

Quelle forme pour l'univers ?

Roland Lehoucq

Quelle est l'étendue de l'univers ?

Est-il fini ou infini ?

A-t-il une forme ?

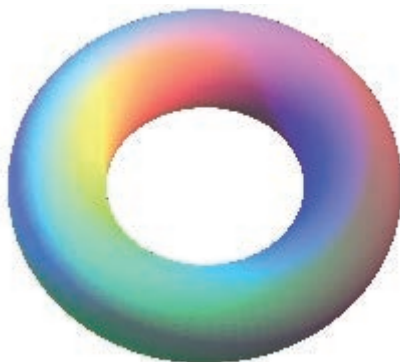
Cela fait moins de cent ans les scientifiques tentent de répondre à ces questions qui hantent l'esprit humain depuis des dizaines de siècles. Toutes les tentatives visant à élucider ces énigmes se heurtent à un fait incontournable : s'il est possible d'apprécier la forme d'une planète ou d'une galaxie car nous pouvons les observer de l'extérieur, celle de l'univers nous semble inaccessible car nous ne le percevons que de l'intérieur. Cette situation s'est déjà produite dans le passé. Notre voisinage terrestre nous apparaît plan, limité par un horizon, et longtemps l'humanité a crû évoluer sur une Terre plate et limitée par un bord. Pourtant on a pu montrer que la Terre était sphérique bien avant de pouvoir la voir de l'extérieur, depuis l'espace.



Galaxie Messier 83 © ESO

Que dire de la forme et de l'extension de l'univers ?

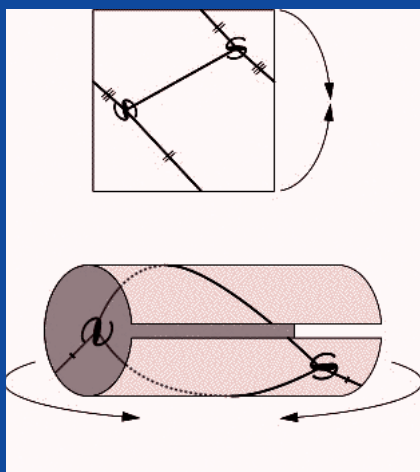
Les savants furent longtemps partagés entre deux termes qui posaient problème : soit l'univers est fini et limité par un bord, mais l'idée d'un bord répugne, car, dira-t-on toujours, qu'y a-t-il derrière le bord ? , soit l'univers est infini, mais alors comme le concevoir ? Pourtant les mathématiciens avaient déjà étudié des surfaces à la fois finies et dépourvues de bord : la sphère en est un exemple. Pour en construire une autre, découpez un long rectangle dans une feuille de caoutchouc. En collant l'un contre l'autre ses deux grands côtés vous obtiendrez un tuyau cylindrique terminé à chaque extrémité par une circonférence formée par le petit côté du rectangle. En collant l'une contre l'autre ces deux circonférences vous voilà avec une sorte de chambre à air de bicyclette, un tore disent les mathématiciens. Une fourmi qui s'y déplace n'est nullement limitée dans ses mouvements. Et pourtant, le



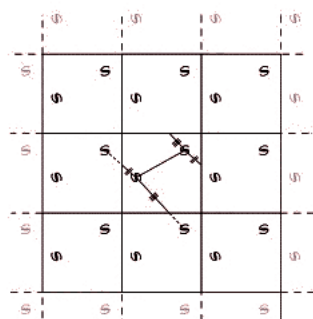
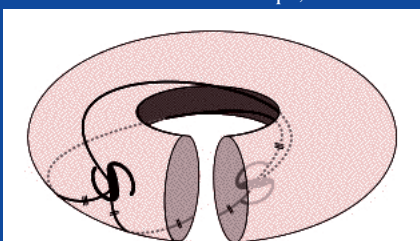
Tore © www.mathcurve.com/

Quelle forme pour l'univers ?

domaine qui lui est accessible est d'aire finie, égale à celle du rectangle initial, et ne possède pas de bords.



opérations à mener pour réaliser un univers bidimensionnel torique,



ainsi que l'illusion qu'aurait un habitant tout plat d'un univers bidimensionnel torique

Remarquons que ces opérations de collage et de déformation élastique reviennent à déclarer identiques deux côtés opposés du rectangle. Cela revient à dire qu'une fourmi se déplaçant à la surface du rectangle et atteignant l'un de ses côtés ne sort pas du rectangle, elle y entre par le côté opposé. Il lui est alors impossible de quitter la surface délimitée par les côtés du rectangle.

Il est clair que si la taille de l'univers observable est gigantesque, il est difficile de reconnaître si les lignes que nous appelons droites ne sont pas en réalité des courbes immenses se refermant sur elles-mêmes. Cette idée n'est pas plus paradoxale que ne pouvait l'être pour un homme primitif l'idée qu'en marchant constamment droit devant lui, vers l'est, il finira par retrouver son point de départ, où il arrivera en venant de l'ouest. L'univers pourrait donc *se refermer sur lui-même*, être fini et sans bord.

Comment la fourmi peut-elle se rendre compte de l'étrangeté de son espace vital sans en quitter la surface ?

En marchant ! Elle repère un point de départ, s'en éloigne et cherche tous les chemins qui y reviennent. Elle peut commencer par avancer dans une direction quelconque avant de rebrousser chemin en faisant un boucle ; c'est le classique *demi-tour*. Mais il existe deux directions remarquables qui la ramèneront à son point de départ. Notre fourmi peut décrire une petite circonférence du tore, c'est-à-dire parcourir en allant toujours tout droit une distance égale à l'un des petits côtés du rectangle. Elle peut aussi décrire une grande circonférence, égale à l'un des grands côtés du rectangle. On peut démontrer que tous les autres chemins qui ramènent la

Quelle forme pour l'univers ?

fourmi à son départ se construisent à partir de ces deux-là, en parcourant un certain nombre de petites circonférences et un certain nombre de grandes, dans un sens ou dans l'autre. Une fois ce travail réalisé, la fourmi sait qu'elle n'évolue pas sur un plan infini car dans ce cas il n'y aurait qu'une seule façon de revenir au point de départ : en suivant le classique chemin en boucle.

Que faire si les distances à parcourir sont trop grandes ?

La fourmi va utiliser la lumière en guise de chaîne d'arpenteur. La lumière d'une source placée à la surface du tore doit épouser celle-ci et plusieurs chemins lui permette d'atteindre la fourmi. Un rayon peut atteindre la fourmi en suivant le chemin le plus court mais aussi, partant dans la direction opposée, en faisant un tour complet du tore. Il peut aussi s'enrouler un certain nombre de fois autour de la petite circonférence et un certain nombre de fois autour de la grande. Comme dans un pièce remplie de miroirs, il est aisé de comprendre que cette multiplicité de chemins se traduit par une multiplicité des images observées par notre fourmi.

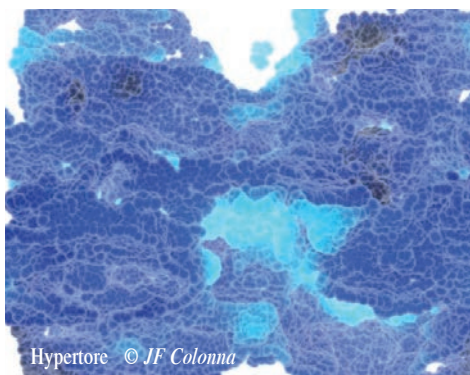
Quelle est la conclusion de notre fourmi ?

Une unique hypothèse lui permet d'expliquer toutes ses observations : son espace vital est un plan infini recouvert de rectangles aux contenus identiques, jointifs deux à deux et se déduisant les uns des autres par translation. Quand notre fourmi, se déplaçant en ligne droite, boucle un tour du tore tout se

passer comme si elle atteignait le point situé dans un rectangle voisin. De son point de vue, les multiples sources lumineuses observées ne sont pas les images d'une unique source ; elles sont bien réelles, régulièrement placées à l'intérieur de chaque rectangle. La structure particulière de son espace réel donne ainsi à la fourmi l'illusion de vivre dans un espace infini. Non seulement il n'est pas contradictoire pour un espace d'être fini et sans bords, mais il donne à ses habitants l'illusion d'être infini.

Existe-t-il des espaces à trois dimensions finis et sans bords ?

Bien sûr ! Il suffit de généraliser le procédé de construction du tore en remplaçant le rectangle plan initial par un parallélépipède rectangle dont les faces opposées sont collées deux à deux. Pour *voir* le collage des faces équivalentes l'une contre l'autre il faudrait l'effectuer dans un espace à quatre dimensions, inaccessible à nos sens. Alors, la construction qui consiste à identifier mentalement les paires de faces opposées prend tout son intérêt. Le volume obtenu est un *hypertore* qui, comme le tore, donnerait l'illusion à ses habitants de vivre dans un espace infini



Hypertore © JF Colonna

Quelle forme pour l'univers ?

qu'ils pourraient se représenter comme un réseau de parallélépipèdes identiques, parfaitement jointifs et copies les uns des autres. L'espace présente ainsi une structure triplement périodique puisqu'il existe trois directions particulières, telles qu'en nous déplaçant en ligne droite selon l'une d'elles, nous trouverons, après avoir parcouru une longueur déterminée, une région de l'espace rigoureusement identique à celle d'où nous sommes partis. Sous



cette forme, l'hypothèse paraît étrange et presque absurde ; elle l'est peut-être moins si l'on admet qu'en réalité, ce n'est pas en un lieu identique que l'on arrive, mais exactement au lieu de départ, c'est-à-dire que la périodicité est du même type que celle constatée par notre fourmi en promenade sur un tore et non celle que constaterait la même fourmi en se déplaçant sur un vaste mur couvert de motifs se répétant périodiquement. Comme pour le tore la lumière émise par une source peut aussi emprunter plusieurs chemins pour nous atteindre.

Une même galaxie sera donc vue de multiple fois dans différentes directions du ciel. Chaque galaxie de notre univers ayant un grand nombre d'images, notre ciel nous apparaîtra peuplé d'une myriade de galaxies, fantômes issus d'une poignée de galaxies réelles.

Et que dire de notre univers ?

L'une des plus grandes découvertes du XX^e siècle se résume en une seule phrase : l'univers a une histoire. Il y a 13,7 milliards d'années, il était extrêmement homogène, dense et chaud. Depuis, il est soumis à une expansion et le lieu de la formation progressive des structures cosmiques, galaxies et amas de galaxies. Le principal vecteur de l'information que nous recevons du ciel est la lumière, qui se déplace à la fabuleuse vitesse de 300 000 km/s. Fabuleuse, mais finie ! Ainsi, plus nous regardons loin plus la lumière a mis de temps pour nous parvenir et plus nous regardons dans le passé. Tout comme les marins, nous sommes limités par un horizon et quand les astrophysiciens parlent d'*univers* ils pensent d'abord à l'*univers observable*, accessible à leurs



Quelle forme pour l'univers ?

instruments, dont la taille est limitée par la distance parcourue par la lumière depuis sa naissance. Ils pensent aussi aux *univers modèles*, issus de leurs calculs mathématiques, qui doivent donner une description correcte de la zone limitée qui nous est directement accessible ; c'est même le critère que doit impérativement satisfaire un modèle pour être acceptable. Dans la plupart des modèles cosmologiques, l'univers *réel*, assimilé au modèle, est plus vaste que l'univers observable. Cela semble d'ailleurs logique puisque la physique se fonde sur l'idée que le monde *observable* est une partie, une projection, du monde *réel* imaginé comme beaucoup plus vaste. Les astrophysiciens adoptent le même parti et considèrent communément que l'univers réel, imaginé à partir d'un modèle qui ne décrit correctement que l'univers observable, est forcément plus vaste que ce dernier, voire infini. Mais nous avons vu qu'un être hypothétique évoluant à la surface d'un tore a l'illusion de vivre à la surface d'un plan infini puisque aucun bord, aucune limite, ne vient entraver ses déplacements. Il en conclurait certainement que son univers observable est infini alors que son univers réel est fini.

Spectaculaire renversement de situation. Il faut donc abandonner nos préjugés en cosmologie et tenir compte des univers modèles, aux formes étranges pour notre intuition commune, où c'est, au contraire, l'univers observable qui est plus grand que l'univers réel.



Alors, l'univers est-il fini ?

Aujourd'hui, la réponse peut paraître décevante : aussi loin qu'ils puissent voir, les astrophysiciens n'ont pas encore détecté de signes certains de sa finitude. Cela ne signifie pas forcément que l'univers est infini mais seulement qu'il est plus grand que la taille de notre horizon, soit environ 46 milliards d'années-lumière. Sachez toutefois que s'il est théoriquement possible de prouver la finitude de l'univers, son infinitude restera, elle, à jamais indémontrable.

Roland Lehoucq

Astrophysicien au CEA - Saclay

Pour en savoir (un peu) plus

Roland Lehoucq, *L'Univers a-t-il une forme ?*, Flammarion

Jean Pierre Luminet, *L'Univers chiffonné*, Editions Fayard

Note

Pour explorer des espaces aux topologies variées allez consulter l'excellent site de Jeffrey Weeks

<http://www.geometrygames.org/CurvedSpaces/>