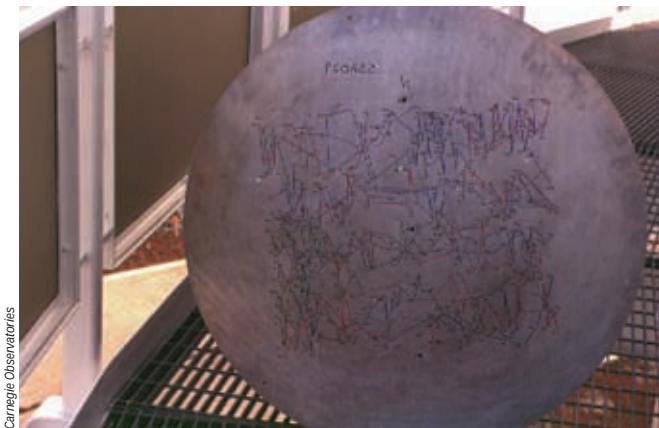
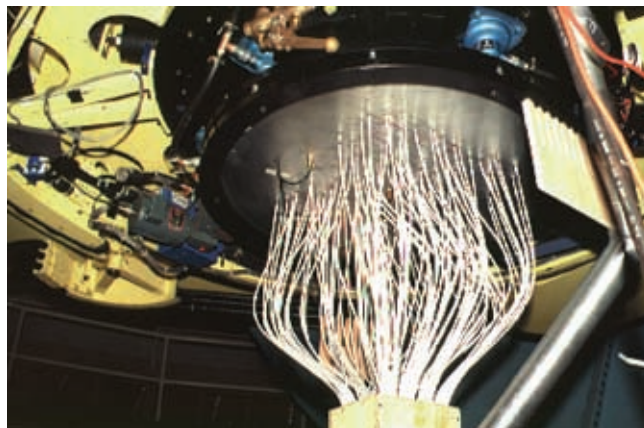




Carnegie Observatories

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.

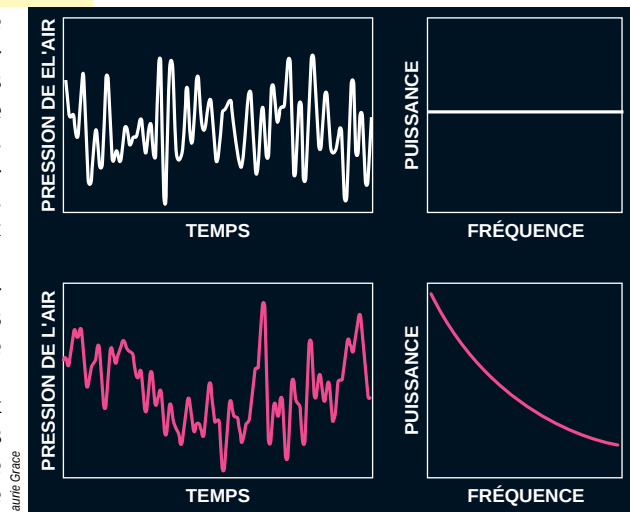
La couleur du son

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.