

## Les mesures dans un univers en expansion

**Quand on cherche à mesurer l'éloignement d'objets extragalactiques, on se heurte à une difficulté fondamentale : non seulement on ne peut effectuer une mesure directe, faute de pouvoir attendre des millions d'années, mais, de plus, notre univers s'étend continuellement. Alain Riazuelo, astrophysicien à l'IAP, nous explique les techniques anciennes et modernes qui ont servi ou servent à évaluer les gouffres spatiaux qui nous séparent des autres étoiles ou galaxies.**

Lorsque l'on cherche, sur Terre, à mesurer l'éloignement de points, deux techniques viennent immédiatement à l'esprit : la triangulation, qui consiste à déterminer deux angles connaissant la séparation entre les stationnements ; la télémétrie, c'est-à-dire (grossièrement) la mesure du temps aller-retour d'un rayon lumineux, que l'on convertit en distance moyennant la connaissance de la vitesse de la lumière. Ces deux méthodes impliquent que l'objet distant reste immobile, ou du moins que sa vitesse de déplacement puisse être négligée durant le va-et-vient. Cette approximation se vérifie dans la pratique aussi bien sur Terre, où les points restent proches et les vitesses basses, qu'à l'intérieur du Système solaire, malgré les distances plus élevées et les vitesses plus grandes.

Quand on passe à l'échelle de notre Galaxie, la télémétrie ne sert plus à rien ; la triangulation, réduite à une mesure de parallaxe (voir encadré plus loin), permet de déterminer la distance d'étoiles voisines. Au-delà, il n'est plus possible d'effectuer de mesures directes ; *a fortiori*, dès que l'on tente d'arpenter les espaces intergalactiques. À cette échelle, se manifeste également un phénomène inédit, l'expansion, qui se traduit par un taux de récession proportionnel, au premier ordre, à l'éloignement ; cette dilatation du « substrat spatio-temporel » pose un problème concret de définition de la distance : quel sens attribuer à ce mot, quand on sait qu'il est, d'une part, impossible de voir les objets éloignés où et tels qu'ils sont « à présent » (en raison de la finitude de la vitesse de la lumière) et, d'autre part, que ces objets se déplacent constamment (en raison

de l'expansion) ? Alain Riazuelo, chercheur à l'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP), tente de clarifier ces notions délicates pour les profanes.

**G.E. :** Quelles sont les principales étapes qui ont marqué la mesure de l'univers ?

**A.R. :** L'astronomie, particulièrement la position du Soleil, a toujours été importante pour déterminer les alternances saisonnières et donc les périodes de semis, récoltes, etc. Certains sanctuaires mégalithiques comme Stonehenge ont, selon toute vraisemblance, servi d'observatoires solaires, et nous savons que les Sumériens connaissaient déjà les principales planètes. Mais observer et, dans une certaine mesure, prévoir, n'impliquent pas de savoir mesurer.

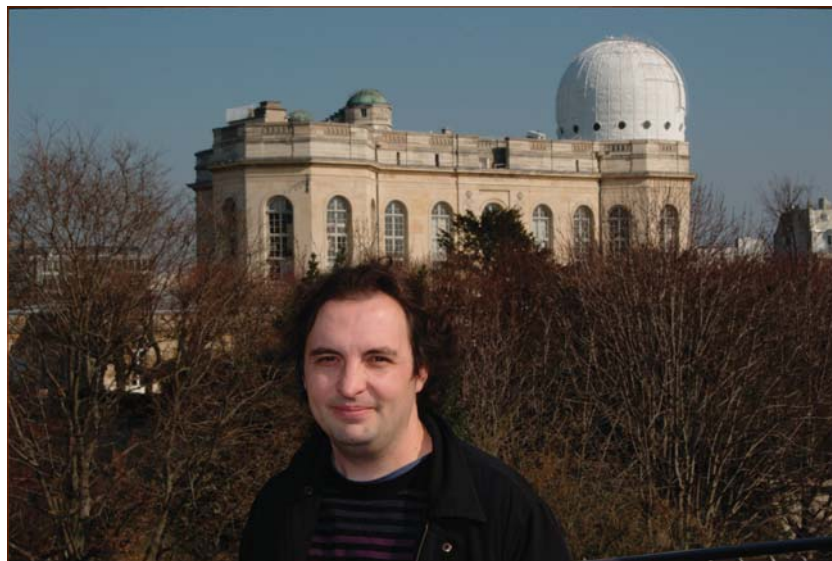
Il faut attendre la Grèce ancienne pour avoir une trace certaine des premières expériences de mesure de corps célestes, à commencer par la Terre ; tout le monde connaît la célèbre expérience d'Ératosthène pour déterminer le diamètre terrestre. Peu après, les Grecs, en mesurant la taille de l'ombre de la Terre sur Lune (à l'occasion des éclipses lunaires), sachant que les diamètres apparents du Soleil et de la Lune étaient équivalents, ont pu déterminer que le diamètre terrestre était environ trois fois et demi plus grand que le diamètre lunaire ; avec la mesure d'Ératosthène, on connaissait le

rayon terrestre, donc lunaire, puis, à l'aide de l'angle solide occupé par la Lune, on a pu en déterminer sa distance, soit environ soixante rayons terrestres ou 380 000 km.

En ce qui concerne la distance Terre-Soleil, l'astronome grec Hipparque essaya de mesurer l'angle Soleil-Terre-Lune au premier quartier, c'est-à-dire au moment où l'angle Soleil-Lune-Terre était de 90 degrés. Connaissant la distance Terre-Lune précédemment déterminée, on se retrouve dans la situation d'une triangulation classique, où deux angles et une distance sont connus, ce qui permet de déterminer les autres angles et distances. Cette méthode, correcte en principe, est cependant fortement instable car proportionnelle à la tangente de l'angle mesuré Soleil-Terre-Lune, qui est quasiment droit. De fait, les mesures angulaires effectuées se révélèrent légèrement erronées, ce qui conduisit à une forte sous-estimation du résultat (quelques millions de kilomètres au lieu de 150).

### La parallaxe

On appelle parallaxe la différence d'angle que mesurent deux observateurs, situés en deux lieux différents, (ou un observateur qui occupe successivement deux endroits différents), qui vise(nt) le même objet. Il s'agit donc d'une simple triangulation, effectuée soit simultanément par deux personnes distantes (et dans ce cas, la ligne de base ne dépasse pas le diamètre terrestre), soit à deux époques différentes, souvent éloignées de six mois (la ligne de base, dans ce cas, est le diamètre de l'orbite terrestre). Dans le premier cas, on peut effectuer des mesures de distance dans le Système solaire, dans le second dans l'univers proche.



Alain Riazuelo, astrophysicien et chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP).

On en restera là pendant plusieurs siècles, jusqu'à la découverte par Kepler de ses trois lois de la mécanique céleste, particulièrement la troisième (loi « harmonique ») qui établit une relation entre distance au Soleil et temps de révolution : ces derniers étant très bien connus, il devint possible de déterminer la distance des planètes... à un facteur près ! On savait donc Mars plus éloignée du Soleil que la Terre d'un facteur 1,5 environ, mais c'était tout. Pour aller plus loin, il fallait soit recourir à des mesures de parallaxe, ce qui était difficile, soit observer des alignements Terre – Planète – Soleil en deux endroits différents. Par chance, il existe un candidat parfait à cet exercice, la planète Vénus, qui « transite » devant le Soleil, un phénomène hélas très rare : deux fois tous les siècles environ, à huit ans d'intervalle. Le nom de l'infortuné astronome français Guillaume Le Gentil est resté lié à cette méthode (voir encadré). Finalement, ce sont des astronomes anglais qui réalisent la première mesure précise au XVIII<sup>e</sup> siècle, et déterminent la distance Terre-Soleil avec une précision de l'ordre du pour-cent.

Il faut ensuite attendre le mathématicien Bessel pour que la méthode de la parallaxe soit

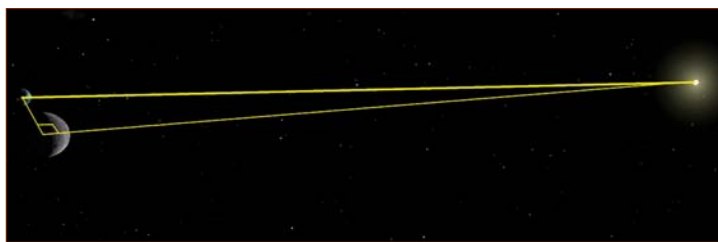
appliquée pour la première fois à des étoiles, en l'occurrence une « star anonyme », 51 Cygni. Bessel l'avait choisie car elle possédait un mouvement propre important (elle se déplaçait rapidement dans le ciel), et il estimait qu'une telle étoile devait être relativement proche de nous. Naturellement, compte tenu des longueurs mises en jeu, la parallaxe était infime (une fraction de seconde d'arc) et les résultats furent fort imprécis, mais donnèrent quand même un ordre de grandeur utile : les étoiles les plus proches se situent malgré tout à plusieurs dizaines de milliers de milliards de kilomètres, c'est-à-dire quelques années-lumière, soit plusieurs centaines de milliers de fois la distance Terre-Soleil.

On en arrive maintenant à l'époque « moderne ». Faute de pouvoir utiliser des méthodes directes, on va chercher des méthodes de détermination indirectes. La première consiste à essayer d'identifier puis de repérer des « chandelles » standard, des astres dont on connaît la luminosité intrinsèque, puis de mesurer leur éclat vu depuis la Terre : connaissant la loi de décroissance de la luminosité en fonction de la distance, on déduit aisément cette dernière. Premières à être utilisées, les *céphéides*, des

## Les mésaventures de l'astronome Guillaume Le Gentil

Parti à Pondichéry, en Inde, pour observer un transit de Vénus, Guillaume Le Gentil dut quitter son observatoire en catastrophe juste avant le transit de Venus de 1761, car la guerre qui venait d'éclater entre la France et l'Angleterre, rendant la région dangereuse. C'est donc en mer qu'il assista impuissant au transit de Venus, les mouvements du bateau sur lequel il se trouvait l'empêchant de réaliser toute mesure correcte. Après la signature de la paix, notre astronome débarqua enfin en Inde, largement avant le deuxième transit (qui a donc lieu huit ans après le premier), construit son observatoire et... ne peut rien voir en raison d'un « nuage fatal », comme il l'appela, qui passa devant le Soleil au début du transit (alors que les jours précédents avait été magnifiques !). Pis, de retour en France, il découvre qu'on l'avait déclaré mort, que sa femme s'était remariée et que ses enfants avaient hérité de sa fortune – qu'il ne put recouvrer. Louis XVI intercédait cependant en sa faveur, il retrouva son siège à l'Académie des sciences et un poste à l'Observatoire.

étoiles dites « variables » : leur éclat fluctue périodiquement, et ces deux paramètres (éclat et période) sont reliés par une relation empirique assez simple. Moyennant quoi, il suffit d'identifier des *céphéides* dans un amas ou une nébuleuse, de les observer quelque temps et le tour est joué. C'est principalement à l'astronome américain Henrietta Leavitt que l'on doit cette méthode, qui a permis d'arpenter notre Galaxie dans le premier quart du XX<sup>e</sup> siècle.

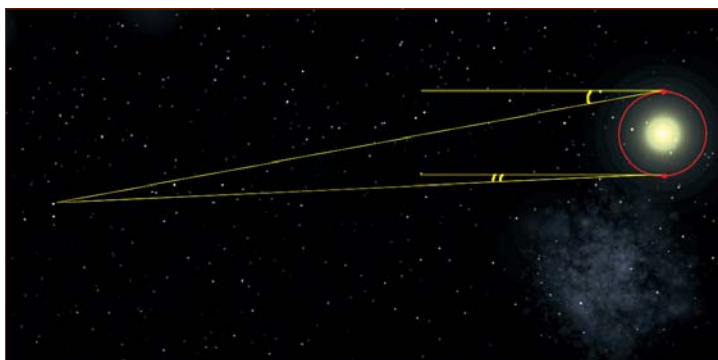


Principe de la mesure d'Hipparque. Lorsque la Lune, au premier plan, est à son premier quartier, l'angle qu'elle forme avec la Terre et le Soleil est droit. Si l'on arrive à mesurer l'angle ayant comme sommet la Terre, on peut en déduire toutes les mesures du triangle, moyennant la connaissance préalable de la distance Terre-Lune. Hélas, en raison de l'éloignement du Soleil, cet angle est également presque droit, et la moindre imprécision sur sa détermination se traduit par des erreurs énormes sur les distances.

Pour aller plus loin, il faudra attendre l'avènement de télescopes plus performants. Finalement, c'est Edwin Hubble, qui à partir de 1925, en utilisant le nouvel instrumenta de cent pouces (2,54 m) du Mont Palomar qui, le premier, parviendra à résoudre des *céphéides* dans différentes « nébuleuses » comme on les appelait alors, et à prouver qu'elles n'appartiennent pas à notre galaxie. L'astronomie extragalactique était née. Assez bizarrement, la position du Soleil dans la Galaxie ne sera, quant à

notre propre Galaxie n'est d'ailleurs pas parfaitement connue à ce jour ; par exemple, le fait que celle-ci possède une barre en son centre est une découverte qui remonte à vingt ans à peine.

Sur sa lancée, Hubble va découvrir l'expansion de l'univers, c'est-à-dire que toutes les galaxies, hormis celles avec lesquelles nous sommes liées par la gravitation, s'éloignent de nous. Hubble s'aperçoit que la lumière des galaxies distantes subit un léger rougissement ; ce décalage vers le



Principe de la mesure par parallaxe. À partir de deux positions (généralement opposées) de la Terre sur son orbite (en rouge), on effectue la visée d'une étoile et on calcule l'angle correspondant en s'appuyant sur un référentiel fixe (étoile considérablement plus éloignée). Là encore, la différence d'angle (très faible), connaissant le rayon de l'orbite terrestre (150 000 000 km), permet, en principe, le calcul de la distance Terre-étoile. Cette méthode sert de base à la définition d'une mesure couramment utilisée en astronomie, le parsec. L'illustration n'est évidemment pas à l'échelle.

elle, définitivement établie que dix ans plus tard. La détermination de la position du Soleil par rapport au centre galactique est rendue difficile par le fait que celui-ci est masqué par des nuages de gaz opaques, et que son éclat s'en trouve très atténué. La structure détaillée de

rouge, ou *redshift*, caractérise les corps qui s'éloignent de nous (par effet Doppler), et son intensité permet de déterminer la vitesse. Grâce aux *céphéides*, l'astronome évalue l'éloignement de quelques objets et s'aperçoit que le *redshift*, donc la vitesse, suit une loi linéaire en fonction de la distance. La réci-

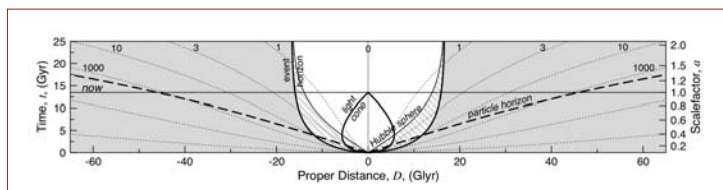


Diagramme mathématique explicitant les relations entre expansion, distances et « horizons », selon les données astronomiques les plus vraisemblables actuellement. La Terre est au milieu de la figure, et nous nous situons sur l'intersection de cette droite verticale et de la droite horizontale *now*. La surface à l'intérieur du light cone représente la portion de l'univers visible actuellement. La Hubble sphere désigne la limite au-delà de laquelle, en raison de l'expansion, les objets se mettent à s'éloigner de nous plus vite que la lumière. L'event horizon représente la frontière de ce que nous pourrions voir : les objets situés au-delà s'éloignent trop vite pour que leur lumière puisse un jour nous atteindre. Enfin, le particule horizon, représenté en hachures grossières, matérialise un autre horizon : les objets situés au-delà sont invisibles parce que l'univers est trop jeune pour permettre à leur lumière de nous atteindre ; ils sont donc actuellement situés au-delà de treize milliards d'années-lumière. En pointillés, la trajectoire de différentes galaxies distantes. Ce diagramme n'est pas très réjouissant : on voit que l'event horizon, qui marque la limite de nos observations, tend vers une asymptote, ce qui signifie que l'univers observable stagne : même en attendant très longtemps, on n'observe rien de plus ; en outre, les trajectoires des galaxies divergent et finissent toutes par franchir l'event horizon, ce qui signifie que le ciel deviendra de plus en plus vide au fur et à mesure de l'avancée du temps, jusqu'à se limiter aux galaxies les plus proches de nous. Extrait de : T. M. Davis, C. H. Lineweaver, *Expanding Confusion: common misconceptions of cosmological horizons and the superluminal expansion of the universe*, Arxiv astro-ph/0310808.

proque du facteur de proportionnalité,  $H_0$  ou constante de Hubble, donne un ordre de grandeur de l'âge de l'univers.

À l'époque, cependant, on n'avait qu'une idée très imprécise de la luminosité absolue des *céphéides*. Par conséquent, Hubble a calculé une constante complètement fautive (sept fois plus élevée que sa vraie valeur), ce qui rapprochait beaucoup les galaxies et donnait un âge de l'univers trop faible pour concorder avec les premières estimations issues d'autres branches de la science comme la géologie : l'univers se trouvait ainsi plus jeune que la Terre ! Cette contradiction a longtemps posé problème avant d'être peu à peu résolue après

guerre. À l'heure actuelle les estimations modernes conduisent à une mesure de  $H_0$ , désormais connue à mieux que 10 %, ce qui correspond à un univers vieux de treize milliards et demi d'années environ.

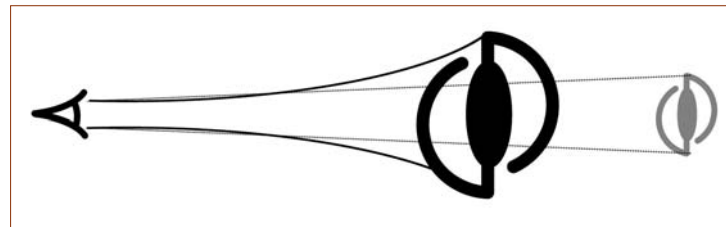
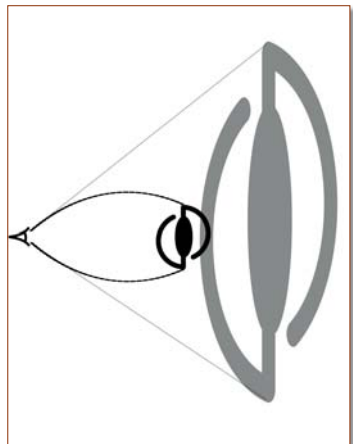
La mesure des objets lointains passe donc par l'évaluation de leur *redshift*. Mesurer un spectre, cependant, pose des soucis : la lumière, déjà très faible, doit passer dans un prisme qui la décompose, l'étale, ce qui la rend encore plus diaphane. Pendant longtemps, le nombre de galaxies dont on avait un spectre précis est resté limité à quelques milliers. Il aura fallu attendre les années 1980 et l'arrivée des matrices CCD, bien plus sensibles que

les émulsions photographiques pour obtenir les données sur un échantillon plus fourni d'objets très lointains. Actuellement, on peut observer des galaxies ayant un *redshift* au-delà de 6, c'est-à-dire qui sont aujourd'hui éloignées de nous de plus de 25 milliards d'années lumière.

### G.E. : Qu'est-ce exactement que l'expansion ?

**A.R.** : C'est un phénomène « *consubstantiel* » à l'univers : il s'étend – on pense uniformément – dans toutes les directions. La métaphore la plus utilisée est celle du ballon de baudruche que l'on gonfle et sur lequel on colle des confettis : les confettis s'éloignent les uns des autres (*récession*), mais eux-mêmes ne subissent pas d'expansion ; cette dernière est aisément contrebalancée par les forces locales de cohésion que nous connaissons.

Le travail de Hubble a mis en évidence l'expansion de l'univers. Mais aujourd'hui, on peut faire mieux, en reconstituant l'histoire de cette expansion, c'est-à-dire en déterminant comment le taux d'expansion a varié au cours du temps. C'est un résultat intéressant car l'évolution du taux d'expansion nous donne des informations sur les propriétés de la ou des formes de matière qui emplissent l'univers. Vers la fin du siècle dernier, deux équipes indépendantes ont procédé à une exploration systématique de l'univers en utilisant les *supernovæ*



Distorsions des distances dans des espaces courbes. L'espace hyperbolique majore les distances apparentes : les rayons lumineux divergent plus vite que dans l'espace plat, et la sensation de profondeur s'en trouve augmentée (les objets lointains sont plus « petits ») ; l'espace sphérique possède des propriétés amusantes : au départ, il se comporte « normalement », mais, si les rayons lumineux parcourent plus de la moitié du rayon de l'univers, ils se mettent à converger (vers le point antipodal de l'observateur). Ainsi, au lieu de diminuer avec la distance, les images des objets s'agrandissent (penser à la manière dont les méridiens divergent en partant du pôle nord jusqu'à l'équateur, puis se rapprochent pour concourir au pôle sud) ! À la limite, l'image du point antipodal occupe tout le ciel.

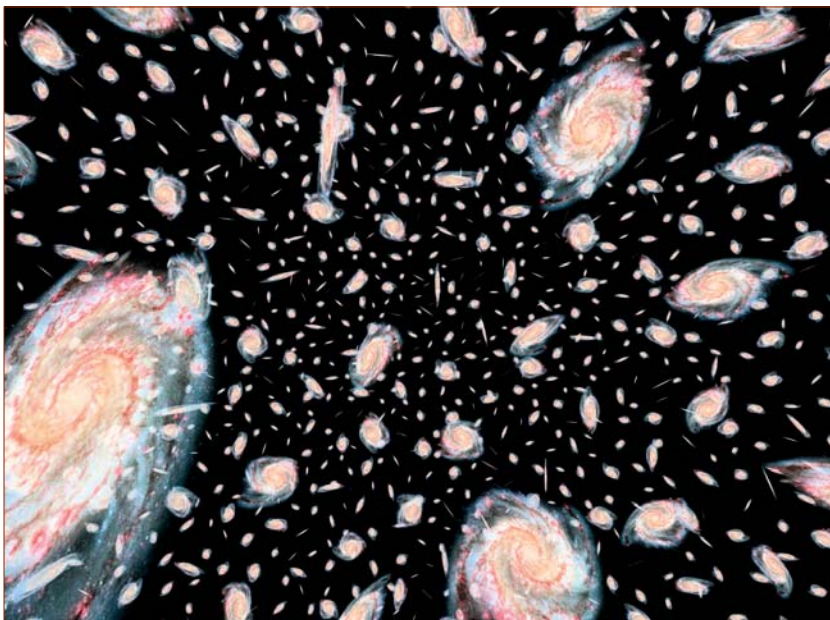


Image du fond du ciel dans un univers hyperbolique. Comme les rayons lumineux divergent, non seulement les objets distants apparaissent excessivement lointains, mais le ciel est très peuplé, car le champ de vision intercepte un angle solide d'espace plus important que celui de l'espace plat (illustrations A. Riazuelo).

plutôt que les *céphéides*. Le résultat obtenu était formel : les *supernovæ* lointaines sont moins lumineuses que prévu, donc plus distantes. Cela signifie que l'expansion de l'univers ne ralentit pas, comme on pourrait s'y attendre, mais accélère, un résultat que l'on ne peut expliquer en supposant que l'univers contient des formes conventionnelles de matière. Il devient nécessaire de supposer qu'il contient une composante supplémentaire, que l'on appelle, faute de mieux, énergie sombre, et qui possède un effet gravitationnel répulsif.

**G.E. : Le concept de distance reste-t-il défini dans un univers en expansion ?**

Cela pose évidemment un problème pour la mesure des distances. Dans un univers statique, vous pouvez évaluer une longueur en utilisant la méthode du temps d'aller-retour divisé par deux ; certes, il faut être patient pour les objets très lointains, mais, en principe, cela fonctionne ; en prime, la réponse obtenue est exacte puisque rien ne bouge. Dans un univers en expansion, les difficultés s'accumulent : non seulement il

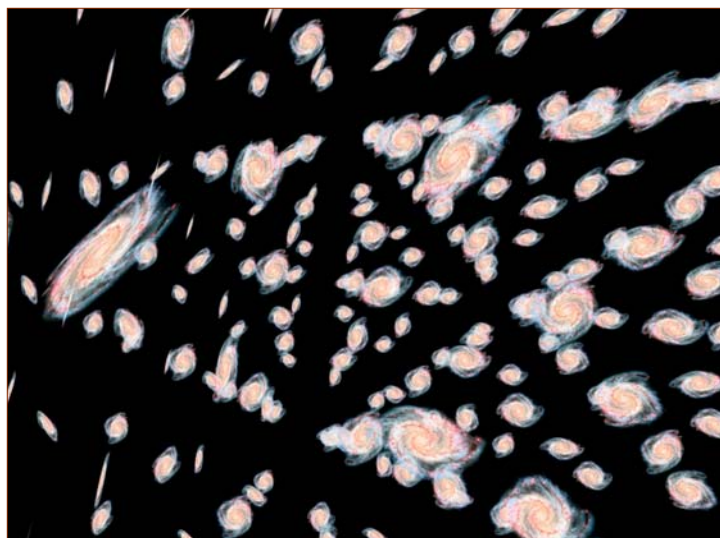
faut attendre plus longtemps pour obtenir une mesure fautive, mais, de surcroît, il existe une limite au-delà de laquelle il est impossible d'aller ; il s'agit d'une propriété plus fondamentale de notre univers : l'existence d'un « horizon ».

En pratique, c'est assez facile à comprendre. Le premier « horizon » correspond au fait que vous ne pouvez voir des objets dont la lumière n'a pas eu le temps de vous parvenir depuis les débuts

de l'univers. Dans un univers statique, c'est le seul horizon qui existe, et il régresse au fur et à mesure que le temps passe, si bien qu'avec un peu de patience, l'univers devient visible sur des distances toujours plus grandes.

Dans un univers en expansion, il peut exister un autre horizon plus fondamental, dit « horizon des événements ». Il matérialise une limite au-delà de laquelle, même en attendant un temps infini, on ne peut rien voir, car l'univers s'étend trop, éventuellement trop rapidement, pour que la lumière émise par ces régions distantes arrive à nous atteindre. Imaginez de nouveau notre ballon. Tracez-y deux points et demandez à une fourmi d'aller d'un point à un autre pendant que vous le gonflez ; si le ballon n'est pas trop gonflé, les points s'écartent lentement, la fourmi arrive à faire le trajet – certes, en plus de temps que si le ballon ne gonflait pas, mais elle y parvient ; quand le ballon atteint un rayon critique, la distance entre les deux points augmente plus vite que celle parcourue par la fourmi : même en avançant, elle régresse par rapport à son point d'arrivée, et ne pourra jamais l'atteindre.

Ainsi, selon les modèles cosmologiques actuels, même au prix



Le fond du ciel dans un univers plat, euclidien. C'est vraisemblablement le cas de l'univers actuel.

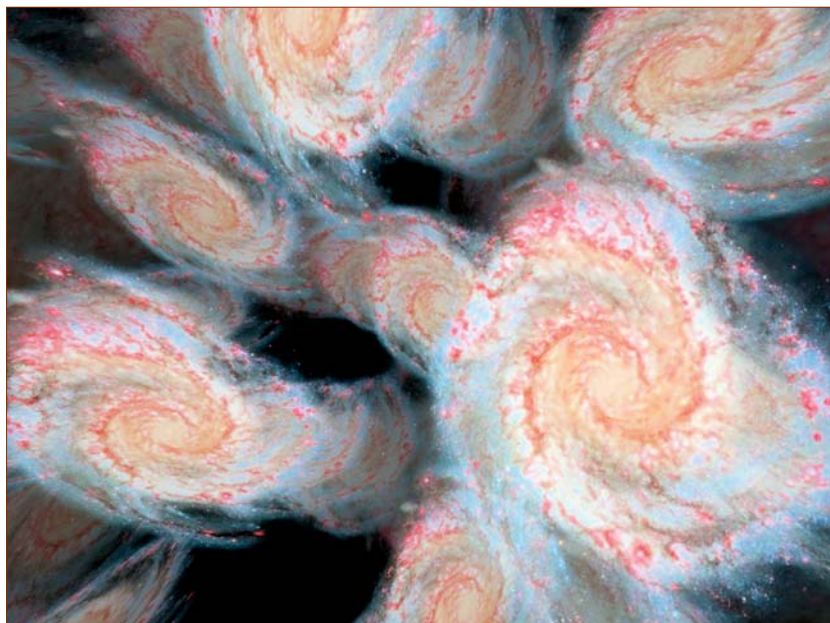
d'une attente infiniment longue, l'univers observable se limitera à 65 milliards d'années-lumière autour de nous. Nous ne pouvons espérer en connaître plus. Tout ce qui existe au-delà nous restera caché à jamais.

Enfin, à regarder loin, on regarde tôt, et, à scruter le passé, on finit par atteindre une limite ultime, qui correspond au passage entre l'univers jeune, chaud et lumineux, à l'univers actuel, froid et transparent. Cette transition, qui s'est effectuée brutalement environ 380 000 ans après le Big Bang, marque l'extrême limite de l'observable : c'est le fameux *fond diffus cosmologique* à 2,7 K. On ne peut rien discerner de plus vieux ; c'est un peu comme quand vous regardez le Soleil : vous voyez une surface lumineuse, et ce qui se trouve à l'intérieur n'est pas visible. Ce fond est globalement uniforme, mais ses légères hétérogénéités (de l'ordre de  $10^{-5}$  K) dénoncent la présence de micro-fluctuations qui nous permettront, une fois modélisées, de calculer certaines propriétés de notre univers.

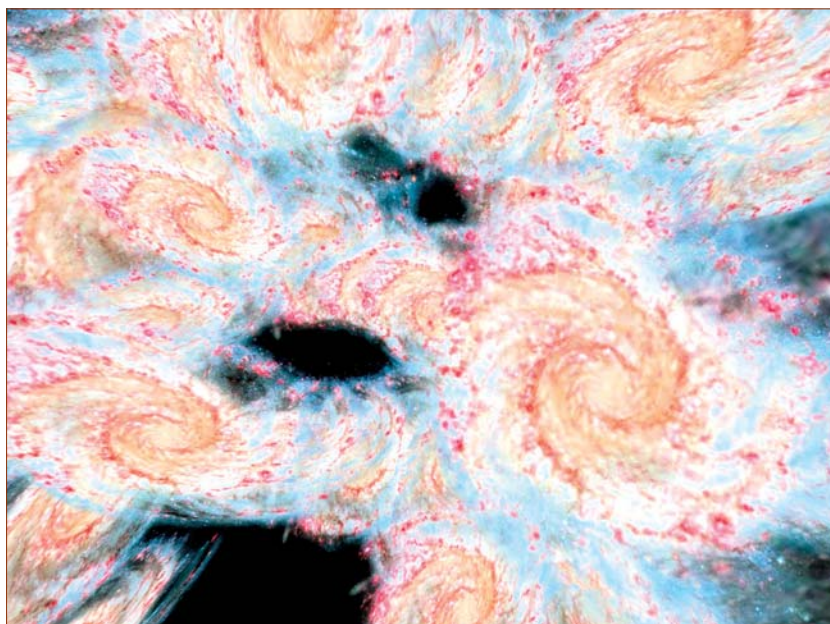
**G.E. : Qu'entend-on par « distance » dans cet univers en expansion ?**

**A.R. :** La notion est évidemment assez délicate. La première méthode qui fournit une distance, nous l'avons vu, consiste à utiliser une étoile ou un événement astronomique dont l'éclat est connu. Alors, en mesurant sa luminosité sur Terre, puis en appliquant une relation simple, on arrive à calculer son éloignement ; appelons ça la « distance de luminosité ».

La deuxième méthode s'applique à des objets dont on connaît la dimension. C'est le principe de la perspective : si vous connaissez le diamètre d'une galaxie, et que vous mesurez son diamètre angulaire apparent, vous en déduisez sa distance. Il s'agit d'une distance « géométrique » ou « angulaire ».



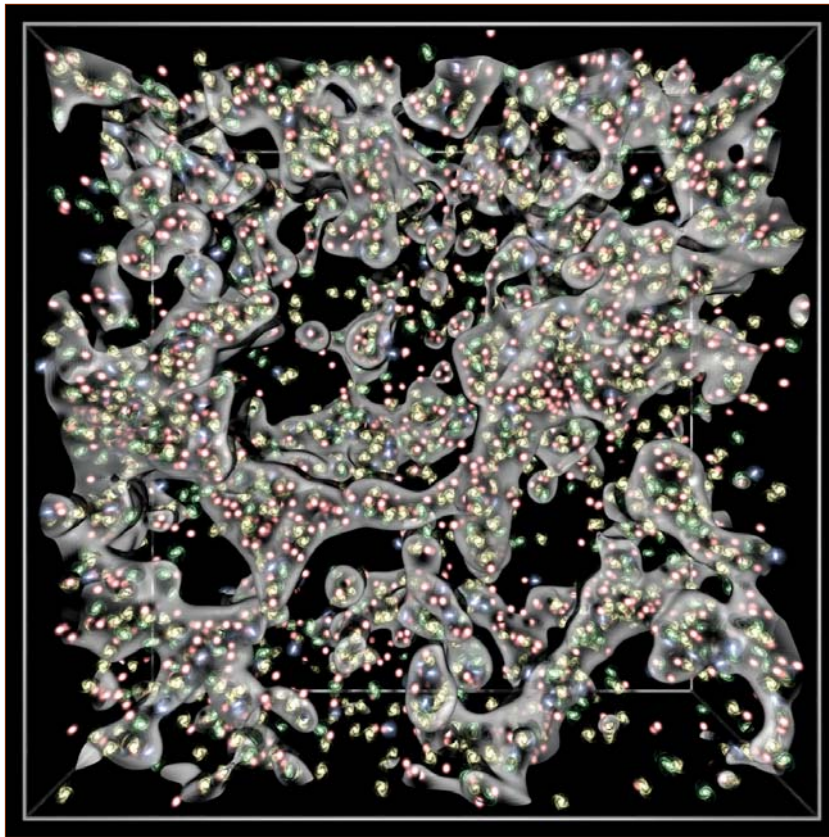
Fond du ciel dans un univers fermé : il n'y a presque pas de vide, la nuit n'existe pas ! Les objets très lointains, en raison de la convergence antipodale, apparaissent démesurés. Ici, le rayon de courbure a été volontairement très exagéré. L'image du haut applique un flou proportionnel à la distance, qui n'apparaît pas dans l'image du bas (Illustrations Alain Riazuelo).



La troisième distance, vous l'obtenez en mesurant le *redshift* ; on peut la qualifier de « distance de Hubble ».

Ces trois distances ne coïncident pas en raison de l'expansion. La distance angulaire croît moins vite que la distance de Hubble (les objets lointains ont un diamètre angulaire plus gros que ce à quoi

on s'attendrait naïvement), alors que la distance de luminosité augmente, elle, très vite : les objets lointains, plus gros, sont hélas surtout beaucoup plus pâles, et donc beaucoup moins faciles à observer qu'en l'absence d'expansion. À cause de ces effets, les distances deviennent nécessairement faussées : on observe des objets à la posi-



Représentation de la structure de l'univers à grande échelle d'après le 2DF Galaxy Redshift Survey. Illustration équipe 2DF-GRS.

tion qu'ils occupaient lorsque la lumière les a quittés, il y a très longtemps. Leur position actuelle est calculable, mais pas observable, puisque rien ne va plus vite que la lumière. Donc, pour résumer : il est possible de déterminer des distances passées et d'en déduire l'actuelle, mais impossible de confirmer directement le calcul.

**G.E. : Les principes de la géométrie classique sont donc applicables à l'univers ?**

**A.R. :** Oui, mais en partie seulement ! Car, au-delà du phénomène d'expansion, tout nous indique que nous vivons dans un univers « plat », au sens de la géométrie riemannienne : courbure nulle, espace euclidien – tous les théorèmes connus y sont applicables. Là aussi, ce résultat surprend : il n'y a aucune raison *a priori* à cette absence de courbure, qui implique une valeur bien précise

de la densité générale de matière. Toutefois, il faut bien l'accepter. Ceci étant, tout euclidien que soit notre espace, notre espace-temps lui n'est pas plat, il est courbé. Le fait que la taille angulaire des objets évolue de façon contre-intuitive est là pour nous le rappeler.

Ensuite, si l'univers est « plat », ce n'est pas pour cela qu'on en connaît la forme. Celui-ci peut ressembler à un plan, mais aussi à un cylindre, ou un tore, ou à d'autres géométries plus complexes, il y en a dix-huit possibles. On a cherché des indices dans l'analyse du fond diffus cosmologique, mais on n'a rien trouvé. Il n'est même pas certain que l'on puisse déceler quoi que ce soit à ce sujet, ce qui fait que la communauté scientifique s'y intéresse assez peu. Ceci dit, d'un point de vue conceptuel, ce serait fabuleux de prouver que notre univers a la forme d'une bouteille de Klein ou d'objets plus bizarres encore.

**G.E. : On peut donc maintenant cartographier le ciel ?**

**A.R. :** Oui, mais toujours avec les limitations inhérentes aux instruments astronomiques. Le premier catalogue de galaxies à grande échelle, réalisé à la fin des années 1980, a révélé une autre surprise. Alors que l'on pensait jusqu'ici que les galaxies étaient réparties à peu près uniformément dans l'espace, il n'en est rien. Celles-ci s'organisent plutôt en forme d'éponge, avec des longs filaments qui se croisent, séparés par des bulles essentiellement vides. On sait maintenant, grâce à des simulations numériques que ça n'a rien d'étonnant, du moins si on a en tête que la répartition actuelle de matière dans l'univers est le reflet d'infimes écarts à une distribution de matière parfaitement uniforme dans l'univers primordial. Cartographier l'univers primordial nous révèle un univers sans étoiles ou galaxies, mais déjà parcouru d'immenses d'ondes de densité, celles précisément dont on trouve les traces dans le fond diffus cosmologique. La compréhension de ces phénomènes ondulatoires primitifs est, par conséquent, l'une des clefs de la cosmologie actuelle. L'observation de l'univers jeune nous permet de comprendre l'univers actuel, et la comparaison de photos de l'univers prises à différentes époque nous renseigne sur certaines de ses propriétés.

Plus près de nous, les techniques laser nous ont permis de mesurer la distance Terre-Lune au centimètre près. Il ne faut pas croire que c'est un luxe : certaines prédictions de la théorie de la Relativité générale demandent cette précision pour qu'on en vérifie la validité. Ainsi, tout est lié : la vérification des théories par des mesures proches et précises permet d'extrapoler aux objets situés à des distances prodigieuses. C'est un peu de la fameuse « harmonie » du cosmos si chère aux anciens. ○