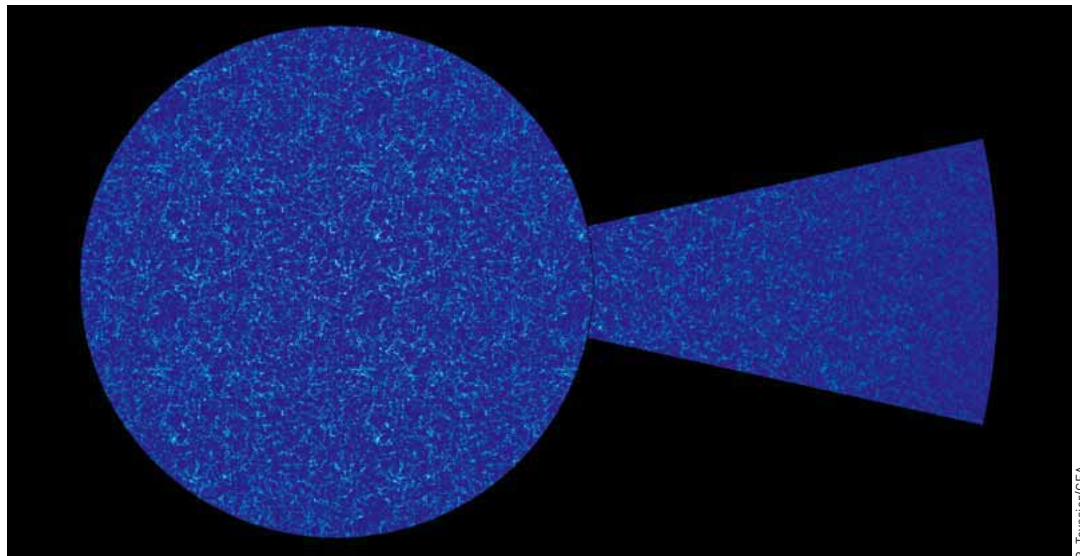




## Formation des structures de l'Univers : le jeu des modèles

Ne pouvant mettre l'Univers en laboratoire, les astrophysiciens développent des modèles numériques pour décrire son évolution. Leur résolution s'accroît de génération en génération mais il reste encore bien des mystères, en particulier la nature de la matière et de l'énergie noires.

Cône de lumière représentant la fraction de l'Univers observable, simulée en 2007 par la collaboration Horizon sur l'ordinateur platine du **CCRT**, le centre de calcul du CEA. Cette simulation de haute performance, qui a pris en compte près de 70 milliards de particules et plus de 140 milliards de mailles, va permettre aux astrophysiciens de prédire quelle est la distribution de matière dans l'Univers avec une précision et un réalisme sans précédent.



R. Teysseier/CEA

Notre vision de l'Univers a beaucoup évolué à travers les siècles. Dans sa *Divine Comédie*, Dante Alighieri (1265-1321) décrit ainsi le cosmos : les **planètes** se déplacent sur des sphères concentriques, appelées mobiles, au centre desquelles se situe la Terre. Les **étoiles** vivent quant à elles sur la sphère la plus externe, nommée *Primo Mobile*. Le voyageur imaginaire dont Dante conte l'histoire découvre qu'au-delà de ce *Primo Mobile* se trouve une grande lumière qui, par l'intermédiaire du *Primo Mobile*, met en mouvement toutes les autres sphères. Cette vision poétique du cosmos pourrait constituer un **modèle** d'Univers médiéval, mais son langage résonne étrangement avec la vision moderne de la **cosmologie**. Au-delà de l'aspect poétique, cette vision s'apparente aussi à un modèle scientifique, dans la mesure où il permet de prédire le mouvement des planètes dans le ciel. Le mouvement rétrograde que certaines d'entre elles avaient le mauvais goût de suivre paraissait contredire le modèle, mais grâce à la théorie des *épicycles*, il fut possible de l'expliquer de façon relativement simple, sans menacer l'ensemble de l'édifice.

### Le contenu de l'Univers

Avant de décrire le modèle actuel de l'Univers, il convient de dresser un rapide portrait des objets qui peuplent le cosmos à grande échelle. Les planètes, elles, sont dans notre environnement immédiat. La cosmologie moderne s'attache à décrire la distribution d'objets beaucoup plus grands et lointains : les **galaxies**, et parmi elles, la nôtre, la **Voie lactée**. Ces grands objets majestueux sont composés de centaines de milliards d'étoiles comme le **Soleil**. De couleurs et de formes très variées (**spirales, elliptiques, irrégu-**

**lières**), les galaxies se distribuent dans l'Univers selon une structure très caractéristique appelée la toile d'araignée cosmique. Les galaxies se forment et évoluent au sein de ses grands filaments (voir *La toile d'araignée cosmique*, p. 65).

Observant encore plus loin, les astronomes ont découvert ce fameux rayonnement **micro-onde** – le **fond diffus cosmologique** ou rayonnement fossile (voir *La grande histoire thermique de l'Univers*, p. 62) – image de l'Univers lorsqu'il avait 380 000 ans. Cette photographie jaunée d'un Univers en culotte courte est d'une importance primordiale : elle donne accès aux conditions initiales de notre Univers. Qu'y voit l'observateur ? Un ciel essentiellement homogène, avec des fluctuations infimes, d'une amplitude de 1 pour 100 000. L'image appropriée est celle d'un lac tranquille, à la surface duquel l'observateur attentif discerne cependant d'infimes vaguelettes qui la perturbent très légèrement. L'origine de ces fluctuations demeure encore un mystère. La théorie la plus plausible est celle de l'inflation. Elle met en jeu des fluctuations de densité aux échelles **quantiques**, dans l'Univers **primordial**, suivies d'une phase d'inflation qui projette ces fluctuations quantiques aux échelles cosmiques. Il n'en demeure pas moins que les astronomes observent directement ces fluctuations, 380 000 ans après leur origine, lorsque l'Univers devient transparent et lève le voile sur sa vraie nature.

### Le big bang... et la suite

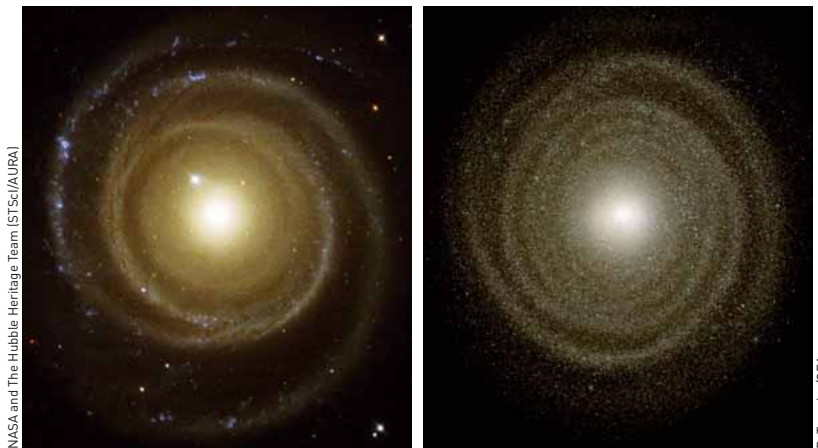
Le modèle actuel de formation des structures s'appuie sur la théorie du **big bang**, qui suppose un Univers en expansion décrit par la **relativité générale**. Terme péjoratif utilisé par l'astrophysicien

anglais Fred Hoyle pour se moquer de cette théorie, « big bang » est néanmoins devenu le nom « officiel » de la théorie ! Après la singularité initiale, qui joue le rôle du *Primo Mobile* de Dante en initiant l'expansion universelle, l'Univers se dilate et se refroidit, conduisant progressivement à l'apparition des particules et de leurs **interactions**. Ce modèle met en jeu trois composantes principales : la matière ordinaire (l'**atome** et ses constituants) qui ne représente que 4 % de l'énergie totale, la **matière noire** (environ 24 %) et l'**énergie noire** (72 %) ; voir *Formation des galaxies : une histoire paradoxale*, p. 56. Comme leur nom l'indique, la nature de ces deux nouveaux intervenants échappe encore aux physiciens. La matière noire est un fluide autogravitant<sup>(1)</sup>, mais sans collisions, ce qui empêche pour l'instant sa détection<sup>(2)</sup>. Sa signature **gravitationnelle** fournit néanmoins des preuves indirectes de sa présence. L'énergie noire, elle, est encore un peu plus mystérieuse. Elle a été introduite récemment dans le modèle, pour expliquer la brusque accélération qui semble caractériser l'expansion universelle depuis quelques milliards d'années. Elle pourrait être liée à un nouveau fluide, aux propriétés inédites, et dont l'action ne s'applique qu'à très grande échelle. Il s'agit de deux « points durs » de la théorie actuelle : il n'y a qu'un pas à faire pour les comparer aux fameux *épicycles* du modèle médiéval.

Continuons le film de la formation des structures. Les fluctuations primordiales vont croître sous l'effet de l'instabilité gravitationnelle : pour reprendre l'image du lac, les vaguelettes se transforment petit à petit en une houle qui se creuse, pour devenir finalement, au bout de 100 millions d'années, des vagues déferlantes, provoquant la naissance des premières étoiles. Cette phase d'amplification gravitationnelle s'appelle les *Âges Sombres*, qui prennent fin à l'apparition des premiers objets lumineux. C'est le début de la formation hiérarchique des objets cosmiques. Les premières galaxies à apparaître sont très petites : elles ne contiennent qu'un million d'étoiles. Elles vont ensuite se regrouper pour créer des galaxies plus grosses. Ces dernières vont évoluer, et entrer en collision les unes avec les autres, pour engendrer les galaxies massives qui peuplent l'Univers aujourd'hui, avec parmi elles la Voie lactée.

## L'Univers simulé

Le modèle qui permet de décrire cet assemblage hiérarchique des galaxies n'est autre que la mécanique des fluides autogravitants. Il s'agit d'un modèle mathématique relativement simple, mettant en jeu quelques lois de conservation et l'interaction gravitationnelle dans un champ faible<sup>(3)</sup>. Ce modèle, aussi simple soit-il, rend les calculs analytiques très difficiles à entreprendre. Les équations en jeu sont fortement non linéaires, et font intervenir des



MASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

R. Teysier/CEA

À gauche, image en vraie couleur de la galaxie NGC 4622. À droite, image en vraie couleur d'une galaxie simulée avec le code RAMSES, développé au Service d'astrophysique du CEA/Irfu, dans le cadre du modèle hiérarchique. L'accord entre le modèle et l'observation est excellent.

phénomènes chaotiques. Or, il est fondamental pour une théorie de pouvoir faire des prédictions quantitatives. Une bonne théorie se doit en effet d'être falsifiable : il faut pouvoir la confronter au réel par le biais de ses prédictions.

Pour calculer les prédictions de ses modèles complexes, la science moderne fait donc appel à l'ordinateur. Le triptyque théorie, simulation et expérience est au cœur de toute activité scientifique : désormais, la science « marche sur trois pattes ». C'est encore plus vrai pour l'astrophysique, qui ne peut évidemment réduire ses objets d'étude à une expérience en laboratoire. Les astrophysiciens n'ont accès au réel que par le biais d'objets très complexes, qui échappent totalement à leur volonté simplificatrice. L'ordinateur joue donc un rôle fondamental de médiation entre la théorie et l'observation. Aujourd'hui, il est possible de **simuler** l'évolution de 70 milliards de pseudo-particules grâce à une utilisation intensive des supercalculateurs (voir l'illustration p. 68). Il est malheureusement toujours impossible de simuler l'ensemble de l'Univers observable avec assez de détails pour accéder à l'échelle des galaxies. Les simulations cosmologiques à grande échelle ne permettent de simuler que la matière noire. Pour pouvoir comparer avec les observations, il est nécessaire de peupler les **halos** de matière noire par des galaxies. Cette étape est généralement réalisée par une démarche phénoménologique, appelée aussi approche semi-analytique, car elle mélange **modélisation numérique** et modélisation analytique. Tout en restant conscient des limites de cet exercice, il faut souligner l'accord spectaculaire entre ce modèle et la distribution réelle des galaxies. L'instabilité gravitationnelle d'une matière noire froide semble donc pouvoir expliquer la formation des structures de l'Univers à grande échelle.

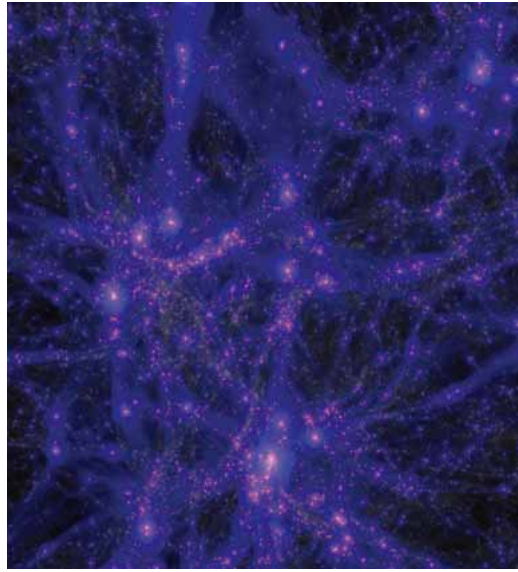
## Des questions en suspens

À plus petite échelle, le mystère de la formation des galaxies reste entier. La théorie, élaborée pendant les années 1970, met en jeu le rôle central du rayonnement. Les collisions entre atomes d'**hydrogène** conduisent au refroidissement rapide du **plasma**

(1) Comme la matière ordinaire, la matière noire est sensible à la gravitation qui freine sa dispersion.

(2) Les collisions entre particules provoquent l'émission de **photons**, détectables à distance.

(3) Cette restriction, dite « limite de champ faible », est la condition pour que la théorie newtonienne reste valable. Dans les champs forts (ou non statiques), il faut utiliser la théorie d'Einstein (relativité).



Vue en projection de la distribution du gaz et des étoiles dans la simulation MareNostrum réalisée sur l'ordinateur MareNostrum du centre de calcul de Barcelone (Espagne).

R. Teyssier/CEA

cosmologique. Ce dernier ne peut plus résister à l'**attraction gravitationnelle**, et les halos de gaz s'effondrent rapidement pour former des structures en équilibre centrifuge : les disques galactiques. Les propriétés microscopiques de l'atome d'hydrogène sont donc à l'origine de la masse des galaxies. La modélisation numérique de ce scénario pose de nombreux problèmes, pour la plupart liés à la résolution limitée des calculs. Pour surmonter l'obstacle, la **collaboration Horizon** a choisi de modéliser un Univers virtuel artificiellement petit (150 millions d'**années-lumière**), afin d'atteindre l'échelle des galaxies. La simulation MareNostrum, réalisée sur l'ordinateur du centre de calcul de Barcelone, n'en reste pas moins d'une ampleur inégalée. Elle a fait apparaître des disques à structure spirale, avec plusieurs milliers de **mailles** par galaxie. Néanmoins de nombreux problèmes demeurent : les galaxies simulées sont trop petites et elles contiennent trop d'étoiles, pour n'en citer que deux.

## L'Univers a-t-il une forme ? Est-il fini ou infini ?

Les **modèles cosmologiques** sont construits dans le cadre de la **relativité générale** d'Einstein, théorie qui interprète la **gravitation** comme une manifestation de la courbure de l'espace induite par la distribution de matière et d'énergie. En supposant que l'espace est homogène et **isotrope**, les mesures cosmologiques les plus récentes semblent indiquer une courbure très faible de l'espace. Les astrophysiciens attribuent alors à l'Univers une géométrie euclidienne. Répugnant à imaginer un Univers limité par un bord pour éviter la question gênante « Qu'y a-t-il derrière le bord ? », ils le considèrent comme infini. Pourtant, les mathématiciens ont montré depuis longtemps qu'un espace peut être à la fois fini et dépourvu de bords – la surface d'une sphère ou d'un tore en constituent deux exemples. Un être hypothétique évoluant à la surface d'un tore aurait l'illusion de vivre sur une

surface infinie, puisque aucun bord ne viendrait limiter ses déplacements. Il en conclurait certainement que son Univers observable est infini, alors que son Univers réel est fini (figure 1). L'application de cette idée aux modèles cosmologiques est riche d'enseignements.

Comment apparaîtrait l'Univers s'il se refermait sur lui-même à la manière d'un tore ? Pour atteindre l'observateur, la lumière émise par une **galaxie** lointaine pourrait emprunter plusieurs trajets : en suivant le chemin le plus direct, mais aussi, parmi une infinité d'autres possibilités, un autre qui ferait le tour de l'Univers – la surface du tore – en prenant la direction « opposée » à la précédente. La même source serait donc vue de multiples fois dans différentes directions et le ciel apparaîtrait peuplé de nombreuses galaxies fantômes, images d'une poignée de galaxies réelles. L'observateur aurait

l'illusion de vivre dans un Univers beaucoup plus grand et beaucoup plus rempli qu'il ne l'est en réalité (figure 1).

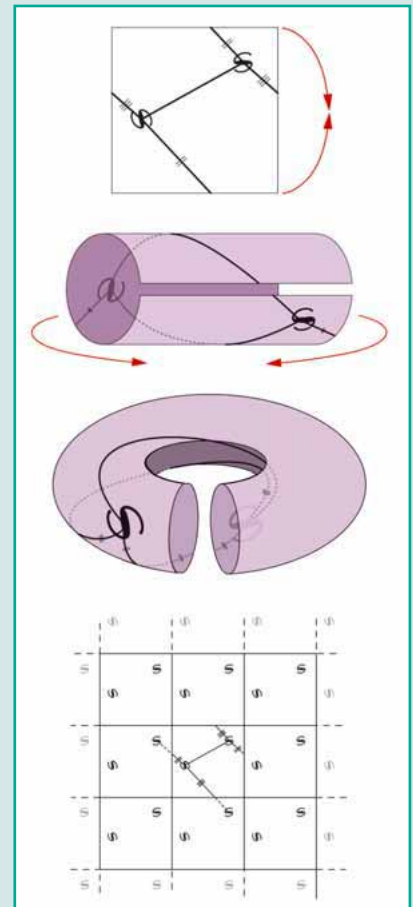


Figure 1. Principe de construction d'un Univers fini et sans bords à deux dimensions : on identifie les côtés opposés d'un carré. Un observateur qui vit à la surface d'un tel Univers a l'illusion de vivre sur un plan infini.



ESO

Quelle est la forme de l'Univers ? Est-il fini ou infini ? Il semble que les réponses à ces questions millénaires soient enfin accessibles à nos observations et à nos modèles cosmologiques.

Ce type de simulation doit en effet aborder un nouveau problème : simuler la formation des étoiles. Les modèles actuels de formation d'étoiles sont fondés eux aussi sur une approche phénoménologique. À chaque fois que les physiciens progressent dans la description mathématique du modèle, un nouvel horizon cognitif apparaît, et la solution leur échappe. La précédente génération de simulations s'attachait à simuler la matière noire, les galaxies représentant la frontière du modèle. La génération actuelle s'attaque à la modélisation des galaxies, avec comme nouvelle frontière la formation des étoiles. En extrapolant la loi de Moore<sup>(4)</sup>, il semble acquis que

(4) Loi empirique énoncée en 1965 par l'ingénieur électronique Gordon Moore, et jamais démentie par les faits jusqu'à aujourd'hui. Elle stipule que la densité de composants sur une puce électronique double tous les deux ans (chiffre ramené ensuite à 18 mois). La puissance des ordinateurs suit. Cette progression exponentielle devrait rencontrer des limites physiques vers 2015.

les dix à vingt prochaines années verront l'avènement de simulations permettant de simuler chaque étoile individuellement, avec vraisemblablement un nouveau verrou cognitif qu'il faudra surmonter.

#### > Romain Teyssier

Service d'astrophysique (SAP)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
Unité mixte de recherche astrophysique  
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

### POUR EN SAVOIR PLUS

A. DEKEL, Y. BIRNBOIM, G. ENGEL, J. FREUNDLICH, T. GOERDT, M. MUMCUOGLU, E. NEISTEIN, C. PICHON, R. TEYSSIER, E. ZINGER, « Cold Streams in Early Massive Hot Haloes as the Main Mode of Galaxy Formation », *Nature*, 457, p. 451-454, 2009.  
R. TEYSSIER *et al.*, « Full-Sky Weak-Lensing Simulation with 70 Billion Particles », *Astronomy & Astrophysics*, 497 (2), p. 335-341, 2009.  
R. TEYSSIER, C. PICHON, « L'Univers dans un ordinateur », *Dossier Pour la Science* « Galaxies : fenêtres sur l'Univers », 56, 2007.

### Les enseignements du fond diffus

Des indices sur la forme de l'Univers peuvent être cherchés dans le **fond diffus cosmologique**. Ce rayonnement, émis il y a 13,7 milliards d'années au moment où l'Univers est devenu transparent, semble émis par la surface d'une gigantesque sphère dont la Terre occupe le centre<sup>(1)</sup>. La température de ce rayonnement est affectée par de minuscules fluctuations, de l'ordre d'un millième de pour-cent. Leur distribution angulaire peut être décomposée en harmoniques sphériques<sup>(2)</sup> à la manière dont un son est décomposé en harmoniques ordinaires. Les amplitudes de cette décomposition dépendent de la géométrie de l'espace et des conditions physiques qui régnaient à l'époque de l'émission du fond diffus. La forme de l'espace affecte aussi ces amplitudes. Ainsi, elles sont nulles si leur longueur d'onde est plus grande que la « circonférence » de l'Univers. Cette absence des grandes longueurs d'onde a été constatée dans les observations menées par le satellite américain WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) de 2003 à 2006. Partant de ce résultat,

(1) La Terre ou, plus précisément, le lieu de l'observation. Il y a en effet de bonnes raisons de penser que l'image apparaîtrait identique quel que soit ce lieu. La Terre n'est pas un point particulier de l'Univers.

(2) Harmonique sphérique : fonction sphérique utilisée en mathématiques dès qu'intervient la notion d'orientation (**anisotropie**) et donc de rotation. Elle est caractérisée par un laplacien (opérateur différentiel) nul.

(3) Pour en savoir plus : *L'Univers a-t-il une forme ?* ROLAND LEHOUCQ, Flammarion, collection Champs.

un nouveau modèle cosmologique a été proposé, alternative au modèle cosmologique standard euclidien et infini : l'Univers aurait la structure topologique de l'espace dodécaédrique de Poincaré, dont la géométrie est sphérique (figure 2). Par ailleurs, ce modèle prédit la présence de corrélations particulières dans le fond diffus cosmologique – des paires de cercles « homologues » le long desquels les fluctuations de température seraient les mêmes.

Depuis 2003, trois équipes différentes (américaine, allemande et polonaise) se sont penchées sur le test de ce modèle en utilisant divers indicateurs statistiques et des **simulations numériques** massives. Aucune réponse claire n'a émergé car le signal attendu est dégradé par divers effets cosmologiques, par des contaminations d'origine astrophysique et par les imperfections instrumentales. Cependant, l'analyse la plus récente, réalisée à l'aide de méthodes statistiques sophistiquées, semble favoriser la symétrie dodécaédrique dans la carte du ciel produite par le satellite WMAP. De nouvelles observations sont évidemment nécessaires pour valider ou non le modèle. Pour faire avancer le débat, les données du satellite européen Planck, lancé en mai 2009, (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90) sont attendues avec impatience.

Désormais, le problème de la forme de l'Univers<sup>(3)</sup> a quitté le domaine de la spéculation métaphysique. Les prochaines années seront riches d'observations cosmologiques fines et devraient apporter de nouveaux changements dans nos représentations de l'Univers. Sans doute permettront-elles de trancher la question de sa forme...

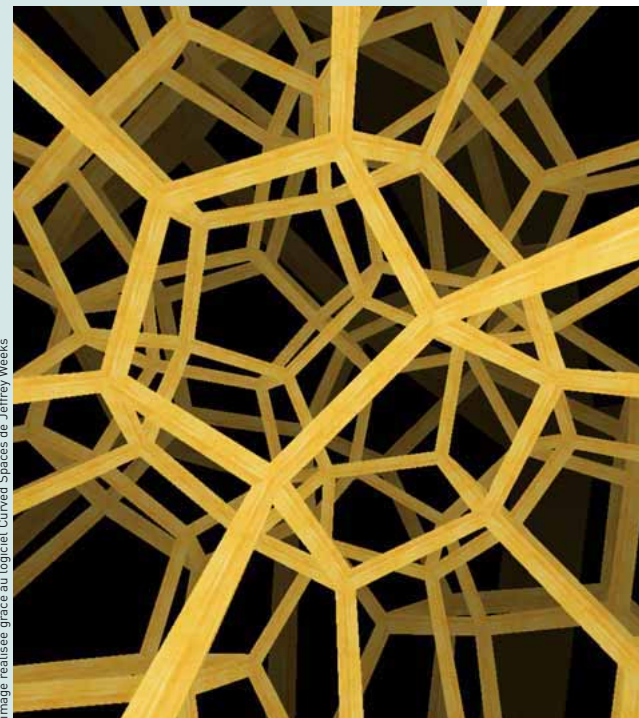


Image réalisée grâce au logiciel Corned Spaces de Jeffrey Weeks

Figure 2. L'espace dodécaédrique de Poincaré est un espace sphérique fini et sans bords construit en identifiant les faces opposées d'un dodécaèdre régulier après une rotation d'un dixième de tour. Ce modèle rend bien compte des fluctuations de température du fond diffus cosmologique à grande échelle angulaire.

#### > Roland Lehoucq

Service d'astrophysique (SAP)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)