

Jean-Pierre Luminet

Directeur de recherche au C.N.R.S.

Astrophysicien à l'Observatoire de Paris-Meudon

Laboratoire Univers et Théories

## **Espaces parallèles en science et dans les arts visuels**

**session 7 : lundi 19 juin 1995**

JEAN-PIERRE LUMINET : Qui dit représentation de l'espace dit géométrie. Pour commencer je parlerai donc de l'invention même de la géométrie, au temps des Grecs, et de l'utilisation des sphères et des polyèdres pour représenter l'architecture de l'univers. Ensuite j'aborderai le monde des illusions d'optique et des figures dites "impossibles", qui mettent en jeu les limitations de notre système visuel. Puis je traiterai la notion « d'espace élastique », dont l'introduction en physique, à travers la relativité générale d'Einstein, a marqué une grande révolution dans nos conceptions scientifiques sur la structure de l'univers. J'aborderai notamment les thèmes des distorsions de l'espace-temps engendrées par les trous noirs et le big-bang. Je mentionnerai quelques grands principes de symétrie utilisés dans les représentations de l'espace aussi bien scientifiques qu'artistiques. Je m'attarderai plus particulièrement sur les problèmes de pavage des espaces et je finirai sur les modèles "d'univers chiffonné", sortes de mirages cosmiques généralisés sur lesquels je travaille depuis quelques années, et qui modifient radicalement le rapport entre l'espace réel et l'espace perçu.

### **Sphères, polyèdres et cosmos**

Si nous ouvrons un dictionnaire et que nous cherchons la définition du mot : espace, nous trouvons ceci : "étendue indéfinie qui contient tous les objets ". C'est une définition assez vague qui correspond à celle que les Grecs pouvaient se donner il y a plus de 2000 ans. Mais il est clair que les physiciens et les mathématiciens, aussi bien que les artistes, ont besoin d'une définition plus précise. Les règles qui permettent de définir et de décrire l'espace sont celles de la géométrie. Il s'agit de la branche des mathématiques qui s'occupe non seulement des propriétés des figures dans l'espace, mais aussi des propriétés de l'espace lui-même. Selon la légende, la géométrie a été fondée au VI<sup>e</sup> siècle avant J.-C. par Thalès de Milet. A cette époque, nombre de philosophes grecs accomplissaient une sorte de voyage initiatique en Égypte, source de la civilisation. Thalès aurait inventé la géométrie en observant les triangles d'ombre portés par les grandes pyramides : il aurait eu l'idée de mesurer la hauteur des pyramides en mesurant la longueur de leur ombre au moment précis de la journée où la longueur de l'ombre de son propre corps était égale à sa hauteur réelle. On reconnaît là le théorème des triangles semblables.

A partir de Thalès, les règles de la géométrie élémentaires vont se développer. Chacun sait qu'elles ont été portées à un premier point de perfection par Euclide, qui œuvra à Alexandrie au III<sup>e</sup> siècle av. J.-C. Les *Éléments* d'Euclide, conservés par les Arabes après la destruction d'Alexandrie, puis redécouverts en Occident et traduits au début du Moyen Âge, ont eu une grande influence à la Renaissance. Influence sur les mathématiques et la géométrie, bien entendu, mais aussi sur l'art, puisque c'est sur les théorèmes des *Éléments* que sont fondés les règles de la perspective... Influence également sur la cosmologie, la science qui traite de la représentation de l'univers dans sa globalité. Les premiers Grecs, dont Thalès, élaborèrent déjà des systèmes du monde, c'est-à-dire qu'ils tentèrent de bâtir une véritable architecture cosmique et de représenter géométriquement l'organisation de l'univers... Platon et Aristote ont notamment énoncé des lois générales visant à décrire l'organisation du système du monde. Ces systèmes sont fondés sur des considérations géométriques, plus précisément sur des principes de symétrie. Cette idée purement « esthétique » se retrouve tout au long de l'histoire des sciences physiques : l'organisation de l'univers est supposée obéir à des principes de beauté, et la beauté s'exprime par la symétrie, les « justes proportions ». Dans le *Timée*, Platon discute des symétries de la nature, et de la façon dont ces symétries peuvent expliquer l'organisation du cosmos. Il considère en premier lieu la figure parfaite entre toutes, la sphère. En effet, on peut faire tourner la sphère dans n'importe quel sens, elle ne change pas d'aspect. Dans le langage géométrique moderne, on dit que la sphère est invariante sous le groupe des rotations continues de l'espace à trois dimensions. ... Platon discute ensuite d'autres figures régulières, mais pas aussi parfaites que la sphère : les polyèdres réguliers. Ces figures sont invariantes sous certaines rotations de l'espace, mais pas sous toutes.

Prenons par exemple un cube. Pour qu'il reste exactement identique à lui-même, vous ne pouvez pas le faire tourner de n'importe quel angle. Il faut trouver l'angle précis (en l'occurrence 90°) qui ramène une face exactement à l'identique, et cela dans les trois directions...

Platon généralise donc les idées de symétrie à toute l'organisation de l'univers. Il propose un modèle qui va rester fermement ancré pendant pratiquement 2000 ans dans l'histoire de la physique, à savoir que : premièrement, pour représenter le ciel, habitacle des Dieux, donc nécessairement parfait, il faut se fonder sur un système de sphères emboîtées. D'ailleurs, ne voit-on pas des cercles dans le ciel en observant le mouvement des astres ? Deuxièmement, tout ce qui se déroule ici-bas, sur terre, est imparfait. Les êtres vivants naissent, vieillissent et meurent. Les corps matériels s'altèrent. Pour représenter l'imperfection du monde terrestre, Platon utilise les polyèdres réguliers... Une découverte géométrique très importante, connue de Platon, nous apprend qu'il n'existe que cinq polyèdres réguliers possibles. : le tétraèdre (ou pyramide); l'hexaèdre (ou plus simplement le cube) ; l'octaèdre, qui a huit faces triangulaires; l'icosaèdre, qui a 20 faces triangulaires ; et enfin le dodécaèdre, avec 12 faces pentagonales... Partant de là, Platon a associé les polyèdres aux cinq éléments constitutifs du monde matériel, à savoir le feu, la terre, l'air, l'eau et la quintessence. L'idée de Platon, développée par Aristote, sera adoptée pendant des siècles pour fonder la cosmologie de l'âge classique. Dans le ciel, c'est-à-dire dans le monde supra lunaire, règne la perfection symbolisée par des sphères et des cercles. Dans le monde sublunaire (de la terre à la lune) règnent l'imperfection et le changement, caractérisés par les éléments – de bas en haut : terre, eau, air, feu, quintessence, représentés géométriquement par les polyèdres réguliers.

Les représentations de polyèdres se trouvent dans toute l'histoire de l'art. Dans le livre très fameux de l'humaniste Luca Pacioli, *La divine proportion* (1509), les gravures ont été réalisées par Leonardo da Vinci et une partie du texte a été rédigée par Piero della Francesca. A cette époque, l'interaction était très forte entre les artistes, qui réfléchissaient sur la meilleure façon de représenter la nature, et les mathématiciens, qui développaient les grands principes de la géométrie euclidienne. L'invention de la perspective date de cette période.

Serge Fauchereau : Pouvez-vous nous parler un peu de la quintessence ?

J-P. L. : La quintessence est ce que plus tard on appellera éther, c'est-à-dire le milieu immatériel dans lequel baignent les éléments. J'y reviendrai plus tard car la notion s'est transformée au cours de l'histoire, et joue encore aujourd'hui – bien que sous une autre forme appelée "énergie du vide" – un rôle capital dans nos modélisations cosmologiques.

Permettez-moi d'abord de poursuivre la description du système du monde aristotélicien, qui a été perfectionné sur le plan astronomique par Ptolémée au II<sup>e</sup> siècle après J.-C. Ce fameux système, qui place notamment la Terre au centre de l'univers et les planètes selon des orbites circulaires autour de la Terre, tiendra jusqu'au XVI<sup>e</sup> siècle... comme l'illustre fort bien cette gravure de 1544.

L'élément terre est au centre, au-dessus l'eau, puis l'air, et le feu... Le premier cercle que l'on rencontre en s'élevant est celui de la Lune. A partir de là, on trouve un ensemble de sphères emboîtées les unes dans les autres, représentant les orbites des différents corps célestes, tous censés tourner autour de la Terre... Le Soleil, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. Ce sont les seules planètes visibles à l'œil nu. Au-delà, il y a la voûte étoilée, appelée sphère des fixes. En effet les étoiles étaient censées ne jamais changer, et toutes situées à la même distance, semblables à des clous dorés fixés sur une immense sphère de cristal qui englobait le Monde. Hormis le mouvement de rotation général, les étoiles se trouvent toujours dans la même position relative, c'est pour cela que les Anciens les ont regroupées en constellations, avec des figures bien connues comme la Grande Ourse, Cassiopée, Orion, etc. L'immuabilité du ciel des fixes allait bien dans le sens de la perfection : ce qui ne change jamais est nécessairement parfait. En revanche, les planètes se déplacent légèrement au cours de l'année, par rapport au fond d'étoiles fixes. L'étymologie du mot planète signifie précisément « astre errant ».

B : Comment expliquaient-ils la nuit ?

J-P. L. : En considérant que le Soleil passait de l'autre côté de la Terre. Pour les Anciens, la Terre ne tournait pas sur elle-même, mais c'était l'ensemble des corps célestes qui tournait autour d'elle, ce qui revient au même du point de vue des apparences et de l'alternance jour-nuit... On dit souvent que les Grecs croyaient que la Terre était plate, mais c'est tout à fait inexact. Déjà à l'époque de Pythagore, au VI<sup>e</sup> siècle av. J.-C., les Grecs savaient que la Terre est ronde. Ératosthène, au III<sup>e</sup> siècle av. J.-C., a même fait des mesures purement géométriques pour déterminer la circonférence de la Terre. Il avait entendu dire par des caravaniers que dans une ville du sud de l'Égypte nommée Syène (aujourd'hui Assouan, près de la frontière avec le Soudan), se trouvait un grand puits, et qu'un certain jour de l'année, le Soleil, au zénith, dardait directement ses rayons au fond du puits. Ce jour spécial n'était autre que le solstice d'été, le 21 juin. Or, Ératosthène savait que dans sa ville d'Alexandrie, le même jour, à midi, un bâton vertical avait une ombre. Courte, certes, mais une ombre. Si la Terre était plate, un tel écart ne se produirait pas. Ensuite, au moyen des

règles de la géométrie euclidienne, Ératosthène a calculé cet angle formé par les rayons du Soleil avec la verticale. Il a trouvé  $7^{\circ}2'$ , c'est-à-dire  $1/50$  de cercle. Pour obtenir la circonférence de la Terre, il faut donc multiplier par 50 la distance qui sépare Alexandrie et Syène. Ératosthène aurait notamment interrogé les caravaniers pour leur demander combien de jours il fallait pour aller à dos de chameau de Syène à Alexandrie. À partir de ces données, il a déduit une valeur de la circonférence terrestre très proche de 40 000 km, qui est la valeur mesurée aujourd'hui par des moyens autrement puissants. Un véritable exploit intellectuel et pratique !

Le couronnement de l'astronomie sphérique de Ptolémée se matérialise dans un livre du XVI<sup>e</sup> siècle qui est à la fois une œuvre d'art et une œuvre scientifique. *L'Astronomie des Césars*, écrite par l'astronome allemand Apianus, est dédiée à l'empereur Charles Quint et à son frère, le roi Ferdinand. Apianus a réalisé une sorte de livre-univers. À l'aide d'un ensemble de disques de carton amovibles, de règles graduées et de fils, il a construit des « instruments de papier » permettant de faire de l'astronomie pratique, par exemple calculer la position céleste de Mars en l'an 600 av. J.-C., la conjonction de Vénus en 1300 ou les éclipses de Lune et de Soleil.

Ce livre date de 1540, c'est aussi la date à laquelle commence la première grande révolution astronomique - en Pologne, Copernic publie *De la révolution des ordres célestes*, où il propose un système du monde non plus centré sur la Terre mais centré sur le Soleil. La théorie de Copernic n'aura pas dans l'immédiat une grande influence, il faudra à peu près un siècle et une succession d'événements astronomiques remarquables pour faire basculer le vieux système aristotélicien et aboutir à une nouvelle représentation du cosmos. L'un des premiers événements date de 1572. Dans la constellation de Cassiopée, une étoile nouvelle est apparue dans le ciel. Elle est restée visible, très brillante, pendant plusieurs semaines, ensuite elle a disparu. L'astronome Danois Tycho Brahe a suivi l'évolution de cet astre et a fait des mesures précises pour aboutir à la conclusion qu'il s'agissait bien d'une étoile, et non pas d'une nouvelle planète, d'une comète ou d'un quelconque astre errant. Mais alors, comment une étoile nouvelle pouvait-elle apparaître dans la sphère des fixes réputée immuable ? Ce fut le premier coup sérieux à la représentation du monde en vigueur depuis Platon, Aristote et Ptolémée. D'autant qu'en 1610, Galilée utilise pour la première fois une lunette astronomique. Il découvre que la Lune n'est pas parfaite mais est de même nature que la Terre, avec ses cratères, ses montagnes et ses vallées. Il découvre quatre satellites tournant autour de Jupiter, ce qui fait de Jupiter une sorte de système solaire en miniature... Le couronnement de cette révolution astronomique progressive, c'est Kepler. Ce génial théoricien était myope et ne pouvait donc faire d'observations astronomiques précises. À la place il faisait marcher son intellect et sa prodigieuse intuition. C'est lui qui a réussi le plus grand exploit de cette époque : en découvrant par le calcul la nature elliptique de trajectoires planétaires, il a réussi à débarrasser l'astronomie de la tyrannie des cercles et des sphères parfaites... Pendant huit ans, Kepler a analysé les observations de Tycho Brahe sur les positions étrangement changeantes de Mars. Ces mouvements apparents étaient précédemment expliqués par de complexes compositions de mouvements circulaires (la théorie des épicycles). Kepler a mis à jour la forme elliptique de l'orbite martienne, et a généralisé cette loi à l'ensemble des planètes dans le cadre du système héliocentrique.

Remarquons que cette révolution scientifique se déroule au même moment où l'ellipse fait son apparition dans l'architecture baroque : elle apparaît dans les voûtes d'églises baroques, notamment dans le sud de l'Allemagne. Ceci est un autre exemple des

conjonctions entre les représentations du monde élaborées par les scientifiques et les préoccupations esthétiques des architectes et plasticiens.

Un autre fait marquant de cette révolution astronomique est ce que l'historien des sciences Alexandre Koyré a appelé le "passage du monde clos à l'univers infini". Il n'était en effet plus possible de garder l'idée d'une sphère des fixes parfaitement immuable marquant la frontière d'un monde clos et petit. Il semblait dès lors que les étoiles devaient plutôt se répartir dans un espace très vaste, voire infini... Or, l'espace infini ne pouvait se traduire, en termes mathématiques, que par l'espace euclidien, celui dans lequel les parallèles ne se recoupent qu'à l'infini, où la somme des angles d'un triangle est égale à  $180^\circ$ , etc.

C'est donc avec des savants comme Patrizzi, Descartes et surtout Newton que pour la première fois de l'histoire, l'espace physique, "réel", sera identifié à un espace mathématique "abstrait" ...

Cette gravure illustre de façon pittoresque le passage du monde clos à l'univers infini, en montrant un astronome qui désormais va regarder au-delà de la sphère des fixes, qui n'est plus dès lors que la sphère des apparences, pour découvrir les véritables mécanismes du monde.

Si la géométrie euclidienne n'a été considérée qu'assez tard dans l'histoire des représentations scientifiques de l'espace - au XVII<sup>e</sup> siècle, elle a utilisée beaucoup plus tôt par les peintres de la Renaissance qui tentèrent de représenter fidèlement la Nature, plus précisément de projeter une scène à trois dimensions sur un support à deux dimensions. Pour cela, il fallait des règles géométriques précises. C'est d'abord Brunelleschi, le fameux architecte du Duomo de Florence, qui a esquissé les règles de la perspective. Ces règles ont été formalisées en 1436 dans le traité *De la peinture*, d'Alberti. Oeuvre capitale pour l'histoire de l'art, car Alberti donne là les règles formelles permettant de représenter correctement l'espace réel, et notamment l'impression de lignes ou de points à l'infini, à l'intérieur d'un cadre fini bidimensionnel. Plus généralement, on y trouve une tentative pour définir la beauté de façon rationnelle, à partir de l'idée qu'elle réside en l'harmonie réciproque des parties et du tout. Vous connaissez bien entendu le nombre d'or : c'est la recherche de la juste proportion. Celle-ci est définie de façon à ce que le rapport entre la plus petite partie et la plus grande partie soit égal au rapport entre la plus grande partie et le tout. Passons sur les calculs, mais en bref c'est la solution d'une équation du deuxième degré, qui vaut 0,618. Pratiquement toutes les œuvres d'art de l'époque, qu'il s'agisse d'arts graphiques à deux dimensions ou d'architecture à trois dimensions, sont fondées sur ce nombre d'or. Par exemple, les villas de Palladio (1508-1580) sont construites sur ce schéma et, au dire de leur propre créateur, elles "sonnent juste" ...

Un artiste majeur de la Renaissance se trouve au cœur de toutes ces interrogations sur les rapports entre géométrie et espace réel. Il s'agit de Dürer (1471-1528). Il a notamment joué un rôle capital dans les recherches sur la perspective. C'est lui qui a importé dans les écoles du Nord les nouvelles règles issues de l'école italienne, et il les a lui-même approfondies à travers un traité de géométrie qu'il a écrit.

°L'une de ses gravures symbolise ces recherches : il s'agit du *Perspectographe*, où l'artiste se représente lui-même en train de dessiner sur une feuille plane une femme nue, couchée dans l'espace tridimensionnel. Dürer interpose entre lui et le modèle un cadre quadrillé, qui

préfigure les systèmes de coordonnées cartésiennes qui ne seront utilisés en mathématiques qu'au XVII<sup>e</sup> siècle!

° Albrecht Dürer, en 1515, a gravé sur bois les premiers planisphères représentant le ciel dans sa totalité. Ces planisphères ont ouvert la voie à un renouveau de l'uranométrie - discipline qui traite des cartes célestes. Les positions des étoiles sont fixées avec la précision du catalogue de Ptolémée. Les figures sont artistiquement dessinées, dans un style ne présentant aucune ressemblance avec les représentations antérieures des constellations. Dans sa carte de l'hémisphère Nord, Dürer a ajouté aux quatre coins les portraits imaginaires d'astronomes célèbres, représentant les nations dominantes qui avaient contribué à l'uranométrie : Aratus Cilix (le Grec Aratos), Manilius Romanus (le Romain Manilius), Ptolemeus Aegyptius (l'Égyptien Ptolémée) et Azophi Arabus (l'Arabe al-Sufi). La carte de l'hémisphère Sud est beaucoup plus sommaire, Dürer ne disposant d'aucune donnée sur les régions du ciel austral invisibles en Europe.

° Voici son œuvre connue sous le nom de *Melancholia* ... Cette eau-forte, datée de 1514 d'après le carré latin qui y figure, évoque une rêverie sur la nature du monde selon un état de mélancolie que la vision médiévale associait à "l'humeur noire", à la dépression et à la planète Saturne. Le personnage ailé préfigure de façon troublante l'interrogation créative de Kepler sur l'usage des sphères et des polyèdres pour représenter l'harmonie secrète du monde. Dans le ciel luit un astre que l'on peut identifier à la grande comète de l'hiver 1513-1514. Tendant vers le signe zodiacal de la Balance, elle annonce, sinon la fin des temps, du moins l'achèvement d'un cycle du monde. L'échelle à sept degrés rappelle la croyance des Grecs byzantins selon laquelle l'âge du monde ne dépasserait pas sept mille ans.

Tout au long du XVI<sup>e</sup> siècle vont se développer des études à la fois géométriques et artistiques sur les polyèdres... Voici un très beau livre publié à Nuremberg en 1568 : *La perspective des corps réguliers*. Cet ouvrage de Wentzel Jamnitzer (1508-1585) est un chef-d'œuvre de l'art géométrique. Les gravures offrent d'étonnantes variantes sur les cinq corps platoniciens et des constructions en forme de polyèdres étoilés que Kepler décrira mathématiquement cinquante ans plus tard, en 1619. Le rapport que Kepler a entretenu avec les polyèdres est riche d'enseignements sur la façon dont fonctionne l'imaginaire créatif du savant, ce qui le rapproche en cela beaucoup de l'artiste. Tout novateur qu'il soit, Kepler est l'auteur de deux cosmogonies complètes dans l'esprit de l'Antiquité : *Mysterium cosmographicum* (*Le Secret du monde*) en 1596 et *Harmonices mundi* (*L'Harmonie du monde*) en 1619. A cette époque charnière entre Antiquité et pensée moderne, il reste imprégné d'une tradition qui lie explicitement cosmologie et harmonie divine. Mais ce que Kepler cherche à retrouver n'est nullement le mysticisme des nombres des pythagoriciens. Il prend pour point de départ les figures géométriques comme étant des « choses de raison ». Par sa volonté marquée de donner une explication rationnelle du monde, il fonde donc une démarche proche de celle des scientifiques modernes. Dans son *Secret du monde*, rédigé à l'âge de vingt-cinq ans, Kepler fait appel à la géométrie d'une manière originale pour résoudre le problème des rapports des orbites planétaires. Selon lui, les cinq polyèdres doivent correspondre exactement aux cinq intervalles entre les six planètes connues (Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne). Il inscrit un octaèdre entre les orbites de Mercure et de Vénus, un icosaèdre entre Vénus et la Terre, un dodécaèdre entre la Terre et Mars, un tétraèdre entre Mars et Jupiter, et un cube entre Jupiter et Saturne. Après de nombreux calculs, Kepler voit les solides platoniciens s'insérer les uns après les autres avec précision entre les orbites appropriées. Il démontre mathématiquement que les solides platoniciens s'agencent l'un dans l'autre d'une manière

unique, selon une architecture en correspondance exacte avec celle du système solaire. Pour Kepler, cela ne saurait être un hasard : persuadé d'avoir découvert le « secret du monde », il interprète cette correspondance comme une manière nouvelle et rationnelle de rendre compte de l'harmonie fondamentale qui règne dans le ciel.. Son imagination débordante lui suggère de prolonger cette référence à l'harmonie en faisant appel au sens du goût. Il entreprend le projet d'une "coupe cosmique", véritable distributeur de boissons choisies et préparées en correspondance avec les polyèdres et les harmonies planétaires. En février 1596, Kepler se rend à la cour de son protecteur, le duc Frédéric de Wurtemberg, pour le persuader de faire construire une maquette de l'Univers en forme de coupe. Les symboles des planètes seraient taillés dans des pierres précieuses : un diamant pour Saturne, une hyacinthe pour Jupiter, une perle pour la Lune, etc.. La coupe verserait plusieurs breuvages, que des tuyaux dissimulés amèneraient de chaque sphère planétaire à sept robinets disposés sur le rebord. Mercure fournirait du marc, Vénus de l'hydromel, Mars un fort vermouth, et ainsi de suite... Le projet, trop coûteux, n'aboutit pas.

Kepler ne pourra jamais se détacher vraiment de cette vision du monde, même s'il abandonnera la stricte correspondance entre polyèdres et orbites planétaires en 1609, après avoir découvert que ces orbites, elliptiques et non pas circulaires, ne pouvaient s'insérer dans un tel schéma. Mais c'est bien sa recherche passionnée d'une harmonie sous-jacente qui l'a aiguillé vers les trois lois des mouvements planétaires restées fameuses, et qui traduisent en quelque sorte la négation de son idée initiale. Plus tard, Kepler réutilisera les polyèdres pour décrire certains phénomènes naturels, notamment les cristaux. En observant des flocons de neige, il eut l'intuition que leur structure microscopique était fondée sur les polyèdres réguliers étoilés. À partir de là, Kepler écrit le premier traité de cristallographie, "*La neige sexangulaire*".

Il n'est pas inutile de préciser qu'aujourd'hui encore, les physiciens théoriciens qui essaient d'élaborer des théories très compliquées décrivant les interactions fondamentales de la nature continuent à utiliser, non plus des sphères et des polyèdres, mais des groupes de symétrie – qui traduisent finalement la même chose : l'idée d'un ordre caché.

### **Les figures impossibles**

Je vais momentanément interrompre le cours de l'histoire des représentations cosmologiques pour parler de figures qui, justement, désobéissent aux règles de la perspective pour créer des altérations de notre perception.

Deux catégories de figures posent des problèmes à notre système visuel : les figures ambiguës et les figures impossibles.

° Les figures ambiguës ont été utilisées par un certain nombre d'artistes, notamment Vasarely. Vous reconnaissez ici un exemple très connu d'un motif cubique ambigu, que l'on peut percevoir à la fois convexe ou concave selon la façon dont on ajuste son système mental. Tout un mouvement artistique, celui de l'Optical Art, dont Vasarely est un exemple médiatisé, a utilisé ce genre de motifs.

° Ceci est une autre figure ambiguë bien connue, dans laquelle on voit soit une sorte de vase si l'on se concentre sur l'intérieur, soit deux visages qui se font face si l'on se

concentre l'extérieur. Voici une autre figure ambiguë intitulée *Ma femme et ma belle-mère*. Est-ce que vous voyez pourquoi ?

Artiste : Une vieille femme et une jeune femme.

J-P. L. : Exactement ! ...A noter que, quand on se fixe un certain temps sur l'une des deux images possibles, par exemple celle de la vieille femme, il devient de plus en plus difficile de passer à l'autre représentation... Il faut faire un effort mental plus grand... Le grand Salvador Dali a magistralement utilisé des figures ambiguës dans nombre de ses toiles.

° Passons maintenant aux figures impossibles. En voici une appelée *triangle de Penrose*. C'est un objet tridimensionnel représenté en deux dimensions, mais on s'aperçoit que si on voulait réellement construire cet objet dans l'espace à trois dimensions, ce serait tout bonnement impossible.

Artiste : C'est de quelle année ?

J-P. L. : Je vais justement faire un bref historique de ces figures impossibles. En 1958, le jeune mathématicien Roger Penrose – qui est toujours vivant et en activité – travaillait avec son père qui lui, était psychologue... En griffonnant de petits dessins sur une feuille de papier, il s'est aperçu qu'il avait trouvé un motif étrange ressemblant à première vue à un triangle, mais un triangle absolument impossible à construire dans l'espace normal ... Les Penrose se sont demandés s'il s'agissait là d'une "découverte". Et une découverte de quelle nature ? mathématique ? psychologique? Finalement ils ont publié un article décrivant plusieurs figures impossibles dans un journal de psychologie. En retour, ils ont été contactés par des artistes, notamment Mauritz Cornélius Escher, qui leur ont signalé qu'ils dessinaient depuis longtemps des figures impossibles, sans savoir qu'il s'agissait de choses mathématiques nouvelles et étonnantes!

° Pourquoi une figure impossible pose-t-elle un problème particulier à notre système de perception ?...Parce que, devant une figure impossible, notre cerveau se trouve aux prises avec deux propositions contradictoires : il "voit" clairement un objet, mais cet objet est un non-objet dans la mesure où on ne peut pas le fabriquer matériellement. Notre système mental est donc capable de se figurer des non-objets...

° A la suite des recherches de Penrose, des historiens d'art s'y sont intéressés et ont découvert des figures impossibles, volontaires ou involontaires, dans des œuvres bien antérieures à la publication de cet article (par exemple chez Piranèse, Hogarth et Duchamp)... Après avoir contacté Penrose, Escher a collaboré avec lui et produit de nouvelles œuvres qui intégraient leurs découvertes. C'est un exemple intéressant de transfert des connaissances des scientifiques vers les artistes. Ce transfert peut même fonctionner en sens inverse, puisque certaines estampes de Escher, issues de ses recherches empiriques, ont permis à des mathématiciens de développer des branches nouvelles des mathématiques, notamment dans le domaine de la topologie.

° Voici quelques gravures très connues de Escher... Le *Mouvement Perpétuel* utilise le triangle impossible de Penrose... La *Montée et descente* montre un escalier impossible, que l'on peut monter et descendre indéfiniment, tout en restant sur le même plan... Évidemment, toutes les figures impossibles trichent avec la représentation de l'espace et les règles de la perspective, mais c'est tellement bien fait qu'on ne s'en aperçoit pas facilement.

° Artiste : Cela date de quand ?

J-P. L. : Ces gravures de Escher datent des années 50-60. Il existe plusieurs ouvrages intéressants sur l'œuvre de Escher et sur son interprétation à la lueur des mathématiques. Par exemple *Escher, Art et Science* sont les actes d'un colloque tenu dans les années 1980. Le livre de Bruno Ernst, *Le monde des illusions d'optique*, traite de façon détaillée des figures ambiguës et des figures impossibles...

° Bruno Ernst a lui-même réalisé des figures impossibles... Cette photographie par exemple, ressemble vraiment à une photographie réelle, mais elle est truquée. En haut, on reconnaît *le triangle de Penrose* avec une fleur au milieu. L'œuvre date de 1985.

Pour clore ce deuxième chapitre sur les figures impossibles, j'ose vous montrer une de mes œuvres, une gravure de 1992 intitulée "trou noir", qui crée une illusion d'optique en violant de façon assez simple les règles de la perspective... Selon ces règles, si on représente la ligne d'horizon, les points de convergence à l'infini sont situés sur cette ligne... Si vous introduisez un troisième point de fuite non situé sur la ligne d'horizon, vous introduisez des déformations optiques... Dans mon dessin j'ai effectivement introduit un point de fuite placé largement au-dessous de la ligne d'horizon, et qui donne l'illusion que le carrelage, pourtant rectiligne, est concave et incurvé, comme courbé sous le poids de la cathédrale en ruine qui pèse dessus...

### **L'espace élastique**

° Cette gravure me permet de faire la transition avec mon troisième chapitre, celui qui traite de *l'espace élastique*. C'est un terme imagé pour aborder une théorie compliquée, la relativité générale d'Einstein, qui au début du XX<sup>e</sup> siècle a complètement chamboulé les idées que l'on se faisait sur la nature de l'espace, du temps et de la gravité. En deux mots, elle traite de l'influence que la matière et l'énergie exercent sur la forme même de l'espace, le rendant d'une certaine façon élastique.

Avant Einstein régnait la théorie de Newton, exprimée dans ses *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, publiés en 1687. Dans le système du monde newtonien, il y avait un espace défini a priori, existant de toute éternité, et dont l'étendue correspondait exactement à l'espace euclidien. La nature de cet espace était indépendante de tout observateur : la longueur d'une règle était la même pour tous, que l'on soit en mouvement ou au repos par rapport à la règle. De même pour les intervalles de temps. Espace et temps absolus formaient donc un cadre pré-établi, à l'intérieur duquel il s'agissait de décrire le mouvement des corps matériels à l'aide de la mécanique. Nous avons tous appris les lois de la physique newtonienne à l'école, notamment la loi de l'attraction universelle supposée décrire la gravité. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, les progrès de la physique ont indiqué aux chercheurs qu'il fallait changer de représentation. Il fallut notamment abandonner l'idée que les mesures d'espace et de temps étaient absolues. En d'autres termes, lorsqu'une règle ou une horloge sont en mouvement relatif par rapport l'observateur à une vitesse importante, disons proche de celle de la lumière, la mesure des intervalles d'espace et de temps est élastique. Les longueurs se contractent et les temps se dilatent. Il faut donc bien abandonner les notions de temps absolu et d'espace absolu, existant indépendamment de l'observateur. La théorie de la relativité propose ainsi un mariage subtil entre l'espace et le temps, qui donne l'espace-temps, et de plus, les corps massifs confèrent à cet espace-temps des propriétés géométriques nouvelles, qui ne sont plus euclidiennes. Pour vous permettre de mieux visualiser ce dont je vous parle, je vous ai apporté une pièce de tissu

élastique (en l'occurrence un morceau de bas résille) qui figure l'espace-temps réduit à deux dimensions. Si je place une boule représentant un corps massif comme une étoile, il est clair que le tissu s'incurve autour de la boule. Or, la masse engendre la gravitation. Donc, en relativité générale, la gravitation n'est pas le résultat d'une force attractive mystérieuse émise par le Soleil, ce n'est qu'une manifestation de la géométrie courbe de l'espace-temps. La démarche est on ne peut plus platonicienne : le phénomène purement physique de la gravitation est complètement géométrisé. C'est pour cela que la théorie de la relativité générale exige un nouveau cadre mathématique, qui est celui des géométries non euclidiennes, découvertes au XIX<sup>e</sup> siècle. Un certain nombre de mathématiciens tels que Gauss, Riemann et Lobatchevski avaient en effet imaginé l'existence possible d'espaces abstraits différents de l'espace euclidien, en l'occurrence des espaces courbes. Pour visualiser la forme d'un espace courbe, la lumière joue un rôle fondamental, en ce sens que ses trajectoires épousent toujours la forme naturelle de l'espace, ce qui permet d'en faire une sorte de maillage visualisable. Plus précisément, la lumière emprunte toujours le plus court chemin pour aller d'un point à un autre, ce que l'on appelle une géodésique. Dans l'espace ordinaire, qui n'a pas de courbure, les rayons lumineux se propagent en ligne droite ; l'espace euclidien est donc tissé par un réseau rectiligne, semblable à ce morceau de bas résille plat. Mais dès que je considère un corps massif, le Soleil par exemple, de la courbure s'introduit et modifie la forme du tissu. Ce que l'on pourra vérifier en observant que les trajectoires des rayons lumineux sont déviées en passant près du Soleil ... ce qui a été fait dès 1919 lors d'une éclipse totale de Soleil !

Dans la théorie de la relativité générale, plus un corps est massif, plus la courbure de l'espace-temps qu'il engendre est importante. Les astrophysiciens ont imaginé un type d'astre capable de causer une déformation tellement profonde du tissu élastique de l'espace-temps qu'il engendre un puits dont rien ne peut sortir : c'est un trou noir. Les rayons lumineux eux-mêmes – qui suivent toujours la trame du tissu – sont capturés au fond du trou noir. S'ils pénètrent dans une zone critique marquant la surface du trou noir, tous les objets matériels sont capturés : les particules, les fusées, les cosmonautes.

° Dans ma propre démarche artistique, j'ai voulu représenter de façon symbolique le mariage relativiste entre espace, temps et matière à travers une série de gravures... Celle-ci, que je vous ai déjà montrée, intitulée *Trou noir*, représente l'espace courbe, creusé par le puits vertigineux d'un trou noir. La gravure suivante, *Chronos*, représente plutôt le temps et les phénomènes d'irréversibilité qui lui sont liés... La suivante, *Big bang*, représente la génération et la structuration progressive de la matière au cours de l'histoire cosmique... Enfin, *Espace - Temps - Matière* regroupe, toujours de façon symbolique, des éléments des trois précédentes. L'oiseau représente l'envol d'une nouvelle physique, la physique relativiste et quantique...

Voici maintenant une vraie photographie du ciel qui montre une manifestation optique engendrée par la courbure de l'espace : un mirage gravitationnel, qui matérialise en quelque sorte à nos yeux (équipés de grands télescopes) la courbure relativiste.. Dans un mirage gravitationnel, la lumière d'une source lumineuse très lointaine (quasar ou galaxie) est déviée par la masse d'un objet (amas de galaxies) situé plus près sur la même ligne de visée. Il en résulte multiplication, amplification, ou déformation de l'image de la source.

° Ce cliché du télescope spatial *Hubble* révèle plusieurs objets bleutés de forme incurvée, qui sont les images multiples de la même galaxie. Cette illusion d'optique est créée par un amas de galaxies situé au centre de la photographie, de couleur jaune. Son gigantesque champ gravitationnel agit comme une lentille optique : la lumière qui le traverse est déviée, si

bien que l'image des objets plus lointains situés derrière l'amas est démultipliée, amplifiée et distordue. Dans ce cliché, la lumière émise par la galaxie lointaine, une spirale, s'est divisée en cinq faisceaux en traversant l'amas. L'une des cinq images résultantes est proche du centre, les autres sont réparties autour. Chaque image de la spirale est incurvée en forme d'arc. L'amas jouant le rôle de lentille est situé à 5 milliards d'années-lumière, dans la constellation des Poissons, tandis que la galaxie bleue se trouve environ deux fois plus loin.

° Voici maintenant les distorsions optiques les plus extrêmes engendrées par la courbure de l'espace, celles provoquées par les trous noirs... Aucun trou noir n'a été observé d'assez près pour en obtenir des images photographiques. Ces images sont donc le résultat de calculs d'ordinateur. Un aspect qui m'a toujours particulièrement intéressé dans la recherche scientifique concerne justement tout ce qui pose un problème de visualisation. L'exemple type est bien sûr celui du trou noir. Par sa nature même, le trou noir est invisible : il ne laisse échapper ni matière ni lumière. On ne peut en comprendre toutes les propriétés qu'en résolvant les équations appropriées de la relativité générale (et cette compréhension est hélas réservée aux seuls spécialistes). Si l'on veut malgré tout en donner une représentation, on peut imaginer que le trou noir est entouré de gaz chaud, qui l'éclaire d'une certaine façon et révèle la présence de l'invisible. Cette question a constitué l'un de mes premiers travaux de recherche. À la fin des années 1970, j'ai calculé par ordinateur une « photographie virtuelle » de trou noir. Aujourd'hui, il est possible d'observer des trous noirs indirectement, c'est-à-dire par les effets qu'ils causent sur leur environnement : leur puissant champ gravitationnel aspire la substance gazeuse des étoiles voisines en d'étranges tourbillons, appelés « disques d'accrétion ». Ces phénomènes ont été détectés dans certains systèmes d'étoiles doubles émettant du rayonnement X et au centre de nombreuses galaxies.

L'image montre comment l'on verrait un trou noir entouré d'un disque de gaz. Les images subissent des déformations optiques extraordinaires, dues à la déviation des rayons lumineux. Tout cela s'explique parfaitement par la relativité générale. Prenons un trou noir et un mince disque de gaz vus par la tranche, ainsi qu'un observateur lointain (ou une plaque photographique si l'on désire immortaliser la chose). Dans une situation ordinaire, c'est-à-dire dans l'espace euclidien, la courbure est faible. C'est le cas du système solaire où l'on observe la planète Saturne entourée de ses somptueux anneaux, avec un angle de vision légèrement au-dessus du plan. Bien sûr, une partie des anneaux est cachée derrière la planète, mais on complète aisément par la pensée leur tracé elliptique. Autour d'un trou noir, il en va tout à fait différemment à cause des déformations optiques dues à la courbure de l'espace-temps. Notamment, on aperçoit le dessus du disque dans sa totalité, quelle que soit l'inclinaison du regard. L'arrière du disque n'est pas caché par le trou noir, car les images qui en proviennent sont en quelque sorte relevées par la courbure de l'espace et atteignent l'observateur lointain. Beaucoup plus étonnant, on voit également le dessous du disque gazeux. En effet, les rayons lumineux qui normalement se propagent vers le bas, dans une direction opposée à celle de l'observateur, remontent vers le haut et fournissent une « image secondaire », vision très déformée du dessous du disque. En théorie, il existe une image tertiaire qui donne une vue du dessus distordue (après que les rayons lumineux ont accompli trois demi-tours), puis une image d'ordre 4 qui donne une vue du dessous plus écrasée encore, et ainsi de suite à l'infini.

Pour décrire l'image finale, nulle légende ne convient mieux que ces vers de Gérard de Nerval, écrits il y a plus d'un siècle :

*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 !*

Xavier Fourt : Comment se fait-il que cette matière lumineuse ne soit pas attirée par le trou noir ?

J-P. L. : Mais elle l'est, précisément !... Elle est attirée en un mouvement de spirale, mais comme le disque est constamment régénéré par de la matière fraîche, on a l'impression d'observer une forme stable.

° En tenant compte également des propriétés physiques du disque gazeux : rotation (qui donne la dissymétrie droite gauche du flux lumineux), température, émissivité, on obtient une simulation de l'apparence photographique d'un trou noir entouré d'un disque de gaz lumineux. Voici maintenant les simulations numériques les plus perfectionnées que l'on puisse faire aujourd'hui à l'ordinateur. Il s'agit d'une succession d'images calculées qui reproduisent le plus fidèlement possible différentes images d'un trou noir lors d'un voyage spatial que nous pourrions faire en pensée. Imaginons un explorateur cosmique qui a repéré un gros trou noir au loin par le hublot de son vaisseau spatial. Fasciné par le spectacle, il décide de plonger dans sa direction et de s'engouffrer à l'intérieur, sachant toutefois qu'il ne pourra plus en ressortir. Il oriente son vaisseau en direction du trou noir, coupe les moteurs de façon à tomber en chute libre, et observe le spectacle par le hublot avant, dans la direction de son mouvement. La série de clichés montre les instantanés pris par notre intrépide explorateur à différentes étapes du plongeon le long de sa trajectoire. La dernière image est prise *de l'intérieur du trou noir*, le photographe ayant dû pivoter de 180° et regarder par le hublot arrière pour voir une dernière fois les images démultipliées et très déformées du disque d'accrétion. Contrairement à une opinion courante, à l'intérieur d'un trou noir il ne fait pas noir, puisque les rayons lumineux y pénètrent.

Carmela Uranga : Est-ce que le trou noir a un centre ?

J-P. L. : Il a un centre géométrique, oui. Je vais vous en parler.

X. Fourt : Pourquoi il n'y a pas de lumière dans le trou noir, vu qu'il y en a qui rentre ?...

J-P. L. : Parce que l'on continue à regarder vers l'avant. On tourne le dos à l'Univers, on tourne le dos à la lumière. Mais il suffit de se tourner par le hublot arrière pour voir l'univers extérieur, bien qu'on ne puisse plus jamais y retourner...

S.F : On est dans l'espace, dans le temps, ou quoi ?

J-P. L. : On est toujours dans l'espace-temps mais c'est un espace-temps très bizarre dans la mesure où l'espace joue en quelque sorte le rôle du temps. On est irrésistiblement attiré vers un point de l'espace, qui est le centre du trou noir, de la même manière que, dans l'univers ordinaire, on est irrésistiblement attiré dans le temps vers le futur : il n'y a pas de retour en arrière possible ... À l'intérieur d'un trou noir, il y a une sorte d'inversion de l'espace et du temps, c'est-à-dire que l'espace devient "inexorable".

Serge Fauchereau : C'est un peu l'idée d'Herbert George Wells avec sa machine à explorer le temps, il est toujours dans le même espace et c'est le temps qui change.

J-P. L. : En effet. Wells lisait la littérature de vulgarisation scientifique ; dans ses romans et nouvelles, on trouve une influence importante de ces lectures. Ceci dit son roman "La machine à explorer le temps" date, si je ne m'abuse, de 1895, une époque où la relativité d'Einstein n'avait pas encore été inventée! Mais il est vrai que l'on trouve ailleurs l'influence de la relativité dans la littérature et l'art de l'époque. Duchamp, par exemple, a tenté d'intégrer la quatrième dimension, celle du temps, dans sa fameuse toile, *Nu descendant un escalier*. Il représente dans le même espace la décomposition du mouvement au cours du temps.

Carmela Uranga : Qu'est-ce qu'il y a comme matière à l'intérieur ? Je croyais que le trou noir c'était une étoile effondrée...

J-P. L. : C'est exact.

C. U. : Donc la matière devient très dense... et elle reste dans le trou ....

J-P. L. : Effectivement, le grand mystère qui subsiste encore aujourd'hui avec la théorie des trous noirs, c'est le destin de la matière qui y tombe. Où va-t-elle ? Reprenons notre tissu élastique. Si nous creusons un puits suffisamment profond pour simuler un trou noir, qu'advient-il au fond ? Y a-t-il un « nœud » qui bloque l'espace-temps (ce qu'en mathématiques on nomme une « singularité », où la courbure devient infinie), ou bien le tissu est-il « percé » ? Dans ce dernier cas, l'ouverture est-elle un trou béant, ou s'apparente-t-elle à un « passage vers l'ailleurs » ? Comment agissent les distorsions spatio-temporelles sur le tissu élastique ? Seules les solutions mathématiques de la relativité générale peuvent nous guider. La possibilité la plus spectaculaire, bien que très spéculative, est une structure géométrique étrange appelée « trou de ver » : cette espèce de tunnel connecterait le fond du trou noir à une région de l'Univers appelée « fontaine blanche », car elle fonctionnerait à l'inverse d'un trou noir (selon certains modèles, cette région pourrait même se trouver dans un « autre » Univers). Cette solution mathématique des équations de la relativité ouvre des perspectives singulièrement nouvelles pour les voyages spatio-temporels, car elle offrirait des « raccourcis » d'espace-temps permettant d'éventuels trajets de plusieurs années-lumière en quelques heures, sans toutefois dépasser la vitesse de la lumière. Certaines trajectoires pourraient même remonter le temps !

C. U. : Mais les parties attirées par le trou sont attirées par quoi ?... S'il n'y a pas de densité du trou, qu'est-ce qui attire ?...

J-P. L. : Ce qui attire, ce n'est pas la matière ni la densité, c'est la courbure de l'espace. Je vous rappelle que dans la théorie de la relativité générale, on remplace le concept de force d'attraction gravitationnelle par celle de la courbure de l'espace. C'est pour cette raison que l'on aboutit à des espace-temps étrangement tordus, et certaines de ces distorsions conduisent à la possibilité de voyages dans l'espace et dans le temps.

La relativité ne s'applique pas seulement aux trous noirs, mais également à la description de la structure et de l'évolution de notre univers tout entier, c'est-à-dire à la cosmologie... Les modèles cosmologiques relativistes, qui ont aujourd'hui remplacé les anciens systèmes du monde d'Aristote, Ptolémée, Copernic ou Newton, sont des solutions engendrées par les équations de la relativité générale. En cosmologie il est raisonnable de présumer que

l'espace physique est équivalent en chacun de ses points. Cette hypothèse, appelée « principe cosmologique », est une extrapolation à l'échelle universelle de l'idée que nous ne sommes pas au centre du monde ; elle se traduit mathématiquement par le fait que l'espace doit posséder une courbure moyenne *constante*. En effet, puisque la courbure est engendrée par la matière, le fait que cette dernière soit distribuée de façon uniforme entraîne que la courbure à grande échelle soit elle-même uniforme. Pour mieux le visualiser, je reprends la métaphore du tissu élastique. Si je voulais représenter l'Univers dans son ensemble, il faudrait déployer une immense surface, sur laquelle un grand nombre de billes représentant les galaxies et possédant sensiblement la même masse seraient placées de façon régulière. La distribution de ces masses étant uniforme, on imagine facilement que le tissu acquerrait une courbure constante.

Trois cas de figure s'offrent donc aux cosmologistes : cette courbure constante peut être positive, négative ou nulle. Pour mieux me faire comprendre, je rappelle qu'à deux dimensions, la surface d'une sphère a une courbure positive, le plan a une courbure nulle, et une selle de cheval a une courbure négative. Sur la sphère, la somme des angles d'un triangle est supérieure à 180 degrés ; dans le plan, elle est exactement égale à 180 degrés ; sur la selle, elle est inférieure à 180 degrés. L'espace cosmique tridimensionnel peut être courbé tout comme les surfaces, mais de façon plus compliquée. En principe, on pourrait détecter la courbure de l'Univers en mesurant les angles formés par un triangle cosmique gigantesque. Une autre façon de mesurer la courbure de l'espace est indiquée par la relativité générale : selon que la densité moyenne de matière-énergie est supérieure ou inférieure à une certaine valeur critique, la courbure est positive ou négative, et nulle à la frontière exacte (cette valeur critique est égale à  $10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup>).

Toutefois, l'essence même de la relativité générale étant de coupler les propriétés géométriques de l'Univers à son contenu matériel, l'espace cosmique, modelé par la matière, devait naturellement varier au cours du temps, c'est-à-dire se dilater ou se contracter globalement. Autrement dit le tissu élastique de l'espace, en plus d'être localement incurvé par la distribution des billes, se dilate ou se contracte en chacun de ses points. C'est Lemaître qui, en 1927, fut le premier à comprendre cela et à faire le lien avec des observations astronomiques étranges, qui suggéraient que toutes les galaxies s'éloignaient de la Terre à grande vitesse. En réalité Lemaître comprit que c'est l'espace qui est en expansion, et non pas les galaxies qui fuient l'observateur terrestre. C'est sans doute la plus importante révolution scientifique du XX<sup>e</sup> siècle, qui a abouti aux fameux modèles de big-bang, qui décrivent l'histoire complète de l'univers. Car, dès lors que l'espace n'est pas statique, n'est pas invariable au cours du temps, il a une histoire, une origine et un destin.

En ce qui concerne le destin de l'Univers, deux scénarios sont possibles : soit l'expansion se ralentit fortement, dilate l'espace jusqu'à un volume maximal, puis laisse place à un mouvement inverse de contraction et de réchauffement s'achevant en un ultime embrasement de l'Univers : le « big-crunch » (du mot anglais qui signifie « écrasement ») ; soit l'expansion actuelle se poursuit à jamais, diluant et refroidissant sans cesse l'Univers. Cette seconde possibilité se subdivise elle-même en deux, selon que l'expansion ralentit sans jamais s'arrêter, ou au contraire s'accélère. Ces différents scénarios dépendent des proportions respectives et des formes d'énergie qui emplissent le cosmos. Par exemple, si la densité d'énergie sous forme matérielle dépassait la valeur critique donnée plus haut, l'univers serait fermé. Les observations actuelles indiquent que ce n'est pas le cas. En outre, on sait qu'il y a beaucoup de matière sombre dans l'univers, y compris sous forme d'une énergie non matérielle (appelée constante cosmologique, qui peut s'interpréter comme

l'énergie du vide quantique), de sorte qu'il est pour l'instant impossible de répondre à la question sur le futur à long terme de notre univers.<sup>1</sup>

Pour le passé de l'univers, le film de l'expansion projeté « à l'envers » conduit inéluctablement à une époque reculée où l'expansion a commencé tandis que l'Univers se trouvait dans un état très concentré et très chaud. Lemaître avait imaginé que la totalité de la matière cosmique, avant le début de l'expansion, devait se trouver sous la forme d'un « atome primitif » comparable aux noyaux atomiques ordinaires mais beaucoup plus grand, et dont l'instabilité fondamentale aurait engendré l'expansion. La vision de Lemaître, revue et corrigée par les progrès ultérieurs de la physique, a donné naissance aux fameux modèles de big-bang. Au sens mathématique du terme, le big-bang correspond à une « singularité » où la courbure de l'espace devient infinie. C'est une extrapolation de la relativité générale, le big-bang échappe donc aux lois de la physique connue, et une meilleure description de cet état singulier (qui pourrait être obtenue par une théorie de la gravité quantique, par exemple) est l'un des grands enjeux de la recherche du XXI<sup>e</sup> siècle. Par exemple la cosmologie quantique, qui est actuellement la forme la plus élaborée de la cosmogonie scientifique, tente de mettre en équations le surgissement spontané de l'Univers à partir des fluctuations du « vide quantique ». Ce dernier ne ressemble nullement au vide traditionnel ; il est semblable à un océan virtuel sans cesse agité d'ondes d'énergie, lesquelles peuvent engendrer spontanément des paires de particules et d'antiparticules. Ces couples éphémères, s'annihilant aussitôt apparus, laissent la place à une écume bouillonnante d'énergie et perpétuellement changeante, poétiquement appelée « écume de l'espace-temps ». Au hasard des fluctuations, il peut arriver qu'une particule et son antiparticule soient suffisamment séparées pour ne plus pouvoir s'annihiler mutuellement. De la « matière » surgit alors du vide, avatar moderne de l'antique "quintessence". Notre Univers tout entier pourrait être né ainsi d'une énorme fluctuation du vide, démesurément grandie sous l'effet de l'expansion.

Pour comprendre la gravité quantique, les physiciens ne sont pas avares d'analogies et de métaphores. L'une d'elles, proposée dès les années 1960 par John Wheeler, est l'écume d'espace-temps. Si nous observons l'océan à bord d'un avion volant à haute altitude, nous avons l'impression qu'il est lisse et plat, ou tout au moins faiblement courbé ; nous le décrivons donc par un espace mathématiquement simple : un morceau de plan euclidien ou une portion de surface sphérique de courbure uniforme. Si nous nous rapprochons, nous obtenons une meilleure résolution et nous voyons apparaître les vagues ; la surface de l'océan reste connexe, c'est-à-dire d'un seul tenant, et continue, mais elle acquiert une courbure variable de place en place, au gré des creux et des vagues. L'océan est cabossé. Enfin, si nous descendons au ras des vagues, c'est-à-dire si nous scrutons la surface de l'océan avec la résolution maximale, nous ne pouvons la décrire qu'à l'aide d'un espace mathématique extrêmement compliqué et dont la forme varie constamment au cours du temps. C'est une écume bouillonnante qui change ses structures spatiales en permanence, et de façon imprévisible. L'espace n'est même pas connexe, puisque des gouttes se détachent.

Dans les années 1980, une autre hypothèse a supplanté celle de l'écume d'espace-temps : la théorie des cordes, qui stipule que les constituants fondamentaux de la matière ne sont pas des particules ponctuelles mais des cordes ouvertes ou fermées à l'échelle de

---

<sup>1</sup> Depuis la date de cette conférence, de nouvelles observations astronomiques obtenues à partir de 1998 permettent de trancher entre les alternatives théoriques : il semblerait que l'univers soit en expansion perpétuelle accélérée, son contenu matériel étant largement dominé par la forme d'énergie "explosive" attribuée au vide quantique!

la longueur de Planck, dont les modes vibratoires définissent les propriétés des particules. Dans ce cadre, l'espace-temps devient un concept dérivé, qui ne prend sens qu'à une échelle supérieure à celle des cordes. La théorie des cordes, qui se décline selon plusieurs variantes, a suscité un tel engouement que certains physiciens ont pu croire en tirer une « théorie de tout ». Mais les difficultés mathématiques sont redoutables et il n'est pas certain qu'elles soient résolues dans un proche avenir.

Ces approches, même balbutiantes, apportent des éclairages tout à fait nouveaux sur la naissance de l'espace et du temps lors du big-bang : la cosmogonie quantique. Un océan d'énergie bouillonnante est associé au vide quantique. Cette énergie engendre certaines fluctuations beaucoup plus importantes que d'autres sur des temps extrêmement courts (en vertu de l'inégalité d'Heisenberg temporelle qui, dans la mécanique quantique, contraint l'extension en énergie à des valeurs d'autant plus grandes que l'extension temporelle est courte). Dans cet océan quantique, les plus grosses fluctuations d'énergie pourraient éjecter spontanément des gouttes d'écume qui, une fois détachées, évolueraient selon leurs lois propres, sous forme d'univers à part entière. Dans un tel schéma développé notamment par Andrei Linde, notre Univers ne serait plus unique ; il ferait partie d'un « multivers ». Notre Univers, dont les astrophysiciens tentent laborieusement de reconstituer la structure et l'histoire en effectuant des observations astronomiques et en bâtissant des modèles cosmologiques, ne serait donc qu'une bulle très particulière qui se serait détachée du vide quantique il y a environ quinze milliards d'années – un temps mesuré dans sa propre horloge. Le multivers, lui, affranchi du temps et de l'espace, serait une mousse d'univers chaotique sans cesse régénérée, engendrant des bulles d'univers aux interconnexions perpétuellement changeantes, chaque bulle ayant des propriétés différentes, y compris le nombre de dimensions spatiales.

Mais je m'éloigne beaucoup de notre sujet, celui de la représentation de l'espace dans l'art... Jusque là, je vous ai surtout parlé de physique parce que je pense que toutes les idées nouvelles sur la représentation de l'espace n'ont pas encore été « digérées » par les artistes. Mais elles le seront un jour, nécessairement. Chaque révolution conceptuelle portant sur les représentations scientifiques de l'espace, du temps et de la matière, finit tôt ou tard par être intégrée dans l'imaginaire des artistes, du moins ceux qui sont à l'écoute du monde et qui ensuite retranscrivent, à leur façon, ces nouvelles découvertes. Les artistes ont aussi des intuitions empiriques qui peuvent inspirer les scientifiques. Il y a échange permanent entre ces deux types d'imagination créatrice.

### **Infiniment Courbe et Nuit Étoilée**

La deuxième partie de mon intervention commencera par un film intitulé *Infiniment courbe* dont j'ai écrit le scénario. J'avais longtemps rêvé de pouvoir faire un film traduisant en images les notions abstraites sur l'espace-temps courbe. La chaîne ARTE s'est finalement intéressée au projet et a permis la production de ce documentaire de création de cinquante-deux minutes, réalisé en 1992 par Laure Delesalle. Cette approche purement visuelle et assez métaphorique de l'espace-temps vous reposera, je l'espère, du discours sans doute trop abstrait que je vous ai tenu jusqu'ici.

Projection du film *Infiniment courbe*

J-P. L. : ...Des questions particulières sur le film ?

Chen Zen : Je trouve personnellement que cela laisse moins de liberté à la pensée que tout le discours que vous nous avez tenu ce matin. C'est plus pédagogique, en fait. Du coup ce matin je me sentais plus libre. Mais j'aimerais avoir l'avis de l'auditoire...

J.-P L. : Effectivement, on entraîne le spectateur dans une sorte de discours démonstratif qu'il était difficile d'éviter...

Chen Zen : Il y a peut-être là davantage une volonté d'expliquer que d'exposer, comme vous l'avez fait ce matin ? Je ne sais pas... Quelle est l'opinion des autres ?

Olivier Leroi : Est-ce destiné à des enfants aussi ? Vous êtes très didactique dans ce film.

J-P. L. : Le film est destiné à tous les publics... Il comporte effectivement des parties simples, pour ne pas dire simplistes. ....Nous avons beaucoup hésité à utiliser en voix-off cette forme de question-réponse... Nous avons essayé d'autres formes de narration mais elle ne fonctionnaient pas, alors nous sommes restés à celle-là. En outre, le documentaire devait rentrer dans le cadre des émissions pédagogiques de ARTE, avec toutes les contraintes imposées par les producteurs et par la chaîne. Il ne faut pas oublier que dans l'audiovisuel, l'auteur est souvent moins libre que dans d'autres formes d'expression artistique.

O. Leroi : C'est quand même visible par des enfants ?

J-P. L. : Oui, j'espère. bien sûr! Même si à un certain moment on voit une femme nue et des doctes savants qui tournent autour !...

° Avant de poursuivre mon discours sur les représentations purement géométriques de l'espace, je vais faire une brève digression sur une toile de Van Gogh, intitulée *La Nuit étoilée*, qui va vous faire entrer enfin dans un champ visuel plutôt qu'abstrait. On sait que Van Gogh, l'homme du Nord aux cieus chargés, était fasciné par la limpidité du firmament provençal. Il sortait la nuit, en pleine campagne, avec ses toiles et ses pinceaux, des bougies plantées sur le rebord de son chapeau de paille pour s'éclairer, et il peignait le ciel. En 1888, il a peint une nuit étoilée au-dessus du Rhône où l'on reconnaît les sept étoiles du Chariot, dans la constellation de la Grande Ourse - preuve du réalisme dont Van Gogh faisait preuve dans la transposition picturale du firmament. Ce réalisme est moins évident dans d'autres toiles de l'époque, et les exégètes se sont demandés si les représentations van goghiennes du ciel n'avaient pas peu à peu glissé du réalisme à l'imagination la plus folle, voire au délire, au rythme de sa propre détérioration psychique, suite à l'épisode de l'oreille coupée daté du 23 décembre 1888. La plus fascinante de ses toiles est la *Nuit Étoilée au-dessus de Saint-Rémy*, peinte à l'asile de Saint-Paul de Mausole. Un ciel immense chargé d'objets lumineux, une lune et des étoiles trop grosses parmi de vastes spirales tourbillonnantes semblent mettre en cause le réalisme de Van Gogh. Dans une lettre à son frère Théo, datée du 19 juin 1889, Vincent écrit : "J'ai *enfin* terminé la Nuit Étoilée". En ces mois d'activité fébrile, Van Gogh a donc posé les premiers éléments picturaux de sa toile quelques jours, voire quelques semaines auparavant. Aujourd'hui, des logiciels astronomiques sur micro-ordinateur permettent de reconstituer les cartes du ciel

au-dessus d'un lieu quelconque et à n'importe quelle époque. Calculons ainsi<sup>2</sup> les cartes du ciel au-dessus de Saint-Rémy de Provence pour chaque nuit précédant la date du 19 juin 1889. Surprise : très précisément le 25 mai 1889 à 4h40 heure locale, le ciel en direction de l'Est a fugitivement présenté une configuration remarquablement proche de celle peinte par Van Gogh : l'aube naissante, se traduisant par un voile blanchâtre au-dessus des collines, la brillante planète Vénus précédant le Soleil encore sous l'horizon, le croissant de Lune éclairé à l'Est, les deux étoiles principales de la constellation du Bélier de part et d'autre du cyprès, et deux étoiles de la constellation des Poissons entre la Lune et le Bélier. L'élément le plus remarquable du tableau est la grande spirale centrale. À cette position, le logiciel astronomique indique l'existence d'une galaxie spirale dans la constellation des Poissons, invisible à l'œil nu mais qui peut être photographiée avec un télescope de moyenne puissance et un temps de pose suffisamment long. L'image de cette galaxie est celle d'une spirale vue de face, extrêmement ressemblante avec la spirale de Van Gogh. N'en concluons pas que le peintre était doué d'une vue télescopique surnaturelle! Comme l'indique sa correspondance, il était tout simplement passionné par les choses célestes. Lecteur assidu de la revue *L'Astronomie* éditée par Camille Flammarion, il y avait découvert avec émerveillement les premières photographies de nébuleuses spirales. On sait aussi qu'il avait lu *l'Astronomie Populaire*.

Le "réalisme de position" des nuits étoilées de Van Gogh ne fait donc aucun doute, et donne au spectateur une émotion supplémentaire : celle de connaître la minute précise à laquelle le peintre a reporté pour la première fois sur sa toile les points lumineux du ciel provençal. Je signale aussi qu'une œuvre musicale absolument magnifique d' Henri Dutilleux porte également ce titre, car cette composition pour orchestre s'inspire du tableau de Van Gogh.

### **L'espace pavé**

Je reviens maintenant à notre espace euclidien pour aborder la question des pavages. Beaucoup d'artistes, notamment les mosaïstes, ont été confrontés au problème de trouver des motifs plus ou moins réguliers dont la répétition à l'identique forme un pavage. Cette problématique se rencontre en particulier dans l'art islamique, puisque le Coran interdit la représentation picturale des êtres animés. Cette contrainte a engendré une forme d'art abstrait, puisque les motifs utilisés dans l'art islamique du pavage sont fondés sur des abstractions géométriques. À l'Alhambra de Grenade, par exemple, on voit de magnifiques mosaïques conçues dans cet esprit. Alors que les mosaïstes avaient découvert toutes les façons rationnelles de répéter des motifs réguliers de manière à paver un plan, ce n'est qu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle que le problème mathématique a été résolu. Le mathématicien et cristallographe russe Fedorov a étudié les groupes de symétrie des cristaux naturels et s'est intéressé à ces structures pour définir tous les pavages possibles de l'espace euclidien. Il a découvert qu'il existe 17 groupes de symétrie permettant un pavage régulier du plan. La méthode consiste à trouver un motif de base, une sorte de « cellule fondamentale » qui va être répétée par un ensemble de déplacements particuliers, en l'occurrence des translations, des rotations ou des réflexions. On entre là dans le cadre de la théorie des groupes, qui permet la classification de tous les groupes de symétrie. Ainsi,

---

<sup>2</sup> En 1990, le critique d'art américain Albert Boime avait déjà eu l'idée d'effectuer cette recherche, mais pour la seule nuit du 19 juin, ce qui n'est évidemment pas la bonne date à chercher; la reconstitution du ciel qu'il donne est inexacte.

les mosaïstes avaient trouvé de façon empirique et intuitive des symétries mathématiques remarquables.

Escher est l'exemple le plus frappant des rapports entre mathématiques et arts graphiques. En 1936, le jeune artiste s'est rendu à l'Alhambra de Grenade, où il a été fasciné par les pavages mauresques. Peu après cette visite, il a lu un article de vulgarisation que le mathématicien hongrois George Pólya avait publié en 1924 sur les groupes de symétrie dans le plan. Sans en comprendre l'aspect abstrait, Escher a su en extraire les dix-sept groupes de symétrie qui y étaient décrits. Entre 1936 et 1941, il a appliqué ses nouvelles connaissances dans une série impressionnante d'estampes présentant tous les pavages périodiques possibles. Prenant le contre-pied de l'art islamique, qui devait se cantonner à des motifs purement géométriques, Escher a utilisé des formes animales ou humaines : des papillons, des oiseaux, des poissons, des lézards, des diabolins. Il est entré en contact avec des mathématiciens de renom comme Donald Coxeter et Roger Penrose, et a travaillé en collaboration avec eux. En introduisant dans ses estampes des motifs de couleur – une dimension supplémentaire qui n'est pas prise en compte dans la classification de Fedorov –, Escher a ouvert un nouveau pan de la géométrie, la théorie des groupes de symétries polychromatiques, ultérieurement étudiée par Coxeter.

On ne peut pas réaliser un carrelage avec des pentagones. Mais les pavages semi-réguliers, composés à l'aide de motifs différents, sont aussi un domaine d'étude fascinant, qui a été formalisé par les travaux mathématiques de Roger Penrose. Penrose est un remarquable mathématicien et physicien polyvalent, à l'imagination extrêmement créative. Non seulement il a travaillé sur les pavages, mais il est l'un des plus éminents spécialistes de la relativité générale, l'un des fondateurs de la théorie des trous noirs, et il s'intéresse depuis peu à la modélisation du fonctionnement de la pensée à l'aide de la physique quantique ! La dernière fois que je l'ai rencontré lors d'un dîner chez un ami commun, il m'a montré des diapositives de certains pavages qu'il a brevetés et qui sont aujourd'hui utilisés par des entreprises de carrelage. Il gagne donc de l'argent avec ses découvertes mathématiques, ce qui est plutôt rare !

Là encore, les pavages semi-réguliers ont d'abord été explorés empiriquement par les artistes et artisans. L'origami, art traditionnel du papier plié si prisé au Japon, est très précisément lié aux pavages semi-réguliers du plan ; comme quiconque a pu le vérifier en fabriquant une cocotte en papier, les tesselles sont des polygones tels que triangles, rectangles, etc., qui ne sont pas tous identiques.

Escher ne s'est pas cantonné aux pavages de l'espace euclidien, il a également réalisé des estampes qui représentent des pavages d'un plan hyperbolique, c'est-à-dire une surface de courbure négative. Pour les besoins de la représentation sur une feuille de papier, il faut faire une transformation de coordonnées qui déforme la représentation : alors même que l'espace hyperbolique est infini, l'infini est ramené à distance finie, c'est-à-dire que la totalité de l'espace hyperbolique est inscrite entièrement à l'intérieur d'un cercle. Cette représentation, découverte au début du siècle du XX<sup>e</sup> siècle par Henri Poincaré, porte son nom. Escher a réalisé une série d'estampes intitulées *Limite circulaire*, dans lesquelles il a utilisé cette représentation de Poincaré. On voit par exemple des poissons se répéter de façon à couvrir régulièrement la totalité de la surface, mais qui deviennent apparemment de plus en plus petits quand on s'approche du bord du disque.

## La topologie

° Je vais maintenant aborder la branche de la géométrie appelée la topologie, qui s'intéresse aux propriétés globales des espaces. Examinez ces surfaces qui semblent différentes – la surface d'un cube, d'une sphère, une sorte de patate et un bol... En fait, ces surfaces peuvent se déduire l'une de l'autre par déformation continue. On dit de ces surfaces qu'elles ont la même topologie. Idem pour ces surfaces qui ont un trou : une sphère avec une anse peut être déformée pour donner la surface d'un anneau, que l'on appelle un tore. Si je continue à déformer le tore, j'obtiens une tasse à café avec une anse...

Les mathématiciens ont découvert qu'il est possible de représenter n'importe quelle surface par un polygone dont on recolle deux à deux certains côtés. Ainsi, en collant deux bords opposés d'un carré, on obtient un morceau de cylindre, et si l'on réunit les deux extrémités de celui-ci on fabrique un tore.

Imaginons une créature évoluant sur un tore, voyageant tout droit le long d'une direction principale ; elle communique par des rayons lumineux avec son point de départ, de sorte qu'elle peut calculer la distance parcourue ; à un certain moment, cette distance atteint un maximum puis se met à diminuer ; après avoir fait un tour complet, la créature est revenue à son point de départ. Elle en conclura qu'elle vit dans un espace d'extension finie. Pourtant, en ayant mesuré autour d'elle la somme des angles d'un triangle, elle a toujours trouvé 180 degrés, si bien qu'elle déduira aussi qu'elle vit dans un plan euclidien. La métrique (géométrie locale) du tore plat reste donnée par le théorème de Pythagore, tout comme celle du plan et du cylindre. Mais sa topologie, sa forme globale, est différente.

Il y a un rapport avec les pavages mosaïques dont je vous ai parlé plus haut. À partir du polygone fondamental et en répétant les opérations de collage, on crée indéfiniment des répliques du motif de base ; ce faisant on réalise un pavage d'un espace plus grand, appelé « espace de revêtement universel ». Le revêtement universel du tore est le plan euclidien infini – ce qui traduit bien le fait que le tore plat est une surface euclidienne. Si on le découpe le long de son petit cercle et le long de son grand cercle, puis qu'on le déplie, il se transforme en un morceau de plan euclidien : un rectangle.

Il y a trois catégories de surfaces : celles de courbure positive, celles de courbure nulle et celles de courbure négative. Le prototype des surfaces de courbure positive est la sphère, le prototype des espaces euclidiens est le plan, le prototype des espaces hyperboliques ressemble à une selle de cheval.

Je vous montre la classification des surfaces euclidiennes, c'est-à-dire de courbure nulle : il en existe en tout et pour tout cinq. La première, c'est le plan usuel. Les quatre autres sont le cylindre, le ruban de Möbius, le tore, et la bouteille de Klein. Toutes ces surfaces peuvent être obtenues en partant d'une cellule fondamentale qui est un rectangle, et en faisant des collages particuliers sur tel ou tel côté.

° Pratiquement tous les écoliers ont construit au moins une fois dans leur vie le fameux ruban de Möbius. A partir d'un rectangle de papier on colle deux faces opposées, mais en faisant un demi-tour avant de coller. Pour pouvoir le faire il faut un rectangle de papier suffisamment long, tordre le papier sans le déchirer, et on obtient ce fameux ruban qui a fasciné les mathématiciens et les artistes, notamment les sculpteurs. En effet il a une propriété étrange : c'est une surface qui n'a qu'une seule face, comme on peut s'en apercevoir si on suit le trajet d'une fourmi qui marche toujours droit devant elle.

° La bouteille de Klein est une sorte de mélange entre le tore et le ruban de Möbius. On commence par faire un cylindre, ensuite on colle les deux autres côtés après avoir tourné

de  $180^\circ$ . La bouteille de Klein ne peut être représentée sur une feuille de papier. C'est une abstraction pure, une surface qui, bien que complètement fermée sur elle-même, n'a pas d'intérieur ni d'extérieur. C'est malgré tout une surface euclidienne, et fait donc partie des espaces les plus simples. On voit que même au sein des espaces les plus simples on trouve des formes extrêmement subtiles qui sont permises par la topologie : cette branche de la géométrie qui classifie et essaye de comprendre les formes des espaces.

Alessandra Tesi : Mais la géométrie fractale ne s'occupe-t-elle pas, justement, des formes qui ne peuvent pas être réduites à la géométrie normale, comme la tête de l'arbre ou les formes de la nature ?

J-P. L. : La géométrie fractale s'intéresse effectivement aux formes, mais pas du tout dans la même optique. Elle ne s'intéresse pas aux formes globales des espaces, mais à des motifs qui peuvent se retrouver à des échelles de résolutions différentes, un peu comme des poupées gigognes qui s'emboîtent les unes dans les autres. Lorsque des formes géométriques s'emboîtent les unes dans les autres de façon régulière, l'objet mathématique correspondant s'appelle un fractal. Beaucoup de formes naturelles peuvent être décrites mathématiquement, de façon assez fidèle par des fractales, lesquelles suscitent beaucoup d'intérêt auprès des plasticiens ... Les formes fractales produites par des ordinateurs dégagent très souvent une charge émotionnelle d'autant plus étonnante qu'elles proviennent de systèmes d'équations assez simples : on fait tourner le programme d'ordinateur et on engendre des formes qui sont souvent d'une beauté stupéfiante...

Un des premiers exemples de fractale a été donné par le mathématicien Von Koch. Ce qui est extraordinaire, c'est la simplicité du procédé de base et la complexité du résultat lorsqu'on itère le procédé un grand nombre de fois. La courbe de Von Koch est obtenue en partant d'un segment, que l'on partage en trois. Sur le tiers central du segment, on construit un triangle équilatéral. On répète le processus sur chacun des segments... Chacun d'eux engendre donc une structure qui est le reflet à plus petite échelle de la structure ... C'est le niveau 2 de l'opération. On recommence au niveau 3, et ainsi de suite, théoriquement jusqu'à l'infini, avec des segments de plus en plus petits à mesure qu'on avance. Seuls les ordinateurs peuvent arriver à des configurations vraiment éloignées de la configuration de départ. L'objet mathématique final est un type d'espace complètement différent de ceux dont je vous ai parlés jusqu'ici... C'est un espace qui a une dimension qui n'est même plus un nombre entier. Le résultat est un espace fractal intermédiaire entre une ligne de dimension 1 et une surface de dimension 2.

A. T. : C'est pour cela que c'est pas réductible à la topologie ?

J-P. L. : Absolument. Avec la topologie, je ne vous parlais que d'une classification des espaces qui ont une dimension entière. L'un des intérêts des fractales, c'est qu'on peut en produire de n'importe quel type à partir de pratiquement n'importe quel motif et d'un algorithme astucieux. Beaucoup de phénomènes naturels sont assez fidèlement décrits par des fractales, comme le découpage des feuilles d'un arbre ou celui de la côte de Bretagne. Si on suit la côte de Bretagne sur une carte de géographie et que l'on mesure, par exemple, la distance de Saint-Malo à Quimper, on trouve mettons 500 km. Ensuite, on se rend sur le terrain et on mesure le nombre de pas en suivant la côte. Cette fois, on suit toutes les anfractuosités du terrain, et pour la distance Saint-Malo-Quimper, on trouve 2000 km. Ensuite, on demande à une fourmi de faire la mesure ... La fourmi, chargée de parcourir les minuscules anfractuosités de la côte de Bretagne, ne pourra jamais y parvenir de son vivant, bien sûr... Mais si elle y arrivait, elle trouverait que la côte de Bretagne mesure un

million de km... Et pour aller encore plus loin, on remplace la fourmi par une molécule, on obtient alors une longueur de la côte de Bretagne qui tend vers l'infini. En fait, la côte de Bretagne se rapproche d'une fractale, c'est-à-dire que sa longueur dépend du niveau de résolution auquel on l'observe. Les fractales présentent un intérêt pour la représentation des formes de la nature, et jouent donc un rôle très important aujourd'hui en imagerie de synthèse, animation de jeux vidéo, etc. . Notamment pour la représentation des paysages naturels en réalité virtuelle. Il existe des « recettes fractales » qui permettent de représenter de façon extraordinairement réaliste les montagnes ou les nuages ...

A. T. : C'est incroyable qu'Escher ait eu déjà une idée de cela...

J-P. L. : En réalité il a eu plus d'intuition du côté de la topologie que de celui des fractales. D'ailleurs, j'ai omis de vous dire qu'il a tenté un truc absolument impossible : représenter la bouteille de Klein... Sa gravure s'intitule *La Galerie d'estampes*. Elle représente un personnage qui fait mettre un tableau dans une galerie, mais en fait le tableau de la galerie se transforme en son propre tableau, c'est-à-dire que la galerie est à la fois la galerie et l'un des tableaux de la galerie... Escher n'a sans doute pas réalisé que cette construction se rapprochait de celle d'une bouteille de Klein, comme les mathématiciens s'en sont aperçus ultérieurement!

### L'espace chiffonné

Pour terminer, intéressons-nous à l'espace à trois dimensions et aux diverses formes qu'il peut avoir, avec l'idée que l'espace réel pourrait bien ressembler à cela. De même qu'à deux dimensions, à partir d'une feuille de papiers dont on collait les bords, on pouvait engendrer un espace fini, refermé sur lui-même, pour obtenir le tore, on peut le faire à trois dimensions en partant non plus d'une feuille de papier mais d'un parallélépipède. Vous prenez donc un volume parallélépipédique découpé dans l'espace euclidien ordinaire, et vous considérez que les paires de faces opposées du parallélépipède sont en fait les mêmes. Le résultat final, qu'on ne peut pas visualiser, est un espace toujours euclidien, sans courbure, mais qui est complètement refermé sur lui-même. On l'appelle hypertore. Il existe six hypertores différents, tous des espaces euclidiens à trois dimensions qui ont « un trou ». Il est impossible de visualiser ce trou, parce qu'il faudrait un système mental à quatre ou cinq dimensions. Il n'y a que les mathématiques ou des schémas simplifiées qui permettent de représenter ces espaces.

La classification topologique des espaces euclidiens nous apprend qu'en réalité, en trois dimensions, il en existe 18 - dont l'espace habituel, infini, et les 6 hypertores dont je viens de vous parler. Vous me direz : « pourquoi faire compliqué quand on peut faire simple ? » Hé bien parce rien n'interdit que notre univers réel soit de cette nature : au lieu d'être un espace euclidien s'étendant à l'infini, il ne serait euclidien qu'à notre échelle, c'est-à-dire localement, mais à très grande distance il se refermerait sur lui-même à la façon d'un hypertore. Quelle serait la conséquence pour nous qui sommes plongés dans cet espace ?... Une fantastique illusion d'optique. Je vous explique la raison : Prenons un rayon lumineux qui va d'une source de lumière (étoile, galaxie) à un observateur (astronome). Si l'espace a une topologie compliquée, il y a une infinité de trajets possibles pour aller de la source à l'observateur. Prenons l'exemple du cylindre ... Il y a non seulement le trajet direct, mais aussi le trajet qui fait un tour du cylindre et qui parvient à l'observateur dans une autre direction... Celui-ci va donc voir une autre image de la source de lumière. En fait, il verra un

grand nombre d'images « fantômes » de la même galaxie, qui correspondent aux rayons lumineux qui ont fait un, deux, trois, quatre tours, etc.

° Si nous vivions dans un tel espace à la topologie un peu compliquée, que j'appelle un « espace chiffonné », nous serions plongés dans un vaste mirage cosmique à cause de la démultiplication des trajectoires des rayons lumineux, une sorte de gigantesque jeu de miroirs qui nous donnerait l'illusion de vivre dans l'espace de revêtement universel évoqué plus haut à propos des pavages d'espace. Reprenons l'exemple le plus simple, celui de l'hypertore. L'espace réel serait assimilable à l'intérieur d'un parallélépipède abstrait dont les faces sont recollées. Il pourrait être relativement petit, disons cinq milliards d'années-lumière au lieu de quinze, mais donner l'illusion d'un espace beaucoup plus grand, voire infini. Toutes les images fantômes d'une galaxie donnée seraient vue dans toutes les directions et à des distances apparemment différentes. L'univers apparent ressemblerait à une sorte de cristal développé dans l'espace et le temps à partir de la cellule fondamentale, qui serait l'espace réel, plus petit que l'espace perçu. On retrouve ainsi certaines préoccupations des mosaïstes dans cette nouvelle branche de la cosmologie que l'on appelle « topologie cosmique ». En effet, la classification mathématique des espaces tridimensionnels, qu'ils soient euclidiens, sphériques ou hyperboliques, peut être incorporée dans les modèles de big-bang.

Pour se convaincre de la pertinence de l'idée, nous avons fait des simulations d'ordinateur, afin de calculer le mirage topologique créé par un univers chiffonné, et de comparer le résultat avec l'univers observé par les télescopes. Le résultat est étonnant. On crée facilement l'illusion d'une répartition des galaxies homogène à grande échelle, mais avec des détails à petite échelle tels que creux, vides, filaments, ressemblant aux cartes du ciel profond qui sont réellement observées.

A. T. : Mais c'est possible de faire le contraire ? C'est-à-dire de distinguer les objets réels de tous les autres ?

J-P. L. : Individuellement, non, mais statistiquement, oui ! C'est justement l'objet actuel de mon travail de recherche. Nous partons des cartographies célestes obtenues par les grands télescopes, et nous appliquons des techniques d'analyse statistique sur la répartition apparente de tous les objets pour voir s'il n'y a pas des répétitions de certains motifs, qui révéleraient la forme d'une cellule fondamentale.

A. T. : Ce serait déduire ce système du réel...

J-P. L. : Absolument ! Initialement, mon idée était purement théorique, en fait ludique car cela m'amusait de jouer avec les formes possibles de l'espace. Ensuite j'ai compris que l'on pouvait faire la démarche inverse et, à partir des observations astronomiques décodées à la lumière d'un espace chiffonné, remonter à une possible architecture secrète de l'univers. L'un des espaces chiffonnés les plus intéressants, l'espace de Poincaré, est représentable par un polyèdre fondamental qui est un dodécaèdre, c'est-à-dire l'un des cinq solides platoniciens. Mais l'intérieur du dodécaèdre est chiffonné, puisqu'il est obtenu en identifiant les paires de face opposées en ayant tourné d' $1/10$  de tour. Le résultat est un espace sphérique très petit... Il se pourrait que la véritable architecture secrète de l'espace soit de cette nature, fondée sur l'un des solides platoniciens sur lequel on applique des principes de symétrie et de répétition. Ce qui serait tout de même une surprise extraordinaire ! Il y a bien sûr d'autres modèles possibles pour décrire la forme de l'espace, mais c'est une piste intéressante... Et comme il n'y a pas que les arts plastiques et la musique qui entretiennent

des relations étroites avec les découvertes scientifiques, mais il y a aussi la littérature, je citerai une phrase étonnante extraite d'un roman de Nina Berberova, *Le mal noir*. L'écrivain ignorait tout de la cosmologie et des espaces chiffonnés, puisque ceux-ci n'ont été inventés que l'an dernier ... Mais dans son roman elle a écrit cette phrase prémonitoire : "Non ! Je ne peux pas croire que les astres soient si loin, des milliards d'années-lumière, cela ne veut rien dire. Un de ces jours on découvrira qu'ils sont beaucoup plus proches, et tout ce qui nous paraissait infini et immense deviendra petit."

A. T. : Je crois que les gens les plus intéressés par l'astronomie pour des raisons de nécessité, ce sont les navigateurs ?

J-P. L. : Dans l'histoire ancienne, où on naviguait en se repérant avec les étoiles, mais plus maintenant.

A. T. : Je pense que du point de vue de la mer, cela peut être complètement différent de celui de la Terre. Je me demande si les découvertes des navigateurs correspondaient à celles des astronomes ?

J-P. L. : Pourquoi les points de vue des navigateurs seraient-ils très différents ? Pourquoi la vision du ciel depuis la mer serait-elle différente de celle qu'on a à partir depuis la terre ferme ?... Hormis le fait qu'en mer on a un horizon qui est le plus bas possible ...

A. T. : Le Soleil ne se couche pas tout le temps au même point...

J-P. L. : Mais cela ne dépend pas du fait qu'on soit sur terre ou sur mer, c'est simplement un effet de position à la surface du globe, et de l'époque de l'année où on observe.

Artiste : Mais je crois que c'est un peu différent. On voit les choses différemment quand on les voit d'un point mobile, par exemple d'un bateau ?

J-P. L. : Rationnellement, il n'y a pas de différence, mais subjectivement il peut y avoir une énorme différence. Cela fait plutôt appel à ce que j'appelle le « sentiment cosmique ». Regarder la voûte céleste procure un sentiment cosmique tout à fait différent selon que l'on est en pleine mer ou sur terre. Et même sur terre, la perception subjective du ciel est différente selon que vous êtes en plaine ou au sommet d'une montagne. Mais sur le plan purement rationnel et objectif, je vous assure qu'il n'y a aucune différence.

Étudiante : Pour les navigateurs à l'époque des découvertes, c'était une nécessité de se déplacer...

J-P. L. : Oui. Ce n'est pas un hasard si la révolution astronomique post-copernicienne date des XV<sup>e</sup> et XVI<sup>e</sup> siècles, qui est justement l'époque des premières grandes explorations de la planète par les navigateurs. Dans le domaine des cartes célestes par exemple, il y avait des cartes des constellations faites par les Grecs, les Arabes, etc.. Mais ils n'avaient pas accès aux constellations de l'hémisphère sud, qui ne sont jamais visibles sous nos latitudes. Lorsque Magellan est revenu de son premier voyage dans l'hémisphère sud et qu'il a décrit notamment ces deux nuages qui sont très proches du pôle sud céleste et qu'on appelle aujourd'hui *les nuages de Magellan*, tout le monde a été surpris puisque jamais personne n'en avait entendu parler. Aujourd'hui d'ailleurs, on sait que ces deux nuages de Magellan sont des galaxies que l'on voit directement à l'œil nu depuis l'hémisphère sud. Les grandes explorations maritimes ont surtout fait progresser la cartographie plus que l'astronomie, c'est-à-dire les techniques de représentation sur une

feuille plane de la surface sphérique de la terre, ou de la voûte céleste concave. Cela posait des problèmes de pure géométrie... Les Grecs savaient que la Terre était sphérique, mais au Moyen Âge, les grandes découvertes des Grecs furent oubliées, et l'on était repassé à l'idée d'une terre plate. L'une des motivations de Christophe Colomb, hormis l'idée de faire fortune avec l'or des Indes, était de redémontrer que la Terre était bien ronde. Et bien entendu, les expéditions maritimes ont bouleversé les représentations géographiques du globe terrestre.

Artiste : Y a-t-il des cartes du ciel réalisées par les navigateurs ?

J-P. L. : Non, mais des catalogues d'étoiles, oui! Les livres de bord tenaient des registres qui alignaient des colonnes de chiffres astronomiques, parce que les navigateurs embarquaient des instruments de visée astronomique, des quarts de cercle et des sextants, qui permettent de mesurer l'angle de visée des étoiles au-dessus de l'horizon. Ce n'est qu'à leur retour en Europe que les navigateurs livraient ces chiffres à des astronomes capables de les matérialiser en cartes du ciel. La première carte du ciel, c'est Dürer qui l'a faite, en 1515, à peu près à la même époque que les voyages de Magellan.

### **Les symétries de l'univers**

X. F. : Vous pouvez nous parler un peu plus des espaces symétriques et de la différence avec les espaces asymétriques ?

J-P. L. : Qu'est-ce que vous appelez les espaces asymétriques ?

X. F. : La majeure partie des objets qui nous entourent ont des formes asymétriques...

J-P. L. : Oui, mais il est intéressant de chercher, à l'intérieur de cette asymétrie, une symétrie cachée.

X. F. : Pour pouvoir la mathématiser.

J-P. L. : Exactement. Cela semble une démarche relativement naïve, mais ce qui est étonnant c'est qu'elle a toujours très bien fonctionné dans l'histoire des sciences. On part du principe qu'il existe des symétries dans la nature, certaines apparentes, d'autres cachées. Mais le raisonnement dépend aussi du degré d'approximation à partir duquel on considère qu'il y a symétrie. Les symétries mathématiques sont exactes, les symétries naturelles ne le sont pas. Le corps humain est symétrique en première approximation, mais il ne l'est pas tout à fait. Il en va de même dans la nature. Certains aspects de la nature présentent de grandes symétries en première approximation, mais ces symétries simples s'évanouissent et sont remplacées par d'autres symétries plus subtiles lorsqu'on observe avec plus de précision. Et on remarque alors dans ces symétries plus subtiles d'autres petits écarts, et encore de nouvelles symétries plus complexes, et ainsi de suite. C'est une démarche générale de la physique que de toujours chercher les symétries cachées dans l'univers. En particulier pour retracer la naissance même de l'espace, du temps et de la matière, il y a 15 milliards d'années au moment du big-bang. L'un des rêves des physiciens théoriciens, c'est que l'univers à son début ait été complètement symétrique, et qu'au cours de son évolution il le serait devenu de moins en moins. Quand les physiciens recensent

l'ensemble des interactions physiques connues, ils en trouvent quatre. On les appelle les interactions fondamentales, parce que la totalité des phénomènes physiques connus s'expliquent sur la base de ces quatre interactions. L'une de ces interactions est la gravitation. L'autre est l'interaction électromagnétique, responsable en particulier des phénomènes de rayonnement électromagnétique, des réactions chimiques, etc.. Les deux autres interactions sont de type nucléaire, car elles n'agissent qu'au niveau des noyaux atomiques, à une échelle extrêmement microscopique. L'une est dite forte, parce qu'elle est très puissante et permet la cohésion même des noyaux des atomes. L'autre est dite faible, et elle rend compte des phénomènes de désintégration radioactive. Pourquoi quatre interactions? Les physiciens se posent la question. Ils aiment toujours simplifier, avoir des théories autant que possible globales, réduire le nombre de paramètres différents. Donc, les physiciens cherchent une sorte de super théorie dans laquelle les quatre interactions fondamentales ne seraient que les reflets à basse énergie d'une interaction unique, qui elle aurait prévalu au moment du big-bang. Toujours le besoin de trouver le secret du monde..., sans la moindre garantie de tenir la bonne piste... On se leurre peut-être complètement, mais comme jusqu'à présent cela semble marcher, hé bien on continue à raisonner dans ce schéma!

C. U. : C'est la théorie de qui ?

J-P. L. : De personne en particulier, des dizaines de chercheurs y ont contribué et y travaillent encore. Je vais vous préciser où en sont les recherches actuelles sur les symétries de l'univers, en remontant pas à peu dans le passé de l'univers et en tendant vers le big-bang, toujours plus chaud, plus dense, plus énergétique.

Aujourd'hui l'univers est âgé de 15 milliards d'années environ, et en moyenne il est froid. Sa température moyenne, que l'on appelle le fond cosmique, est de  $- 270^{\circ}$  C. Quand on remonte dans le passé, l'univers devient en moyenne de plus en plus chaud. Vous savez que lorsqu'on observe une étoile ou une galaxie, on la voit toujours dans le passé, puisque les rayons lumineux qu'elle a émis ont mis un certain temps à parvenir jusqu'à nous, à la vitesse de 300 000 km/s. Ceci est longuement développé dans le film *Infiniment courbe* que vous avez vu. Hé bien la plus ancienne et plus lointaine image de l'univers que l'on puisse capter date d'une époque où la température de l'univers était égale à  $3000^{\circ}$  C, lorsque l'univers était à peine âgé de 300 000 ans. À cette époque-là, il n'existait encore aucune étoile, aucune galaxie, aucune structure astronomique... juste des particules élémentaires et du rayonnement piégé. Il n'empêche que ce rayonnement a subitement jailli au bout de 300 000 ans et qu'on le détecte aujourd'hui sous la forme du fond cosmologique. Maintenant, pour explorer l'univers antérieur, il faut faire non plus de l'astrophysique, puisque qu'on n'a pas d'image électromagnétique, mais de la physique des hautes énergies. On recrée dans des accélérateurs de particules les conditions de température et d'énergie qui ont dû exister dans les premiers temps de l'univers et on examine le résultat des expériences pour simuler en laboratoire l'état de l'univers primitif. Les physiciens ont pensé qu'en remontant suffisamment loin dans le passé énergétique de l'univers, l'interaction électromagnétique et l'interaction faible devaient s'unifier en une seule interaction dite "électrofaible". Selon les calculs cela n'a pu se produire que lorsque la température de l'univers était de 1000 milliards de degrés, quand l'univers n'était âgé que d'un millième de milliardième de seconde. Pour vérifier ces prédictions en laboratoire, on a construit un gigantesque accélérateur de particules européen près de Genève, au C.E.R.N. Et la prédiction a été vérifiée - ce qui a valu le prix Nobel aux théoriciens qui l'avaient prédite et aux expérimentateurs qui l'avaient vérifiée. Maintenant, grande question : que s'est-il passé

pendant le premier millième de milliardième de seconde ?... On n'a aucune évidence expérimentale, il ne reste plus que le calcul théorique. On extrapole, on spéculé qu'à  $10^{-35}$  seconde, l'interaction électrofaible s'unifie avec l'interaction forte. Et en continuant le raisonnement, on se dit que la gravitation finit, elle aussi, par s'unifier. Quand le fait-elle ? Pas au temps zéro. En fait le temps zéro n'a aucun sens. Le plus petit temps que l'on puisse imaginer en physique est  $10^{-43}$  seconde, c'est le temps de Planck. Et c'est à ce temps-là que l'univers aurait été régi par une interaction unique. Reprise dans le sens de la marche, l'évolution de l'univers depuis le temps de Planck jusqu'à aujourd'hui est donc celle d'un refroidissement et d'une suite de brisures de symétrie, qui ont engendré les interactions fondamentales.

C. U. : Y a-t-il d'autres théories que le big-bang ?

J-P. L. : Certes. On lit assez souvent, dans la presse de vulgarisation scientifique, que le big-bang était remis en question. C'est très exagéré. Évidemment le big-bang n'est qu'un modèle, il ne décrit pas la vérité, il n'y a d'ailleurs jamais de vérité en science, les modèles changent constamment. Mais le big-bang est actuellement le seul modèle plausible, parce que fondé sur une théorie de la gravitation satisfaisante, la relativité générale, et surtout compatible avec toutes les observations actuelles. C'est le seul modèle qui satisfasse à ces deux critères... Le problème, c'est que le big-bang pose des interrogations qui sont à la limite du questionnement scientifique, et qui relèvent de la métaphysique, notamment l'existence d'un temps zéro, d'une création du monde, etc. Il est intéressant de réfléchir aux implications métaphysiques du big-bang, mais ces réflexions, comme elles sont très subjectives, nuisent parfois à la crédibilité objective du modèle. ... En tous cas, certaines alternatives ont été proposées au modèle de big-bang. Mais jusqu'à présent, aucune n'a tenu le choc de la confrontation avec les observations. Dans les années 1950, des astrophysiciens ont refusé de croire que l'univers était en évolution. Ils ont imaginé un modèle « de l'état stationnaire » dans lequel l'espace était en expansion, mais créait en permanence de la matière, pour garder l'idée que la densité moyenne de l'univers devait rester invariable au cours du temps. C'était un présupposé philosophique, n'est-ce pas ? Le modèle a été abandonné lorsqu'en 1965 on a découvert le vestige du big-bang sous la forme du rayonnement fossile à  $-270$  °C, qui confirmait la théorie du big-bang. Depuis il y a eu bien d'autres modèles alternatifs, mais à chaque fois qu'on les a confrontés aux observations, ils ont échoué. Jusqu'à présent c'est toujours le modèle de big-bang, amélioré par des petites variantes, qui reste le modèle satisfaisant pour décrire l'évolution de l'univers.

X. F. : En modifiant les théories d'origine est-ce qu'on modifie toutes les théories physiques qui en découlent ?

J-P. L. : Les théories d'origine sur lesquelles repose tout l'édifice du big-bang, ce sont la relativité générale et la mécanique quantique. Si vous touchez à ces deux piliers fondamentaux, vous altérez toutes les conséquences. Ce que tentent de faire aujourd'hui certains théoriciens, c'est de construire une super théorie mélangeant la gravité et la mécanique quantique pour obtenir un seul pilier pour toute la physique, de l'infiniment grand à l'infiniment petit.

X. F. : Ce qui m'étonne, c'est la fragilité de la théorie du big-bang ; elle ne repose pas sur une masse énorme de données ?

J-P. L. : Il y en a essentiellement quatre...

X. F. : Si on part d'hypothèses qui sont vérifiées avec très peu de données, cela peut être assez dangereux, non ?

J-P. L. : D'accord! Mais il faut voir que si on modifie la relativité générale et la physique quantique pour aboutir à un modèle de gravité quantique, il n'y aura peut-être plus de big-bang stricto sensu, c'est-à-dire pas de temps zéro, mais il n'empêche que le nouveau modèle ne sera pas très différent du précédent, car toute l'histoire longue de 15 milliards d'années à partir du premier millième de milliardième de seconde, elle, ne sera pas changée. On ne peut pas modifier arbitrairement les théories de base, au point de changer cette portion d'histoire qui, elle, est vérifiée par les observations. Donc il n'est pas évident que le modèle du big-bang soit si fragile que cela. Au contraire...

A. T. : Y a-t-il des artistes contemporains que vous suivez et dont vous tenez compte, même indirectement, dans ce que vous faites ?... ou qui peuvent vous apporter des idées?

J-P. L. : L'art n'est pas un moteur de la recherche scientifique, c'est tout autre chose. Le travail scientifique est un travail de pointe, et par définition un travail de pointe, dans quelque discipline que ce soit, ne se trouve pas de façon évidente en correspondance avec d'autres domaines. Bien sûr on peut trouver des analogies, mais uniquement à posteriori, quand on s'aperçoit qu'il y a des résonances avec tel tableau ou telle composition musicale ... Il est assez rare que des développements scientifiques entiers naissent à partir d'œuvres artistiques...

Philippe Meste : Chez les Grecs, par exemple, il y a des ressemblances entre certaines représentations artistiques du monde et l'orientation des recherches ...

J.P. L. : Bien sûr ! J'aime cette idée que les développements de la science ne se font pas indépendamment du développement général des idées, à la fois dans la culture, dans l'art, mais aussi dans l'organisation des états, dans la situation politique, économique, religieuse... Il est difficile de faire des théories globales là-dessus, mais il est vrai qu'on pourrait réfléchir si les conditions sociales, politiques, économiques et culturelles à la fin du XIX<sup>e</sup> et au début du XX<sup>e</sup> siècle ont favorisé l'éclosion de la théorie de la relativité générale, du big-bang et de la mécanique quantique.

X. F. : Du fait qu'il y a un observateur, on peut pas éluder la question sociologique, même en physique...

J-P. L. : Je suis d'accord. Et pour l'illustrer, je vais vous raconter comment s'est passée l'invention du big-bang. Entre les années 1910 et 1920, la théorie de la relativité existait déjà, et Einstein a cherché un modèle d'univers qui serait la solution de ses équations. Il a trouvé quelque chose qu'il a jugé inacceptable : il a trouvé justement la possibilité que l'univers soit en expansion. Or, culturellement Einstein était ancré dans l'idée que l'univers était donné une fois pour toutes, qu'il était statique et invariable dans le temps. Donc Einstein a introduit dans ses équations un terme mathématique supplémentaire pour empêcher l'expansion de l'univers. C'est le modèle d'Einstein, qui date de 1917. Quelques années après, grâce à d'importants soutiens financiers apportés par des mécènes, des astronomes Américains ont construit de très grands télescopes et ont commencé à observer les galaxies très lointaines. Ils se sont aperçus que toutes les galaxies avaient un décalage spectral vers le rouge, ce qui signifiait, en vertu de l'effet Doppler, qu'elles s'éloignaient systématiquement

de nous. Cela paraissait incroyable ! De plus, elles semblaient s'éloigner d'autant plus vite qu'elles étaient plus loin. C'est ce qu'on appelle la loi de Hubble. En fait, l'idée d'expansion de l'univers était contenue en germe dans la théorie de la relativité, mais Einstein et d'autres théoriciens avaient refusé de le voir. Et quand la découverte a été faite par hasard par les astronomes, à leur tour les astronomes n'ont pas voulu l'accepter : Hubble n'a jamais voulu croire que l'espace était en expansion ! Mais dès qu'il a publié les résultats de ses observations du décalage vers le rouge des galaxies, des théoriciens se sont dits "Mais bon sang ! Il ne fallait pas introduire le fichu terme qu'Einstein a ajouté aux équations pour empêcher que l'univers soit en expansion !"... Enfin, en 1927, un savant belge nommé Georges Lemaître a le premier compris comment la relativité générale expliquait parfaitement l'univers en expansion. Mais c'est là que les problèmes sérieux commençaient. Parce que Lemaître s'est dit que si l'univers était en expansion, alors en extrapolant dans le passé, il avait dû y avoir un moment où l'univers était né de rien, voici quelques milliards d'années. Lemaître a donc conclu que l'univers, l'espace, le temps et la matière étaient nés d'un événement singulier initial, qu'il a appelé "l'atome primitif". C'était en 1931. Ceci montre l'imbrication entre les croyances philosophiques et religieuses et l'élaboration des modèles scientifiques. Lemaître n'était pas seulement un génial mathématicien, il était aussi prêtre, plus précisément chanoine à Louvain, en Belgique. Pensez donc ! Un religieux ! Ses collègues scientifiques l'ont immédiatement soupçonné de vouloir justifier le récit de la Genèse : la création de l'univers à partir de rien. Ils lui ont dit : "Votre modèle est mathématiquement juste, mais physiquement cela ne peut pas marcher parce que cela évoque trop la création du monde." Lemaître s'est défendu de vouloir mélanger la religion et la science. Il était sincère, et pourtant il est mort en 1966, quasiment oublié de ses contemporains, alors qu'il avait inventé la plus grande théorie scientifique du siècle. Une semaine avant de mourir, un de ses assistants va le voir sur son lit d'hôpital et lui dit : "Monseigneur Lemaître, vous aviez raison ! On vient de trouver dans le ciel la preuve de l'atome primitif !". C'était le rayonnement fossile à  $-270$  °C, vestige de l'univers chaud primitif. A partir de là, presque tout le monde s'est rué sur le modèle du big-bang. Vous voyez que la façon dont les idées scientifiques finissent par s'imposer est toujours liée à des problèmes de société, de croyance, de présupposés culturels et philosophiques... Des chercheurs comme Einstein, par exemple, fantastiquement perspicaces dans certains raisonnements, ont eux-mêmes des blocages culturels... D'ailleurs, Einstein l'a reconnu plus tard : "J'ai fait la plus grande erreur de ma vie : ne pas reconnaître dans mes équations que l'univers était en expansion !" Il a été tellement dégoûté par son erreur qu'il a cessé de faire de la cosmologie. Inversement, Lemaître a découvert le big-bang avec une intuition extraordinaire mais il est resté ignoré de son vivant parce qu'on l'a accusé de vouloir promouvoir ses croyances religieuses. Et même aujourd'hui que le big-bang est accepté, qui connaît Georges Lemaître ? Cela semble bien injuste, mais toute l'histoire des sciences fourmille de ce genre d'injustices!.

S. F. : C'est peut-être de l'histoire ancienne, mais même ce terme de big-bang était au départ péjoratif...

J-P. L. : Absolument ! Le principal adversaire de la théorie du big-bang était un astronome britannique très connu, Fred Hoyle. Dans les années 1960 il faisait une émission de radio pour vanter les mérites de son propre modèle, l'univers stationnaire, et il a qualifié le modèle de Lemaître de « big bang », « grand boum », pour se moquer ... Le mot a fait fortune, et aujourd'hui tout le monde l'a adopté.

Eric Duyckaerts : Mais on a posé une question sur la manière dont vous regardez les artistes qui travaillent sur l'espace.

J-P. L. : Tous les artistes travaillent sur l'espace.

Sarkis : Oui mais, Lucio Fontana, cet artiste italien qui a lancé des concepts spatiaux dans son œuvre c'est comme les toiles trouées, vous savez... Vous qui êtes un scientifique, comment vous réagissez...?

J-P. L. : En principe je ne regarde pas les tableaux avec l'œil du scientifique...

Sarkis : Arrivez-vous à faire abstraction de votre métier en regardant une œuvre de Fontana ou de Jackson Pollock... ?

J-P. L. : Je n'ai jamais établi le moindre rapport entre l'œuvre de Pollock (que je connais et apprécie relativement) et mon travail... D'une manière générale, quand je contemple des œuvres d'art, je ne prête aucune attention à un possible codage d'informations scientifiques. Je laisse aller mon émotion et mon sens esthétique.

Sarkis : Donc cela ne vous apprend jamais rien pour votre métier ?

J-P. L. : Pas directement... Mais on apprend toujours d'une certaine façon, ne serait-ce que par l'enrichissement intérieur que cela procure. Quand je vois une œuvre d'art qui me touche, cela enrichit mon imaginaire. Or, il faut savoir que la recherche scientifique de pointe fait appel à l'imaginaire. L'imaginaire d'un scientifique qui fréquente régulièrement les œuvres d'art s'enrichit de tous ces apports, et un jour, cela peut l'ouvrir sur une création dans le domaine scientifique. Ces influences sont très subtiles ... En ce qui me concerne, je pense qu'effectivement il y a eu, dans mon histoire passée, tout un enrichissement culturel qui m'a poussé à travailler dans certaines directions, à savoir le rapport entre la réalité et les illusions d'optique. Avec l'idée que nous sommes en permanence plongés dans l'illusion, comme le suggèrent nombre d'ouvrages philosophiques. Il y a une première illusion qui s'intercale entre le réel et le perçu : c'est notre système visuel, qui fait filtre, et brouille les données brutes du réel. Mais cela concerne plutôt les physiologistes. Le but de ma recherche en physique, ce sont les illusions engendrées non pas par l'imperfection de nos sens, mais par la nature même du monde : ce n'est pas seulement notre système mental qui brouille le réel : c'est la nature même du monde qui est voilée. Un exemple très connu est la théorie de la mécanique quantique. Le pilier de base de cette théorie est ce qu'on appelle le "principe d'incertitude". Pour résumer, il contient l'idée que les propriétés réelles des particules élémentaires sont à jamais inaccessibles, qu'elles sont cachées derrière une sorte de voile. Avec les univers chiffonnés j'ai trouvé intéressant de chercher une sorte de principe général d'incertitude qui agirait cette fois au niveau cosmique. Avec des illusions engendrées non par notre système visuel, mais par la forme même de l'espace... Or, bien avant de m'engager dans ces recherches, j'avais été fasciné par des œuvres contenant des jeux d'illusion... Par exemple Salvador Dali... C'est au XX<sup>e</sup> siècle que les artistes ont poursuivi le plus de recherches sur les figures ambiguës et les architectures spatiales déroutantes...

S. F. : Selon vous, ces figures ambiguës ont-elles d'une manière ou d'une autre un rapport avec la logique de la contradiction?

J-P. L. : Je ne connais pas.

S. F. : Je parle de ces théories des années 50 essayant de concilier deux théories de types opposés... Ils prenaient la théorie de la lumière en exemple et disaient grosso modo : c'est une onde, mais c'est en même temps une projection de particules...

J-P. L. : Ce n'est contradictoire qu'au premier niveau. Mais dans la théorie quantique, les aspects ondulatoire et corpusculaire ne sont absolument pas contradictoires – au contraire, ce sont des aspects complémentaires, ce qui n'est pas du tout la même chose !...La complémentarité, ce n'est pas la contradiction !...On visualise une onde comme une vague et un corpuscule comme une petite bille... Ces deux représentations ont l'air antagonistes, mais à un niveau plus profond, en l'occurrence les équations de la mécanique quantique, on voit apparaître les deux aspects. C'est bien cette complémentarité qui est forte, et qui aujourd'hui donne des résultats dans tous les domaines où elle s'applique. En revanche, au sujet des figures impossibles, il me semble qu'il faut retenir l'idée d'objet et de "non-objet" : un objet qui semble pouvoir exister, et qui en fait n'existe pas. Ce qui, d'après moi, se rapproche plutôt de concepts psychanalytiques. Quand j'en ai parlé à un ami psychanalyste, il m'a dit : "Cela me rappelle l'injonction paradoxale." Je crois que c'est Lacan qui a le plus développé cette question : en de nombreuses situations, dans la vie mentale d'un individu, il est confronté à deux situations qui semblent totalement conflictuelles, et le problème de l'individu c'est soit de faire un choix, soit de s'apercevoir qu'en fait ces deux propositions ne sont pas contradictoires. Dans le cas du choix, il faut évidemment faire le deuil de ce qu'on laisse de côté....

S. F. : Donc, pour revenir à la logique contradictoire, on pourrait peut-être dire qu'elle essaye tout simplement de lier deux domaines sans grande nécessité... C'était le début des années 50.

J-P. L. : A cette époque, en effet, la mécanique quantique, effectivement, n'avait pas complètement réalisé l'importance de la complémentarité.

X. F. : La mécanique quantique est une approche fondamentaliste. Elle veut résoudre en allant plus profond, ou en le croyant tout au moins, plutôt que d'avoir une approche globalisante... Mais tout à l'heure, on voyait bien que la question du big-bang était conditionnée par d'autres théories, et donc qu'elle se vérifiait de manière globale, et non pas spécifique.

J-P. L. : Qu'est-ce que vous voulez dire par-là ? La mécanique quantique joue un rôle fondamental dans les idées d'unification. Elle s'est développée à peu près à la même époque que la relativité générale. Mais ces deux théories contemporaines ne sont pas compatibles. Toute sa vie, Einstein lui-même a essayé de les rendre compatibles, il n'y est pas parvenu. Aujourd'hui encore, les physiciens essaient de marier la théorie de la relativité et la mécanique quantique, sans y parvenir.. Toujours est-il que les deux théories régissent des phénomènes de l'univers qui sont a priori différents, puisque la relativité générale régisse les phénomènes de gravitation, donc les phénomènes de nature astronomique, tandis que la mécanique quantique régisse les interactions entre particules élémentaires, à un niveau où la gravitation n'intervient pas. Pour décrire les systèmes physiques, ont fait appel soit à l'une, soit à l'autre. On ne mélange pas les deux. Disons que dans 99,9% des cas, on ne mélange pas. Mais évidemment, il y a des phénomènes particuliers qui se trouvent à la charnière des deux théories, et les meilleurs exemples sont justement les trous noirs et le big-bang. C'est la raison pour laquelle j'en ai parlé si longuement... Qu'est-ce qui se passe au fond des trous noirs?... Il y a à la fois de la gravitation, puisque les trous noirs sont le résultat d'un effondrement gravitationnel gigantesque, mais comme la matière effondrée

converge vers une singularité centrale, il doit forcément y avoir un moment où les phénomènes deviennent régis également par la mécanique quantique. Comment ? On n'en sait rien. C'est exactement pareil pour le big-bang : si tout l'ensemble de la matière de l'univers est indéfiniment compressée à mesure qu'on s'approche du big-bang, cela veut dire que la mécanique quantique, qui n'intervient pas dans l'univers d'aujourd'hui à grande échelle, devait en revanche jouer un rôle fondamental au tout début de l'univers, quand il était extraordinairement petit, chaud et dense ... Et c'est justement en construisant une théorie unifiée qui marie la relativité générale et la mécanique quantique que l'on dégage de nouvelles idées étranges, comme celle de l'écume de l'espace-temps, ou de brisure spontanée de symétrie.

Si au siècle prochain une équipe de physiciens géniaux élabore une théorie satisfaisante de la gravité quantique qui réussirait à décrire l'univers primordial ou le centre des trous noirs, ils seront peut-être amenés à supposer qu'à cette époque, l'espace avait 10 dimensions, et qu'ultérieurement, en un temps extraordinairement bref, parmi ces 10 dimensions, trois se sont dilatées pour devenir les dimensions normales de l'espace, tandis que sept autres sont restées toujours à la longueur minuscule de  $10^{-33}$  cm... Ce qui voudrait dire qu'aujourd'hui il y aurait trois dimensions d'espace perceptibles parce qu'elles sont à notre échelle, et sept complètement inaccessibles. On retombe donc dans une approximation de la relativité générale et de la mécanique quantique telles qu'elles existent aujourd'hui. Ce qui ne veut pas dire qu'on ne puisse plus toucher à ces deux piliers, mais disons qu'à mesure que la science se construit et s'avère de plus en plus efficace pour décrire les phénomènes naturels, il devient de plus en plus difficile de remettre en question ses fondations... Imaginons que demain, dans un laboratoire quelconque, on découvre un phénomène totalement incompris qui oblige à réviser le fondement même des choses... Ce n'est pas impossible, ce serait même hautement excitant ! Il faudrait peut-être reconstruire les troncs de base, mais en s'assurant que tout un ensemble de ramifications resteraient correctes. Parce qu'il faudra bien continuer à expliquer le mouvement des planètes, par exemple... Souvenons-nous que la théorie de la relativité a remplacé conceptuellement la théorie de l'attraction universelle de Newton, mais que dans la pratique, la théorie de Newton donne encore de très bons résultats pour calculer les trajectoires des planètes autour du Soleil autant que celles des satellites artificiels qu'on envoie dans l'espace... Avec les lois de l'attraction universelle de Newton, dont on sait pourtant que c'est pas la meilleure théorie de la gravitation, on fait quand même des calculs suffisamment précis pour envoyer une sonde se poser sur la Lune avec une précision de dix mètres...

Mais nous arrivons à la fin de cette journée... Cela a été un grand plaisir pour moi d'avoir pu développer quelques-uns de mes sujets favoris devant un auditoire non spécialisé... Vous avez eu le courage de m'écouter pendant de nombreuses heures. Entre collègues, nous parlons un jargon beaucoup plus technique. Ici j'ai évité les termes techniques et j'ai cherché des équivalents visuels... C'était très enrichissant pour moi aussi.

Sarkis : Vous dessinez un chemin...

J-P. L. : Ah oui, c'est cela ! Ce chemin, c'est en quelque sorte l'émergence de la complexité... On part d'un tronc unique, et des branches commencent à pousser, puis des feuilles. La diversité s'introduit dans l'univers, mais l'unité demeure en même temps...

**Bibliographie**

J-P. Luminet : *Les trous noirs*, Le Seuil, 1992

J-P. Luminet : *Les poètes et l'univers*, Le Cherche Midi, 1996

M. Lachèze-Rey & J-P. Luminet : *Figures du Ciel*, Le Seuil, 1998

J-P. Luminet : *L'Univers chiffonné*, Fayard, 2001