

ENTRETIEN  
AVEC JEAN-  
PIERRE LUMINET

PAR

MAYLIS DE KERANGAL

*Jean-Pierre Luminet est astrophysicien, écrivain et poète. Spécialiste mondial des trous noirs, il étudie depuis une dizaine d'années la topologie du ciel, et développe l'idée d'un univers d'extension spatiale finie, mais sans bords, qu'il désigne par le terme d'« univers chiffonné ». Entretien à l'Observatoire de Meudon, le 22 janvier 2011.*

**MAYLIS DE KERANGAL :** *Est-il possible de tracer une histoire des représentations du ciel ?*

**JEAN-PIERRE LUMINET :** Bien sûr. Les premières représentations explicites, c'est-à-dire sous la forme de cartes ou de pierres gravées (on trouve les premières représentations du cosmos dans les pierres gravées de Babylone, par exemple) remontent surtout à la Grèce antique. Elles sont mi-explicites, mi-fantasmatiques. « Fantasmatiques », c'est-à-dire qu'elles établissent un système du monde, un modèle cosmologique, dans lequel ce que l'on voit du ciel peut s'insérer dans une vision du monde plus globale, essentiellement philosophique.

Pendant très longtemps, évidemment, les représentations du ciel se sont limitées à ce que l'on voyait à l'œil, et ce jusqu'à la lunette de Galilée en 1609 : 2 500 ans d'histoire se cantonnent donc au visible. De même, pendant très longtemps, le ciel, c'était le ciel de nuit, les étoiles. Les premières tentatives de représentation globale du ciel remontent à Platon, Aristote, aux grands philosophes de l'Antiquité. Il y a plusieurs écoles, dont deux principales. Celle qui triomphe jusqu'au xvi<sup>e</sup> siècle, c'est la vision aristotélicienne, qui conçoit un univers géocentrique : la terre est absolument fixe au centre de l'univers, tout tourne autour d'elle, en cercles. Pour Platon, ce n'est pas le poète ni même l'astronome

qui va le mieux parler du ciel, comprendre ses mécanismes, mais celui qui fait de la géométrie – il avait fait inscrire à l'entrée de l'Académie: « Que nul n'entre ici s'il n'est géomètre. » Il y a très tôt cette idée d'essayer de comprendre le ciel à travers des éléments de la géométrie, des principes d'harmonie, de beauté, d'ordre. Le symbole de la perfection supposée céleste, c'est le cercle et la sphère. C'est pour cela que tous les systèmes de l'Antiquité sont fondés sur les mouvements célestes circulaires ou sphériques autour d'une terre immobile, avec en plus cette idée justement que les étoiles sont toutes à la même distance et qu'elles occupent une ultime sphère, dite sphère des fixes. Dans toutes les représentations antiques et médiévales, on en trouve des transcriptions visuelles sous forme de sphères de cristal où les étoiles sont accrochées, un peu comme des lampions. Elles sont là pour l'homme, pour décorer la nuit et pour clôturer

le ciel. Après, lorsqu'ils ont fini par accepter Aristote après l'avoir rejeté, les théologiens du Moyen Âge ont incorporé dans la cosmologie chrétienne cette idée de la sphère des fixes comme limite du monde physique. Au-delà, pour eux, il y avait le monde spirituel, la demeure de Dieu et des anges, un au-delà du ciel, non plus un espace physique mais un espace purement spirituel, que l'on trouve d'ailleurs parfaitement décrit dans la *Divine Comédie* de Dante. Cette première option a donc été très largement dominante, jusqu'à la révolution copernicienne.

L'autre option, qui plus tard s'avérera beaucoup plus profonde et féconde, mais qui a longtemps été rejetée, c'est celle des philosophes atomistes comme Démocrite et Épicure, qui avaient une vision beaucoup plus moderne, selon laquelle l'univers était infini. Les deux éléments constitutifs du ciel étaient le vide et les atomes. L'atome, c'était la particule élémentaire, l'élément

insécable: *atomos* en grec veut dire « qui ne peut pas être divisé ». C'est une vision très matérialiste. Selon les philosophes atomistes, toute configuration, tout corps, qu'il s'agisse d'un corps céleste ou de n'importe quel corps vivant, était l'agrégat fortuit et aléatoire d'un nombre fini d'atomes qui se combinaient pour former un corps, lequel évoluait puis se désagrégait. Ceci se passant cependant dans un vide infini et un temps éternel, ces agrégats devaient se reproduire un très grand nombre de fois, sinon un nombre infini; d'où l'idée extrêmement moderne de « pluralité des mondes ». Il n'existe pas de représentation visuelle de la cosmologie atomiste, toutes les représentations sont aristotéliennes. Évidemment, ces conceptions ont fait horreur à l'Église chrétienne, elles ont donc été effacées des tablettes jusqu'au xvi<sup>e</sup> siècle. La deuxième grande étape est le passage au système héliocentrique – c'est ce que j'ai raconté

dans une série de romans, *Les Bâisseurs du ciel*, de Copernic à Newton. La terre devient une planète qui bouge autour du soleil et tourne sur elle-même. Progressivement, le ciel s'ouvre, le cosmos clos de l'Antiquité laisse la place à un univers très vaste, dans lequel les physiques terrestre et céleste sont unifiées. Chez Aristote, on pensait qu'il y avait deux physiques différentes, mais grâce à Galilée, Kepler et Newton, leurs lois sont unifiées au sein d'un univers très grand, sinon infini, comme chez Newton. Les étoiles sont autant de soleils. Sur le plan de la représentation visuelle, il est évident que l'avènement de la lunette de Galilée, puis le développement du télescope, commencent à montrer le ciel invisible à l'œil humain, à révéler combien il est différent du ciel simplement visible. Et, à mesure que l'astronomie va progresser, on va s'apercevoir que la partie visible de l'univers n'est qu'une pointe lumineuse infinitésimale de

ce qu'est véritablement l'univers, pour aboutir aujourd'hui à la quasi-certitude que moins de 1 % de l'ensemble de l'univers existe sous forme visible. Même avec les télescopes les plus performants, qui montrent des clichés absolument époustoufflants, où l'on voit dans un minuscule champ de ciel des milliers de galaxies, où l'on a l'impression que l'univers est peuplé d'un nombre quasiment infini de sources lumineuses, malgré tout, cela ne représente qu'à peine 1 % de ce qu'il y a réellement dans l'univers. Il y a ce décalage constant, d'abord géographique, la position de la terre qui se décale, puis le décalage du visible par rapport à la réalité du ciel qui est essentiellement invisible, invisible aux instruments mais visible avec l'œil du théoricien, qui essaie de reconstituer, justement, la présence de cet invisible.

Revenons à l'histoire des systèmes du monde : la théorie de Newton triomphe pendant deux

cents ans, ensuite c'est la révolution relativiste d'Einstein. Avec la relativité générale, on a une théorie sur l'architecture invisible de l'univers, qui postule un espace-temps courbe. Ce n'est plus l'espace rigide absolu de Newton ou de Galilée. C'est un espace-temps mou, élastique – qui se traduit visuellement par les trajets particuliers des rayons lumineux.

La plus grande découverte scientifique du  $xx^e$  siècle, c'est peut-être la découverte du modèle du Big Bang, et l'idée que l'univers n'est pas éternel. La question de l'inscription du ciel dans le temps change complètement. L'univers évolue : il était très différent il y a quelques milliards d'années de ce qu'il est aujourd'hui, et sera encore différent dans quelques milliards d'années. C'est l'essence même des modèles de Big Bang.

La question de la taille du ciel, c'est-à-dire de l'univers, est un sujet à rebondissements. Dans

l'Antiquité, on pensait qu'il était fini, borné par la sphère des étoiles fixes. Mais cela posait un problème, qu'on appelle le « paradoxe du bord ». Il ne pouvait pas vraiment y avoir de bord logique. Il a fallu attendre le  $xix^e$  siècle et la découverte des géométries dites non euclidiennes pour concevoir enfin de façon logique des espaces finis sans bords. Dans le cas de la relativité générale, quand on cherche des solutions aux équations d'Einstein, qui sont susceptibles de représenter l'univers dans son ensemble, on a différentes possibilités. Dans certaines solutions, l'univers est fini mais sans bords. Ce n'est plus l'univers clos des Grecs, c'est un espace de volume fini mais sans limites, ce qui implique qu'il n'existe pas d'espace « contenant » – c'est l'un des points de blocage des représentations mentales. Il existe aussi la solution de l'espace infini. Mais il y a beaucoup de subtilités dans les modélisations. Par exemple, j'ai développé des

modèles particuliers d'espaces finis sans bords mais présentant des connexions particulières, que j'appelle les « univers chiffonnés », et qui proposent de curieuses architectures compatibles avec les observations.

Sur le plan visuel, ce qui est intéressant, c'est que l'idée d'espace-temps élastique et courbé fait que la lumière, à travers laquelle on perçoit le ciel, emprunte des trajets qui ne sont plus les lignes droites habituelles. On a donc des déviations de la lumière, des mirages, etc. Il faut arriver à décoder les illusions d'optique du ciel « profond » révélé par les grands télescopes d'aujourd'hui. Il y a plusieurs illusions d'optiques dont certaines, absolument avérées, sont les « mirages gravitationnels ». Un mirage gravitationnel, typiquement, c'est une source lumineuse lointaine, disons une galaxie, que vous voyez en plusieurs images distinctes, parce que sur la ligne de visée, un corps massif

s'interpose et courbe l'espace autour de lui. Les rayons lumineux qui viennent de l'arrière-plan empruntent plusieurs trajets pour traverser cette « cuvette », et reconvergent vers nous, observateurs. On voit alors la source lointaine en plusieurs exemplaires, mais pas là où elle est réellement, c'est-à-dire derrière l'objet intermédiaire.

*Il y a un système de diffraction...*

Oui. Ces mirages gravitationnels, qui sont des conséquences incontournables de l'espace-temps courbe, sont aujourd'hui observés en des centaines d'exemplaires. Et puis il y a la possibilité, qui m'a particulièrement fasciné mais qui reste à prouver réellement par l'observation, de ce que j'ai appelé les « mirages topologiques ». Ils se produisent dans le contexte de « l'univers chiffonné », où c'est la forme même de l'espace

qui crée une illusion d'optique à l'échelle du cosmos tout entier. Comme un jeu de miroirs. Ce ne sont pas des miroirs physiques, bien entendu, mais des subtilités géométriques qui créeraient les mêmes effets que des miroirs.

*Vous avez eu cette idée-là en étudiant les rayonnements ?*

Au départ, non. J'ai toujours eu une approche de mathématicien et de géomètre, pas une approche d'astronome. C'est ma formation. À la fin des années 1980, je me suis aperçu qu'il y avait toute une branche de la géométrie qui n'avait pas été incorporée à la cosmologie des modèles de Big Bang. C'est justement la possibilité que l'espace puisse avoir une topologie « chiffonnée ». J'ai commencé à importer ces formes possibles, comme le dodécaèdre sphérique, dans les modèles cosmologiques relativistes, et à faire un

certain nombre de prédictions. Or en 2003, pour la première fois, des indices expérimentaux ont commencé à conforter ce type de proposition essentiellement théorique, avec l'analyse de ce qu'on appelle le « rayonnement fossile », vestige de la lumière émise par l'univers primordial. On le cartographie et on analyse sa structure un peu comme on analyserait les vibrations d'un instrument de musique. On découvre qu'il « manque des graves », c'est-à-dire que l'univers primordial n'a pas vibré sur les grandes longueurs d'ondes. Le modèle du dodécaèdre sphérique est un candidat qui marche particulièrement bien pour expliquer cela.

*Peut-on dater le ciel ? Quel âge a-t-il ?*

13,7 milliards d'années.

*C'est très précis.*

C'est devenu extrêmement précis depuis moins de dix ans. La question a fait l'objet d'interminables discussions tout au long de l'histoire. Jusqu'à l'époque de Newton, on suit les Saintes Écritures, la chronologie biblique. On pense que le ciel date de 4004 av. J.-C. Après, le célèbre naturaliste Buffon élabore une théorie de la naissance de la terre. Pour essayer de déterminer son âge, il chauffe des boulets de différentes compositions, qui selon lui pourraient ressembler à la composition de la terre. Ensuite, il mesure leur temps de refroidissement, et il extrapole pour un boulet de la taille de la terre. Il en déduit que la terre a au moins 800 000 ans. C'est encore loin de la réalité, mais à l'époque, c'est gigantesque par rapport aux 4 000 ans bibliques ! On parle toujours du procès de Galilée, mais on ignore souvent que Buffon, le plus grand savant français de son temps, a dû lui aussi abjurer devant les marches de l'Académie des sciences, pour

avoir osé dire que la terre était aussi vieille. Donc, aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles, on commence à bousculer la chronologie, à imaginer un ciel plus ancien, plus ancien en tout cas que la terre. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, grâce à la radioactivité, on en est à des valeurs autour du milliard d'années pour la terre, ce qui implique un âge de l'univers se comptant au moins en milliards d'années. Avant la découverte des modèles de Big Bang, cela ne posait pas de problème parce qu'on pensait que l'univers était éternel. Les modèles du Big Bang proposent cependant un début de l'histoire cosmique – pas forcément le « vrai » début, la création de l'univers, mais le début de la compréhension de l'univers, c'est-à-dire le début de l'expansion. Durant un siècle, les estimations ont oscillé entre dix et vingt milliards d'années. Cela manquait de précision parce qu'il fallait mesurer des paramètres cosmologiques très particuliers. Une bonne précision n'a été

atteinte qu'au début des années 2000. Depuis dix ans, donc, on a des instruments très sophistiqués qui observent le rayonnement fossile et qui permettent de resserrer considérablement l'incertitude sur l'âge de l'univers. Aujourd'hui, on fixe cet âge à 13,7 milliards d'années. C'est le temps écoulé depuis le début de l'expansion de l'univers, c'est-à-dire le moment à partir duquel nos théories physiques sont pertinentes. Je le répète, ce n'est pas forcément le début absolu de l'univers, on pense même aujourd'hui qu'il n'existe pas de « temps zéro ». On commence à envisager des théories plus sophistiquées, des modèles « d'avant Big Bang », qui restent malgré tout très spéculatifs.

C'est intéressant, cette notion d'âge du ciel, parce que cela dépend de ce qu'on met derrière le mot « ciel ». Si le ciel, c'est le ciel bleu, autrement dit le ciel de jour, comme le ciel bleu est lié à l'atmosphère de la terre, l'âge du ciel c'est l'âge de la

terre, qui n'est plus que 4,5 milliards d'années ! Si le ciel c'est le ciel nocturne, alors il s'agit de l'âge des étoiles, et l'âge des étoiles n'est pas tout à fait l'âge de l'univers, parce qu'au moment du Big Bang, les étoiles n'existaient pas encore. Il a fallu attendre à peu près un milliard d'années. L'âge des plus vieilles étoiles nous amène plutôt vers 13 milliards d'années, mais ce sont des étoiles que l'on ne voit pas à l'œil. S'il s'agit maintenant de l'âge des étoiles que l'on voit à l'œil nu la nuit, alors elles ont au maximum quelques dizaines de millions d'années. Cela fait des âges très différents. Finalement, l'âge du ciel dépend de la profondeur avec laquelle notre regard le pénètre.

*Comment se représente-t-on le ciel, physiquement, quelle est sa taille ?*

La taille du ciel, c'est la taille de l'univers dans son ensemble. Sinon, encore une fois, on ne parle

que de l'atmosphère terrestre. Pour beaucoup de gens, cela reste finalement une conception médiévale : le ciel s'arrête à l'atmosphère et, au-delà, c'est un autre monde. Je crois que dans l'esprit de la plupart des gens règne encore cette conception pré-galiléenne où il y a deux mondes différents. L'astrophysicien, lui, envisage la taille de l'univers dans son ensemble ; il peut mesurer très précisément la taille de l'univers dit « observable », accessible à nos instruments. C'est un univers forcément limité par un horizon, de même que le navigateur, à cause de la courbure de la terre, ne voit pas la totalité de sa surface. Selon la théorie de la relativité générale, nous sommes dans un espace-temps courbé, donc on ne voit pas la totalité de l'espace-temps. Il existe un horizon dit « cosmologique ». Grâce à des mesures très précises, on peut mesurer la distance de cet horizon. Il est situé à 50 milliards d'années-lumière de nous. Nous sommes au

centre d'une sphère qui représente la limite de l'univers observable, dont le rayon est de 50 milliards d'années-lumière, et dont le diamètre est donc le double. On aurait tendance à penser que l'univers réel est plus grand que cet univers observé, notamment infini. Il existe cependant la possibilité qu'il soit fini, sans bords, et plus grand que l'univers observable. Les modèles d'univers chiffonnés que j'ai développés proposent un espace fini, plus petit que l'univers observable, lequel nous paraîtrait plus grand justement à cause des mirages topologiques et des illusions d'optique qui en résultent. Par exemple, le modèle du dodécaèdre sphérique chiffonné propose une taille très précise, que j'ai pu calculer et qui serait de 45 milliards d'années-lumière environ. Ce n'est pas beaucoup plus petit que l'univers observé, mais un peu plus petit quand même. Certains lecteurs attentifs pourraient être surpris : comment se fait-il que la taille de

l'univers observé soit de 50 milliards d'années-lumière alors qu'il n'existe que depuis 13,7 milliards d'années ? C'est qu'en général on oublie le facteur expansion. L'espace s'est étendu depuis le Big Bang. Le trajet effectif de la lumière en 13,7 milliards d'années est de 50 milliards d'années-lumière. C'est comme une fourmi qui se balade sur un ballon qu'on est en train de gonfler : la distance effective qu'elle parcourt est plus que le temps multiplié par la vitesse...

*Quelle est également la masse du ciel ?*

Une fois de plus, l'univers visible, qui est fini, a une masse finie. On estime son contenu entre 100 et 200 milliards de galaxies. Typiquement, une galaxie, c'est 200 milliards d'étoiles. En kilos ou en tonnes, cela donne des milliards de milliards, cela n'a pas grand sens. On peut le donner aussi non plus en termes de masse,

mais en termes du nombre total de particules élémentaires. Ça se calcule assez aisément, c'est de l'ordre de 10 puissance 80. C'est intéressant parce cela paraît petit, mais quand on connaît le système de puissances de 10, c'est un nombre faramineux. Pour ce qui est de la masse de l'univers réel, cela dépend des hypothèses sur sa taille : s'il est infini, il a une masse infinie, ce qui pose des problèmes, et s'il est fini, il faut en connaître le volume pour en estimer la masse totale. Dans nos modèles de Big Bang, toutefois, l'histoire entière de l'univers, son âge, son destin, le fait qu'il soit en expansion-contraction ou en expansion perpétuelle, etc., toutes ces propriétés ne dépendent pas de la masse totale, mais de la densité, autrement dit, de la masse par unité de volume. Le destin de l'univers dépend ainsi de la densité de l'univers par rapport à certaines valeurs théoriques. Aujourd'hui, la densité moyenne de l'univers

est de l'ordre de 10 puissance - 29 grammes par centimètre cube, ce qui représente une densité invraisemblablement faible selon nos standards à nous : à peine un atome d'hydrogène par mètre cube d'espace ! C'est infinitésimal. Pourtant, à l'échelle du cosmos, c'est en fait une densité très forte. Selon que la vraie densité se situe au-dessus ou au-dessous de cette valeur-là, l'univers connaît des destins différents : expansion/contraction, expansion perpétuelle décélérée ou accélérée, etc.

*Ensuite, pour poursuivre ce « portrait » du ciel, posons-nous la question de la température, par exemple ? Que sait-on de la température de l'univers ?*

En physique, les températures sont associées à des couleurs qui sont, par exemple, la couleur de la surface des étoiles. Quand vous voyez une étoile jaune, ce qui est le cas du soleil, cela

veut dire que la température est de l'ordre de 5500 degrés.

*À l'œil nu, toutes les étoiles ont des couleurs.*

Absolument. Quand vous voyez à l'œil nu une étoile rouge, c'est une étoile moins chaude en surface, qui est à 2000 ou 3000 degrés, par exemple. Quand vous voyez une étoile bleue, c'est une étoile jeune et chaude, qui est plutôt à 10000 degrés. Ce n'est que la température de surface, puisqu'évidemment on ne voit que la peau des étoiles. À mesure qu'on plonge dans le cœur des étoiles, la température monte. Il y a une température extraordinairement importante en astrophysique, qui est la valeur critique à partir de laquelle la matière dont sont constituées essentiellement les étoiles, c'est-à-dire l'hydrogène, rentre dans des réactions nucléaires de fusion. C'est ce qui fait briller les étoiles. 90 % des

étoiles qui brillent dans l'univers fonctionnent comme le soleil, et leur température au centre est de 15 millions de degrés: c'est la fournaise à laquelle les noyaux d'hydrogène fusionnent et produisent de l'énergie qui fait briller les étoiles.

*Cela explique aussi la lumière.*

La lumière vient effectivement de la centrale nucléaire qui est au centre de chaque étoile et qui traverse ensuite les couches du soleil, se refroidit et finit par quitter la surface pour nous parvenir. Ce qu'il peut être aussi intéressant de dire, c'est que dans les phases finales des étoiles, quand elles ont épuisé leur carburant et qu'elles commencent à entrer dans de grands bouleversements, les grosses étoiles explosent dans des phénomènes extrêmement violents, qu'on appelle des « supernovas ». Elles libèrent alors une énergie phénoménale. Les supernovas jouent un rôle capital

dans toute l'histoire de la matière dans l'univers, parce qu'elles fabriquent les éléments chimiques. Quand on dit que nous sommes des poussières d'étoiles, au-delà de la métaphore, c'est une réalité physique et chimique. À travers une série de réactions nucléaires à très haute température, ces grosses supernovas fabriquent en effet tous les atomes qui existent dans l'univers. Le cœur de ces étoiles, lui, dans les phases explosives, est porté à plusieurs millions de degrés. Ce sont les températures extrêmes vers le haut. Il y a aussi des températures extrêmes vers le bas, vers le froid. Vous savez qu'il existe une échelle de température dite absolue, qui définit un zéro absolu. Converti en degrés Celsius, cela donne -273 degrés. Par définition et par construction, le zéro absolu est inatteignable. Mais on peut s'en approcher de très près. Par exemple, au labo, on a fait des systèmes de refroidissement qui s'approchent à seulement un milliardième de degré du zéro

absolu. Dans l'univers d'aujourd'hui, la température moyenne entre les étoiles est de 3 degrés au-dessus du zéro absolu, donc -270 degrés Celsius. L'univers d'aujourd'hui est donc froid. Tout à l'heure, je parlais du rayonnement fossile. Le rayonnement fossile est capté aujourd'hui dans cette gamme de températures. Pour arriver à mesurer une température aussi basse, il faut un détecteur qui soit encore plus froid que le froid que l'on mesure. Donc on-refroidit les détecteurs à des températures encore inférieures, pour qu'ils soient capables de mesurer une radiation plus chaude qu'eux. C'est comme cela qu'on mesure la température de fond du ciel et qu'on analyse le rayonnement fossile. Ce rayonnement que l'on observe et mesure aujourd'hui à -270 degrés, a été engendré par l'univers il y a 13,7 milliards d'années; or à ce moment-là, il était beaucoup plus chaud: il était à 3000 degrés. C'est uniquement le temps écoulé qui, ajouté à



l'expansion de l'espace, a baissé la température moyenne. C'est comme si vous allumiez un feu de cheminée dans une pièce et que vous reveniez à la fin de la journée : le feu est éteint, la température globale a baissé mais il reste un bain thermique dans la pièce.

L'histoire de l'univers, c'est l'histoire d'une grande dilution et d'un refroidissement, à partir du Big Bang jusqu'à aujourd'hui. Si on remonte au contraire vers le passé de l'univers, on a des températures qui augmentent. Les modèles de Big Bang prédisent que l'univers très jeune a été en moyenne beaucoup plus chaud qu'aujourd'hui. À l'époque où l'univers a émis sa première lumière, que l'on détecte aujourd'hui sous la forme du rayonnement fossile, il était partout à 3 000 degrés. Il n'y avait pas encore d'étoiles, pas de planètes, pas de galaxies. Il n'y avait qu'une sorte de plasma très chaud. L'univers était constitué d'un gaz en expansion.

Grâce aux modèles de la physique nucléaire, on sait que les atomes les plus abondants dans l'univers, qui sont l'hydrogène et l'hélium et dont sont essentiellement constituées les étoiles, ont été fabriqués lorsque l'univers avait une température moyenne de 10 milliards de degrés. Trois minutes après le Big Bang, l'univers s'est précisément refroidi à dix milliards de degrés et a commencé à produire ces éléments-là.

On peut se demander jusqu'où peut monter la température moyenne de l'univers. Théoriquement, si on suit juste les équations d'Einstein, elle tend vers l'infini en s'approchant du Big Bang. C'est un problème de la théorie, car aucune valeur physique ne peut réellement tendre vers l'infini. Cela implique qu'il faut améliorer notre théorie du Big Bang, mais elle fonctionne bien au moins jusqu'à une valeur d'un million de milliards de degrés. On a testé ces températures et ces énergies dans les accélérateurs de particules,

et on a pu ainsi reconstituer un état que l'univers a connu au bout d'un dix milliardième de seconde. Vous voyez donc que le réchauffement climatique, il est passé depuis longtemps !

*Et la couleur du ciel nocturne ? Ce noir qui existe entre les étoiles : qu'est-ce que c'est ? De quoi est-il fait ?*

À travers l'imagerie astronomique, ce qui est frappant, c'est que la plupart des photographies du ciel montrent des points brillants – les étoiles – et du noir entre ces points brillants. On voit cela lorsque le temps de pose n'est pas suffisamment long pour faire apparaître la lumière qu'il y a en fait dans le noir. Car le noir entre les étoiles n'est pas vide. Les étoiles baignent dans du gaz, qu'on appelle le milieu interstellaire, constitué d'hydrogène et de quelques autres éléments très ténus, lesquels émettent du rayonnement

si faible que l'œil humain ne peut pas le percevoir. Même le télescope à court temps de pose ne le perçoit pas. Il faut la plaque photo, qui va se laisser impressionner (au propre comme au figuré) pendant au moins une demi-heure, voire des heures. Quand on examine ensuite les clichés obtenus, on voit que les étoiles ne sont plus dans le noir mais dans un milieu incroyablement riche – le milieu interstellaire –, constitué de vastes masses gazeuses et de nébuleuses de toutes les couleurs, ressemblant à des nuages qui s'agitent en une lente turbulence.

*Donc le noir n'est noir que parce qu'on ne voit pas sa lumière ?*

Oui. Cela dit, ce noir dont on vient de parler reste de la matière « visible », puisqu'on finit par la détecter avec les instruments appropriés. Or j'ai dit tout à l'heure que toute la matière visible de

l'univers représente moins de 1 % du total. Le reste est donc de la « vraie » matière noire qui n'émet aucun rayonnement électromagnétique, quels que soient nos instruments. C'est 99,5 % de notre univers.

*Que sont ces 99,5 % ? De l'énergie quand même ? Arrive-t-on à identifier de quoi cette matière est faite ?*

On peut penser logiquement que nombre d'astres sont obscurs parce qu'ils n'émettent pas d'énergie : les trous noirs, bien entendu, les étoiles mortes, les étoiles trop petites pour allumer des réactions nucléaires, les planètes, les grands nuages d'hydrogène froid, etc., tout cela ne brille pas. Comme nous, et comme les étoiles qui brillent, cette matière noire serait constituée d'atomes, et il y en a dix fois plus que la matière visible. C'est très largement insuffisant pour expliquer

les caractéristiques de l'univers. Il existe d'autres formes de matière qui ne sont plus constituées d'atomes comme nous. Ce sont des particules élémentaires, essentiellement produites peu après le Big Bang par des processus de haute énergie. On appelle cela la « matière exotique ». On pense que le quart de l'univers est formé de ce type de matière. Il reste encore les trois quarts à expliquer. C'est sans doute la question la plus fascinante de la cosmologie d'aujourd'hui. Il ne s'agit plus de matière au sens usuel du terme, puisqu'on en a épuisé toutes les formes possibles – atomique ou non atomique. Le seul candidat qui reste est de l'énergie diffuse, à l'état pur, que l'on appelle énergie sombre, *dark energy*. Celle-ci joue un rôle dominant dans le destin de l'univers, parce que c'est elle qui accélère son expansion. En effet, je parlais plus haut des modèles de Big Bang avec l'alternative expansion/contraction ou expansion perpétuelle : les mesures actuelles suggèrent que

nous serions plutôt dans un univers en expansion perpétuelle, et dont la vitesse d'expansion s'accélère. Pour expliquer cette accélération, il faut que l'univers soit rempli d'une forme d'énergie qui agisse « contre » la gravitation. La gravitation, toujours attractive, a tendance à freiner l'expansion. L'énergie noire serait au contraire répulsive, antigravitante, et expliquerait l'accélération de l'expansion. Reste maintenant à en faire une bonne modélisation théorique : d'où vient-elle ? Le problème n'est pas encore résolu, de nombreux modèles s'affrontent, cela fait partie des enjeux intéressants de la cosmologie. L'une des propositions les plus séduisantes est que l'énergie sombre soit l'énergie du vide...

*C'est un peu angoissant.*

Peut-être parce que l'idée qu'on se fait ordinairement du vide, c'est le néant. Or, le vide

dont je parle est celui de la physique quantique. C'est, au contraire, un vide riche de toutes les potentialités. C'est vrai que le vide, c'est l'absence : vous prenez une boîte et vous enlevez tout, la matière, les atomes, les rayonnements, les champs de forces. Il ne reste que le vide, mais un vide quantique qui a de l'énergie irréductible. Par le principe d'incertitude de la physique quantique, on ne peut pas réduire l'énergie à zéro. Il reste un niveau minimum, l'énergie du vide, dont l'existence a été mise en évidence en laboratoire. En outre, les calculs montrent que cette énergie a les propriétés répulsives requises. Il est donc tentant de dire que l'énergie sombre cosmique est une manifestation de l'énergie du vide quantique, qui prédomine sur tout. Un joli retour inattendu à certaines cosmogonies antiques ou orientales, qui font tout naître du vide et dans lesquelles le vide gouverne toute chose !

*C'est un vide positif, non dépressif. Peut-on parler des trous noirs, à présent ? Est-ce qu'on peut les représenter comme des espèces de pièges, des trappes au sein desquelles l'espace-temps est modifié ? Le trou d'Alice au pays des merveilles...*

On se souvient que l'espace-temps est fortement courbé par une masse très importante ou par une très grande concentration de matière. Dans certaines conditions, des régions de l'espace-temps sont tellement courbées qu'elles se déconnectent du reste. Elles définissent un puits de gravitation tel que, si vous en franchissez le bord, vous tombez dedans et vous ne pouvez plus ressortir. C'est cela, le trou noir.

*Ça forme comme des espèces de tuyaux concaves ?*

Grande question : quelle est la forme de l'espace-temps au fond d'un trou noir ? Est-ce que le trou

noir forme un puits avec un fond bouché, une sorte de nœud qui bloquerait l'espace-temps, et tout s'écraserait indéfiniment dans ce nœud ? C'est une possibilité théorique. Le problème, c'est qu'on ne peut pas aller voir : il n'y a que la théorie qui nous permet de nous y projeter. Une autre solution, qui aboutit à l'un des concepts les plus fascinants de la science moderne, fait l'hypothèse que le fond des trous noirs ne soit pas bouché, mais soit une connexion avec d'autres régions de l'univers. On a appelé ces connexions des « trous de ver » car elles évoquent des sortes de tunnels, des galeries creusées par des vers qui entrent d'un côté de la pomme et ressortent de l'autre. Les trous de ver seraient des distorsions extrêmes de l'espace-temps qui connecteraient des régions très différentes et lointaines de l'univers ; d'un côté, on aurait un trou noir, de l'autre, un symétrique temporel, c'est-à-dire une fontaine blanche, lieu d'où jaillirait

spontanément l'énergie, les deux étant reliés par un trou de ver.

*C'est la théorie qui permet de modéliser ça ? On ne peut pas les observer ?*

Non, les trous de ver sont cachés au fond des trous noirs. Pour prouver leur existence, il aurait fallu qu'on trouve dans l'univers des fontaines blanches, mais cela n'a pas été le cas. Cela ne veut pas dire nécessairement qu'ils n'existent pas, mais, pour l'instant, on est dans l'expectative. Cela reste un modèle théorique, qui a fasciné non seulement les physiciens mais aussi les écrivains de science-fiction. Quand on voit des films de science-fiction parlant de « porte des étoiles », ce ne sont que des transpositions de cette idée de trou de ver, qui permettraient en plus d'offrir des raccourcis pour voyager. Par les

calculs de relativité générale, on montre en effet qu'emprunter un trou de ver, si tant est que cela existe et qu'on puisse le franchir sans se faire écrabouiller, raccourcirait considérablement les voyages dans l'espace et le temps. De façon plus pragmatique, les astronomes s'interrogent sur la détectabilité des trous noirs. À quoi pourrait ressembler un trou noir si l'on pouvait s'approcher suffisamment près ? On ne voit pas le trou noir nu, mais dès qu'il est entouré d'une structure lumineuse, il la fait briller d'une certaine façon. J'ai calculé il y a longtemps comment on verrait des anneaux circulaires gazeux entourant un trou noir. Sur l'image obtenue par ordinateur, on ne reconnaît ni des cercles ni des ellipses, à cause de la forme courbe de l'espace qui dévie les trajets des rayons lumineux et donne ces illusions d'optique étranges, créées par le trou noir.

*Aujourd'hui, il y a cette histoire de pollution atmosphérique, l'idée qu'on s'éloigne de la voûte céleste, qu'on ne voit plus les étoiles.*

Oui, on perd le contact, on perd ce que j'appelle « le sentiment cosmique ». Aujourd'hui encore, quand on va en mer, en montagne ou dans le désert, on voit au-dessus de nous la voûte céleste et l'arche de la Voie lactée. Il n'y a pas plus de 3 000 étoiles visibles à l'œil nu, mais on a l'impression d'un fourmillement presque infini. C'est une impression très puissante. Or les citadins sont en train de perdre ce sentiment. Si on ne sort pas des villes, on ne voit plus rien du ciel. C'est une perte très profonde, y compris au sens psychanalytique du terme.

*Pour la façon dont on se représente notre position dans l'univers, le lien que l'homme établit avec l'histoire de l'humanité ?*

pas les moyens des professionnels ! Alors ils font des tas de pétitions, ils tentent de convaincre les municipalités de modifier les éclairages des villes qui éclairent inutilement le ciel. Ça commence à prendre un petit peu, d'autant qu'on prend conscience des économies d'énergie que l'on peut faire. Le meilleur exemple actuel est une « réserve de ciel étoilé » située au Canada, sur une zone assez grande. Toutes les municipalités, villes et communes de la région ont décidé de modifier complètement leurs systèmes d'éclairage. On retrouve alors un peu le ciel des temps passés. Les astronomes amateurs sont ravis, mais aussi les gens de tous les jours. Ils sortent de chez eux la nuit, regardent le ciel et se disent : « Bon sang de bonsoir, c'est vraiment beau le ciel, finalement. »

*Dès qu'on quitte Paris, les villes, on reconnecte avec tout ça.*

La pollution lumineuse est un problème essentiel. Les astronomes professionnels s'en sont accommodés parce que progressivement, ils ont éloigné leurs observatoires des sources d'éclairages. D'ailleurs, si nous sommes ici, à Meudon, c'est parce que l'éclairage au gaz, qui a commencé dans les années 1850 à Paris, a invalidé l'observatoire fondé par Colbert en pleine ville. À l'époque, Meudon, c'était encore la campagne, on y a donc déplacé les télescopes. Ça a fonctionné jusque dans les années 1910-1920. Ensuite, Paris s'est étendu, et les observatoires français se sont décalés. Ils se sont établis dans le Sud, à Saint-Michel-de-Provence et au pic du Midi. Ces observatoires ont à leur tour été pollués par les lumières des villes lointaines. Aujourd'hui, les grands observatoires sont au Chili, aux îles Hawaï et dans des lieux où il y a aucun éclairage. Les millions d'astronomes amateurs, eux, sont considérablement gênés par la pollution lumineuse, car ils n'ont

Pensons juste à la Voie lactée : aujourd'hui, il faut vraiment aller très loin d'une zone habitée pour la voir, alors qu'elle est omniprésente dans le ciel. Mais si vous passez une nuit dans le désert, vous voyez une arche lumineuse incroyable, qui fait le tour du ciel. C'est fabuleux. Je suis sûr que 80 % des gens ne l'ont jamais vue. Un enfant de dix ans ne sait même pas ce que c'est. En plus, quand vous contemplez cette arche de lumière avec un peu de culture astronomique, vous savez qu'elle est la roue de notre immense galaxie, vue par la tranche... C'est une émotion très puissante. Il faut voir la beauté de ce spectacle et comprendre pourquoi il est beau. Savoir que nous pouvons voir la roue de la galaxie dans laquelle nous sommes et dans laquelle nous tournons est un sentiment cosmique extrêmement fort.