

Jeudi 25 novembre

« *Ombre et lumière, de l'astrophysique à la philosophie* »

par Jean-Pierre Luminet,
astrophysicien, directeur de recherche au CNRS

Je me réjouis d'être revenu, ne serait-ce que brièvement, tout près de mon pays natal pour vous parler d'un sujet qui m'a toujours remué, c'est-à-dire le rapport entre la lumière et l'ombre. J'ai été très sensible à la description littéraire faite par cette jeune aveugle du XIX^e siècle, une description extrêmement tactile d'un ciel bleu ou noir qu'elle n'a jamais vu. Pour moi il s'agit là d'une sorte de cécité voyante parce que l'œil humain doué de la vue, lorsqu'il regarde le ciel nocturne, voit essentiellement du noir parsemé çà et là des quelques petites taches lumineuses que sont les étoiles.

Le fond de ciel que vous voyez sur ce premier cliché ne peut pas être perçu par l'œil humain. Seuls en sont capables les très grands télescopes d'aujourd'hui qui ont la capacité de sonder les immensités cosmiques. Vous voyez quelques étoiles brillantes, mais surtout les milliers de petits points qui sont des objets extraordinairement lointains, en l'occurrence des galaxies à part entière, chacune contenant des centaines de milliards d'étoiles et que l'œil humain ne peut pas distinguer. Cette toile de fond ressemble bien, finalement, à ce tissu d'espace pailleté de taches de lumière qui était si bien décrit par cette jeune aveugle. Nous ressentons quasiment une impression tactile, comme s'il s'agissait d'une tapisserie que l'on a envie de toucher avec les doigts.

Cette image me renvoie aussi à ma propre expérience de jeunesse. Je suis né à vingt kilomètres de là, à Cavaillon. Très jeune, dans mon jardin, j'observais le ciel, à une époque où justement l'éclairage urbain permettait encore de le faire. Ce n'était pas un ciel aussi lointain que celui capté dans cette image télescopique, puisque l'œil humain ne peut percevoir au mieux que quelques milliers d'étoiles, et non pas des centaines de milliers comme dans le cliché que je vous montre. Mais je me souviens que ce qui m'intéressait déjà, en dehors de la beauté évidente du paysage cosmique avec ses bijoux de lumière, ce qui m'intriguait, c'était ce qu'il y a entre les étoiles ; ce n'était pas la partie lumineuse de l'univers, mais sa partie obscure. En fait, la question qui m'agitait, c'était l'espace, le noir qu'il y a entre les étoiles. Qu'est-ce que c'est ? Alors j'ai fait mienne, depuis, cette magnifique citation d'Héraclite, philosophe du VI^e siècle avant J.-C. selon lequel la nature aime se cacher et la beauté de l'invisible est plus belle que la beauté du visible. C'est en partie le but, aujourd'hui, du physicien théoricien, de l'astrophysicien et du cosmologiste que je suis devenu, que de répondre à ces interrogations de mon jeune âge sur les rapports entre l'ombre et la lumière. C'est la raison pour laquelle, trente ans après ces expériences, je travaille dans un observatoire, celui de Paris-Meudon, et dans un laboratoire au nom assez significatif, le Laboratoire Univers et Théories ; car, vous le verrez, au-delà des télescopes qui ne captent que quelques épingles de lumière dans un univers beaucoup plus vaste et essentiellement obscur, c'est la pensée pure et la physique fondamentale qui permettent de percevoir ce qu'il y a au-delà de la lumière. Univers et Théories, dont le joli acronyme donne le mot LUTH. Ce n'est pas un hasard. Nous travaillons, d'une certaine façon, à décoder la partition de lumière de l'univers qui nous raconte, justement, ce qu'il y a au-delà de la lumière. D'autre part, moi qui me suis toujours élevé contre les clivages entre la science, les arts et la littérature, j'ai cette fascination pour l'ombre et la lumière. Je l'ai transcrite à différentes étapes de mon parcours et notamment dans quelques-unes de mes réalisations graphiques. L'une d'entre elles, d'une lithographie datant de 1992, s'appelait déjà « Ombre et lumière ». Cette problématique *ombre et lumière* que je pratique constamment dans mon métier, je l'ai aussi exprimée – pardonnez-moi de faire une auto-citation – dans mon dernier recueil de poésie, « Itinéraire céleste », où j'écris, entre autres : « Le firmament, ce fluide où baignent les

étoiles, nous paraît sombre et sa lumière est trop subtile pour nos yeux. » Si je vous cite mon propre recueil, ce n'est pas par coquetterie d'auteur, mais parce que c'est exactement le sujet d'aujourd'hui.

Dans ma carrière d'astrophysicien, j'ai essentiellement travaillé sur le noir, et j'ai en particulier cherché à savoir comment le noir de l'univers nous révèle sa nature extrêmement profonde. Aujourd'hui, l'essentiel de notre compréhension de l'univers repose non plus sur la lumière, contrairement à ce que l'on pourrait penser, mais sur ce qu'il y a au-delà de la lumière. C'est l'une des raisons pour lesquelles j'ai commencé à travailler, professionnellement, sur les objets qui sont par définition invisibles : les parangons de la noirceur que sont les trous noirs. J'ai d'ailleurs une petite anecdote à ce propos. Je m'appelle Luminet, un rapport évident avec le sujet. Parmi mes premières publications scientifiques qui m'ont fait connaître dans la communauté internationale, j'ai écrit un article très technique qui, grâce à des calculs d'ordinateur, essayait de visualiser l'invisualisable, à savoir le fameux trou noir. Il s'agissait en fait de calculer comment le noir du trou faisait briller son environnement, essentiellement du gaz qui se trouve autour. L'anecdote amusante est la suivante. A l'époque, j'étais un tout jeune chercheur et, hormis mes collègues de laboratoire, personne ne me connaissait dans la communauté internationale. Cet article portait un titre anglais compliqué voulant dire, grosso modo, « visualisation du disque de gaz lumineux autour d'un trou noir », et signé par Luminet. Hé bien, comme je l'ai appris plus tard, nombre de mes futurs collègues ont pensé que le nom d'auteur était un pseudonyme ! Signer Luminet pour montrer pour la première fois un trou noir paraissait être un bon jeu de mots. Mais ce n'en était pas un, et je suis très fier du nom que je porte, qui renvoie à l'idée de lumière !

Qu'est-ce-que c'est que la lumière ? Ce sujet a été débattu, à la fois scientifiquement et philosophiquement, depuis trois millénaires, puisque déjà, à l'époque des Grecs, existaient des théories sur la lumière. J'ai toujours aimé cette idée que quelques-uns des philosophes grecs les plus importants, comme Platon, imaginaient que la lumière n'était pas un phénomène physique en soi, mais une émanation de notre regard. Platon imaginait que notre œil projetait les rayons lumineux qui permettaient d'éclairer les objets. Cette idée est extrêmement poétique mais elle ne marche pas du tout ! Comment expliquer les ombres par exemple ?

Toujours est-il que la conception de Platon s'est imposée. Pourtant, d'autres philosophes importants de l'Antiquité, notamment les fameux atomistes Démocrite et Épicure, avaient eux compris que la lumière était un phénomène indépendant de l'œil, et qu'elle était probablement composée de petits grains, qu'ils ont appelé atomes, qui se propageaient dans l'espace et qui, en pénétrant dans notre œil (on ne connaissait pas encore la rétine) créait une sorte de simulacre en modèle réduit de l'objet émettant ces rayons lumineux. Les contradicteurs de cette théorie disaient simplement : mais comment voulez vous qu'un objet aussi gros qu'une montagne puisse rentrer dans l'œil sous forme de simulacre ? Il a fallu attendre le XI^e siècle après J.-C., c'est à dire 1 500 ans, pour qu'un grand savant arabe nommé Ibn al-Haytham (965-1039), plus connu en Occident sous le nom de Alhazen, revienne à la conception des atomistes en remarquant tout simplement que nous avons des impressions rétinienne : si nous fixons fortement une lumière pendant quelques secondes, quand on ferme les yeux, cette image reste inscrite quelques instants dans le cerveau. Ceci prouvait que ce n'est pas le regard qui émet la lumière, mais que celle-ci était bien un phénomène produit à l'extérieur, qui pénétrait notre œil et laissait une rémanence des images. Voilà le début de l'aventure scientifique sur la compréhension de la lumière.

C'est une longue histoire que je ne vais pas vous raconter en entier, simplement deux épisodes majeurs dans notre compréhension de la lumière.

Le premier, c'est la découverte, par Isaac Newton à la fin du XVII^e siècle, que la lumière ordinaire, c'est-à-dire de la lumière dite blanche — celle par exemple qui est émise par le soleil — est en fait une superposition de couleurs. Pour s'en rendre compte, Newton a utilisé un prisme pour obtenir, pour la première fois de l'histoire, ce que l'on appelle un spectre. Le spectre, c'est donc l'étalement de la lumière sous ses différentes longueurs d'onde. A l'époque de Newton, on ignorait encore la notion de longueur d'onde. Newton a simplement mis en évidence que les fameuses couleurs de l'arc-en-ciel, de l'indigo jusqu'au rouge, ne sont en fait que les couleurs de la lumière

blanche étalées par le spectre. Et pour bien montrer qu'il ne s'agissait pas d'un artifice dû au prisme interposé, il a utilisé un deuxième prisme pour faire reconverger les rayons de différentes couleurs et il a obtenu, à nouveau, la lumière blanche. Ceci a été une première étape capitale pour comprendre que la lumière blanche contient en elle-même la superposition des couleurs, ce que les peintres savent, puisque vous savez que si on mêle les couleurs, on obtient du blanc.

Une deuxième étape fondamentale dans la compréhension de la lumière, un peu plus technique cette fois mais il faut en parler car le monde moderne repose entièrement dessus – c'est la théorie électromagnétique. C'est le savant écossais James Clerk Maxwell qui, en 1873, a compris que la lumière visible n'est qu'une infime partie d'un phénomène physique beaucoup plus général, le rayonnement électromagnétique. Il s'agit de la propagation et de la vibration d'un corpuscule de lumière appelé photon. Cette vibration est caractérisée par une fréquence ou par une longueur d'onde. Maxwell a découvert que le rayonnement électromagnétique se décline sous toutes les longueurs d'onde possibles et imaginables, et ce que nous appelons la lumière visible n'est que la toute petite fraction du rayonnement électromagnétique à laquelle notre œil est sensible. Notre rétine ne capte qu'un infime intervalle de longueurs d'onde. La plaque photographique a d'ailleurs à peu près la même sensibilité que l'œil. Par là même, Maxwell a mis en évidence, pour la première fois, des formes de lumière invisibles à nos yeux.

L'une des tâches des astronomes du XX^e siècle a consisté à fabriquer des instruments capables de détecter les lumières invisibles, car celles-ci sont produites à profusion par tous les astres du ciel, à commencer par le soleil. Dans le domaine des très grandes longueurs d'onde, la lumière correspond aux ondes radio. Quand vous descendez en longueur d'onde, vous obtenez les micro-ondes. Les ondes radio servent évidemment à la transmission de la radio et de la télévision, tandis que les micro-ondes sont effectivement le type de rayonnement qui est utilisé pour la cuisson rapide des aliments dans les fours du même nom.

Lorsqu'on raccourcit encore les longueurs d'onde, mais toujours en restant dans le domaine de l'invisible, nous arrivons à l'infrarouge. Notre œil ne le perçoit pas, mais notre peau peut le ressentir. C'est le rayonnement dit thermique : vous allumez un poêle, vous sentez sur votre peau une sorte de chaleur parce que vous recevez des photons infrarouges que votre œil ne peut voir, mais vous avez des capteurs d'infrarouge dans votre peau. C'est une des raisons pour laquelle les militaires, par exemple, ont développé des détecteurs à infrarouge qui permettent de voir, la nuit, des êtres vivants ; par exemple, la température interne du corps humain, 37° C, se voit bien en infrarouge la nuit.

Vous arrivez ensuite à la fenêtre du visible. C'est une fente extrêmement étroite dans le spectre infini des longueurs d'onde. Pour mémoire, les longueurs d'onde du visible se situent entre 0,4 et 0,8 microns. Le micron étant le millième de millimètre, c'est bien un intervalle très mince, qui lui-même se décompose en les couleurs de l'arc-en-ciel.

Sortons à nouveau de la lumière visible pour entrer dans l'ultraviolet. C'est une lumière de plus courte longueur d'onde et de plus haute fréquence, qui transporte donc plus d'énergie. Elle commence à devenir pénétrante et, de ce fait, dangereuse. Le rayonnement ultraviolet est responsable du bronzage mais, comme vous le savez, il peut provoquer des cancers de la peau. Les rayonnements encore plus pénétrants et énergétiques sont appelés les rayons X. Ils sont notamment utilisés dans l'imagerie médicale pour faire des radiographies puisqu'ils pénètrent les chairs pour donner des images des os. Enfin, les rayons les plus pénétrants de tous sont les rayons gamma. Ils sont associés aux phénomènes les plus énergétiques de l'univers, par exemple les explosions d'étoiles. On les produit aussi à l'échelle humaine dans les bombes atomiques et les centrales nucléaires. Dans un registre plus pacifique, on l'utilise aussi en chirurgie comme une sorte de scalpel ultra-précis pour détruire une à une les cellules cancéreuses.

Vous constatez donc cet éventail extraordinaire de toutes les lumières dont notre œil, finalement, ne perçoit qu'une fente bien étroite. Aujourd'hui, les techniques de l'astronomie ont permis d'ouvrir la totalité des fenêtres sur l'univers en exploitant l'ensemble du spectre électromagnétique. C'est comme si pendant des siècles nous avions vécu dans une pièce circulaire entièrement fermée par des

volets à l'exception d'une étroite fente, celle de la lumière visible, à travers laquelle nous n'aurions vu qu'une infime partie du paysage cosmique ; aujourd'hui, grâce à des détecteurs adaptés, tous les volets sont ouverts et l'on observe le paysage sous toutes ses longueurs d'onde, toutes ses facettes. On y découvre un univers beaucoup plus riche et intéressant que ce que distinguait notre œil, même équipé d'un télescope optique.

Un deuxième élément d'importance pour les astronomes est que, même si les astres émettent généralement des rayonnements sous toutes les longueurs d'onde, la plupart de ces rayonnements ne parviennent pas au sol —heureusement d'ailleurs, sinon nous ne serions pas là pour en parler parce qu'il n'y aurait pas de vie sur terre. Comme l'illustre le schéma que je vous montre, vous avez en bas le niveau de la mer, ensuite on monte en altitude et on rencontre les couches supérieures de l'atmosphère. Vous constatez que les seules bandes de rayonnement qui parviennent au sol sont le rayonnement radio, une petite partie des micro-ondes, et évidemment la lumière visible. Tous les autres rayonnements sont essentiellement arrêtés par les couches de l'atmosphère, à des altitudes plus ou moins élevées. C'est la raison pour laquelle, pour capter ces rayonnements venus des astres lointains, il a fallu attendre le développement de l'ère spatiale dans les années 1970 pour pouvoir embarquer des détecteurs au-dessus de l'atmosphère terrestre et obtenir enfin des visions de l'univers dans l'ultraviolet, l'infrarouge, les rayons X et gamma. Auparavant, on ne soupçonnait pas que l'univers puisse contenir des astres aussi énergétiques, capables de produire de telles quantités de rayons X et de rayons gamma.

Pour vous montrer de façon plus palpable le changement de vue que l'on a d'un objet céleste donné quand on l'observe sous différentes longueurs d'onde, voici l'astre qui nous est le plus familier, le soleil. En lumière visible, il prend l'aspect d'une boule de couleur jaune, parce que la surface du soleil est à 6 000 degrés, et il y a une correspondance entre les températures et les couleurs. Je ne parle pas bien entendu des couleurs que l'on utilise pour peindre les murs, je parle des couleurs des étoiles. Donc, le jaune, c'est 6 000 °, le bleu, c'est 10 000 °, le rouge c'est 2 000 °. Si maintenant vous observez le soleil avec un radiotélescope, c'est-à-dire en ondes radio, vous constatez que son « image » (reconstituée en fausses couleurs pour être visualisée) n'est même plus sphérique. Cela veut dire que vous « voyez » d'autres régions du soleil qui émettent préférentiellement leur lumière dans le domaine radio. Si vous observez le soleil dans l'ultraviolet, vous découvrez encore un soleil différent, avec notamment un grand trou appelé trou coronal, qui s'explique par des mécanismes complexes de la physique solaire. Vu dans un télescope à rayons X, le soleil est à nouveau différent et ne montre que ses régions émissives en rayons X, qui sont en fait les taches solaires et les zones où se déploient des éruptions gigantesques de plasma à très haute température. Vous voyez que pour apprécier toutes ces images complémentaires du soleil, qui nous apprennent différentes facettes de son fonctionnement, il suffisait simplement de chausser les lunettes adéquates.

Je vais maintenant vous parler des origines de la lumière. L'origine de la lumière du jour vient du soleil. A priori, on peut croire qu'elle vient de la surface du soleil, mais en fait cette lumière est engendrée au centre du soleil. Le soleil étant une étoile – et c'est la définition même d'une étoile – il engendre sa propre lumière — contrairement aux planètes ou à la lune, qui ne font que réfléchir la lumière qui émane du soleil. En son centre, la température est tellement élevée qu'elle permet la génération de lumière par des réactions thermonucléaires. Le soleil, comme toutes les étoiles, est essentiellement composé d'un carburant qui est de l'hydrogène, et l'on sait depuis les années 1930 qu'à une température de 15 millions de degrés, la température qui règne au centre du soleil, les noyaux d'hydrogène fusionnent quatre par quatre pour produire un autre élément nommé hélium, la réaction libérant une énergie phénoménale. C'est cette énergie nucléaire qui engendre la lumière du soleil. A 15 millions de degrés, la lumière originelle du soleil est du rayonnement gamma pur, une sorte de bombe atomique auto-contrôlée. Mais le soleil a une vaste atmosphère, moins chaude que le cœur, si bien que la lumière du centre doit traverser les 700 000 km de couches du soleil avant de parvenir en surface. Vous savez que la lumière circule à 300 000 kilomètres par seconde dans le

vide, mais dans le soleil ne règne pas le vide : il y a un gaz de particules électrisées qui dévient constamment le trajet de la lumière. Le petit photon, le grain de lumière émis à 15 millions de degré au centre du soleil, va avoir une sorte de parcours en zig-zag, constamment dévié de son chemin par les interactions avec des particules du soleil. De ce fait, le photon met en moyenne dix millions d'années pour arriver à la surface, et non pas deux secondes et quelques! Cela change quelque peu la perspective que l'on a sur le soleil. Dites-vous bien que la lumière que vous voyez du soleil, c'est la lumière de sa peau seulement. Arrivée à ce niveau, elle a perdu l'essentiel de son énergie d'origine. Elle n'est plus qu'à 6 000 °, et c'est pour cette raison que le soleil nous paraît jaune. C'est une lumière dégradée qui a perdu l'information sur ses conditions initiales.

Le soleil est opaque à la lumière, et ce ne sont que les théories de la physique nucléaire qui ont permis de comprendre, dans les années 1930, la véritable origine de sa lumière. Aujourd'hui on dispose d'instruments tout à fait extraordinaires qui permettent de voir directement le cœur du soleil : ce sont des télescopes très particuliers qui ne détectent pas le rayonnement électromagnétique, mais des particules élémentaires appelées neutrinos. Les neutrinos sont émis à profusion par les réactions thermonucléaires au centre des étoiles, et évacuent à peu près la même quantité d'énergie que les photons, à la différence près qu'ils sont « aveugles » à la matière. Les neutrinos émis au centre traversent donc les couches gazeuses du soleil comme si c'était le vide, en deux secondes environ, alors que la lumière met dix millions d'années. Parvenus à la surface du soleil, il reste encore 150 millions de kilomètres de vide interplanétaire à parcourir pour parvenir à la terre, ce qui se fait en environ huit minutes, aussi bien pour les photons que pour les neutrinos.

Ainsi, quand on observe le soleil sous sa forme lumineuse, on voit en fait un rayonnement électromagnétique en décalage de dix millions d'années, dont on a perdu les conditions initiales ; mais si on braque un détecteur de neutrinos, on voit quasiment le soleil en direct. Si un méchant démon s'amuse à éteindre subitement le cœur du soleil, il faudrait dix millions d'années pour s'apercevoir d'une baisse de la lumière, mais un physicien des particules travaillant avec un détecteur de neutrinos vous dirait au bout de quelques minutes : « Tiens, le soleil vient de s'éteindre. Il ne vous reste que dix millions d'années ! »

Les magnifiques paysages de lumière que nous propose l'astronomie et que vous avez tous, un jour ou l'autre, admirés dans un atlas, sont des images recueillies par des très grands télescopes, qui non seulement collectent les faibles lumières des astres lointains, mais qui permettent en outre des temps de pose extrêmement longs, ce que notre œil est incapable de faire. L'œil est un récepteur exceptionnel, mais la persistance rétinienne est brève, de l'ordre du dixième de seconde, de sorte qu'il faut beaucoup de photons pour que l'impression lumineuse marque notre rétine. C'est la raison pour laquelle, lorsque l'on regarde un ciel nocturne, on ne voit que les petits points des étoiles. Si on augmente le temps de pose grâce à la photographie, on commence à voir apparaître des nébulosités gazeuses autour des étoiles et puis, comme vous le verrez dans les images suivantes, en augmentant encore le temps de pose, on voit la lumière émerger progressivement de ce qui nous paraissait noir, c'est-à-dire du gaz extrêmement ténu qui emplit l'espace interstellaire.

Dans les beaux clichés astronomiques que je vous montre maintenant, on voit les couleurs des étoiles, liées comme je l'ai dit à la température qui règne à leur surface. Les étoiles bleues sont jeunes et chaudes, environ 10 000 degrés. Les étoiles jaunes sont, disons, adultes, comme le soleil, et rayonnent à environ 6000°. Les étoiles rouges ou orangées sont plus froides, à 2000°. Ce sont soit de toutes petites étoiles, soit des étoiles âgées qui, au cours de leur histoire, se sont dilatées en se refroidissant. Ainsi, rien qu'à travers l'observation des couleurs naturelles des étoiles, nous avons déjà des idées sur leur nature physique et leur degré d'évolution.

Avec un temps de pose suffisamment long, on voit émerger la lumière et les couleurs du milieu interstellaire ; celui-ci est composé de gaz, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, accompagné de quelques autres éléments sous forme de molécules, grains, etc. Ces magnifiques paysages cosmiques avec leur prodigieuse palette de couleurs nous renseignent à la fois sur la température du milieu interstellaire et sur sa composition chimique ; en effet, selon qu'il s'agit

d'hydrogène, d'hélium, de carbone, de fer, etc., ces éléments-là ne diffusent pas le rayonnement dans les mêmes couleurs. Ainsi la vraie matière de l'espace n'est pas du vide peuplé de points lumineux que sont les étoiles, c'est une vraie matière, fluide, très peu dense, qui rayonne dans toutes les couleurs.

Voici une autre image montrant un champ d'étoiles ressemblant à des paillettes dans le noir, et une grande zone obscure. On touche ici « du doigt », en quelque sorte, la problématique de l'ombre et de la lumière. En effet cette zone obscure n'est pas une région où il n'y a rien, mais au contraire une région où énormément de gaz s'est accumulé, ainsi que des grains de poussière interstellaire qui absorbent la lumière visible. Résultat, le nuage nous paraît noir, comme un trou dans l'espace, mais en réalité ce n'est pas un trou, c'est un plein. Une sorte de grumeau dense. Or, ces grumeaux denses sont la matrice des étoiles. C'est en leur sein que se forment les embryons d'étoiles. Pour vous en convaincre, voici une échographie de l'un de ces nuages noirs. En médecine, on utilise les rayons X pour les échographies, mais en astronomie, on utilise le rayonnement infrarouge. Quand on braque un télescope infrarouge en direction de l'une de ces matrices stellaires, on voit effectivement des embryons d'étoiles. Ce sont des proto-étoiles qui ne sont pas encore formées, pas encore sphériques ; ces étoiles ne sont pas autonomes, elles ne sont pas sculptées par leur propre gravité, elles sont encore en interaction avec le gaz ambiant, un peu comme le fœtus dans son placenta. Ainsi, cette image extrêmement émouvante nous donne à voir des étoiles en train de naître dans l'obscurité...

Cette superbe image astronomique montre maintenant la mort lente d'une étoile. En fin de vie, une étoile a consommé l'essentiel de son carburant hydrogène, donc la libération d'énergie connaît une brusque décrue, si bien que le cœur de l'étoile se contracte tandis que l'enveloppe, au contraire, se dilate et finit par se diluer dans le milieu interstellaire. Cette belle bulle de gaz coloré fut l'atmosphère d'une étoile normale, comme le soleil, et le point brillant central fut le réacteur nucléaire qui produisait l'énergie et qui, peu à peu, est progressivement en train de s'éteindre. C'est le sort qui attend notre soleil dans cinq milliards d'années. Soyez donc rassuré, ce n'est pas pour demain.

Il existe des morts d'étoiles plus spectaculaires que l'on appelle des explosions de supernova. C'est une mort cataclysmique parce que l'étoile est beaucoup plus massive et elle a pu atteindre des températures centrales suffisamment élevées pour fabriquer tous les éléments chimiques de la nature ; en fin de vie, elle subit une explosion gigantesque qui déchiquette violemment son atmosphère, telle une bombe thermonucléaire géante qui libère des énergies phénoménales. Voici l'image d'une supernova qui a été observée pour la première fois en l'an 1054, et que l'on perçoit encore mille ans plus tard.

Je vais maintenant vous présenter un autre paysage de lumière, mais à une échelle tout à fait différente : sortons du monde des étoiles et de notre galaxie pour nous intéresser aux galaxies lointaines. L'univers est peuplé de milliards de galaxies, immenses tourbillons contenant chacun des centaines de milliards d'étoiles. Parfois, les galaxies ont le bon goût de se frôler, de rentrer en collision et ce cliché magnifique montre l'interpénétration de deux galaxies spirales en train de fusionner lentement sur des échelles de temps de cent millions d'années.

Toujours pour nous rapprocher de la dualité ombre et lumière, passons à un autre cliché qui montre, vu à travers un très grand télescope, le noir du ciel piqueté de quelques grains de lumière qui sont des galaxies lointaines. C'est à cette échelle immense de distances qu'il faut prendre conscience combien la vitesse de la lumière n'est qu'une vitesse d'escargot. Certes, vous le savez, la lumière se propage à 300 000 kilomètres par seconde, donc en une année elle parcourt ce que l'on appelle l'année-lumière : dix mille milliards de kilomètres. Mais ce qui paraît grand à notre échelle est extrêmement petit à l'échelle cosmique. Par conséquent, dès que l'on braque des grands télescopes sur l'espace lointain, on plonge également dans le passé de l'univers. Les étoiles qui sont distantes de cinquante années-lumière sont vues telles qu'elles étaient quand elles ont émis leur lumière, il y a cinquante ans. La différence n'est pas grande au regard du temps de vie des étoiles, et on peut se dire qu'entre temps l'étoile est restée la même. Cette galaxie qui se trouve à cinquante

millions d'années-lumière est vue telle qu'elle était il y a cinquante millions d'années. A cette époque il n'y avait aucun être humain sur Terre, mais pour la galaxie, dont la stabilité est très grande, on peut dire encore qu'elle n'a pas beaucoup changé entre temps. En revanche, toujours sur le même cliché qui est une sorte de compression de tranches temporelles différentes, un tout petit grain de lumière représente une galaxie très lointaine, disons à dix milliards d'années-lumière. Là, vous plongez réellement dans un passé extrêmement lointain, où non seulement la Terre (qui n'existait même pas), mais l'univers entier lui-même était très différent d'aujourd'hui. Le décalage entre l'époque d'émission de la lumière et l'époque de sa réception (aujourd'hui) devient énorme. Les galaxies que l'on voit à cette époque-là étaient des galaxies très jeunes, qui venaient à peine de se former. Elles n'avaient pas les mêmes caractéristiques que les galaxies d'aujourd'hui. Ce couplage entre l'espace et le temps, entre la géographie et l'histoire de l'univers, est dû à la vitesse finie de la lumière.

Une question que l'on a envie de poser est évidemment : « mais alors quelles sont les limites de l'espace, jusqu'où peut-on observer » ? En construisant des télescopes de plus en plus puissants, qu'est-ce qu'on va voir « au-delà » ? Forcément, nous verrons des astres qui se sont formés dans l'univers et ont émis pour la première fois leur lumière. Pour mieux comprendre cela, il faut se placer dans le cadre de la fameuse théorie du big-bang. C'est l'une des plus grandes découvertes scientifiques de tous les temps, qui nous permet de retracer l'histoire quasi complète de l'univers, depuis le big-bang — un événement singulier qui aurait engendré l'espace, le temps, la matière et la lumière voici 14 milliards d'années — jusqu'à aujourd'hui.

Dans la version moderne des modèles de big-bang (lesquels ont été inventés dans les années 1930 par le belge Georges Lemaître), on trouve une réponse sur l'origine de la lumière. Je ne vous parle plus de la lumière du soleil, mais de l'origine même de toute lumière dans l'univers, l'équivalent de la séparation de la lumière et des ténèbres. La version scientifique moderne de ce « Fiat lux » est la suivante. Durant ses 380 000 premières années d'existence à partir du big-bang, l'univers était opaque et n'émettait pas de lumière. Pourquoi ? Paradoxalement — et on s'approche là de plus en plus de la dualité ombre et lumière — l'univers était opaque parce qu'il était d'une certaine façon bourré de lumière. A cette époque l'univers n'avait pas formé d'étoiles, de planètes ou de galaxies. L'univers était composé d'un plasma, un gaz ultra chaud et ultra dense formé de particules élémentaires et de photons (les grains de lumière). Mais les particules élémentaires étaient si serrées que la lumière restait prisonnière des particules. L'univers était donc opaque. Mais comme l'univers se dilate depuis le big-bang, il est arrivé un certain moment où il est devenu transparent. La transition entre l'opacité et la transparence est précisément l'origine de toute lumière, qui remonte donc à ces premières 380 000 années. Par rapport à nous, cela correspond à 13,7 milliards d'années dans notre passé.

Maintenant je vais commenter plus en détail l'image de cette première lumière émise par l'univers. Nous en avons des images télescopiques dans le domaine des micro-ondes. On l'appelle le rayonnement fossile. Cette lumière originelle s'est propagée dans l'espace et dans le temps, et nous parvient aujourd'hui refroidie par rapport à sa température d'origine. Malgré tout, elle a conservé ses caractéristiques structurelles, de sorte que le paysage cosmique que vous voyez là est l'image électromagnétique la plus ancienne que l'on puisse avoir de l'univers. On aura beau fabriquer des instruments plus perfectionnés, on n'observera jamais plus loin que cette image-là, qui a été obtenue en 2003 par un satellite de la NASA nommé WMAP. A priori, elle ne paie pas de mine. Ce n'est pas un paysage cosmique aussi beau que celui des nébuleuses gazeuses colorées dont je vous ai parlé tout à l'heure, mais c'est une image plus forte. Je vais vous expliquer pourquoi il s'agit de l'une des images les plus importantes de toute l'histoire de l'astronomie.

On a codé par des couleurs les très légers changements de température du rayonnement fossile d'une région à l'autre du ciel. Une des premières choses intéressantes que l'on apprend, c'est que les grains de lumière sont aussi des grumeaux de densité dans le plasma primitif extrêmement homogène et lisse qui baignait alors l'univers. L'écart le plus important entre le point le plus chaud et le point le plus froid, disons un grumeau rouge et un grumeau bleu du cliché, n'est que de un

cent-millième de degré. Le télescope utilisé pour construire cette image est en fait une sorte de thermomètre ultra sensible capable de mesurer les infimes variations de la température du fond de l'univers. Cette carte devient fascinante quand on réalise que ces infimes grains de lumière expliquent la totalité de la matière visible aujourd'hui. Car, si tout à l'heure je vous ai montré des embryons d'étoiles, je vous montre là les embryons de toutes les structures astronomiques qui existent maintenant dans l'univers : planètes, étoiles, galaxies, amas de galaxies, tout est né à partir de ces grumeaux infinitésimaux. Si en effet vous suivez l'évolution d'un grumeau typique au cours du temps, disons sur 200 millions d'années, vous voyez que ce grumeau initialement infinitésimal s'est condensé et a donné naissance aux premières grandes structures matérielles de l'univers – ces énormes condensations de matière que sont les étoiles, les galaxies, les amas de galaxies.

Voilà donc un joli décodage du rayonnement fossile, mais ce n'est pas tout. Le décodage le plus intéressant ressemble à un déchiffrement musical. En effet, l'univers primitif a vibré, sous l'impulsion initiale du big-bang, en produisant de véritables ondes acoustiques. Au bout de 380 000 ans, ces ondes acoustiques se sont figées sous forme de grains de matière lumineuse, un peu à la façon dont se figeraient des grains de sable répartis sur la membrane d'un tambour que vous faites vibrer. Sur cette carte de WMAP vous voyez l'équivalent des grains de sable sur le tambour cosmique. De la même façon que l'on peut décoder les propriétés d'un tambour en analysant ses harmoniques fondamentales, c'est-à-dire la façon dont les grains de sable s'organisent entre eux — la taille typique des grumeaux, leurs corrélations, etc.—, on peut décoder les propriétés de l'univers. Pour reprendre l'analogie du tambour, il est facile de comprendre que la façon dont s'organisent les grains de sable dépend d'un certain nombre de facteurs. Par exemple, de la façon dont vous frappez le tambour. Il est évident que si vous prenez une grosse masse et que vous frappez au centre, la membrane ne vibrera pas de la même façon que si vous prenez un archet de violon et que vous la faites vibrer tout doucement sur son bord. Vous avez donc une information sur la nature de l'ébranlement initial. Cela dépend également de la nature même du tambour, de sa constitution matérielle. Si vous tendez une peau animale, ou si vous utilisez du plastique, ou une plaque de métal, le matériau réagit différemment. Pour l'univers, nous saurons de quoi il est fait en décodant les harmoniques du rayonnement fossile. On a ensuite une information sur la géométrie du tambour, selon qu'il est parfaitement plan — on appelle cela la géométrie euclidienne—, ou légèrement bombé – une géométrie sphérique – ou légèrement incurvé – une géométrie hyperbolique. Enfin, nous aurons une information sur la forme globale du tambour : selon qu'il est rond, carré, pentagonal, etc., les ondes ne se réfléchissent pas de la même façon sur ses bords et ne se recombinent pas de la même façon. C'est pareil pour l'espace. Même si l'univers n'a pas de bords comme un tambour, il possède quand même certaines conditions aux limites que l'on appelle propriétés topologiques. En analysant les harmoniques du rayonnement fossile on peut ainsi obtenir des informations sur la forme globale de l'espace et sur sa taille – par exemple savoir s'il est fini ou infini.

C'est précisément cette analyse harmonique qui a été faite depuis un peu plus d'un an maintenant, grâce à cette carte du rayonnement fossile obtenue par WMAP. Voici les paramètres de l'univers qui gouvernent l'histoire de notre univers, issus du déchiffrement de cette symphonie de lumière. L'âge de l'univers est de 13,7 milliards d'années. La séparation de la lumière et de la matière a eu lieu 380 000 ans plus tard, et les premières étoiles se sont formées au bout de 200 millions d'années. Ceci pour la question temporelle. Maintenant, de quoi est fait le tambour cosmique, de quoi est fait l'univers ? Là, on s'aperçoit que toute cette profusion de galaxies, cent milliards pense-t-on dans l'univers observable, ne représente qu'une tête d'épingle dans ce qui peuple réellement l'espace. Seulement, 0,3 %, trois millièmes entendez-vous, constituent l'univers sous forme visible ! Quand je dis visible, je ne parle même pas de la visibilité de notre œil, mais de tous les rayonnements électromagnétiques confondus, comptabilisant les rayons X, les ondes radio, tout ce que peuvent ou pourront capter un jour nos télescopes de toutes natures. Cela implique que plus de 99 % de la matière et de l'énergie dans l'univers sont invisibles. Mais cela ne veut pas dire pour autant que cette matière sombre est inconnue et que nous n'avons en fait rien compris encore à

la nature de l'univers ! On peut en effet décoder le « noir » et savoir de quoi est faite la matière sombre. A peu près un quart est constitué de particules matérielles, qui engendrent de la gravité et ont donc tendance à freiner l'expansion de l'univers, parce que la gravité est attractive. Cette matière sombre se répartit en trous noirs, en petites étoiles qui ne sont pas assez massives pour briller, en grands nuages d'hydrogène froids, et surtout en particules élémentaires comme des neutrinos, etc. Le reste de l'univers, soit les trois quarts, est de l'énergie à l'état pur, qui n'est même pas sous forme de particules. C'est une énergie diffuse qui emplit en quelque sorte le tissu même de l'espace, et que les physiciens d'aujourd'hui étudient avec beaucoup d'intérêt sur le plan théorique ; en effet, beaucoup considèrent qu'il s'agit tout simplement de l'énergie du vide !

Il ne s'agit pas du vide de la physique classique, mais du vide quantique, qui est virtuellement plein d'énergie. C'est elle qui dominerait l'histoire de l'univers. Le vide quantique est une sorte de dynamite de l'espace, qui a tendance à le faire se dilater en chacun de ses points. Ceci a une conséquence fondamentale sur le futur de l'univers. Depuis que les modèles de cosmologie relativistes existent, le questionnement sur le futur de l'univers portait sur deux possibilités: ou bien l'expansion actuelle de l'univers s'arrêtera un jour et s'inversera pour donner lieu à une fin de l'univers que l'on a appelée « big-crunch », le grand écrasement final, ou bien l'expansion de l'univers sera perpétuelle. A cause de la prépondérance de cette énergie noire, la bonne réponse semble être la deuxième : non seulement l'expansion ne s'arrêtera jamais, mais en plus elle s'accélère au cours du temps. D'autres mesures astronomiques confirment l'accélération de l'expansion cosmique.

Quand on pense à la lumière, on pense souvent à ses jeux et aux illusions d'optique qu'elle engendre. Il y a aussi des illusions d'optique dans l'univers. Il existe par exemple des mirages gravitationnels. La situation est la suivante : nous, observateurs terrestres, voulons observer un astre A très lointain, mais sur la ligne de visée de cet astre, il y a un objet intermédiaire, une galaxie par exemple. La théorie de la relativité générale d'Einstein nous apprend qu'un objet massif courbe l'espace dans son voisinage. Les rayons lumineux épousant la courbure de l'espace, ils peuvent emprunter plusieurs chemins pour nous parvenir. Depuis la terre, on a l'illusion que l'astre A se trouve démultiplié en plusieurs images. C'est un mirage.

Dans ce mirage gravitationnel particulier que je vous montre, appelé « croix d'Einstein », la galaxie qui est sur la ligne de visée se trouve au centre et les quatre extrémités de la croix - qui ressemblent également aux pétales d'un trèfle à quatre feuilles - sont quatre images de la même galaxie, qui est visible en quatre positions différentes à cause du mirage, alors qu'en réalité, elle est située à l'arrière-plan. Ce type de mirage gravitationnel nous renseigne en particulier sur la quantité de matière sombre qui se trouve dans la galaxie visible. Pour que l'on ait ce mirage gravitationnel, il faut que la galaxie intermédiaire soit dix fois plus massive que sa partie visible, donc qu'elle soit essentiellement constituée de matière sombre.

Une autre question que l'on peut se poser, et c'est justement celle que je me suis posée il y a un peu plus d'une dizaine d'années dans le cadre de mon travail de chercheur, est la suivante : quand on analyse un cliché astronomique contenant une profusion de galaxies, qu'est-ce qui nous garantit qu'il ne s'agit que d'images originales ? Pourquoi n'y aurait-il pas des mirages globaux, dits mirages topologiques, qui démultiplieraient toutes les images en raison d'une forme de l'espace très complexe ? Ces « espaces chiffonnés », comme je les ai appelés, nous donneraient l'illusion que l'univers observé, tissé par les rayons lumineux, est plus vaste que l'espace réel, alors qu'en général on pense à l'inverse. Ce serait un peu l'équivalent des constructions de l'artiste-architecte Serge Salat, qui conçoit de spectaculaires installations dites « d'hyper lumière ». Il utilise des jeux de miroirs, des rayons de lumières et des faisceaux lasers pour construire, à partir de petites pièces tapissées de miroirs, l'impression d'une infinie duplication de cette pièce.

On peut construire des modèles d'univers extrêmement complexes de cette sorte ; ce ne sont évidemment pas des modèles d'espaces bornés par des parois réfléchissantes, mais disons que la forme de ces espaces produirait le même type d'effet. Voici par exemple l'architecture invisible

d'un univers où l'espace réel ne correspond qu'à la grande cellule centrale qui a la forme de ce que l'on a appelé un dodécaèdre, mais un dodécaèdre très particulier qui serait reconnecté sur lui-même, comme « chiffonné ». Si nous vivions dans un tel dodécaèdre, nous aurions l'illusion de vivre dans un espace plus vaste, une sorte de mosaïque tapissée de 120 dodécaèdres empilés les uns sur les autres. De façon assez curieuse, l'analyse harmonique du rayonnement fossile dont je vous ai parlé tout-à-l'heure semble confirmer depuis quelques mois une structure de cette nature pour notre univers réel ; celui-ci serait donc un espace en expansion mais fini, replié sur lui-même et légèrement plus petit que l'espace observé, engendrant de ce fait des illusions d'optique que l'on peut calculer très précisément.

Un autre de mes sujets de prédilections, que j'ai commencé à étudier bien avant les univers chiffonnés, ce sont les fameux trous noirs. On ne peut pas parler de la dualité *ombre et lumière* dans l'univers sans parler des trous noirs. L'astrophysique nous apprend que, lorsqu'une très grosse étoile, parvenue en fin de vie, a épuisé son carburant nucléaire, son cœur s'effondre sur lui-même. Et si la masse de l'étoile dépasse une certaine valeur critique, son cœur s'effondre pour donner naissance au phénomène le plus extravagant de l'astrophysique, un trou noir. C'est une concentration de matière telle qu'elle creuse une sorte de puits dans le tissu élastique de l'espace-temps et, au fond de ce puits vont se déverser sans fin la matière et la lumière.

J'ai tout de suite été fasciné, lorsque je faisais mes études de mathématiques à la fin des années 1970, par ces objets quelque peu fantasmagoriques, qui semblaient sortir de l'imagination des mathématiciens mais que les télescopes ne pouvaient voir.

Le trou noir est, par sa définition même, le parangon de l'invisibilité, mais il faut savoir que la formation du trou noir s'accompagne de la plus grande libération d'énergie et de lumière que l'on puisse imaginer dans l'univers – hormis le big-bang bien sûr. Nous avons des images récemment captées de la formation d'un trou noir à travers une explosion d'étoile que l'on appelle une hypernova. Cette hypernova se situe à dix milliards d'années-lumière de nous. Or, que voyons-nous sur ce cliché ? Deux taches aussi lumineuses l'une que l'autre. La première est cette hypernova, grosse étoile qui explose et se transforme en trou noir, tandis que l'autre, c'est une galaxie constituée de 200 milliards d'étoiles. En outre, l'image de la galaxie reste sur le cliché, tandis que l'hypernova s'allume et s'éteint en moins d'une seconde. Cela signifie que, pendant ce temps très court, l'hypernova qui explose et forme un trou noir émet l'équivalent de l'énergie de 200 milliards d'étoiles ! Vous voyez comment la formation d'un trou noir peut s'accompagner de la plus grande libération de lumière que l'on puisse imaginer.

Une fois que les trous noirs sont formés, dans certains cas les astrophysiciens parviennent également à détecter leur présence, mais cette fois indirectement. Un trou noir n'est pas forcément « célibataire », isolé dans l'espace ; il peut vivre par exemple dans un couple d'étoiles et dans ce cas-là, le trou noir aspire progressivement le gaz de l'étoile compagne. Ce gaz s'enroule en une sorte de tourbillon autour du trou noir et, avant de disparaître définitivement, il émet des rayonnements caractéristiques qui sont captés par nos télescopes.

Moi qui ai toujours été fasciné par la dualité ombre et lumière, j'ai voulu que l'un de mes premiers travaux astronomiques, signé d'un nom que l'on croyait être un pseudonyme, comme je vous le disais tout-à-l'heure, soit consacré à la visualisation, par ordinateur, de l'image d'un trou noir entouré d'un disque de gaz brillant, en tenant compte des déformations de l'espace, du temps et des rayons lumineux. Voici l'image que j'ai publiée en 1979. Ultérieurement, j'ai découvert la meilleure légende qui se puisse trouver à cette image. Ce n'est pas un commentaire scientifique, mais six vers extraits d'un poème de Gérard de Nerval – poète du noir et de la lumière par excellence : « En cherchant l'œil de Dieu, je n'ai vu qu'un orbite / Vaste, noir et sans fond, d'où la nuit qui l'habite / Rayonne sur le monde et s'épaissit toujours. / Un arc-en-ciel étrange entoure ce puits sombre, / Seuil de l'ancien chaos dont le néant est l'ombre, / Spirale engloutissant les mondes et les jours ». Cette rencontre inattendue entre science et poésie illustre bien comment la dualité des rapports entre l'ombre et la lumière fait partie de notre métaphysique intérieure. Il y a eu depuis des

simulations numériques plus élaborées, en couleurs et animées, représentant les jeux et déformations de la lumière engendrés par le noir du trou.

Je vais vous présenter brièvement un autre de mes travaux d'astrophysicien, tournant toujours autour de la problématique de l'ombre et de la lumière. Il y a une vingtaine d'années, je me suis intéressé à la façon dont un trou noir géant (on pense qu'il existe de gigantesques trous noirs au centre de pratiquement toutes les galaxies) pouvait tout simplement briser une étoile. En effet, une étoile qui frôle le trou noir, un peu à la façon dont les comètes frôlent le soleil, passe dans une zone critique au voisinage du trou noir, à l'intérieur de laquelle les forces de marée engendrées par le trou noir sont capables de la déchirer. A cette époque, mes collaborateurs et moi avons fait des calculs purement théoriques, mettant tout cela en équations et les résolvant par ordinateur, et il n'y avait aucun télescope capable de voir ce phénomène. Or, nous avons découvert que l'étoile, en s'approchant du trou noir, devait être aplatie sous forme d'une crêpe, et à force d'être aplatie, elle était chauffée, comprimée et la crêpe finissait par « sauter ». Je me souviens que nous avons baptisé le phénomène « crêpe stellaire flambée ». Après cette prédiction j'ai changé de sujet, mais j'ai eu le plaisir d'apprendre que depuis quelques années, la nouvelle génération de télescopes commence à détecter ce genre de phénomènes dans les noyaux de galaxies lointaines. L'année dernière, il y a eu un tel événement dont la NASA a fait un petit film, qui n'est qu'une visualisation assez naïve d'une crêpe stellaire flambée mais que je vous montre quand même. Vous voyez ici un très gros trou noir, qui fait peut-être cent millions de fois la masse du soleil, et voici que surgit une petite étoile, elle entre dans la zone critique et finit par être écrasée et explose sous la forme d'une crêpe stellaire flambée.

J'en ai fini pour l'astrophysique, mais je voudrais terminer mon intervention par deux exemples se rapportant au sujet ombre et lumière, tirés cette fois-ci dans les disciplines de l'art – j'ai déjà mentionné combien je m'étais toujours élevé contre les clivages entre la science, les arts et la littérature. Madame la conseillère régionale, Cécile Helle, a mentionné en introduction du colloque l'œuvre de Vincent Van Gogh. En effet, après avoir quitté son nord natal et peint des paysages aux cieux surchargés de nuages, Van Gogh est venu en Provence et a découvert la clarté des cieux. Emmerveillé, il a écrit : « je peins le ciel, je peins les étoiles, je vois les couleurs des étoiles ». Il s'est mis alors à peindre une série de tableaux représentant des cieux très évocateurs. Par exemple, la « Nuit étoilée au-dessus du Rhône », de 1888, montre le souci de Van Gogh de représenter un ciel à peu près fidèle. L'intensité des astres est exagérée, mais les positions des étoiles sont correctes. Vous reconnaissez sans doute la Grande Ourse, dite aussi le Chariot. Si on fait une reconstitution astronomique du ciel que l'on pouvait voir en 1888, à Arles, en regardant de l'autre côté du Rhône, la Grande Ourse se trouvait bien à cette position-là. Il y a quelques années, je me suis plus particulièrement intéressé à une des œuvres les plus énigmatiques de Van Gogh, « La nuit étoilée au-dessus de Saint-Rémy », datée de 1889. C'est l'époque qui a suivi l'épisode quelque peu dramatique de décembre 1888, où Van Gogh a tenté de se suicider et s'est coupé l'oreille. Après cela il est entré dans une maison de repos près de Saint-Rémy de Provence, en fait un asile psychiatrique, mais où il avait gardé toute liberté pour peindre. On sait que Van Gogh allait peindre la nuit, toujours fasciné par le ciel piqueté d'étoiles, et lui-même racontait, dans les lettres adressées à son frère Théo, qu'il sortait la nuit avec un grand chapeau de paille, mettait des bougies sur le pourtour de son chapeau pour éclairer la feuille, et commençait à mettre sur ses toiles les positions des astres dans le ciel. Dans cette toile énigmatique « Nuit étoilée au-dessus de Saint-Rémy », on a cependant l'impression d'un ciel surchargé, totalement irréaliste. On peut penser à première vue que Van Gogh était effectivement devenu fou, et que sa peinture n'avait plus rien à voir avec la réalité. Mais est-ce vraiment certain ? Là encore, on peut utiliser un logiciel astronomique qui permet de reconstituer le ciel nocturne à l'époque où Van Gogh est censé avoir peint cette toile. Comme on sait que Van Gogh a terminé cette toile par une lettre qu'il a écrite à son frère Théo au mois de juin 1889, il suffit de faire marcher le logiciel un peu en arrière, pour essayer de trouver si, dans les quelques jours ou quelques semaines qui ont précédé, il y avait eu une configuration céleste

ressemblant à celle de son tableau – en faisant abstraction des éclats des étoiles, qui sont de toute évidence très exagérés. J'ai eu la surprise et l'émotion de trouver que le 25 mai 1889 à quatre heures quarante du matin très exactement, le ciel au-dessus de Saint-Rémy de Provence avait cette configuration. Vous devinez ici la ligne d'horizon, cachée par les montagnes, le clocher du village et le cyprès. On peut se douter que l'on est à l'aube, parce que le ciel est encore sombre mais une lueur blanchâtre éclaire l'horizon, et le croissant de lune est éclairé par en bas, ce qui signifie que le soleil est encore sous l'horizon et s'apprête à se lever. En outre vous avez cet astre brillant qui ne peut être que Vénus, l'étoile du berger, en fait la planète qui précède le soleil dans sa montée. Les autres points lumineux sont des étoiles. La reconstitution astronomique le confirme : le 25 mai 1889 à quatre heures quarante du matin, vous retrouvez le croissant de lune situé dans la constellation des Poissons, Vénus au-dessus de l'horizon et les quelques étoiles de la constellation du Bélier que Van Gogh a peintes dans son tableau. Il est assez émouvant de penser qu'un simple logiciel de reconstitution astronomique vous donne l'heure exacte où le génial artiste a, pour la première fois, mis sur sa toile vierge les petits points des étoiles et la Lune à leur positions exactes, et qu'ensuite il a transformé ce canevas en un chef d'œuvre de l'histoire de l'art ! Mais la chose la plus intéressante – et là j'en reviens à une forme de cécité voyante dont j'ai parlé tout au début – c'est cette sorte d'œil télescopique qu'a eu Van Gogh. En effet, dans son tableau, au beau milieu du ciel étoilé est peint objet bizarre, un incroyable tourbillon dans l'espace. Or, les reconstitutions astronomiques indiquent à cet endroit-là un objet céleste qui se trouve être une galaxie, évidemment invisible à l'œil nu. Et cette galaxie, qui se trouve dans la constellation des Poissons, ressemble comme deux gouttes d'eau à la spirale de Van Gogh. Je ne prétends pas que Van Gogh avait une vision télescopique, bien entendu, mais qu'il avait le bon goût d'être passionné d'astronomie, lisant des livres et des revues de vulgarisation. Or, à cette époque, on commençait à publier les premières photographies de galaxies. Vous voyez le tour de force de Van Gogh : il décide de représenter, de façon visible, ce qui reste invisible à l'œil humain mais qui est perceptible au télescope. Il a compris qu'il y a de la lumière dans le noir, et il décide de mettre en pleine lumière, comme élément principal de son tableau, un astre invisible mais qui est bien là, tapi dans l'ombre...

Mon deuxième exemple est tiré de la musique. Il s'agit d'une œuvre conçue et écrite en 1991 par un compositeur prématurément disparu mais que j'ai bien connu et qui a été mon ami, Gérard Grisey. Cette œuvre s'intitule : « Le noir de l'étoile ». Je vous rappelle qu'au cœur des explosions de supernova, le résidu central de l'étoile se transforme en une sorte de cadavre stellaire, normalement invisible mais qui, dans certaines circonstances, peut être détecté en ondes radio sous la forme d'un « pulsar ». Le pulsar est comme un point qui clignote, qui s'allume et qui s'éteint à un rythme extrêmement régulier. La raison, c'est que le pulsar est une sorte de phare cosmique, une étoile morte qui tourne rapidement sur elle-même en émettant un faisceau radio très localisé et, comme un phare maritime, à chaque fois que le faisceau de lumière balaie notre ligne de visée, on détecte un signal. Gérard Grisey a eu l'idée de me contacter pour élaborer un projet utilisant ces sortes de métronomes cosmiques comme éléments musicaux à part entière. Ces rythmes inflexibles, qui sont en fait des rythmes de lumière, sont transposés dans le domaine acoustique et interagissent avec les sons bien réels produits par des percussionnistes humains. L'œuvre musicale est donc écrite pour six percussionnistes et deux « guest stars » au sens propre du terme, en l'occurrence des pulsars invités au concert, captés au radiotélescope et qui délivrent leurs rythmes cosmiques. Cette œuvre extraordinaire vient juste d'être gravée en CD chez Universal Music et a obtenu le grand prix de l'Académie Charles Cros. Comme vous pouvez l'imaginer, il s'agit d'une partition de musique contemporaine assez exigeante et difficile, dont toute la structure temporelle est calquée sur des rythmes de pulsars différents tournant chacun à leur vitesse de rotation propre.

J'en ai fini avec mon exposé proprement dit et je suis prêt à répondre à quelques questions.

Intervenante : Il y a une chose qui m'a étonné, c'est que de la naissance à la mort des étoiles, elles sont toujours rondes.

Jean-Pierre Luminet : Vous avez vu, en fait, que la forme d'une étoile change au cours de son existence. Je vous ai montré d'abord des embryons d'étoiles qui n'étaient pas rondes parce qu'elles n'étaient pas autonomes. Une étoile ne devient ronde que lorsqu'elle devient entièrement gouvernée par sa propre gravité. La gravité attire les particules vers le centre de la même façon dans toutes les directions, donc les corps qui sont soumis à leur propre gravité ont tendance à s'arrondir. Toutefois, les corps sphériques tournent sur eux-mêmes, et vous savez qu'ils ont tendance à s'aplatir légèrement. ; la Terre, par exemple, est légèrement aplatie aux pôles, le Soleil est lui aussi légèrement aplati, et il existe des étoiles qui tournent très vite et qui, de ce fait, sont très aplaties. Lors de la fin explosive d'une étoile, comme une supernova, d'autres phénomènes entrent en jeu et les gaz sont éparpillés de façon non sphérique.

Intervenant : Est-ce que les trous noirs, s'ils existent, représentent un danger ?

Jean-Pierre Luminet : Après que les trous noirs aient été conçus par les théoriciens et qu'ils aient laissé sceptiques la plupart des astronomes, nous avons acquis les moyens de les détecter, même si c'est de façon indirecte. On commence donc à avoir aujourd'hui d'assez bonnes idées sur le nombre de trous noirs dans l'univers. Ils se forment dans des conditions exceptionnelles, il faut de très grosses étoiles, et celles-ci sont rares. Malgré tout, il y a tellement d'étoiles dans l'univers que l'on estime que, dans une galaxie typique comme la nôtre, la Voie lactée, sur les 200 milliards d'étoiles environ qu'elle contient, il doit y en avoir entre 10 et 100 millions qui se sont transformées en trous noirs. C'est très peu finalement. Cela implique que le plus proche trou noir est, en toute probabilité, extrêmement loin de nous – plusieurs milliers d'années-lumière. Donc, si cela peut vous rassurer, aucun trou noir ne va passer près de notre planète et menacer de l'absorber. Le sort de la terre n'est absolument pas lié à un trou noir. Si on mettait un trou noir à la place du soleil, ayant la même masse que lui, on ne se rendrait compte de rien, hormis le fait qu'il n'y aurait plus de lumière : sur le plan gravitationnel, la terre continuerait à tourner sur son orbite elliptique autour du trou noir sans être absorbée. Il faut vraiment être tout près d'un trou noir pour en ressentir les effets.

Intervenant : Est-ce qu'il y a ou est-ce que l'on peut concevoir des expériences, à l'échelle humaine, qui simulent tout ou partie de ces phénomènes, avec les accélérateurs, synchrotrons et autres instruments de ce genre ?

Jean-Pierre Luminet : Il y a plusieurs types d'expériences que l'on peut faire en astrophysique. C'est vrai que cette science a un statut particulier par rapport aux autres sciences de la matière, qui offrent, elles, la possibilité d'expérimenter en laboratoire. Vous voulez étudier par exemple un cristal ? Hé bien vous le placez dans votre labo, vous le faites chauffer, vous l'irradiez, vous tapez dessus, bref vous voyez comment il réagit. Avec les étoiles, vous ne pouvez pas le faire. Vous recevez passivement leur lumière. On peut malgré tout faire des expériences numériques, que l'on appelle des simulations. Prenez une explosion de supernova, par exemple. On écrit les équations qui gouvernent son évolution, on fait tourner l'ordinateur puis on regarde le résultat. Si celui-ci correspond à ce qui a été observé, on a fait une bonne simulation, sinon on modifie les paramètres jusqu'à ce qu'on ait trouvé la bonne modélisation. La simulation numérique est donc une forme d'expérience sensible. Une autre forme d'expérience, qui concerne plutôt la physique des très hautes énergies, concerne la description des premiers instants de l'univers peu après le big-bang. Vous avez tous entendu parler du CERN, à Genève, avec ses grands collisionneurs qui sont capables d'accélérer les particules élémentaires à des vitesses proches de celle de la lumière et leur confèrent des énergies phénoménales. Lorsque l'on fait entrer en collision des faisceaux de particules ainsi

accélérées, on recrée pendant quelques fractions de secondes des conditions de températures et d'énergie extrêmes, un million de milliard de degrés par exemple, qui sont celles que l'univers primordial a dû connaître juste après le big-bang. Avec ces expériences, on peut donc tester et reconstituer les propriétés de l'univers lorsqu'il n'était âgé que d'un dix-milliardième de seconde.

Intervenante : Ce qui m'a paru fascinant, au-delà même de tout ce que vous avez évoqué, c'est peut-être le bruit assourdissant qu'il devrait y avoir dans cet univers et qu'on n'entend pas du tout.

Jean-Pierre Luminet : C'est un bruit de lumière. Le bruit est assourdissant mais il n'est pas perceptible à nos oreilles, parce que ce que l'on appelle le son, en général, a besoin d'un milieu suffisamment dense pour se propager. Si vous m'entendez parler dans cette salle, c'est parce qu'il y a de l'air autour de nous. Mes cordes vocales font vibrer l'air et vous transmettent les informations sous forme d'ondes de compressions. Si on se trouvait dans le vide interstellaire, vous ne m'entendriez pas parce que les vibrations que j'émettrais ne pourraient pas se propager.

Malgré tout, il y a une sorte de symphonie de l'univers. C'est une symphonie de lumière, une sorte de partition que l'on apprend à déchiffrer. Les ondes lumineuses ne sont pas des ondes sonores, mais elles sont aussi caractérisées par une longueur d'onde et une fréquence, de sorte que l'on peut faire des analogies entre la lumière et le son. Prenez une étoile comme le soleil. Vous ne l'entendez pas, mais vous le voyez vibrer, parce qu'en fait, le soleil est une grosse boule de gaz agitée de mouvements internes ascendants et descendants. La surface du soleil est comme la membrane d'un tambour compliqué qui vibre, et on dispose aujourd'hui des télescopes capables de faire la carte des régions du soleil qui montent et celles qui descendent (quelques centimètres par seconde à peine). On reconstitue ainsi la partition du soleil, qui est aussi une partition de lumière, à travers laquelle on déduit les conditions qui règnent à l'intérieur du soleil.

Intervenant (Olivier Cadart) : Sans effleurer le sujet de demain sur la pollution visuelle, je voudrais avoir votre appréciation sur ce phénomène que l'on appelle pollution du ciel, par la lumière qu'émettent les habitants de la terre, qui paraît complètement dérisoire par rapport aux immenses phénomènes astronomiques dont vous parlez mais qui, pourtant, alerte un certain nombre de gens.

Jean-Pierre Luminet : Effectivement, l'éclairage urbain et la pollution lumineuse causent de grands problèmes pour l'observation astronomique. Je vous ai montré des phénomènes astronomiques qui émettent des débauches d'énergies, mais ils se produisent extrêmement loin dans l'espace, et nous ne recueillons sur terre que l'écume de cette énergie. Nous ne recevons que quelques photons, et il faut des sites d'observation exceptionnels pour parvenir à prendre les magnifiques clichés que je vous ai montrés. Au cours de l'histoire de l'astronomie, les lieux d'observation se sont progressivement éloignés des villes. Lorsque Galilée a utilisé pour la première fois une lunette et l'a braquée vers le ciel pour découvrir les satellites de Jupiter ou les phases de Vénus, il se trouvait dans la ville de Venise, mais à cette époque les lumières n'étaient pas gênantes. Par la suite, les grands observatoires ont commencé à se développer près des grandes villes comme Paris, Londres ou Saint-Petersbourg. Les choses ont commencé à changer radicalement avec le premier éclairage automatique des villes au gaz, dans la deuxième moitié du XIX^e siècle. La pollution lumineuse a commencé à devenir un problème et les observatoires ont commencé à s'éloigner. Avec l'apparition de l'électricité au début du XX^e siècle, la situation est devenue de plus en plus problématique. Dans un pays comme la France, les observatoires de Meudon et de Paris ont gardé leur nom d'observatoire, mais ne servent plus de lieu d'observation depuis de nombreuses années. Ce sont des instituts de recherche avec des bureaux, où des théoriciens comme moi travaillent sur des ordinateurs. Les astronomes observateurs, il y a encore vingt ans, pouvaient se rendre dans deux sites privilégiés du Sud de la France, l'un à Saint-Michel de Provence, au-dessus de Forcalquier, l'autre au Pic du Midi dans les Pyrénées. Aujourd'hui, même ces sites ne sont plus

assez performants. On peut encore y faire quelques observations astronomiques planétaires, mais pour observer le ciel très profond et des astres très faibles, il faut aller dans la Cordillère des Andes, au Chili, ou au sommet du Mauna Kea aux îles Hawaï, à 4 200 mètres d'altitude. Il y a là une armada de télescopes de tous les pays, parce que ces sites sont vraiment exceptionnels. Même le télescope géant du mont Palomar aux Etats-Unis, dont on a beaucoup parlé entre les années 1930 et 1990, est aujourd'hui en voie de fermeture. Quand on l'a construit, les astronomes voulaient déjà se mettre à l'abri de la pollution lumineuse de Los Angeles, et ils ont cru aller suffisamment loin en l'installant sur un montagne à 150 kilomètres du cœur de Los Angeles, près de Pasadena. Mais aujourd'hui, cette mégapole arrive au pied du mont Palomar, et on ne peut plus y faire d'observations profondes ! Les sites très reculés s'amenuisent sur Terre, si bien qu'un jour on finira par installer nos télescopes sur la face cachée de la Lune, où on sera tranquille pendant un bon bout de temps.

Mais ces problèmes concernent l'astronomie professionnelle. Les astronomes amateurs - et il y en a beaucoup en France, répartis dans des clubs - ont des moyens très réduits, et ne peuvent pas aller au Chili ou à Hawaï. Ils ont leur petit télescope pour faire leurs observations dans leur jardin, ou bien ils prennent leur voiture et vont à dix kilomètres dans la campagne. Mais cette solution ne suffit plus. C'est pour cette raison que beaucoup d'astronomes amateurs et d'associations réclament, auprès des pouvoirs publics, de faire très attention à l'éclairage urbain agressif, qui gâche ce plaisir extraordinaire de voir le ciel, même en amateur.

Intervenant : Pour l'astrophysicien que vous êtes, est-ce que la question bien connue, « le monde est-il fini ou infini ? » a encore un sens ?

Jean-Pierre Luminet : C'est un vieux débat, et il se trouve que la question a plus que jamais un sens, d'autant que je pense avoir moi-même apporté quelques pierres au sujet avec les modèles d'espace chiffonné que j'ai brièvement mentionnés. Je répète qu'en analysant les vibrations du « tambour cosmique », décodées à travers la partition de lumière du rayonnement fossile observée en 2003, mes collaborateurs et moi-même avons interprété un certain « manque de graves » dans les harmoniques de l'univers par la finitude de l'espace. On a pu ainsi attribuer une taille et une forme très précise à l'univers, celle du dodécaèdre en expansion dont je vous ai parlé. La question est donc extrêmement pertinente et plus que jamais d'actualité.

Intervenant (S. Giorgis) : Pour suivre ces questions un peu naïves, est-ce qu'il y a bien une certitude ou une hypothèse sur le temps ? L'espace serait limité, mais, avant le big-bang ? C'est une question d'enfant !

Jean-Pierre Luminet : Il n'y a plus d'âge pour poser de telles questions ! La question de l'enfant n'est pas plus naïve que la question de l'adulte. D'abord, je suis désolé de contredire votre commentaire. Ce n'est pas parce que je vous ai dit que l'espace était fini que je vous ai dit que l'espace avait des limites. L'espace est fini mais il n'a pas de limites. Cela pose toujours un problème de visualisation parce que notre espace mental n'est pas habitué à visualiser des espaces finis mais qui n'ont pas de limites. On a pu le montrer sur le plan physiologique, notre espace mental reconstruit un espace euclidien infini au sein duquel on visualise des formes délimitées par des surfaces. On a donc toujours tendance à visualiser un objet en le plongeant dans un espace extérieur fictif, qui n'est que notre espace mental. Et on a donc toujours tendance à attribuer une limite à la finitude d'un objet. Pour l'univers, c'est autre chose. D'abord, sur le plan du pur vocabulaire, il y a comme un défaut de logique à parler de quelque chose « à l'extérieur de l'espace ». Puisque l'espace est, par définition, l'ensemble de tous les lieux de l'univers, comment voulez-vous parler d'un lieu qui serait hors de tout lieu ? Il ne peut pas y avoir d'espace en dehors de l'espace, le terme dehors impliquant déjà une notion de déplacement spatial ! Je vais vous donner un exemple d'espace fini, appelé hypersphère. Partons d'abord de la sphère, la surface d'un ballon

par exemple. C'est une surface, donc un espace à deux dimensions. Vous êtes sur la surface de la sphère, la surface de la terre, par exemple, vous filez droit devant vous, vous accomplissez un grand cercle et vous revenez à votre point de départ. Vous voyez bien que vous êtes dans un espace bidimensionnel qui est fini – vous ne vous éloignez jamais indéfiniment – et qui n'a pas de limites — vous n'êtes jamais tombé dans un trou. Pour mieux le comprendre, essayez de visualiser un planisphère en projection polaire. C'est-à-dire que vous représentez la totalité de la surface terrestre par deux disques. L'un centré sur le pôle nord représente l'hémisphère nord, l'autre centré sur le pôle sud représente l'hémisphère sud, chacun des disques étant délimité par l'équateur. Vous avez donc deux disques pour représenter le planisphère, et il est évident que l'équateur de chacun des disques n'est pas une limite de l'espace. En fait les deux frontières du disque sont les mêmes points, ceux de l'équateur terrestre. Si vous partez du pôle nord de l'un des disques, vous traversez la France, vous allez vers le sud, vous arrivez au bord apparent du disque, c'est-à-dire à l'équateur. Comme ce n'est pas un vrai bord, vous passez immédiatement sur l'équateur de l'autre disque et vous continuez vers le pôle sud. Et ainsi de suite sans limites, vous pouvez naviguer indéfiniment dans votre carte sans jamais rencontrer de frontières. Pour l'hypersphère c'est la même chose en rajoutant la troisième dimension. Vous remplacez les deux disques par l'intérieur de sphères, et vous obtenez une représentation de l'hypersphère par deux sphères accolées, telles que la surface de chacune des sphères est collée à la surface de l'autre sphère. Dans ce volume-là, vous pouvez circuler indéfiniment dans un volume fini mais qui n'a ni frontière ni extérieur.

De même pour le temps : on ne peut pas parler d'un temps en dehors du temps, et dans la mesure où l'on suppose que le temps a été créé au big-bang, la question d'un « avant big-bang » n'a pas de sens. Toutefois, des théories récentes font l'hypothèse que le big-bang n'a pas créé le temps, et donc qu'il a pu exister une phase de l'univers antérieure au big-bang. Mais ces théories ne sont pour l'instant pas testables par des observations et restent très spéculatives.

Intervenant : À quoi ça sert l'astrophysique et l'astronomie en tant que science ?

Jean-Pierre Luminet : Dans la mesure où l'astronomie est la plus ancienne des sciences, on peut penser que cela sert à autre chose qu'à rêver ! La naissance de l'astronomie voici cinq mille ans est liée à deux raisons principales, l'une culturelle, l'autre pratique. La première est ce qui fait notre spécificité d'être humain, et que j'appellerai l'étonnement philosophique. Quand on est là, sur terre, dans notre petite condition d'être humain limité dans l'espace et dans le temps, et que l'on contemple le ciel étoilé, comment ne pas se poser la question : « Qu'est-ce que l'on fait là-dedans ? Est-ce que ces étoiles là-haut ont une signification pour nous ? ». C'est une question philosophique, métaphysique, voire religieuse chez certains, donc essentielle. La première mission de l'astronomie a justement été de tenter de décoder un éventuel rapport entre nous et ce qu'il y a là-haut. Entre le petit et le grand, le microcosme et macrocosme. Il y a eu bien sûr dans l'histoire de fausses interprétations, des superstitions et des croyances irrationnelles comme l'astrologie, où nos fantasmes se nourrissent par des sentiments cosmiques projetés, mais l'astronomie scientifique a rationalisé tout cela et y est parvenue. Le fait par exemple de comprendre que les atomes qui nous constituent ont été forgés dans le big-bang et dans le cœur d'étoiles mortes nous révèle le vrai rapport entre l'homme et le cosmos.

La seconde raison est totalement pratique. Quand les sociétés ont eu besoin de se structurer il y a cinq mille ans, elles ont eu besoin de définir le temps à travers des calendriers. Pour avoir des calendriers fiables, il faut des horloges. Et les seules horloges naturelles connues dans l'Antiquité étaient les mouvements réguliers des astres, de la Lune et du Soleil. Les premières civilisations importantes, en Égypte, à Babylone, en Chine, etc., ont réellement pu se développer à travers l'établissement de calendriers luni-solaires, qui ont demandé l'accumulation d'observations astronomiques faites par des professionnels, pendant des siècles et des siècles, pour mettre en évidence des cycles réguliers. Par la suite, toute une phase de l'histoire de notre civilisation occidentale, à partir de Christophe Colomb, a été marquée par l'exploration de la Terre. Comme la

navigation se faisait grâce aux étoiles, l'astronomie a joué un rôle essentiel. Il fallait établir des cartes précises du ciel, tenir compte des irrégularités de la Lune, de la précession des équinoxes et nombre d'autres phénomènes célestes. Cette branche de l'astronomie dite « pratique » fut utile à la géographie et à la navigation, donc utile à la conquête des nouvelles terres et des mers. Tout ceci a déterminé l'histoire géopolitique et économique de nos peuples. Par exemple, les rivalités pour s'emparer des colonies entre la France, l'Angleterre, la Hollande, le Portugal, etc., au siècle des Lumières, étaient conditionnées par les capacités des astronomes-géographes à calculer la latitude et la longitude et à établir de bonnes cartes.

Rien n'a changé aujourd'hui, malgré les apparences. Par exemple, la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui vous semble peut-être seulement jolie et poétique avec son espace-temps courbe, à quoi sert-elle ? Savez-vous qu'on la retrouve dans les petits boîtiers GPS qu'utilisent les camionneurs, les chauffeurs de taxi, les randonneurs, et les navigateurs ? Les GPS mesurent la position à la surface de la terre avec une grande précision en utilisant des constellations de satellites artificiels et en faisant une triangulation cosmique, pour cela ils doivent tenir compte de la courbure de l'espace, c'est-à-dire de la relativité générale, pour calculer les temps de trajet des rayons lumineux. Sans cela, vous feriez une erreur de quelques centaines de mètres, et si vous étiez perdu en haute montagne dans la brume, vous rateriez le refuge et vous mourriez !

Intervenant (Fayeton) : Pour l'instant, la théorie du big-bang est là et on attend confirmation. Est-ce qu'il y a actuellement des théories différentes en cours, mis à part celle créationniste ?

Jean-Pierre Luminet : Le créationnisme n'est pas une théorie scientifique. Evidemment la théorie du big-bang est scientifique, et comme tout modèle scientifique c'est un modèle provisoire. La science ne délivre pas de vérité avec un grand V, elle délivre des modèles qui font office de vérité provisoire le temps que dure le modèle face aux confrontations avec l'observation et l'expérience. La théorie du big-bang, qui a été forgé par Lemaître et Friedmann dans les années 1930, puis développée et améliorée, tient extraordinairement bien la route. C'est le seul modèle scientifique de cosmologie qui soit fondé sur une théorie de physique fondamentale bien vérifiée - la relativité générale - et dont les prédictions s'accordent avec l'ensemble des observations astronomiques, et plus particulièrement les observations de 2003 sur le rayonnement fossile. Ces observations permettent vraiment pour la première fois de valider tout un ensemble de modèles. En effet il ne faut pas croire qu'il y ait « un » modèle de big-bang, il en existe plusieurs, en raison de plusieurs paramètres qui gouvernent les équations et qui, selon leurs valeurs, peuvent donner des solutions très différentes. Aujourd'hui, les observations sont affinées à quelques pourcent près, et permettent d'éliminer un certain nombre de modèles tout en favorisant une solution de big-bang à expansion perpétuelle accélérée. Bien entendu il y a encore quelques questions non résolues, ainsi que des théories alternatives tentant de décrire l'univers par d'autres modèles que ceux du big-bang. C'est normal, en science il est nécessaire de développer des théories contradictoires. Mais pour l'instant, ces théories-là sont très loin d'avoir un statut théorique et expérimental aussi solide que celle du big-bang.

Intervenante : Vous avez dit que le vide quantique représentait 72 % de l'univers. Est-ce que vous pouvez au moins nous en dire quelque chose ?

Jean-Pierre Luminet : Cette notion de vide quantique est effectivement une des questions non complètement résolues les plus fondamentales. La physique quantique existe depuis à peu près un siècle. Elle prédit et calcule que le vide, c'est-à-dire l'absence de particules, de champs de forces ou de rayonnements, ne se réduit pas à « rien » comme dans la physique classique, mais à un niveau d'énergie minimal qui est non nul. En cosmologie, il semblerait que cette énergie du vide gouverne l'évolution de l'univers, puisqu'elle représenterait grosso modo les 3/4 de l'énergie totale, et serait actuellement responsable de l'accélération de l'expansion de l'univers au cours du temps. Certains

modèles de cosmologie dits quantiques font également intervenir le vide à l'origine même de l'univers. On remplace alors la notion de point singulier d'où tout serait sorti, qui est une absurdité physique, par celle d'un vide quantique, réalité première et fondamentale, génératrice de tout chose. En effet, l'énergie du vide a tendance à fluctuer spontanément, un peu comme la surface d'un océan agité bouillonne et produit de grandes vagues. Le vide quantique fluctuerait aléatoirement, les grosses fluctuations engendreraient l'équivalent des gouttes de l'écume. Une goutte de l'écume du vide quantique se matérialisant en espace-temps-matière deviendrait un univers à part entière. Dans ce nouveau schéma, on fait exploser le cadre du big-bang traditionnel, puisqu'on a la possibilité d'un « plurivers », c'est-à-dire une multitude d'univers différents, tous jaillis de l'écume du vide quantique à des époques différentes et dans des conditions différentes, chaque univers vivant ensuite sa propre histoire.

Intervenante (Anouk Arnal): Je voudrais rebondir là-dessus, je me souviens du film « Le trou noir » de Walt Disney, qui fait partie de l'un de mes grands films de science-fiction de la fin des années 1970, où le trou noir était conçu comme un lieu de passage, justement peut-être d'un univers à l'autre. Mais cette lumière et cette énergie, où vont-elles ?

Jean-Pierre Luminet : Sur le plan purement cinématographique, je me permettrais de dire que le film de Walt Disney sur les trous noirs est l'un des films les plus calamiteux que j'aie vus. Je me souviens, l'époque où il a été projeté pour la première fois en France, à la fin des années 1970, a été l'occasion de ma première apparition publique en tant qu'astrophysicien. J'étais alors un tout jeune chercheur. Le cinéma Gaumont avait eu l'idée de faire une présentation en avant-première de ce film, et un journaliste scientifique connu, Robert Clarke, avait invité deux astrophysiciens pour commenter le film devant le public après la projection. Il avait donc invité Hubert Reeves, déjà très connu, et un inconnu nommé Jean-Pierre Luminet mais qui présentait l'avantage d'être l'un des rares spécialistes français du sujet. Voilà pour la petite anecdote.

Ce film utilise une idée qui n'est pas absurde, celle que les trous noirs pourraient être des portes de passage pour naviguer dans l'espace et le temps. Dans les équations de la relativité générale, il y a en effet la possibilité que le fond d'un trou noir ne soit pas bouché, mais qu'il pourrait être connecté à une autre région, soit de l'univers lui-même, soit d'autres univers, grâce à des sortes de tunnels d'espace-temps appelés « trous de ver », en anglais « wormholes ». Ceux-ci permettraient, si on pouvait les emprunter, de faire des voyages tout à fait stupéfiants dans l'espace et dans le temps en franchissant des distances phénoménales en un temps très bref, sans pour autant dépasser la vitesse de la lumière.

Ce sont des solutions qui existent dans les équations, mais on ne sait pas si elles se réalisent réellement dans l'univers. Pour l'instant, les trous de ver sont surtout exploités par les écrivains et les cinéastes de science-fiction, parce que l'on rêve depuis longtemps d'aller visiter les étoiles et les galaxies lointaines.

Intervenant (Michel Ban) : Vous avez commencé votre intervention par un parallèle entre les découvertes astrophysiques et ce qu'en pensaient deux philosophes majeurs à l'orée de l'humanité, Platon d'un côté, et les atomistes de l'autre. J'aimerais savoir où en est le dialogue, aujourd'hui, entre l'astrophysique et la philosophie, entre la physique et la métaphysique. Est-ce que nous en sommes toujours à ce postulat, qui me vient de mémoire de Heidegger, lequel en regard des dernières découvertes scientifiques sur l'univers, établit un constat sur la condition d'être humain voué à des horizons lointains et à une incertitude constante ? Est-ce que ce que vous avez indiqué à demi-mot sur la pluralité des mondes que nous dévoile l'astrophysique d'aujourd'hui est une préfiguration de ce que nous disent les philosophes post-modernes sur la pratique de tous les mondes possibles ? Est-ce que nous en sommes là, ou est-ce qu'il y a d'autres dialogues possibles ? Est-ce que vous croyez que ce dialogue existe encore, ou est-ce qu'il est mis en veilleuse aujourd'hui ?

Jean-Pierre Luminet : Le dialogue entre physique, astrophysique, métaphysique et philosophie est toujours extrêmement vivant. Évidemment, il a beaucoup évolué au cours des âges, dans la mesure où l'évolution de nos connaissances scientifiques a modifié certaines options philosophiques. Je ne voudrais pas critiquer la philosophie moderne, mais je ne suis pas sûr qu'Heidegger ait dit des choses beaucoup plus fondamentales que les philosophes des temps passés comme Platon, Spinoza ou Kant... Il y a toujours eu deux aspects dans la recherche : un aspect théorique et un aspect fondamental. Ces deux façons de faire la science ne sont pas du tout opposées, elles doivent au contraire s'épauler constamment l'une l'autre, se confronter en s'enrichissant et parfois en se détruisant en un dialogue permanent. Ceci nous renvoie à deux options philosophiques qui sont celles de Platon et d'Aristote. Vous connaissez sans doute la fresque de Raphaël, *L'École d'Athènes*, qui montre l'aréopage de tous les grands philosophes de l'Antiquité ayant contribué à une certaine vision du monde qui a imprégné l'Occident pendant de nombreux siècles. Au centre du tableau, on voit Platon et Aristote côte-à-côte, et Platon a le doigt levé vers le ciel pour bien signifier qu'il est l'idéaliste ; il croit qu'il existe des vérités transcendantales, qu'il appelle les Idéaux ; Aristote, au contraire, dirige sa main à plat vers le sol, comme s'il voulait dire à Platon qu'il faut avant tout explorer la réalité matérielle en classant, en observant, en expérimentant. La physique a toujours été dans cette dualité. L'idée que l'on ne perçoit qu'une infime partie de l'univers, et que le reste est dans un invisible que l'on essaie de décoder par des mathématiques et des théories fondamentales, renvoie au mythe de la caverne de Platon. Cette magnifique parabole de la condition humaine dont nous parle Platon dans « la République » nous dit que nous, êtres humains, sommes comme des esclaves enchaînés dans une caverne obscure. Il y a des flambeaux derrière nous mais on ne voit que les ombres qui se projettent sur la paroi, et on appelle « réalité » ces ombres ». Comme Platon est un idéaliste, il pense qu'il est possible de se libérer de nos chaînes par la discipline de l'esprit, les mathématiques, la musique, la philosophie, pour accéder à la réalité du monde et atteindre les Idéaux à partir des ombres. C'est ce que tente de faire la physique théorique d'aujourd'hui. À travers les ombres et les faibles lumières que nous percevons, on essaie de reconstituer, par des modèles mathématiques très sophistiqués, une réalité beaucoup plus riche et beaucoup plus complexe. D'un autre côté, il y a la démarche aristotélicienne, celle du physicien expérimentateur, qui met constamment les théories à l'épreuve de l'expérience, en élimine la plupart pour n'en laisser subsister que quelques-unes. L'avancée de la recherche scientifique a toujours été fondée sur le dialogue permanent entre ces deux visions philosophiques de la connaissance.