

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.

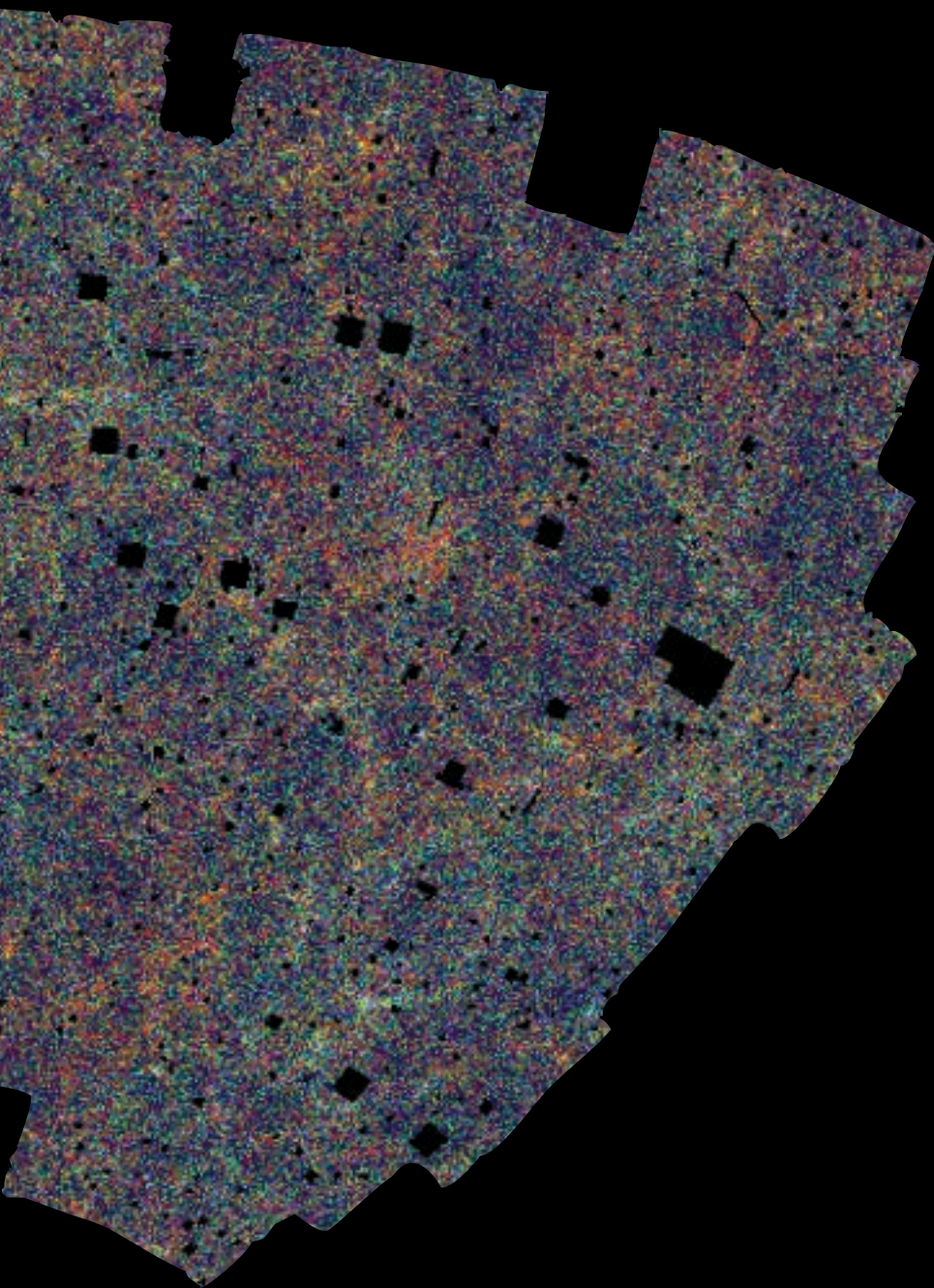
La grégarité des galaxies et des amas de galaxies va pourtant à l'encontre d'un pilier de la cosmologie moderne : le principe cosmologique. Selon ce principe, l'Univers est globalement homogène et isotrope ; aucun de ses points et aucune orientation

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-

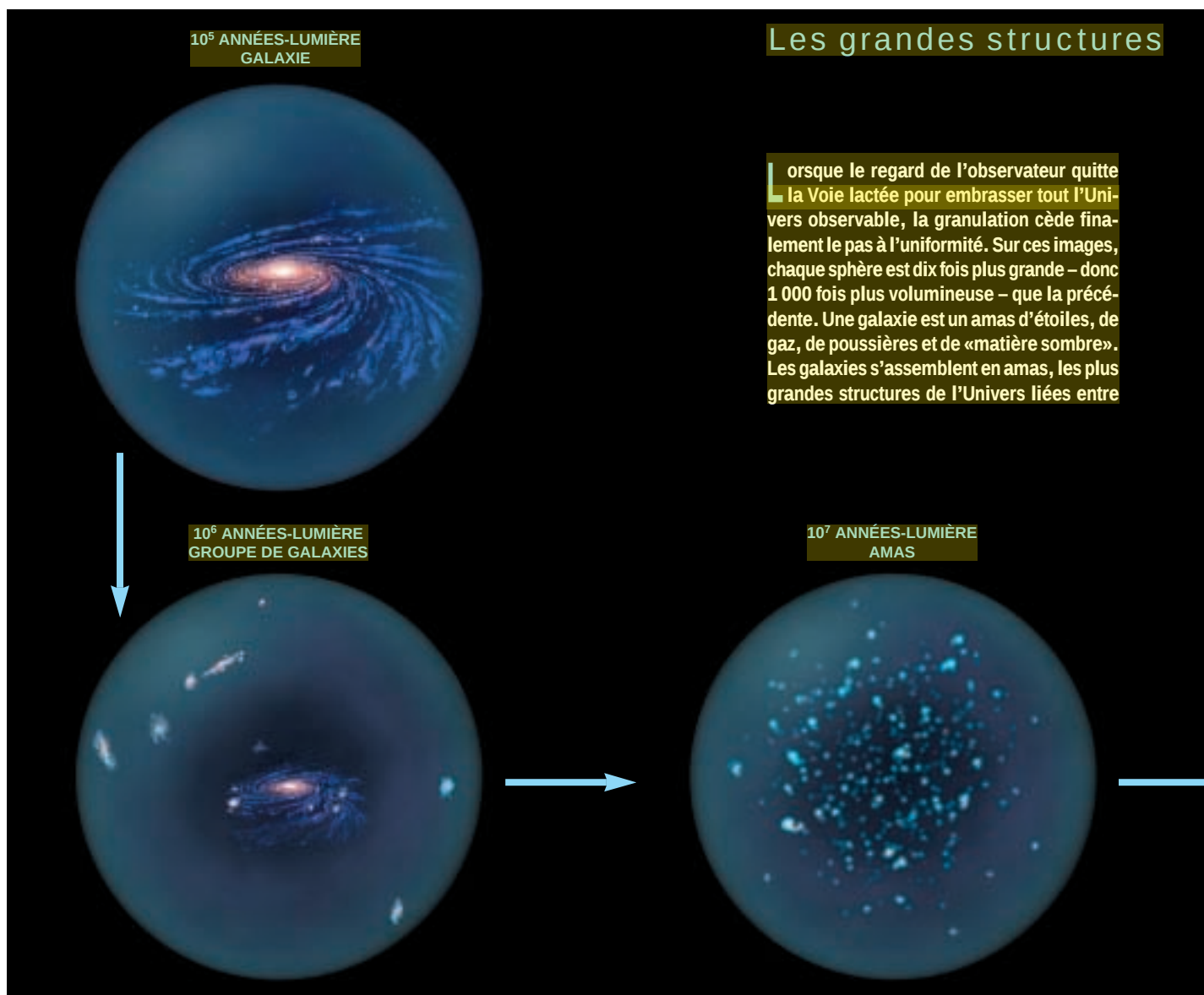
tent en question (voir *Les plus vastes structures de l'Univers*, par Jack Burns, in *Pour la Science*, septembre 1986) : on identifia une «Grande muraille» de galaxies, qui mesurait 750 millions d'années-lumière de longueur, plus de 250 millions d'années-lumière de largeur et 20 millions d'années-lumière 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



Les grandes structures

Lorsque le regard de l'observateur quitte la Voie lactée pour embrasser tout l'Univers observable, la granulation cède finalement le pas à l'uniformité. Sur ces images, chaque sphère est dix fois plus grande – donc 1 000 fois plus volumineuse – que la précédente. Une galaxie est un amas d'étoiles, de gaz, de poussières et de «matière sombre». Les galaxies s'assemblent en amas, les plus grandes structures de l'Univers liées entre

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

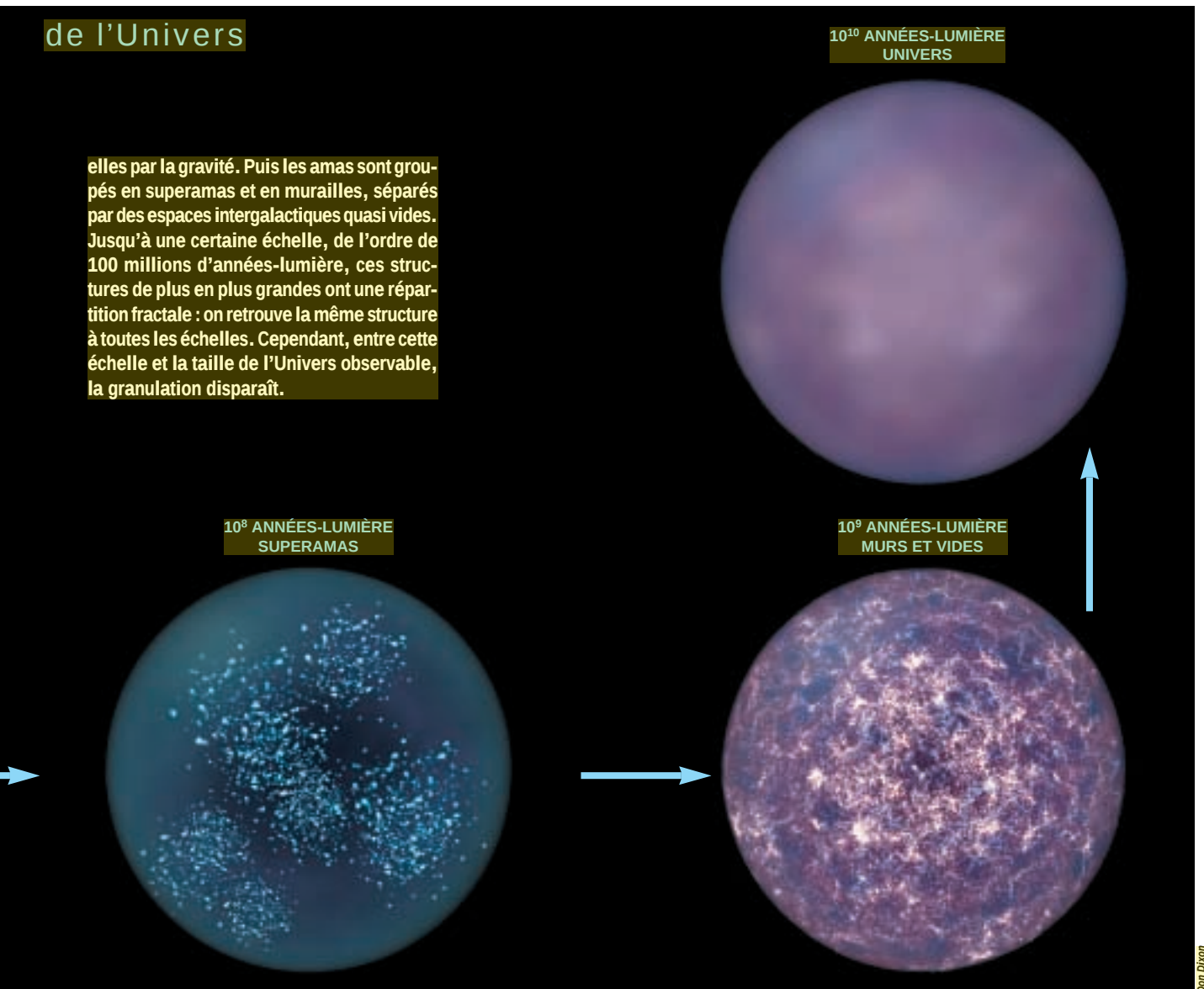
Shectman, de l'Observatoire Carnegie, le travail a été accéléré : son système à plusieurs fibres optiques mesure simultanément les spectres de 112 galaxies. Une fois des objets sélectionnés, on perce une plaque métallique de trous en des positions qui correspondent aux positions des objets dans le ciel. 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

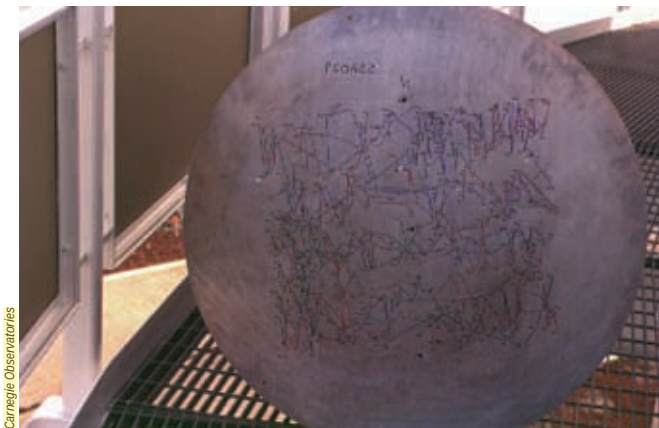
Les cartes obtenues semblent montrer que les galaxies sont regroupées (voir la figure 5). Les impressions sont

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.

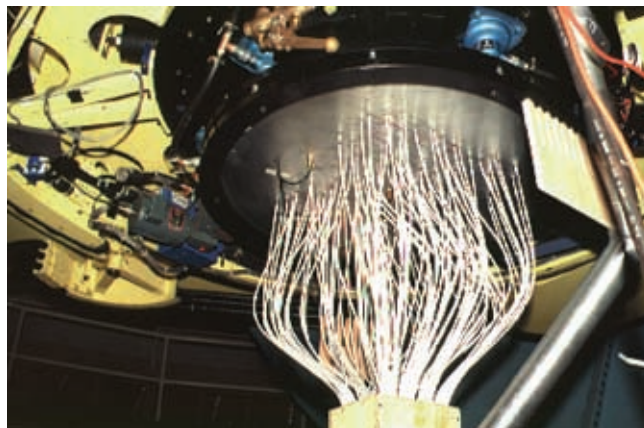


Don Dixon



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.