

●●● *histoire.*

Nous, c'est eux. Romain Teyssier, Christophe Pichon, Françoise Combes, Bruno Guiderdoni, Stéphane Colombi et Jean-Michel Alimi... leaders d'une équipe d'une trentaine de scientifiques, venue de six laboratoires du CNRS, du CEA, de l'Observatoire de Paris, de l'université Pierre-et-Marie-Curie, réunie dans le projet «Horizon» (1). Mission: concocter un cosmos virtuel, racontant une histoire possible de l'Univers afin de mieux la comprendre. Plus précisément, d'un morceau d'Univers assez vaste pour être représentatif de la variété du cosmos. Nos astrophysiciens seraient-ils devenus mégalos?

**Explorer les zones d'ombre**

«Non, c'est juste que l'on parvient maintenant à modéliser notre ignorance», s'amuse Christophe Pichon (Institut d'astrophysique de Paris, CNRS). Autrement dit, que les connaissances acquises par les cosmologistes sont assez précises pour que le calcul numérique puisse explorer les zones d'ombre qui résistent à l'investigation scientifique. Pour leur cosmos de synthèse, les astrophysiciens bénéficient de l'entrée de la cosmologie – la science de l'Univers tout entier – dans une ère nouvelle, celle du quantitatif (2). Née avec la relativité générale d'Einstein, cette science s'est longtemps limitée à des calculs théoriques. Puis a subi le régime «de la douche écossaise», raconte Pichon, lorsque les observations se succédaient et se contredisaient, faisant grimper au rideau les théoriciens. Aujourd'hui, «depuis cinq ans», précise l'astrophysicien, «elle vit sous le règne de la concordance: les observations se succèdent et convergent, resserrant l'implacable étau des mesures sur les théories».

Pourtant, précision se marie avec ignorance d'une manière déconcertante. Le paradoxe atteint son comble avec le contenu de l'Univers. Pour la majorité des cos-

**Les cosmologistes se tournent vers les calculateurs avec d'autant plus de confiance que la simulation numérique a déjà fait ses preuves dans les labos.**

mologues, une mystérieuse matière noire et une non moins énigmatique énergie noire en composent respectivement 25 et 70%, n'en laissant que 5% pour la matière dite baryonique, l'ordinaire des protons, neutrons et électrons qui constituent les étoiles et les papillons. Formidable précision pour deux objets dont la nature – hormis leur comportement vis-à-vis de la gravitation, attractif pour la matière noire, répulsif pour l'énergie noire – demeure totalement inconnue.

Ce cosmos a une histoire. Commencée il y a 13,7 milliards d'années, selon les calculs les plus récents, âge qu'aucune étoile plus vieille ne vient contredire. Si le début du début demeure hors de portée des équations – et que la question de l'avant-début relève des questions qu'un cosmologiste au sens rassis ne se pose pas – sa première étape solidement connue se situe environ 400 000 ans après le big-bang. Jusque-là, tout n'est que soupe de particules chaude et homogène. Opaque de surcroît, car la lumière ne peut s'y propager librement tant les photons se heurtent à chaque instant aux protons et électrons à l'agitation incessante. Cette soupe se dilue et se refroidit au fur et à mesure que l'Univers s'étend. A cette époque, il passe sous la barre des 3000 °C. Subitement, les électrons

cessent de se balader partout pour se mettre sagement en orbite autour des noyaux d'hydrogène (protons), d'hélium et de lithium, les seuls fabriqués lors du big-bang, pour former les premiers atomes. Cette mise en ordre permet aux photons de se libérer, dans un flash universel, baptisé rayonnement cosmologique, ou fossile, qui baigne, depuis, tout le cosmos. La première détection de ce flash, en 1965, fit entrer la cosmologie dans l'ère de l'observation.

«En 2002, explique Christophe Pichon, le satellite Wmap (Wilkinson Anisotropy Microwave Probe) de la Nasa nous a fourni une image suffisamment détaillée pour en tirer les "conditions initiales" de l'histoire du cosmos.» Sur cette image, les minuscules fluctuations du rayonnement fossile ont révélé

aux astrophysiciens le début de la structuration de l'Univers: sous l'effet de la gravitation, la matière noire a déjà commencé à se rassembler ici, tandis qu'elle se diluait là. Déclenchant un processus qui aboutit, aujourd'hui, à un Univers constitué d'immenses vides sur les bords desquels se groupent les galaxies. «C'est de cette étape décisive que partent les simulations», explique Romain Teyssier.

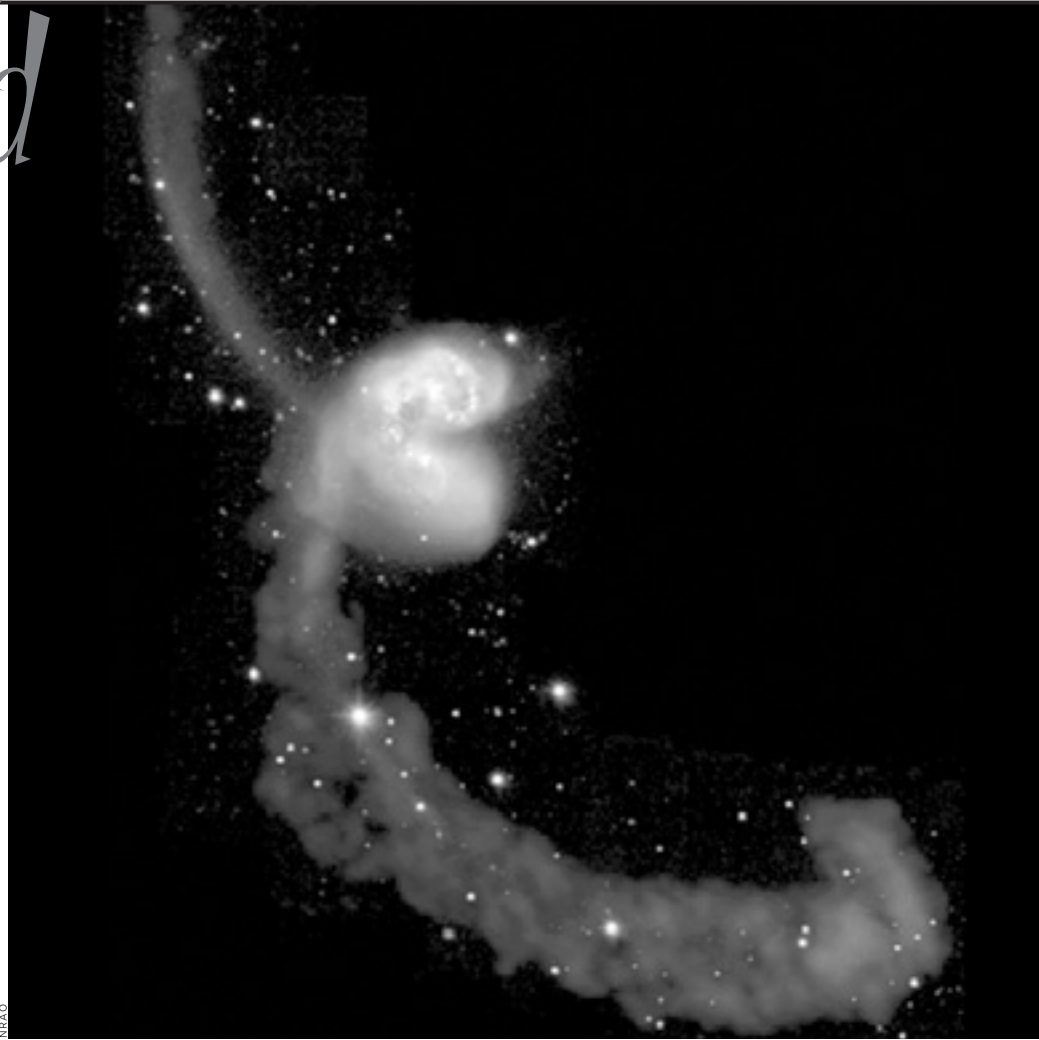
**Place à la simulation numérique**

Au début, c'est assez simple, admet le cosmologiste. Durant trois cents millions d'années, l'Univers vit son «âge sombre». Pas encore d'étoiles pour l'éclairer. Et peu de différences de densité. C'est le règne des équations linéaires, un travail fastoche pour les matheux du cosmos. Puis l'affaire se gâte. L'Univers se structure: au sein d'un immense océan de plus en plus vide se singularisent des îlots où la matière se condense, formant les embryons de galaxies. Surtout, au sein de ces galaxies, le gaz primordial diffus forme ici et là des nuages plus denses et plus froids où dominent les molécules d'hydrogène. Puis, au sein de ces nuages, naissent les premières étoiles. A grande échelle, le cosmos s'organise de façon très «hiérarchique, comme une série de poupées russes», explique

Christophe Pichon. Des galaxies fusionnent, provoquant parfois la formation de gigantesques fleuves d'étoiles et de gaz, et même un baby-boom stellaire il y a sept milliards d'années. Des galaxies se rassemblent en amas liés par la gravitation. La plus grande structure jamais observée, par le Sloan Digital Sky Survey (3), défie l'imagination: un «mur» de galaxies de 4,5 milliards d'années-lumière! Problème: cette histoire de zones vides immenses côtoyant des îlots bourrés de matière, d'apparition de stars capricieuses (étoiles et trous noirs) se traduit en équations non-linéaires instables... l'analyse mathématique y perd son latin, reste la solution de l'approximation numérique, domaine de prédilection des superordinateurs.

Les cosmologistes se tournent vers les calculateurs avec d'autant plus de confiance que la simulation numérique a déjà fait ses preuves dans les labos. Elle a permis de faire le tri entre grands modèles cosmologiques. Et résolu moult questions de plus petite échelle, en s'attaquant «à la morphologie des galaxies», explique Françoise Combes (Observatoire de Paris) qui a joué un rôle de premier plan dans cette aventure. Une galaxie, c'est un ensemble de gaz et d'étoiles qui tourne sur lui-même. La nôtre, la Voie lactée, comporte plus de cent milliards d'étoiles, regroupées en un bulbe central et un disque de cent mille années-lumière de diamètre, parcouru par des bras en spirale, plus denses en gaz et en étoiles. Les deux tiers des galaxies

**Simulation** de la galaxie des Antennes résultant de la fusion de deux galaxies.



présentent cette forme, et 80 % de ces deux tiers y ajoutent une sorte de barre centrale, riche en étoiles, à partir de laquelle s'étendent les bras spiraux. Quant aux autres galaxies, ce sont d'informes patatoïdes, qualifiés d'«elliptiques» par les spécialistes. Tout ça est très joli sur les photos des télescopes, mais plutôt intrigant. Comment se fait-ce qu'un bras spiral puisse se maintenir durant des milliards d'années alors qu'il tourne lentement près du centre galactique et cent fois plus vite sur le bord? D'où viennent les barres? Pourquoi un tiers des galaxies sont-elles elliptiques?

**Un cube au parfum d'infini**

Entre 1970 et 2000, la plupart de ces questions ont trouvé des réponses, avec l'aide décisive de simulations numériques de la vie d'une galaxie durant dix milliards d'années. Les bras spiraux ont révélé n'être que des ondes immatérielles. Les barres, ont découvert les astrophysiciens, ne doivent leur maintien qu'à la capture d'énormes quantités de gaz intergalactique par les galaxies durant leur vie, pour une masse équivalente à celle de toutes leurs étoiles. Le cannibalisme galactique s'est avéré fréquent. Et lorsqu'une grosse spirale, comme notre Voie lactée, gobe une naine, cela n'affecte pas trop sa forme. Mais si les tailles des galaxies en collision s'équivalent, alors leurs belles morphologies se brouillent pour donner naissance aux informes elliptiques. Le plus étrange, c'est que les simulations numériques contribuant à ces découvertes semblent bien loin du réel. «A peine un millier de particules par galaxies dans les années 80, pas plus de cent mille dans les années 90, de 1 à 10 millions en 2000», précise Françoise Combes. Et, comme seul ingrédient, la gravitation selon Newton. Belle démonstration de la capacité des simulations à guider la sagacité des astrophysiciens.

L'ordinateur de Mare Nostrum, lui, va, précise Romain Teyssier, «simuler un cube d'Univers de 300 millions d'années-lumière de côté (dans son état final), peuplé de matière noire, de galaxies (10 000 au bout de 13 milliards d'années après de nombreuses fusions), de gaz diffus, de nuages d'hydrogène moléculaire et d'étoiles – dont les plus massives explosent en supernovae.» Un curieux cube aux parfums d'«infini», puisque «toute matière qui sort d'un côté fait son apparition de l'autre». L'histoire de ce cube d'univers fournira un «cadre cosmologique» à Françoise Combes (lire page 33) pour des simulations de milliers de fusions de galaxies, sur des ordinateurs moins puissants. L'équipe de Bruno Guiderdoni, à Lyon, va transformer les données de ce cube d'univers en un cosmos virtuel, dont les photons seront observables par des télescopes tout aussi virtuels. «Du coup, explique Teyssier, on pourra les comparer directement aux observations de l'Univers réel.» Le coût de l'opération (650 000 euros apportés par l'Agence nationale de la recherche et le CNRS, pour les heures de calcul et des salaires de jeunes chercheurs en CDD) montre que les simulateurs ont su convaincre la communauté scientifique de l'efficacité du virtuel. Cela permettra-t-il de soulever l'épais mystère qui règne encore sur l'histoire du cosmos? ◆

S.H.

**La simulation du Millennium**

Les astrophysiciens français ne sont pas les seuls à concocter des cosmos virtuels. La plus ambitieuse tentative de ce type, baptisée «The Millennium Simulation», a été réalisée (1) par le consortium international Virgo – Royaume-Uni, Allemagne, Canada et Etats-Unis. Le supercalculateur de la société Max Planck, installé à Garching (près de Munich), a simulé l'histoire d'un cube de 2 milliards d'années-lumière contenant 20 millions de galaxies, structuré par la matière noire et l'énergie noire.

S.H.

(1) Volker Springel et al., *Nature* du 2 juin 2005.(1) <http://www.projet-horizon.fr>(2) Lire Alain Blanchard, *Libération* du 26 mars 2005

(3) Le Sloan Digital Sky Survey va couvrir un quart du ciel avec le télescope d'Apache Point Observatory (New Mexico, Etats-Unis) pour un catalogue de 100 millions d'astres.