

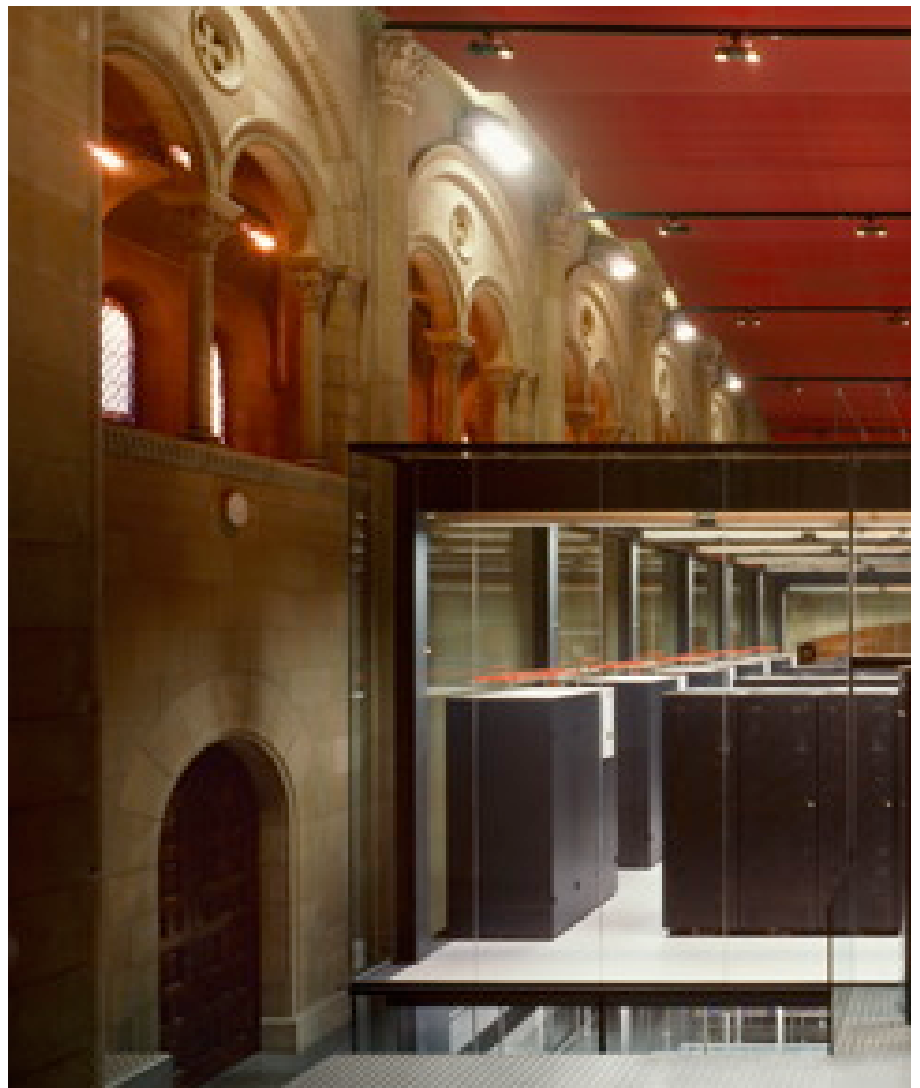
L'Univers dans un ordinateur

Romain TEYSSIER et Christophe PICHON

À défaut d'observer l'Univers dans son ensemble, les astrophysiciens le recréent au cœur de superordinateurs. La cosmologie, reine des sciences d'observation, s'offre avec les simulations informatiques un laboratoire numérique sans limites.

Simuler l'évolution de l'Univers par ordinateur, est-ce le rêve d'un savant fou ou la réalité de la cosmologie moderne ? Grâce aux ordinateurs toujours plus puissants et aux télescopes à l'œil toujours plus acéré, créer un monde virtuel semblable au nôtre est désormais possible. La simulation numérique est un nouvel outil qui permet aux astrophysiciens de tester les théories de formation et d'évolution des structures de l'Univers, du Big Bang à nos jours. La complexité de la tâche est à la hauteur du défi : comprendre les rouages à l'origine des milliards de galaxies qui nous entourent, et notamment la nôtre, la Voie lactée.

Les mécanismes virtuels simulés par l'informatique sont certes performants, mais les prédictions qui en découlent dépendent essentiellement de 3 ingrédients fondamentaux : de « bonnes » conditions initiales, une « bonne » théorie mathématique et une puissance de calcul « suffisante ». En d'autres termes, pour réussir à suivre le chemin emprunté par l'Univers nous devons partir du bon endroit, dans la bonne direction et à la bonne vitesse. Or, les récents développements des télescopes, des théories et des technologies offrent aux astronomes l'occasion de réunir pour la première fois ces trois ingrédients. Dans les années à venir, les astro-



physiciens seront sans doute capables de suivre sur leurs écrans la formation des galaxies avec la même précision que celle qu'atteignent les météorologues qui prévoient aujourd'hui la formation des cyclones.

Tempêtes cosmiques

Le parallèle entre la cosmologie et la météorologie est riche d'enseignement. En effet, les ingénieurs de Météo-France utilisent en continu des superordinateurs pour prédire le climat 3, 4, voire 5 jours à l'avance. La justesse de leur modélisation dépend de mesures de températures et de pressions effectuées sur l'ensemble du territoire. Ces données constituent les conditions initiales à partir desquelles l'évolution dynamique de l'atmosphère est calculée. Plus le réseau des stations de mesures réparties dans tout le pays est resserré, plus

ces conditions initiales sont fidèles et meilleurs seront les prévisions.

L'ordinateur résout ensuite les équations de la mécanique des fluides qui régissent les déplacements des masses d'air. Pour ce faire, on découpe la zone à simuler, par exemple la France, en une myriade de petits éléments de volumes, les mailles. Ces dernières, juxtaposées, recouvrent le territoire et constituent ce que l'on nomme le maillage. Plus le maillage est fin, plus la simulation sera réaliste. Les ingénieurs de Météo-France simulent ainsi l'évolution du climat sur 5 jours avec environ 1 million de mailles réparties sur tout le pays.

Les simulations de la formation des galaxies sont comparables à celles du climat, du moins en ce qui concerne la méthode. En effet, à une toute autre échelle, les astrophysiciens cherchent à prédire la « météo cosmique » sur une

période de quelque 13 milliards d'années. Ce travail dépend également de la disponibilité et de la justesse des conditions initiales représentatives de l'état de l'Univers dans sa prime jeunesse. Or, les télescopes captent un rayonnement dit « fossile », issu de la première lumière diffusée à travers l'Univers, alors âgé de 380 000 ans. Le satellite WMAP a réalisé, entre 2003 et 2006, des mesures de la distribution de température de ce rayonnement fossile. Centrée autour de 2,726 kelvins, la répartition thermique observée est homogène, à l'exception d'infimes variations dont l'amplitude ne dépasse pas 1 pour 100 000.

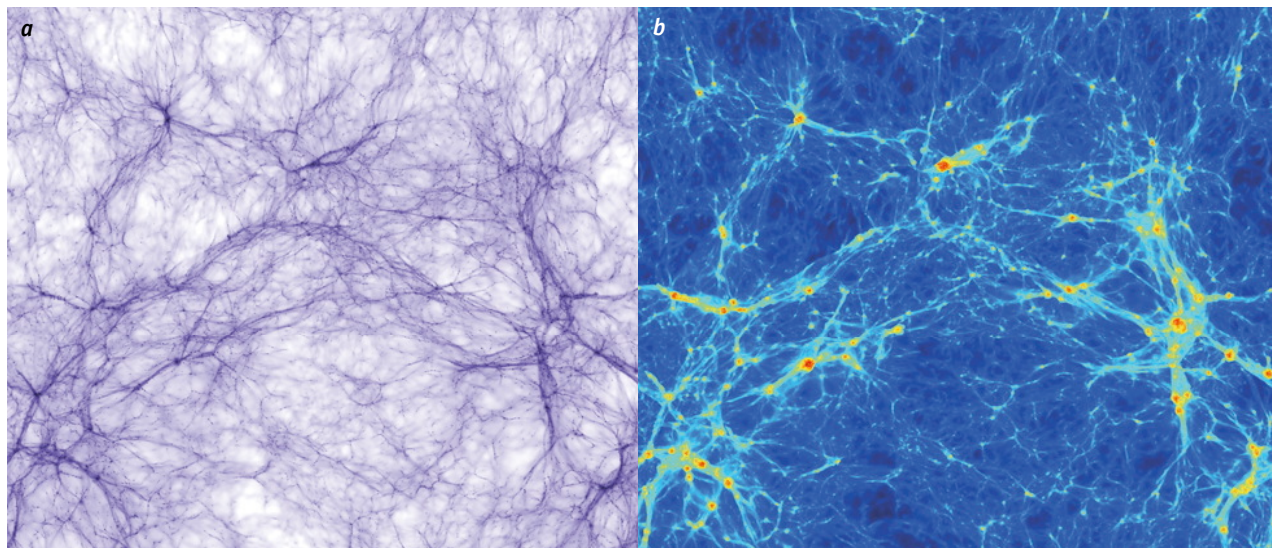
Ce qui passerait pour un détail se révèle d'une importance capitale : ces fluctuations primordiales sont les germes des futures galaxies ! D'aucuns seraient étonnés à l'idée que les galaxies, astres variés et majestueux, soient nées de ces frémissements de densité. Mais c'est sans compter sur un mécanisme performant : l'instabilité gravitationnelle. L'évolution de l'Univers est soumise à la mécanique des fluides auto-gravitants, gouvernés par la force de la gravitation. Or, lors de ses premiers millénaires, la matière du cosmos est dans une situation instable : les régions de l'espace légèrement plus chaudes et plus denses que la moyenne attirent la matière qui les entoure. Petit à petit, ces « grumeaux » de matière sont devenus plus denses, attirant encore plus de masse... Quelques millions d'années plus tard, les conséquences de cette boulimie se manifestent de façon spectaculaire : les agrégats de matière s'effondrent sous leur propre poids. Ainsi naissent les premières étoiles, et les premières galaxies.

Les formes et les mouvements de ces toutes premières galaxies sont encore mystérieux. Ils seront sans doute révélés par les télescopes à venir (voir *À la recherche des premières galaxies*, par R. Pelló, dans ce dossier). Pour le moment, seuls des modèles théoriques



Avec l'amabilité d'Alfonso de Barcelona Supercomputing Center - www.bsc.es

1. L'ORDINATEUR MARENOSTRUM, avec 10 240 processeurs IBM, est l'un des plus puissants de la planète. Situé dans une ancienne chapelle et dédié à la recherche scientifique, ce monstre de calcul est capable de simuler en quelques semaines un Univers virtuel constitué de 5 milliards d'éléments.



© P. Henry et F. Tenaer

nous fournissent une idée de l'apparence de ces premiers objets : de grands nuages de gaz chauds en équilibre, au sein desquels naissent des étoiles. Ces structures ne ressemblent pas encore aux majestueuses galaxies spirales que nous contemplons dans l'Univers local. Elles vont évoluer progressivement pour former des objets toujours plus massifs et toujours plus chauds.

Ce développement par concentration de matière, dû à l'instabilité gravitationnelle, est le mécanisme fondamental de la formation des structures dans l'Univers. Les petites galaxies apparaissent d'abord, puis les grosses se forment par coalescence des plus petites, et ainsi de suite... Ce scénario est « hiérarchique ». Les amas de galaxies, de gigantesques boules de gaz chauds dans lesquelles évoluent des milliers de galaxies massives, sont les dernières structures à se former. En contrepartie, elles ont le privilège d'être les formations les plus massives de l'Univers (voir *Le règne des amas de galaxies*, par P. Henry, U. Briel et H. Böhringer, dans ce dossier).

Durant cette course au gigantisme, un moment particulier marque la naissance des galaxies spirales. Lorsque les masses de gaz, de plus en plus massives et chaudes, dépassent la température critique de 10 000 degrés, les nuages d'hydrogène et d'hélium s'ionisent : toute une gamme d'électrons et de rayonnements est libérée. Les boules de gaz se mettent à briller comme des ampoules et une grande partie de l'énergie thermique, qui

empêchait jusqu'alors l'effondrement gravitationnel, est rayonnée dans le vide cosmique. L'équilibre délicat de ces objets est rompu. Le gaz tombe vers le centre du halo et forme un disque en rotation rapide. Les forces centrifuges compensent alors l'attraction gravitationnelle et créent un nouvel équilibre. Ces disques de gaz dense et froid sont à l'origine des galaxies spirales.

Un jeu de construction

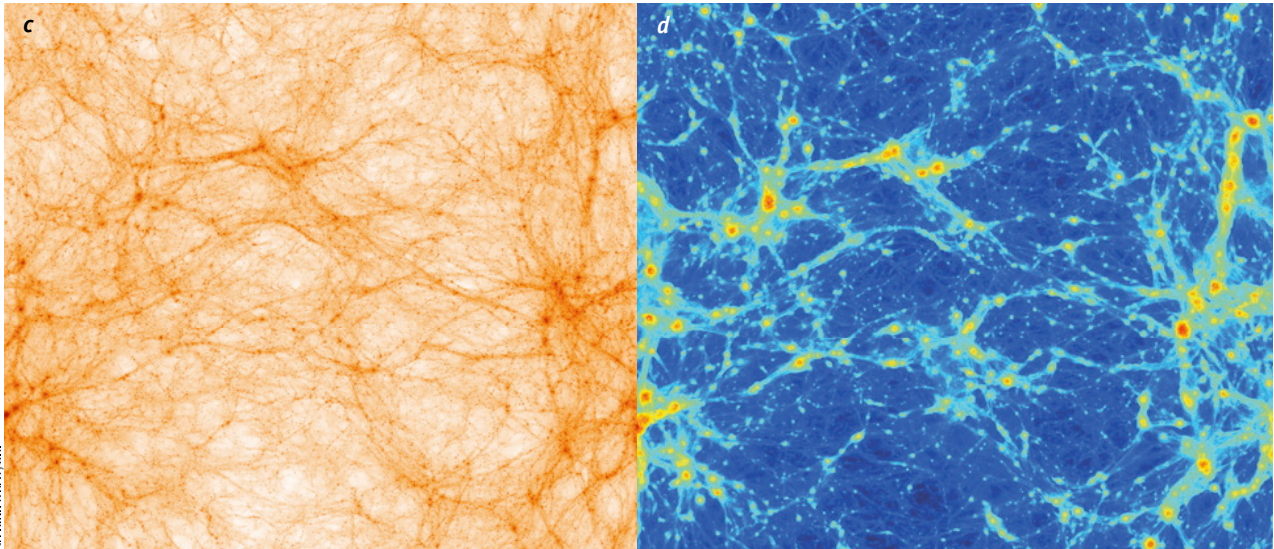
Le scénario de la formation hiérarchique que nous venons de présenter s'impose depuis une dizaine d'années comme la théorie la plus convaincante pour expliquer la dynamique de l'Univers, et ce aux différentes époques de son existence. Des modèles développés dans le cadre de cette théorie se sont avérés en accord avec les observations de la distribution des galaxies, et notamment de la topologie en « toile d'araignée » à grande échelle (voir la figure 1). Les astronomes possèdent ainsi un outil théorique pour comprendre l'origine de la structure en spirales des galaxies (voir la figure 4).

La théorie comporte néanmoins de nombreux points faibles et des zones d'ombres. Quelle est l'origine des galaxies elliptiques dans ce scénario ? Comment expliquer la structure des galaxies naines et celle du cœur des amas de galaxies ? Qu'en est-il de la quantité d'étoiles formées dans l'Univers ou du nombre de galaxies primordiales ? Toutes ces ques-

tions sont intensément débattues par les spécialistes. Avons-nous pour autant les preuves expérimentales de l'invalidité du modèle ? Faut-il le remettre en cause dans son ensemble ? Certains le pensent, mais la réponse n'est pas si simple.

En effet, il est difficile de calculer de manière analytique et précise les prédictions des modèles conçus à partir de la théorie. La physique de la gravité est complexe, non linéaire et, dans certains cas, chaotique. La dynamique des gaz et la physique atomique sont certes bien connues, mais leur prise en compte dans une modélisation mathématique globale de la formation des galaxies est un tour de force. C'est pourquoi les simulations numériques jouent un rôle central dans la validation des théories : elles intègrent l'ensemble des ingrédients de la physique dans un modèle d'Univers global. Grâce aux observations du rayonnement fossile, nous avons en notre possession des conditions initiales précises pour recréer un monde virtuel.

Est-ce si simple de simuler l'évolution de l'Univers sur 13 milliards d'années ? Considérons une « boîte » de volume suffisamment grand pour être à l'image de l'Univers, dans son ensemble. La taille typique du cube simulé avoisine le milliard d'années-lumière de côté. Ensuite, ce volume est divisé en une myriade de petites mailles élémentaires qui représentent un petit espace du monde virtuel. Afin de se rapprocher au plus près des conditions physiques de l'Univers



C. Pichon et R. Teyssier

primordial, chaque maille est pourvue d'une quantité de matière moyenne à laquelle on ajoute des surdensités par un tirage aléatoire, en accord avec les propriétés des fluctuations observées sur le rayonnement fossile. Une fois le maillage initialisé, la simulation débute et progresse à petits pas, en résolvant les équations de la dynamique des fluides dans chaque maille élémentaire.

En cosmologie, deux fluides coexistent : un gaz ordinaire composé d'atome d'hydrogène et d'hélium, et un gaz de matière noire dont la nature exacte est inconnue. Malgré ces mystères, la matière noire est incontournable, car elle constitue 85 pour cent de la masse totale des deux fluides et influe de façon prépondérante sur la dynamique de l'Univers.

La répartition initiale de matière évolue ensuite selon les champs de force gravitationnels, renforcés dans les régions de surdensité. En certains points de l'espace, la densité croît subitement, et des embryons de galaxies se forment. Les astronomes rencontrent alors une difficulté de taille : les différences d'échelle. En effet, le maillage doit être suffisamment fin pour décrire la formation des galaxies depuis les grandes échelles, où elles participent au destin d'un Univers quasi homogène, jusqu'aux petites échelles, où leur effondrement s'équilibre avec la force centrifuge.

Les spécialistes du climat ont résolu un problème équivalent grâce à la technique dite des « mailles adaptatives ». Afin de simuler l'évolution du climat

en France, le quadrillage météorologique doit être précis sur le territoire national, tout en couvrant l'ensemble du globe pour suivre les grands courants qui circulent autour de la Terre. Il serait coûteux et inutile de simuler l'ensemble du système climatique à une même résolution. Le maillage adaptatif offre la possibilité de travailler avec des mailles fines sur la zone d'intérêt et des mailles grossières sur le reste du globe.

Des détails à la loupe

Il en va de même en cosmologie : lorsqu'une région s'effondre sous l'effet de sa propre gravité, les mailles sont automatiquement affinées de façon à mieux décrire la dynamique des fluides au sein de la galaxie en formation. À la différence de la météorologie, les systèmes étudiés ici, les galaxies, se déplacent et entrent en collision les uns avec les autres. Le maillage s'adapte donc en permanence à la topologie complexe et mouvante de l'écoulement dans l'Univers. Les mailles les plus grossières couvrent des régions « vides » de matière ; un maillage moyen habille les filaments cosmiques au sein desquels les galaxies naissent ; et la résolution maximale est réservée aux galaxies.

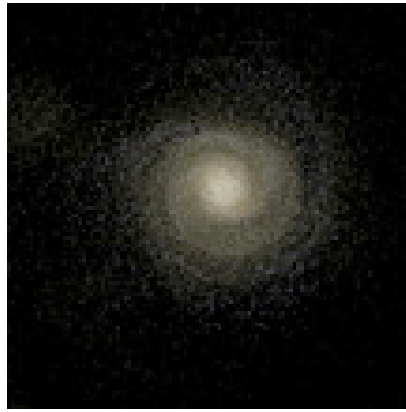
Depuis une quinzaine d'années, des algorithmes performants décrivent la formation des structures avec toujours plus de précision et de fiabilité. Néanmoins, simuler un univers contenant au moins un million de galaxies comme la nôtre demande une importante puissance de calcul. En outre, les

2. LES SIMULATIONS DE L'UNIVERS permettent d'établir des cartes de la répartition du gaz (a et c) et de sa température (b et d). En analysant ces données sur deux époques différentes, respectivement 2,9 milliards d'années (a et b) et 3,6 milliards d'années après le Big Bang (c et d), les astrophysiciens suivent la naissance des galaxies.

plus petites galaxies, dont la masse est quelque 100 000 fois plus faible que celle de la Voie Lactée, nécessitent une centaine de mailles. L'idéal serait donc de simuler un cube de 100 000 mailles de côté, soit un million de milliards d'éléments ! L'ordinateur capable de stocker une telle quantité d'information en mémoire n'existe pas encore, mais nous nous en approchons.

Le plus gros ordinateur du monde est actuellement une machine *BlueGene* installée par IBM aux États-Unis. Sa mémoire vive atteint 33 téraoctets, pour un total de 131 000 processeurs montés en parallèle ! L'Europe n'est pas en reste avec deux ordinateurs géants de taille quasi équivalente. Le premier est l'ordinateur « *MareNostrum* » installé à Barcelone, en Espagne, dans une ancienne église sur le campus de l'Université de Catalogne (voir la figure 2). Le second, l'ordinateur « *Téra 10* » fabriqué par BULL, est situé en France, dans un centre de recherche du CEA. Ces deux ordinateurs comptent chacun 10 000 processeurs et 20 téraoctets de mémoire vive.

Ces machines sont des instruments scientifiques de pointe, aussi complexes et coûteux que les accélérateurs de parti-



C. Pichon

3. LES GALAXIES SPIRALES VIRTUELLES se forment par l'effondrement des nuages de matière noire et visible. Les simulations numériques décrivent alors la formation stellaire et notamment les explosions de supernovae.

cules ou les grands télescopes. Uniques en leur genre, elles sont les prototypes des ordinateurs de demain, et s'inscrivent au cœur des stratégies du développement scientifique et industriel des grandes nations. L'Europe, les États-Unis et le Japon se livrent ainsi depuis 20 ans une guerre microtechnologique à laquelle la Chine et l'Inde se sont récemment associés.

Dédié exclusivement à la recherche scientifique, l'ordinateur *MareNostrum* offre aux astrophysiciens un outil sans précédent de simulation de l'Univers. Pour la première fois, le degré de réalisme est suffisant pour observer l'apparition des premières galaxies et leur évolution au sein du cosmos. Le « Projet Horizon », fondé et dirigé par des astronomes français en collaboration avec une équipe espagnole, utilise cet ordinateur pour simuler l'évolution d'un Univers de 5 milliards d'éléments. Outre la puissance de calcul, cette simulation se distingue par la prise en compte de la mécanique des fluides, du rayonnement et de la formation des étoiles. À titre de comparaison, les astrophysiciens du consortium Virgo ont réalisé en 2006 une simulation nommée « *Millennium* ». Cette dernière comportait certes le double de particules par rapport à Horizon, mais la physique simulée se « limitait » à la seule gravité.

La simulation Horizon a utilisé jusqu'à 2 112 processeurs en parallèle pendant 3 semaines de calcul. Ce même calcul aurait nécessité 182 années sur un ordinateur classique ! Les algorithmes du programme central résultent de la collaboration entre les

astrophysiciens du projet et les informaticiens de l'Institut du développement et des ressources en informatique scientifique (IDRIS), rattaché au CNRS, et ceux du *Barcelona supercomputing center* (BSC). À ce jour, jusqu'à 8 téraoctets de données ont été produits et stockés : le dépouillement a déjà commencé et mobilise une dizaine de chercheurs à plein-temps.

L'horizon dépassé

Cette simulation est la première modélisation réaliste de la formation des galaxies dans un volume représentatif de l'Univers. Les grandes structures simulées sont en accord avec celles que nous observons à différents décalages spectraux, c'est-à-dire à divers âges de l'Univers (voir la figure 3). La taille de la boîte est suffisamment grande pour simuler la formation des toutes premières galaxies massives, similaires à la Voie Lactée, mais apparues 1 à 2 milliards d'années après le Big Bang (voir la figure 4). Ces galaxies massives primordiales sont celles que les grands télescopes du futur débusqueront sans doute aux confins de l'Univers dans les 10 à 20 années à venir.

Un des aspects les plus intéressants de cette simulation réside dans la modélisation de la formation des étoiles massives et de leur évolution en supernovae. Ces dernières dispersent leur matériau stellaire dans l'espace environnant et enrichissent ainsi le gaz en atomes lourds tels le carbone, l'oxygène, ou le fer. Dans des conditions de température et de pression favorables, ces atomes se rassemblent

en molécules géantes et en poussière. Pour la première fois, il est possible de calculer le rayonnement émis par les étoiles des galaxies, essentiellement dans l'ultraviolet, et son absorption par les nuages de poussières interstellaires. L'énergie absorbée est rayonnée ensuite dans les domaines infrarouges et millimétriques. Nos modèles seront donc mis à l'épreuve de l'observation par les télescopes œuvrant dans ces domaines de longueur d'onde.

L'avantage de ce type de simulation est de modéliser un environnement cosmologique réaliste pour les galaxies virtuelles qui peuplent notre boîte. L'accrétion du gaz sur la galaxie suit une géométrie particulière : les filaments froids, qui constituent la toile d'araignée cosmique, se connectent directement aux disques galactiques et le nourrissent en gaz frais. Ces filaments de gaz sont fragiles, et tendent à se disloquer au bout d'une dizaine de milliards d'années. On pense aujourd'hui que la présence ou l'absence de ces filaments influe sur la forme des galaxies spirales ou elliptiques. La simulation Horizon nous fera progresser sur la compréhension de ce mécanisme complexe.

Romain TEYSSIER, est astrophysicien au CEA. **Christophe Pichon** est astrophysicien à l'Institut d'astrophysique de Paris.

<http://www.projet-horizon.fr/>