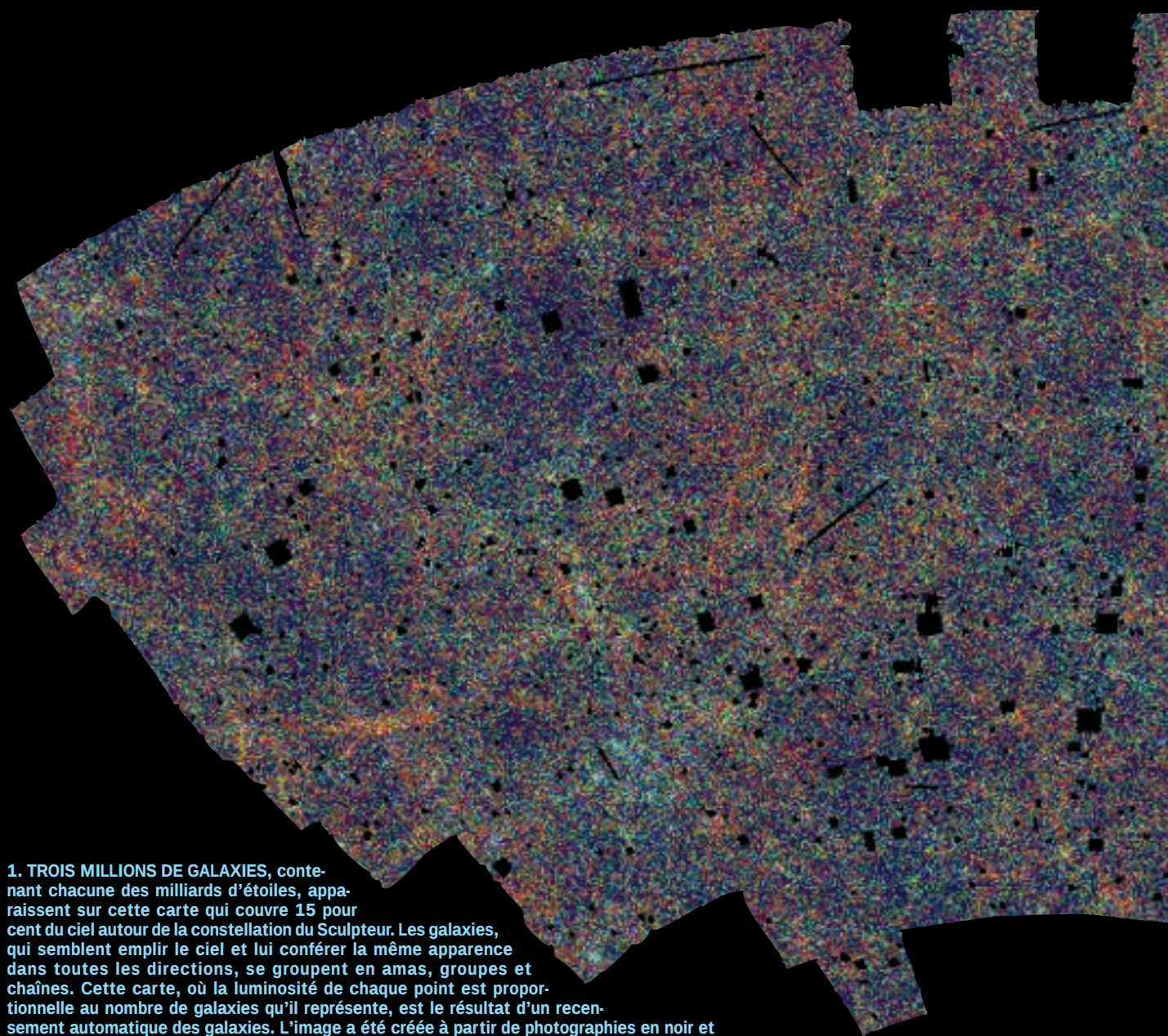
George N. AGRIOS, *Plant Pathology*, quatrième édition, Academic Press, 1997.

Malcolm DANDO, *Biotechnology, Weapons and Humanity*, British Medical Association, Harwood Academic Publishers, 1999.

La cartographie de l'Univers

STEPHEN LANDY

Grâce à des techniques issues de l'analyse musicale, les astronomes étudient comment les galaxies s'agrègent.



1. TROIS MILLIONS DE GALAXIES, contenant chacune des milliards d'étoiles, apparaissent sur cette carte qui couvre 15 pour cent du ciel autour de la constellation du Sculpteur. Les galaxies, qui semblent emplir le ciel et lui conférer la même apparence dans toutes les directions, se groupent en amas, groupes et chaînes. Cette carte, où la luminosité de chaque point est proportionnelle au nombre de galaxies qu'il représente, est le résultat d'un recensement automatique des galaxies. L'image a été créée à partir de photographies en noir et blanc. Dans cette version en fausses couleurs, les points bleus, verts et rouges représentent respectivement les galaxies brillantes, intermédiaires et faibles. Les trous sombres sont des zones, autour d'étoiles brillantes, qui n'ont pu être sondées.

Pour les astronomes, les galaxies sont des structures immenses : rassemblements de quelques centaines de milliards d'étoiles, enchâssées dans un gigantesque nuage de gaz et de poussières, elles s'étendent sur plusieurs centaines de milliers d'années-lumière. Pour les cosmologistes, qui considèrent l'ensemble de l'Univers plutôt que ses constituants, les galaxies ne sont que des briques de base. L'Univers observable en contient des milliards, assemblées en amas, qui s'étendent chacun sur plus de trois millions d'années-lumière et sont réunis à leur tour en

superamas encore plus grands. Dès le début de l'expansion de l'Univers, les forces qui étaient alors à l'œuvre ont structuré l'ensemble des galaxies, puis cette structure a été amplifiée par les interactions gravitationnelles. Aujourd'hui, quelle que soit l'échelle d'observation, les galaxies sont regroupées en structures complexes.

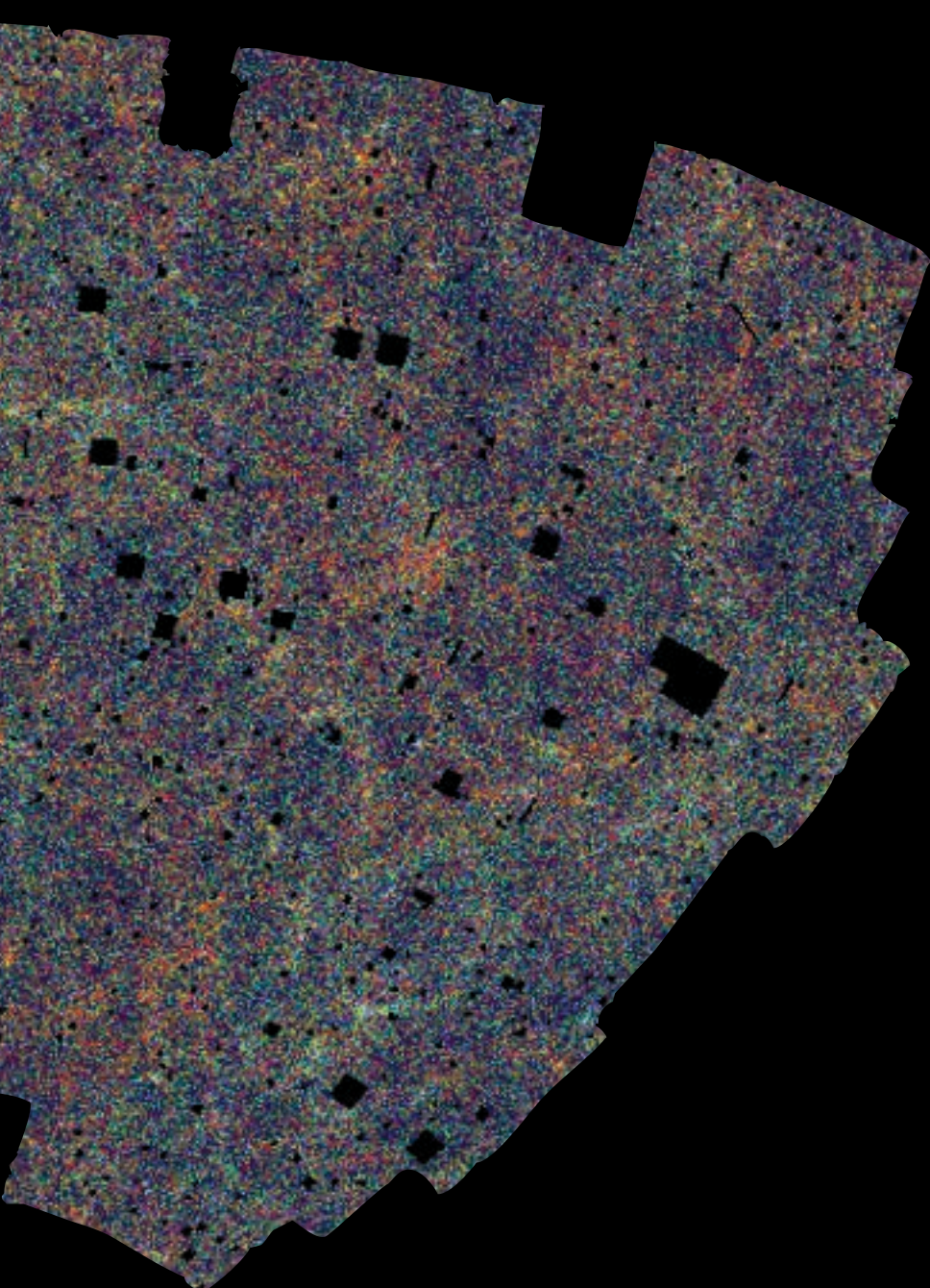
La grégarité des galaxies et des amas de galaxies va pourtant à l'encontre d'un pilier de la cosmologie moderne : le principe cosmologique. Selon ce principe, l'Univers est globalement homogène et isotrope ; aucun de ses points et aucune orientation

ne sont particuliers. Toutes les études cosmologiques sur la densité moyenne de l'Univers, son expansion ou sa forme sont fondées sur le principe cosmologique. À l'échelle de l'Univers observable, d'un rayon de 15 milliards d'années-lumière, la répartition de ces paquets galactiques devrait être quasi uniforme. Comment concilier l'homogénéité de la matière aux plus grandes échelles et son hétérogénéité aux échelles inférieures ?

Grâce à de nouvelles techniques d'observation, les astronomes étudient aujourd'hui la répartition des galaxies lointaines. Contrairement à ce qu'on croyait, l'Univers ne devient pas homogène à partir d'une certaine échelle, et une structure à grande échelle doit être comprise en termes de processus aléatoires : on suppose que l'Univers n'est homogène et isotrope que de manière statistique. Ces nouvelles théories donnent des pistes pour l'exploration des questions les plus ardues de la cosmologie : à quoi ressemblait l'Univers à ses débuts ? Comment est-il devenu ce que nous connaissons aujourd'hui ? Quelles formes de matière, classique ou exotique, contient-il ?

Les récentes avancées résultent de deux décennies de découvertes palpitantes. À la fin des années 1970 et au début des années 1980, les cosmologistes ont commencé une cartographie systématique des galaxies. Ils voulaient analyser la répartition de toute la matière, y compris la « matière sombre » intergalactique, laquelle n'émet pas de lumière.

Les cosmologistes ont ainsi découvert d'abord que les galaxies ont une répartition fractale jusqu'à des échelles de 100 millions d'années-lumière (voir *La distribution des galaxies : vides et superamas*, par Stephen Gregory et Laird Thompson, in *Pour la Science*, mai 1982) : comme la côte de la Bretagne, par exemple, une courbe fractale a la même structure à toutes les échelles. Si la répartition fractale des galaxies subsistait aux échelles les plus grandes, on devrait douter du principe cosmologique : contrairement à une foule, une fractale n'apparaît pas homogène lorsqu'on la regarde de loin. D'autre part, on caractérise une structure fractale par sa dimension, qui peut être non entière. La structure fractale de l'Univers jusqu'aux plus grandes échelles observées est comprise entre



un et deux. Or, dans un Univers fractal de dimension deux, la masse située au sein d'un volume sphérique centré sur une galaxie quelconque augmente avec le carré du rayon. Dans un tel Univers, la densité moyenne dépend de l'échelle, et d'autres paramètres fondamentaux, telle la vitesse d'expansion cosmique, perdent leur signification. En bref, la découverte de la fractalité de l'Univers sembla d'abord anéantir la cosmologie moderne.

Puis les observations montrèrent que la nature fractale disparaît à des échelles de quelques centaines de millions d'années-lumière. À très grande échelle, la répartition des galaxies se décrit en termes statistiques, comme un bruit, par une moyenne et une variance.

Le principe cosmologique était sauf, jusqu'à ce que, vers la fin des années 1980, de nouvelles observations le remet-

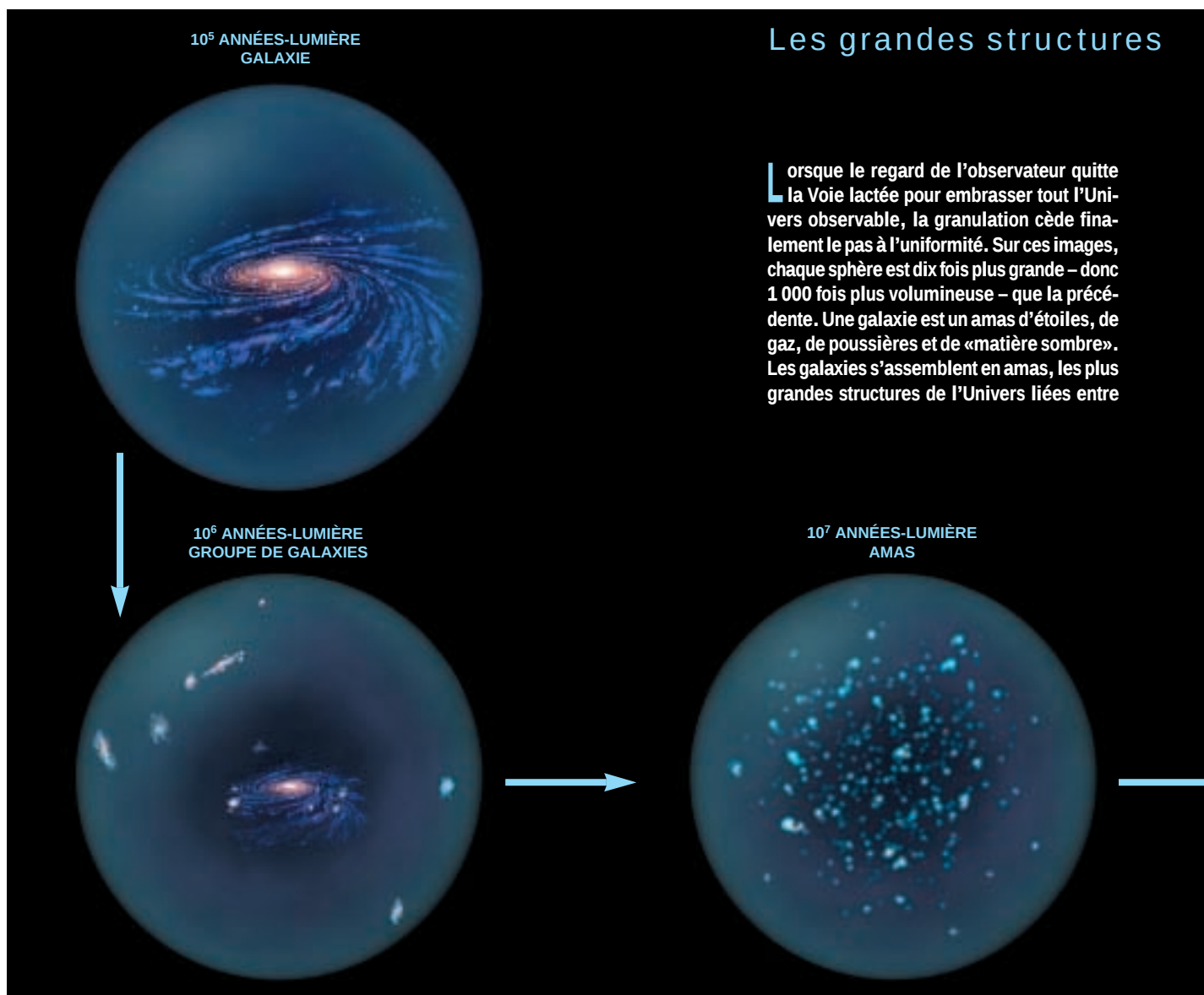
tent en question (voir *Les plus vastes structures de l'Univers*, par Jack Burns, in *Pour la Science*, septembre 1986) : on identifia une «Grande muraille» de galaxies, qui mesurait 750 millions d'années-lumière de longueur, plus de 250 millions d'années-lumière de largeur et 20 millions d'années-lumière d'épaisseur. Une structure cohérente aussi colossale ne s'expliquait plus par une fluctuation statistique. Il fallut poursuivre la cartographie : ce fut le recensement mené entre 1988 et 1994 à Las Campanas, dans le désert du Chili.

Une tranche d'Univers

Les difficultés techniques furent légion : en raison de la faible luminosité des galaxies les plus lointaines, les temps de pose étaient très longs, et l'énorme volume d'espace à étudier augmentait

le nombre d'objets à observer. Autrement dit, nous devions observer plus d'objets avec des expositions plus longues, mais un temps de télescope plus court ! Pour ces raisons, nous avons décidé d'effectuer un recensement très profond (deux milliards d'années-lumière), large (85 degrés à travers le ciel), mais mince (1,5 degré) : nous avons examiné la répartition des galaxies dans une tranche presque plane d'Univers. Bien que la portion d'Univers ainsi observée ait été faible, nous connaissons aujourd'hui l'organisation de l'Univers à des échelles de quelques milliards d'années-lumière ; nous avons six cartes de la tranche explorée et nous connaissons la position de 26 000 galaxies.

Le sondage s'est effectué en plusieurs étapes. D'abord, nous avons fait des observations photométriques – c'est-à-dire que nous avons pris des



photographies du ciel en captant des émissions très faibles – avec une caméra à transfert de charge (CCD) montée sur un télescope de un mètre de diamètre. Pour abréger l'étude, nous avons utilisé une technique nommée photométrie par balayage à entraînement : on pointe le télescope vers un point du ciel, puis on coupe le système de poursuite automatique qui compense la rotation de la Terre ; le télescope reste immobile pendant que le ciel défile et que des ordinateurs lisent les données du détecteur CCD. On obtient ainsi une longue image continue, à une latitude céleste constante et l'on évite de longs repositionnements du télescope. Au total, cette étude photométrique totalisa près de 450 heures de pose.

Ensuite, nous avons analysé les images afin de déterminer quels objets étaient des galaxies, et non des étoiles

ou des défauts. Nous avons choisi les candidats à leur luminosité et à leur aspect flou, typique des galaxies. Nous avons observé les galaxies sélectionnées à l'aide d'un spectrographe couplé à un télescope de 2,5 mètres de diamètre. À la manière d'un prisme, le spectrographe décompose la lumière en ses différentes longueurs d'onde, ce qui nous a permis de calculer le décalage vers le rouge de ces galaxies (le décalage des rayonnements vers les courtes longueurs d'onde mesure la distance des objets, car l'Univers est en expansion : plus les objets sont éloignés de nous, plus ils s'éloignent rapidement).

Un recensement de cette ampleur aurait été impossible si nous avions mesuré les spectres individuellement : pour chaque galaxie, on doit faire une pose de deux heures pour recueillir assez de lumière. Grâce à Stephen

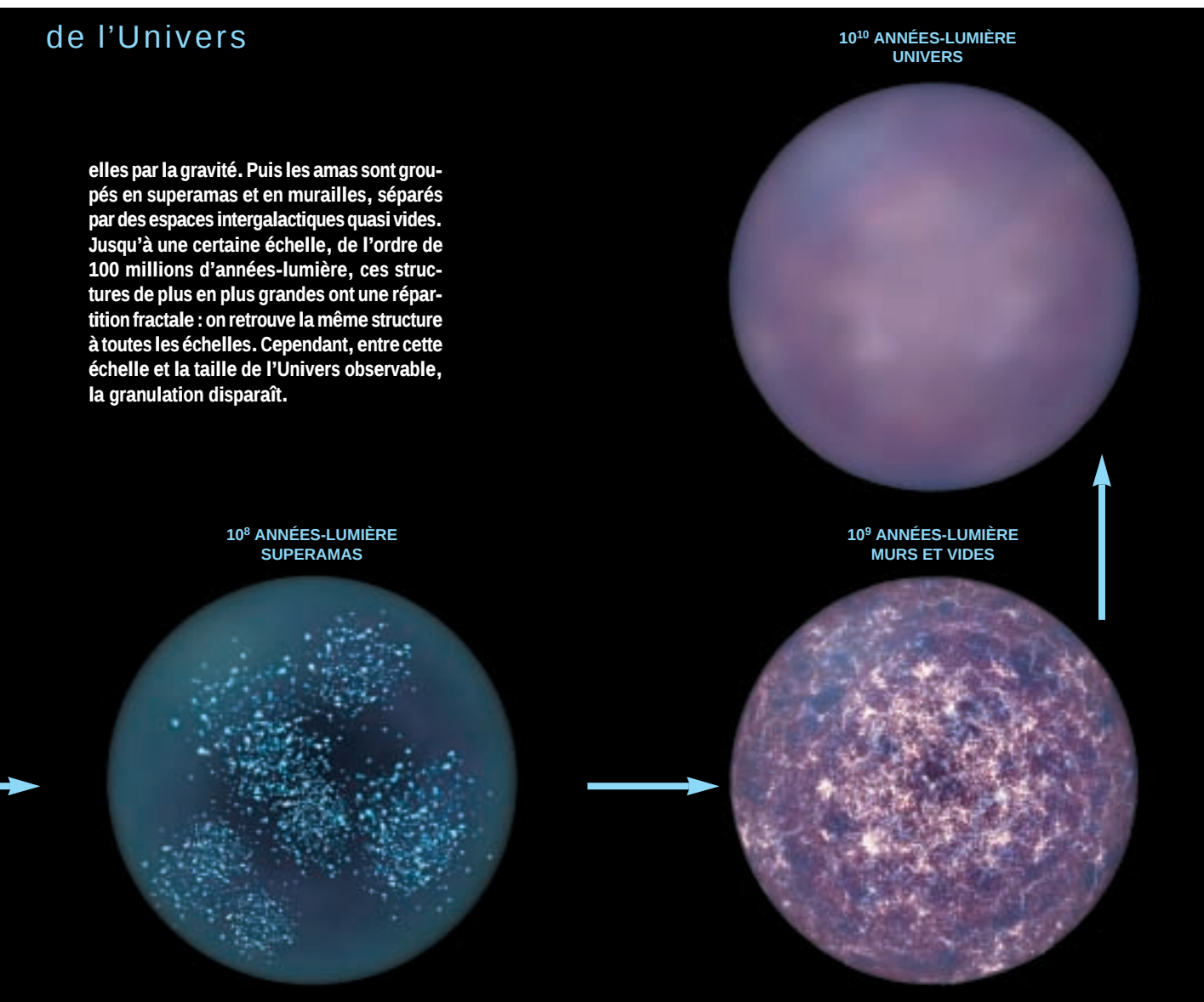
Shectman, de l'Observatoire Carnegie, le travail a été accéléré : son système à plusieurs fibres optiques mesure simultanément les spectres de 112 galaxies. Une fois des objets sélectionnés, on perce une plaque métallique de trous en des positions qui correspondent aux positions des objets dans le ciel. Puis on place cette plaque au foyer du télescope et l'on équipe chaque orifice d'une fibre optique qui transporte la lumière de chaque objet vers un canal du spectromètre. Même avec ce traitement en parallèle, il a fallu 600 heures d'observation, en 100 nuits, pour enregistrer tous les spectres.

Le sondage de l'Univers

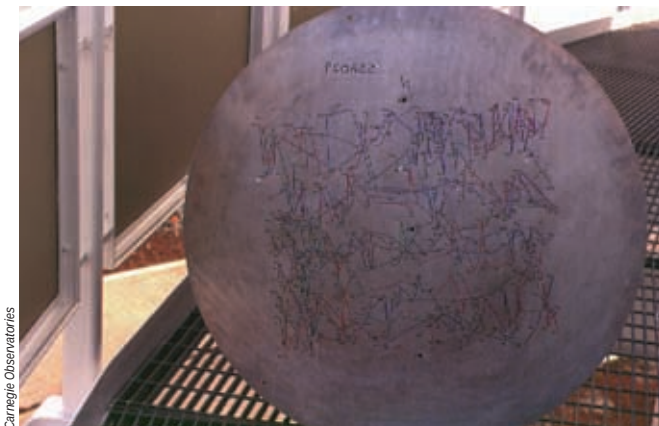
Les cartes obtenues semblent montrer que les galaxies sont regroupées (voir la figure 5). Les impressions sont

de l'Univers

elles par la gravité. Puis les amas sont groupés en superamas et en murailles, séparés par des espaces intergalactiques quasi vides. Jusqu'à une certaine échelle, de l'ordre de 100 millions d'années-lumière, ces structures de plus en plus grandes ont une répartition fractale : on retrouve la même structure à toutes les échelles. Cependant, entre cette échelle et la taille de l'Univers observable, la granulation disparaît.

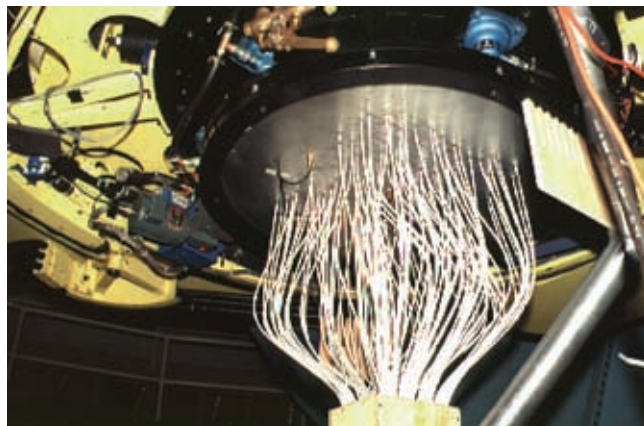


Don Dixon



Carnegie Observatories

2. AFIN D'ACCÉLÉRER LE RECENSEMENT de plus de 26 000 galaxies, Stephen Sackett a construit un instrument qui mesure simultanément le spectre de 112 galaxies. Dans une plaque métallique (à gauche), il a percé des trous qui correspondent aux positions des



galaxies dans le ciel. Des fibres optiques (à droite) conduisent la lumière de chaque galaxie à un canal particulier d'un spectrographe couplé au télescope de 2,5 mètres de diamètre de l'Observatoire de Las Campanas, au Chili.

Les nouveaux catalogues

À la fin des années 1970, à Princeton, Jim Peebles définit ce qui est devenu l'une des grandes thématiques de la cosmologie de la fin de ce siècle : l'analyse statistique de la répartition à grande échelle de l'Univers. Il applique le formalisme statistique à l'information présente dans les catalogues de galaxies, afin, notamment, de tester les modèles théoriques de formation des galaxies.

Ce type d'approche nécessite toutefois une cartographie systématique de l'Univers. Les premiers relevés des années 1980 ont caractérisé la structure à grande échelle de l'Univers proche. Cependant, la présence de grandes murailles qui s'étendaient sur des distances comparables à la taille des catalogues, a conduit les astronomes à étudier des échelles encore supérieures. Ils ont bénéficié, pour ces études, de la révolution technique qu'a été la spectroscopie multi-objets. À l'ESO, les instruments *Optopus*, puis *MEFOS* ont multiplié par un facteur 30 à 100 le nombre d'objets acquis en une seule pose.

Ainsi ont été établis de nouveaux catalogues, comme celui de Las Campanas, mais aussi l'*ESO Slice Project* («projet de tranche de l'ESO»), qui résulte d'une collaboration de 20 astronomes italiens, français et anglais. Ce relevé de plus de 3 000 galaxies, dirigé entre 1991 et 1998 par Giampaolo Vettolani, de l'Observatoire de Bologne, et par Chantal Balkowski, de l'Observatoire de Paris, a été conçu en minimisant les biais observationnels, au détriment de sa taille (22 degrés carrés). On voulait notamment mesurer avec une grande précision la fonction de luminosité des galaxies, c'est-à-dire la proportion de galaxies à une luminosité donnée (la proportion de galaxies intrinsèquement très faibles était jusqu'alors très mal connue).

On a ainsi découvert que le nombre de ces galaxies très peu lumineuses croît beaucoup plus rapidement que ce qu'on prévoyait en extrapolant la fonction connue pour les galaxies plus brillantes. Ceci est dû en grande partie à des galaxies possédant des raies d'émission, signe d'une formation d'étoiles intense, qui deviennent très nombreuses aux faibles luminosités.

Tous les relevés de type «grand angle» donnent des résultats cohérents. Les relevés les plus larges sur le ciel ont montré que la structuration des galaxies dépend de la luminosité : les galaxies très lumineuses se regroupent plus que les galaxies plus faibles. Les propriétés de regroupement varient avec le type morphologique des objets : les galaxies elliptiques sont plus grégaires que les galaxies spirales. L'analyse de ces catalogues a montré l'existence d'une invariance d'échelle dans l'Univers, caractéristique des modèles «hiérarchiques» de formation des structures dus à Richard Schaeffer, du CEA Saclay.

Le relevé de Las Campanas, qui est aujourd'hui le plus profond de ces relevés, a confirmé que la structure lacunaire, mise en évidence par Valérie de Lapparent, de l'Institut d'astrophysique de Paris, se retrouve aux distances supérieures, et il a également révélé que la taille des structures caractéristiques plafonne à une certaine dimension (avec de grands vides et de grandes murailles mesurant entre 300 et 600 millions d'années-lumière). C'est également ce relevé qui permet de mesurer le spectre de puissance et la fonction de corrélation aux échelles les plus grandes.

Par ailleurs, des catalogues de type «téléobjectif», profonds mais étroits, sondent localement l'Univers lointain. Les astronomes français sont très actifs dans ce domaine avec, notamment, deux sondages profonds : les relevés Canada-France et *ESO-Sculptor*.

Pour savoir comment la structure de l'Univers évolue avec le temps, l'idéal serait d'avoir une vision à la fois large et profonde de l'Univers, mais des études très longues sont nécessaires. Côté européen, l'instrument *VIRMOS* associé au *VLT* permettra, avec un multiplexage de 800 objets par champ, de cataloguer en profondeur environ 150 000 galaxies et de retracer la structure de l'Univers jusqu'à dix pour cent de son âge actuel.

Sophie MAUROGORDATO,
CNRS-CERGA, Observatoire de la Côte d'Azur.

insuffisantes, car le cerveau cherche souvent des formes là où elles n'existent pas. Pourtant, ici, l'analyse statistique confirme l'existence de regroupements.

On quantifie cette notion de regroupement à l'aide de fonctions de corrélations, qui représentent le nombre de paires d'objets en fonction de la distance qui les sépare. Avant d'examiner l'application de ces fonctions, considérons le cas plus simple de cerfs dans une forêt. Si l'on trouve un cerf au hasard dans une forêt, on trouvera plus probablement un autre cerf à quelques mètres de lui plutôt qu'à quelques centaines de mètres. La fonction de corrélation prend, dans ce cas, une grande valeur pour des distances de quelques dizaines de mètres et une faible valeur pour des distances de quelques centaines de mètres. Elle décrit mathématiquement le fait que les cerfs voyagent en petits groupes.

Pour les galaxies, on fait une analyse similaire, mais des difficultés surgissent : si l'analyse fonctionne bien pour des échelles bien inférieures à la taille du sondage, elle échoue lorsque l'échelle devient comparable. En effet, le nombre de galaxies – et, par conséquent, le nombre de paires de galaxies – est limité ; un excès de paires à de petites distances est nécessairement compensé par un déficit de paires à des distances supérieures, puisque le total est fixé. Ce jeu de bilan nul contamine le signal de regroupement aux échelles plus grandes.

Heureusement, une autre technique vient aider les astronomes pour l'analyse des regroupements à grande échelle : l'analyse harmonique, ou analyse du spectre de puissance. L'analyse harmonique, comme son nom l'indique, est étroitement liée à l'étude du son. En fait, l'analyse mathématique de la répartition des galaxies est identique à celle du bruit aléatoire.

On décrit de nombreux phénomènes physiques, telles les vagues à la surface de l'océan ou les fluctuations de la pression de l'air dans une pièce, par leur spectre de puissance. De même, l'oreille humaine analyse le son en analysant le spectre de puissance des fluctuations de pression de l'air. Ces fluctuations peuvent être considérées comme un

mélange d'ondes ayant chacune une fréquence et une intensité spécifiques. Nos oreilles décomposent les fluctuations en leurs fréquences constitutives, envoyant au cerveau des signaux qui décrivent l'intensité (ou l'amplitude) de chaque fréquence.

Le spectre de puissance mesure l'intensité des fluctuations de pression en fonction de la fréquence. C'est ce qu'indique l'égaliseur d'une chaîne haute-fidélité. Les gros instruments de musique, tels la contrebasse ou le tuba, émettent une grande partie de leur puissance à de grandes longueurs d'onde, qui correspondent à des basses fréquences. Inversement, le son d'un verre qui se brise se compose principalement d'ondes de hautes fréquences.

Le bruit aléatoire est particulier, parce qu'il peut être complètement décrit par son spectre de puissance. Considérons deux personnes qui visitent à quelques minutes d'intervalle la même chute d'eau (un phénomène qui émet un bruit aléatoire) et qui enregistrent chacune le son pendant plusieurs minutes. Bien que les enregistrements ne soient pas identiques (le son de la cascade change en permanence), les deux enregistrements peuvent décrire le son caractéristique de la chute : en les analysant, on trouve le même spectre de puissance. Les propriétés statistiques des deux enregistrements sont identiques.

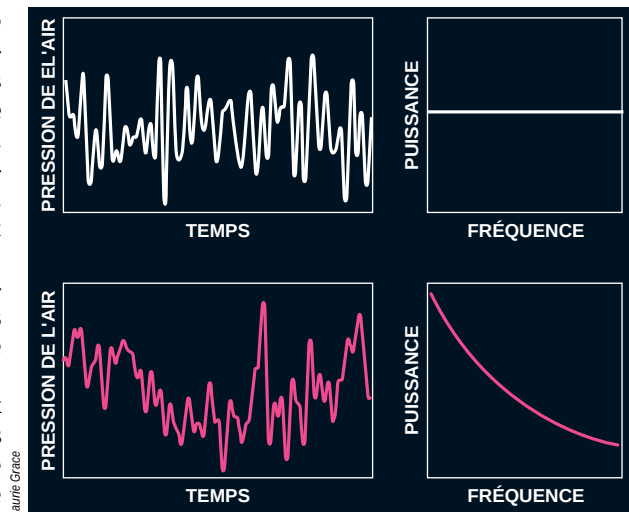
La couleur du son

Un bruit dont le spectre de puissance est plat, ce qui correspond à une puissance identique pour toutes les fréquences, est un bruit blanc. Un tel bruit ressemble à une teinte blanche, car la lumière blanche s'obtient en mélangeant également toutes les couleurs (caractérisées chacune par une longueur d'onde). Le bruit blanc est le grésillement que l'on entend lorsqu'on règle un poste de radio à une fréquence intermédiaire entre celles de deux stations. Ce son est parfaitement aléatoire : à chaque instant, le son est indépendant du son qui l'a précédé (on dit que ces sons sont décorrélés). Un autre spectre de puissance particulier est celui du bruit rose, où chaque octave (entre une fréquence et son double) émet la même puissance (voir la figure 3). Une cascade engendre un bruit rose.

L'analyse harmonique peut réconcilier le principe cosmologique avec l'hétérogénéité des galaxies. Si l'Univers est homogène et isotrope, les observateurs situés dans des galaxies distinctes devraient mesurer les mêmes propriétés de l'Univers aux échelles les plus grandes. Naturellement, ils verraient des répartitions différentes des galaxies, mais, pour un nombre suffisant de sondages, ou pour un sondage de taille suffisante, les deux observateurs mesureraient les mêmes fluctuations statistiques. Ces fluctuations, comme celles du son de la cascade, peuvent être décrites par un spectre de puissance.

Lorsque l'Univers se dilate et évolue, divers mécanismes physiques modifient le spectre de puissance de ses structures à grande échelle. Très peu de temps après le Big Bang, des fluctuations quantiques ont conféré à l'Univers un spectre de puissance. Edward Harrison et Yakov Zel'dovich ont calculé ce spectre primordial vers la fin des années 1960 : c'est une loi de puissance en inverse de la racine cubique de la fréquence, un spectre de bruit rose à trois dimensions.

E. Harrison et Y. Zel'dovich ont obtenu ce résultat en supposant que la plupart des forces naturelles, y compris la gravité, ne possèdent pas d'échelle de longueur intrinsèque ; ce sont des lois



3. NOUS BAIGNONS DANS LES BRUITS BLANCS ET ROSES. Le bruit blanc, analogue aux crépitements d'un récepteur de radio ou à la «neige» d'un téléviseur mal réglé, est complètement aléatoire. Le son fluctue sans cesse, sans régularité (en haut). Le bruit rose, analogue au son d'une cascade ou des vagues qui se brisent sur la plage, est fractal. Cette distinction se retrouve dans les spectres de puissance : le bruit blanc a une puissance égale à toutes les fréquences, tandis que le bruit rose a plus de puissance dans les basses que dans les aigus ; il varie en raison inverse de la fréquence.

de puissance. Dès lors, le spectre de puissance initial devait être une certaine forme de loi de puissance en fonction de la fréquence, de sorte qu'aucune échelle de longueur particulière ne soit privilégiée. Les deux physiciens ont aussi compris le rôle joué par la taille de l'horizon dans l'évolution de l'Univers. Cette taille de l'horizon est la distance qu'un faisceau lumineux a parcourue dans l'Univers depuis le Big Bang. Deux points de l'Univers ne peuvent interagir gravitationnellement que s'ils sont séparés d'une distance inférieure ou égale à la taille de l'horizon, parce que les forces de gravitation se propagent aussi à la vitesse de la lumière. Progressivement, à mesure que le temps passe, l'Univers grossit, et la taille de l'horizon augmente. Ainsi, la taille de l'horizon définit une échelle de longueur naturelle sur laquelle la gravité peut opérer.

Que se serait-il passé si le spectre de puissance initial ne dépendait pas exactement de l'inverse de la racine cubique de la fréquence? Si la loi de puissance avait été plus raide (par exemple, l'inverse de la puissance quatrième de la fréquence), alors les fluctuations aux très petites échelles auraient été supérieures par le passé. En calculant les fluctuations de densité dans la prime histoire de l'Univers, lorsque la taille de l'horizon était petite, les deux physiciens ont trouvé que de nombreuses régions auraient contenu une densité de matière si élevée qu'elles se seraient rapidement effondrées, peuplant l'Univers de trous noirs. Notre existence même prouve que l'hypothèse d'une loi en inverse de la puissance quatrième est exclue. Inversement, si la loi de puissance était plus plate, alors la densité aux grandes échelles fluctuerait considérablement après les débuts de l'Univers. Or, on n'observe pas de telles fluctuations.

Ce raisonnement convaincant justifie le spectre de puissance, mais il ne l'explique pas. En revanche, la théorie de l'inflation cosmologique propose une explication intéressante, en même temps qu'elle conduit à des conséquences vérifiables (voir *L'Univers inflatoire*, par Alan Guth et Paul Steinhardt, in *Pour la Science*, juillet 1984).

Beaucoup de grandes murailles

Le spectre de puissance de l'Univers actuel est très différent du spectre primordial : la gravité a amplifié les fluctuations initiales et engendré des structures comme les amas de galaxies. Jadis, la croissance des fluctuations à des échelles spécifiques fut amplifiée ou retardée, selon que l'Univers était dominé par la matière ou par le rayonnement et selon que les particules élémentaires étaient légères et rapides, ou massives et lentes. La cosmologie moderne s'efforce de comprendre l'évolution du spectre de puissance. Ces dernières années, les observations, telles celles de la répartition des galaxies et du rayonnement de fond diffus cosmologique, ont fourni assez de données pour que l'on teste enfin les théories.

Le modèle de matière sombre froide est aujourd'hui l'une des hypothèses qui explique le mieux la croissance des structures de l'Univers. Selon cette théorie, la plus grande partie de la masse de l'Univers est sous la forme de particules massives et invisibles (d'où le terme «sombre»). Cette matière est «froide» parce que, en raison de sa masse, elle se meut lentement. La matière sombre froide, qui interagirait avec la matière ordinaire uniquement par des forces de gravité, serait la masse manquante dans les galaxies et dans les amas de galaxies (voir *La matière sombre dans l'Univers*, par Lawrence Krauss, in *Pour la Science*, février 1987).

Toutefois, notre sondage montre notamment que la théorie de la matière

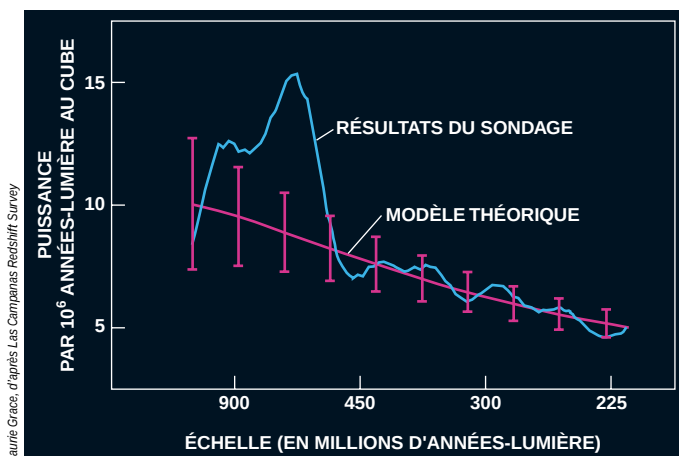
sombre froide n'est plus vérifiée aux grandes échelles (600 millions d'années-lumière) (voir la figure 5). Des sondages antérieurs avaient déjà indiqué ce défaut de la théorie, mais nous l'avons confirmé : en considérant l'ampleur de l'écart entre les prévisions du modèle de matière sombre froide et nos observations, ainsi que la taille de l'échantillon de galaxies étudiées, nous évaluons que la probabilité d'observer une telle déviation par pur hasard est de une sur plusieurs milliers.

Les gigantesques structures observées dans la répartition des galaxies (voir la figure 5) sont la cause essentielle des différences entre la théorie et les observations. Ces structures sont définies par des frontières nettes, par des filaments et par des vides sur les cartes. La taille des plus grandes structures approche trois milliards d'années-lumière, soit plusieurs fois la dimension de la Grande muraille. La découverte de ces structures et de ses conséquences sur le spectre de puissance est un résultat important du sondage de Las Campanas : aux grandes échelles, la répartition des galaxies n'est plus associée à un bruit aléatoire ; un mécanisme physique doit avoir agi pour donner aux fluctuations de densité cette dimension caractéristique.

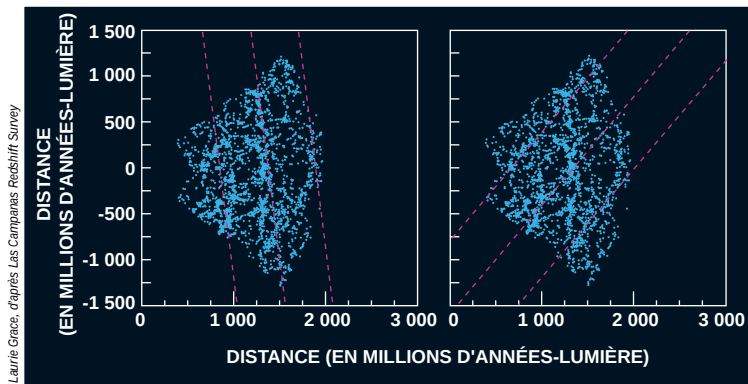
Si la formation des structures résultait d'un bruit statistique, quelques murailles et vides apparaîtraient par hasard, mais ils seraient beaucoup plus rares. Ce seraient des fluctuations statistiques plutôt que des structures réelles.

Pourquoi observe-t-on les murailles et les vides? Ont-ils été créés par les forces de gravitation? Peut-être, mais

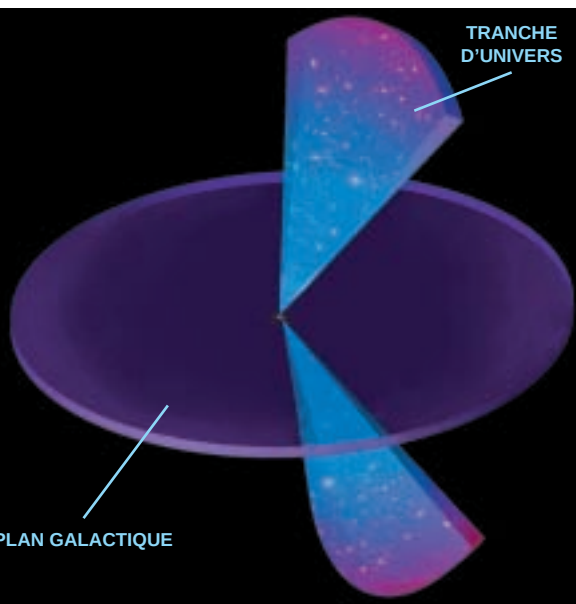
celles-ci déclenchent plus rapidement la formation des petites fluctuations, parce qu'elles mettent moins de temps à attirer la matière aux petites échelles. Si la gravité était en cause, l'agglomération des galaxies aurait dû commencer à petite échelle et s'étendre progressivement aux échelles supérieures. Au cours des 20 dernières années, les cosmologistes ont retenu ce «regroupement hiérarchique» pour expliquer les structures à des échelles inférieures à environ 150 millions d'années-lumière. Toutefois, les analyses de nos sondages montrent que les structures commencent à



4. LE SPECTRE DE PUISSANCE DE L'UNIVERS, mesuré par le sondage de Las Campanas (courbe en bleu), ne correspond pas aux prévisions de la théorie de la matière sombre froide (en rouge). La puissance augmente fortement à des échelles de 600 millions à 900 millions d'années-lumière. Ce désaccord entre modèle et observation signifie que l'Univers est plus structuré à ces échelles que ne l'expliquent les théories actuelles.



5. DEUX TRANCHES D'UNIVERS (à droite) ont été observées lors du sondage de Las Campanas. L'Univers est granuleux aux grandes échelles. Les points, qui représentent les milliers de galaxies contenues dans chaque tranche, ne sont pas répartis uniformément : ils se rassemblent en murailles (*pointillés*), créant des vides dans d'autres régions.



apparaître à des échelles bien supérieures. Le regroupement hiérarchique explique peut-être les petites structures, mais pas les murailles et les vides aux échelles supérieures.

Une nouvelle harmonie des sphères

Aucune des nouvelles hypothèses n'explique la totalité des observations. Certains astronomes ont invoqué un scénario de matière sombre chaude, où l'Univers est dominé par des particules légères, analogues aux neutrinos. L'Univers évoluerait alors de haut en bas, les grandes structures commençant à se former avant les petites. Malheureusement, cette théorie explique mal le regroupement des galaxies à petite échelle.

On a également supposé que l'Univers est moins dense qu'on ne le croyait et qu'il contient peu de matière sombre. Les particules ordinaires, tels les protons et les électrons, auraient constitué un fluide visqueux dans l'Univers primordial. Avant que l'Univers se refroidisse assez pour que protons et électrons se combinent en atomes, des ondes de densité (comme des ondes sonores) se seraient propagées. Après la combinaison des protons et des électrons, ces ondes auraient stimulé l'effondrement gravitationnel à certaines échelles. Curieusement, cette hypothèse résoudrait plusieurs énigmes cosmologiques (voir *L'inflation de l'Univers*, par Martin Bucher et David Spergel, in *Pour la Science*, mars 1999).

Dans une troisième hypothèse, on note que 600 millions d'années-lumière (l'échelle où l'écart entre les observations et la théorie de la matière sombre froide est le plus grand) est environ la distance de l'horizon au moment où la densité moyenne de matière dans l'Univers est devenue supérieure à la densité d'énergie sous la forme de rayonnement. Un changement aussi important a probablement perturbé le spectre de puissance. Quelle que soit l'explication finale, il se peut que nous détectons ici la plus grande échelle de longueur associée à un mécanisme physique dans la nature.

Même un recensement aussi important que celui de Las Campanas ne donne qu'un petit nombre de mesures indépendantes (50 environ) du spectre de puissance aux grandes échelles. D'autres sondages s'imposent, et plusieurs sont en cours. Un groupe australien, nommé 2DF, est en train de cartographier plus de 250 000 galaxies, et une collaboration américano-japonaise (*Sloan*) devrait ensuite mesurer les spectres de près d'un million de galaxies, sur la moitié du ciel, échantillonnant un volume 20 fois plus important que celui que nous avons analysé.

Au VI^e siècle avant notre ère, Pythagore a, le premier, appliqué l'analyse musicale au mouvement des astres : il supposait que les corps célestes étaient des trous dans des sphères de cristal et que le mouvement de ces sphères engendrait des sons. Les distances et les vitesses des corps célestes devaient être dans des rapports simples, comme

le sont les notes de la gamme occidentale. Pythagore supposait ainsi l'existence d'une «musique des sphères». Au XVII^e siècle, Johannes Kepler pensait que les orbites des planètes pouvaient être décrites comme des sphères célestes inscrites entre les cinq solides platoniciens (les polyèdres réguliers). Il croyait que les rapports harmoniques en musique pouvaient être déduits de ces solides et il légitimait une relation fondamentale entre les orbites des planètes et ces harmonies. Là encore, une musique des sphères était évoquée.

Aujourd'hui, notre notion de l'analyse harmonique est assez différente. Elle se fonde sur l'analyse des composantes harmoniques de répartitions aléatoires, et le son observé ressemble plus à celui d'une cascade qu'à un chant divin. Bien que l'analyse moderne ne soit pas aussi spirituelle que celle du passé, le concept d'un Univers isotrope associé à une compréhension des champs aléatoires nous permet d'entendre à nouveau la musique des sphères.

Stephen LANDY est astronome au Collège William & Mary, en Virginie.

P.J.E. PEEBLES, *Principles of Physical Cosmology*, Princeton University Press, 1993.

Stephen A. SHECTMAN et al., *The Las Campanas Redshift Survey*, in *Astrophysical Journal*, vol. 470, pp. 172-188, 10 octobre 1996.

Kelvin K.S. WU, Ofer LAHAV et Martin J. REES, *The Large-Scale Smoothness of the Universe*, vol. 397, pp. 225-230, 21 janvier 1999.

La détection des phéromones

DIDIER TROTIER • KJELL DØVING

Avec leur organe voméronasal, les mammifères analysent les substances biologiques émises par leurs congénères. L'activation de cet organe provoque souvent des réactions physiologiques qui favorisent la reproduction. Dans l'espèce humaine, l'organe voméronasal est peu développé, et il n'est sans doute pas fonctionnel.

En 1813, l'anatomiste danois Ludvig Jacobson (1783-1843) s'étonne de la présence d'une lamelle cartilagineuse allongée, dans le nez de nombreux mammifères. Il soulève ce cartilage et découvre un organe alors inconnu. Les neurophysiologistes explorent encore aujourd'hui le fonctionnement et les effets de cet organe qui, initialement nommé organe de Jacobson, fut renommé en 1895 organe voméronasal (*organon vomeronasale (Jacobsoni)*) par la Société allemande d'anatomie : l'organe est au contact du vomer, une lamelle osseuse verticale, située à la partie postérieure et inférieure de la cloison des cavités nasales.

Dans son article de 1813, que nous avons récemment retrouvé à l'Université d'agriculture de Copenhague, Jacobson montre l'importance de sa découverte : l'organe est présent de chaque côté de la cloison nasale chez tous les mammifères qu'il a observés (chat, vache, chien, chèvre, cheval, cochon, mouton, tigre, chameau, buffle, daim...) ; sa structure complexe et sa grande taille laissent imaginer un rôle physiologique important.

Chaque organe s'allonge vers l'arrière du nez et comporte un canal interne en cul-de-sac, fermé à l'arrière ; l'ouverture du canal est étroite (voir la figure 2). Chez les rongeurs, l'organe s'ouvre directement dans la partie avancée de la cavité nasale. Chez d'autres animaux, tels le chien, le porc, la chèvre

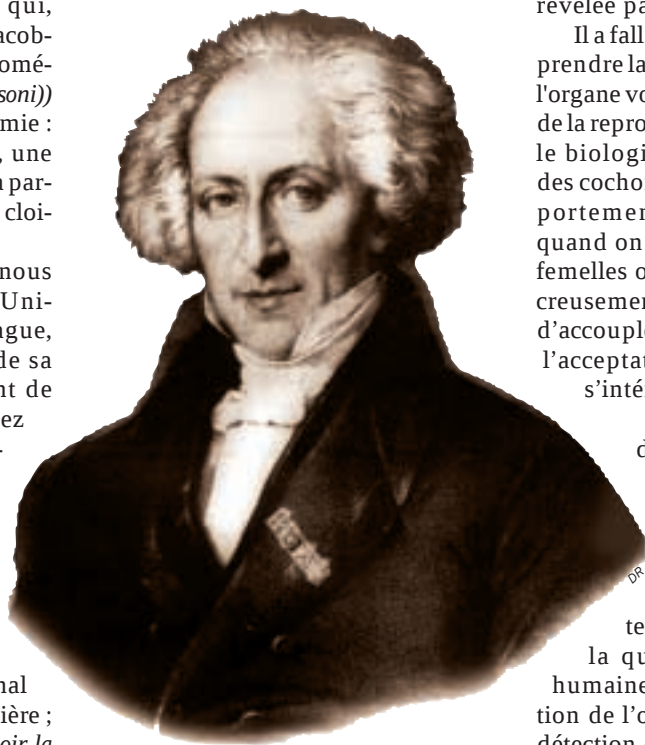
et le bœuf, l'ouverture communique avec le canal palatin, qui relie la bouche et le nez, derrière les incisives.

Jacobson observe que plusieurs vaisseaux sanguins, dont un très gros, irriguent l'organe. Le canal de l'organe étant rempli de mucus, le physiologiste

danois déduit que l'organe pourrait être sécréteur. Cependant, il voit aussi des faisceaux nerveux qui, issus de l'organe, remontent le long de la cloison nasale pour converger sur une petite zone du bulbe olfactif, dans la cavité cérébrale : il suppose que l'organe est plutôt sensoriel. Cette intuition s'est révélée parfaitement exacte.

Il a fallu attendre 140 ans pour comprendre la relation entre l'activation de l'organe voméronasal et certains aspects de la reproduction : en 1953, à Toulouse, le biologiste H. Planel observe que des cochons d'Inde mâles ont un comportement reproducteur amoindri quand on les prive de cet organe. Les femelles opérées ne présentent pas ce creusement des reins, nommé lordose d'accouplement, qui signale aux mâles l'acceptation de la copulation ; elles s'intéressent peu aux mâles.

Plus récemment, les études de la structure et de la fonction de l'organe voméronasal des animaux ont fait mieux connaître le monde des phéromones, ces molécules qui déclenchent des comportements chez les animaux. D'où la question : des phéromones humaines existent-elles ? L'intervention de l'organe voméronasal dans la détection des phéromones animales et sa présence chez l'homme ont fait croire que l'espèce humaine pourrait également être sensible à des molécules stimulant l'organe voméronasal et qui



1. LUDVIG JACOBSON découvrit l'organe voméronasal en 1813, à Leipzig. Il notifia sa découverte à Georges Cuvier, qui ne la mentionna pas. L'article original de Jacobson vient d'être retrouvé et traduit.