

# Un film de 13,7 milliards d'années

Du big bang à l'Univers tel que nous le connaissons, le film s'est longtemps déroulé sans spectateurs. Mais la simulation d'une équipe française a réussi à remonter le temps, recréant au passage des scènes plus vraies que nature. Moteur.

Cette plongée dans l'histoire de l'Univers réalisée par Hubble n'est qu'une image fixe. Les simulations permettent désormais d'en reconstituer le déroulement.

L'Univers, son histoire [un film de 13,7 milliards d'années]

## *Au commencement... était l'inconnu*

Il est impossible, aujourd'hui encore, de dire ce qui s'est passé à «l'instant zéro». Ni même s'il a existé. Car ce point très spécial, où la température et la densité de l'Univers semblent diverger vers l'infini, tient la physique actuelle en échec. L'espace et le temps sont-ils apparus à ce moment-là? Existait-il quelque chose «avant»? Pour les physiciens en tout cas, l'histoire de l'Univers commence une fraction de seconde après le big bang. Plus exactement  $10^{-43}$  seconde après.

L'Univers, son histoire [un film de 13,7 milliards d'années]

## *Après 3 minutes, l'Univers est encore une fournaise*

Immédiatement après le big bang, la température atteint  $10^{32}$  degrés. Trois minutes plus tard, elle s'élève encore à 1 milliard de degrés. L'Univers reste une fournaise mais la bouillie primordiale commence à se structurer. Les particules se lient par l'intermédiaire des forces fondamentales, faisant apparaître les premiers noyaux, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium. Mais l'Univers est encore complètement opaque, car matière et lumière sont intimement enchevêtrées.

L'Univers, son histoire [un film de 13,7 milliards d'années]

## *A 380 000 ans, le cosmos se fait transparent*

La température a maintenant assez baissé (à 3000 degrés) pour que la matière se libère de la lumière: les premiers atomes se forment, la lumière se met à filer droit devant elle. C'est cette première lueur que nous observons sous le nom de rayonnement cosmologique fossile. Et déjà, on distingue sur la plus ancienne image de l'Univers, de légers motifs marbrés: ces infimes fluctuations de densité sont les signes annonciateurs des futurs grands regroupements de matière.

PROJET HORIZON

Echelle  
30 000 al

L'Univers, son histoire [un film de 13,7 milliards d'années]

## *A 1 milliard d'années, étoiles et galaxies sont déjà là*

Obéissant à la loi implacable de la gravitation, les premiers rassemblements d'hydrogène gazeux, qui ont vraisemblablement eu lieu autour de cette mystérieuse « matière noire » dont les physiciens ne savent pas grand-chose, ont donné naissance, en s'effondrant sur eux-mêmes, à des étoiles, puis à des groupes d'étoiles et enfin à des galaxies. Un milliard d'années après le big bang, l'Univers a déjà l'aspect filamentaire qu'on lui connaît aujourd'hui.

PROJET HORIZON

6 millions al

L'Univers aujourd'hui [un film de 13,7 milliards d'années]

# *A 13,7 milliards d'années, voici notre Univers...*

Lentement, les filaments de matière se sont épaissis sous l'effet de la gravitation, laissant de vastes zones quasiment vides. L'Univers a aujourd'hui une structure qui évoque celle d'un réseau de neurones, dont les nœuds correspondent aux grands rassemblements de matière: on y trouve de la matière sombre en grande quantité, mais aussi des superamas de galaxies, qui renferment jusqu'à plusieurs milliers de galaxies contenant chacune des centaines de milliards d'étoiles.

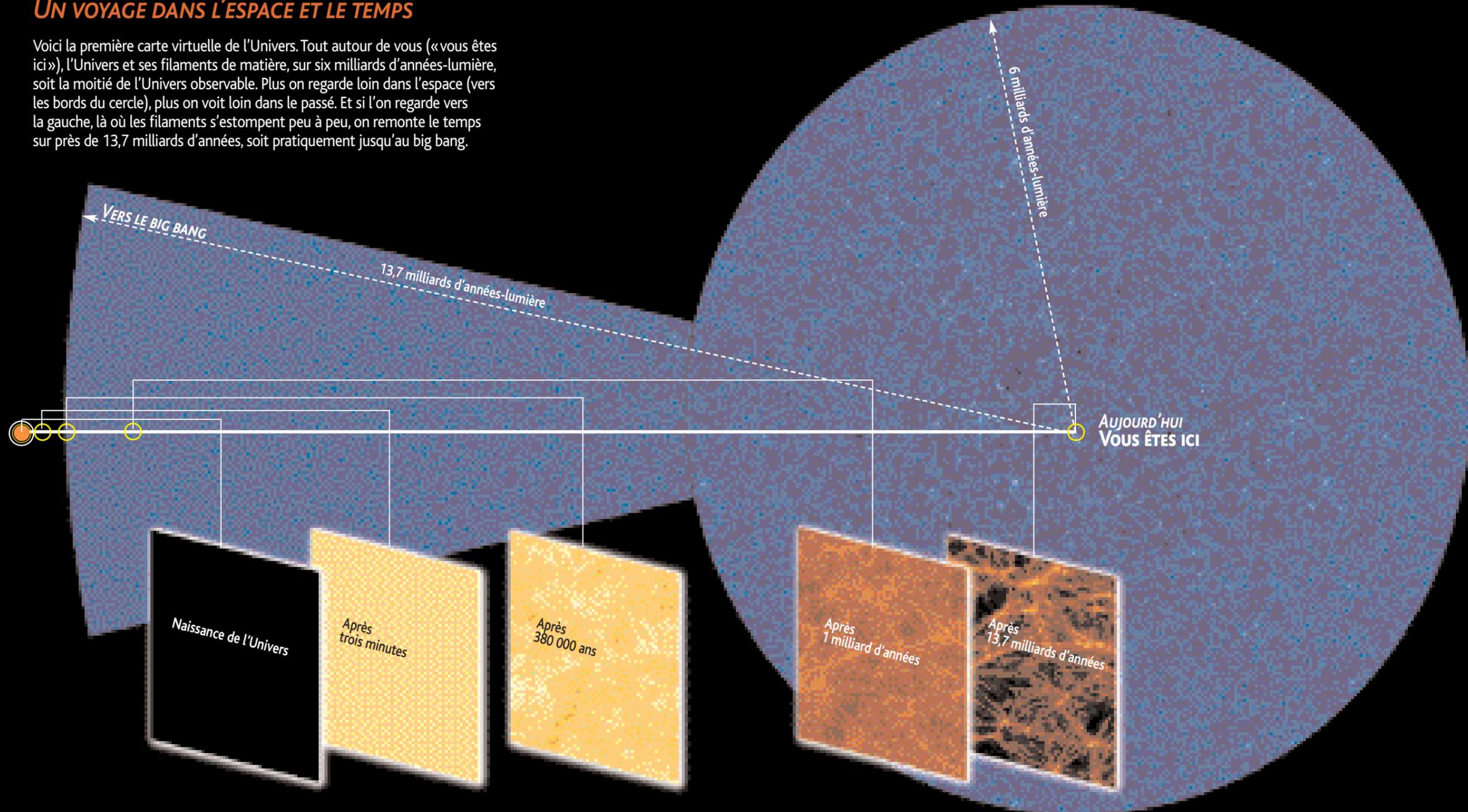
PROJET HORIZON

30 millions al

L'Univers aujourd'hui [un film de 13,7 milliards d'années]

## UN VOYAGE DANS L'ESPACE ET LE TEMPS

Voici la première carte virtuelle de l'Univers. Tout autour de vous («vous êtes ici»), l'Univers et ses filaments de matière, sur six milliards d'années-lumière, soit la moitié de l'Univers observable. Plus on regarde loin dans l'espace (vers les bords du cercle), plus on voit loin dans le passé. Et si l'on regarde vers la gauche, là où les filaments s'estompent peu à peu, on remonte le temps sur près de 13,7 milliards d'années, soit pratiquement jusqu'au big bang.

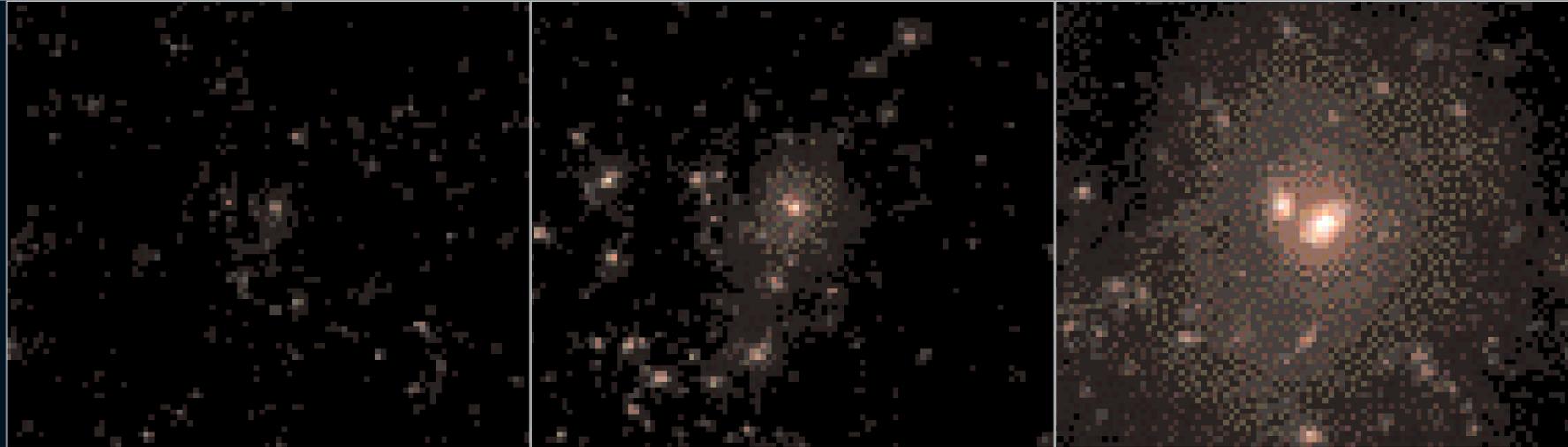


L'Univers aujourd'hui [un film de 13,7 milliards d'années]

**UN PEU D'ÉTOILES,  
BEAUCOUP DE GAZ ET  
ÉNORMÉMENT DE MATIÈRE  
SOMBRE : L'ESSENTIEL DE  
L'UNIVERS EST INVISIBLE**

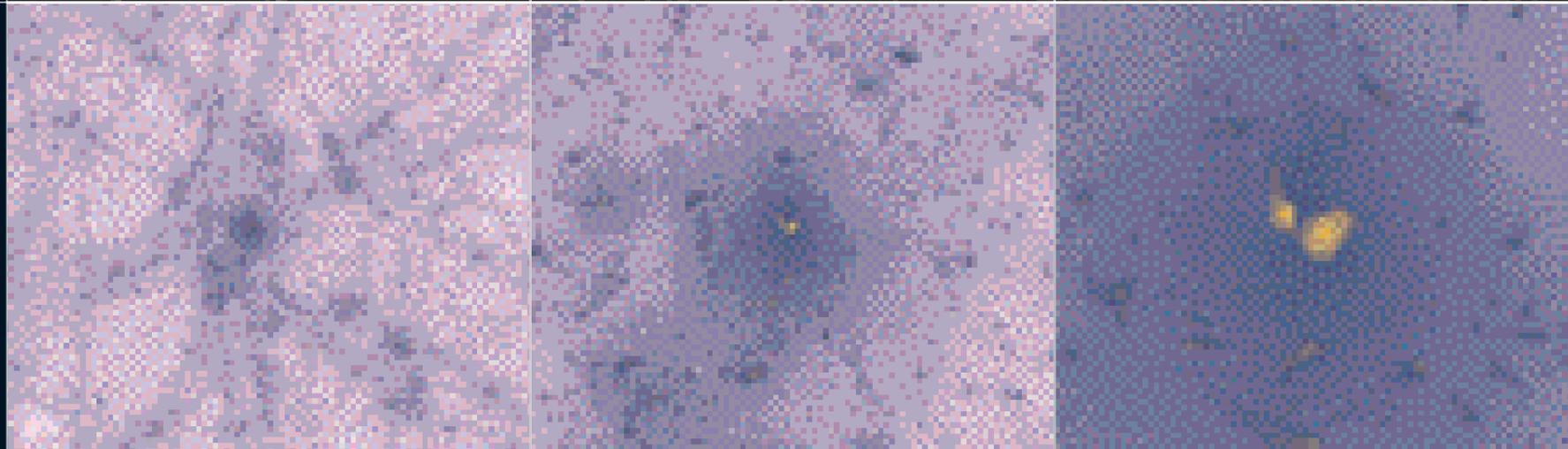
**CE QUE L'ON VOIT**

Lorsque l'on regarde le ciel avec un télescope, on voit ce qui émet de la lumière, à savoir les étoiles et les galaxies...



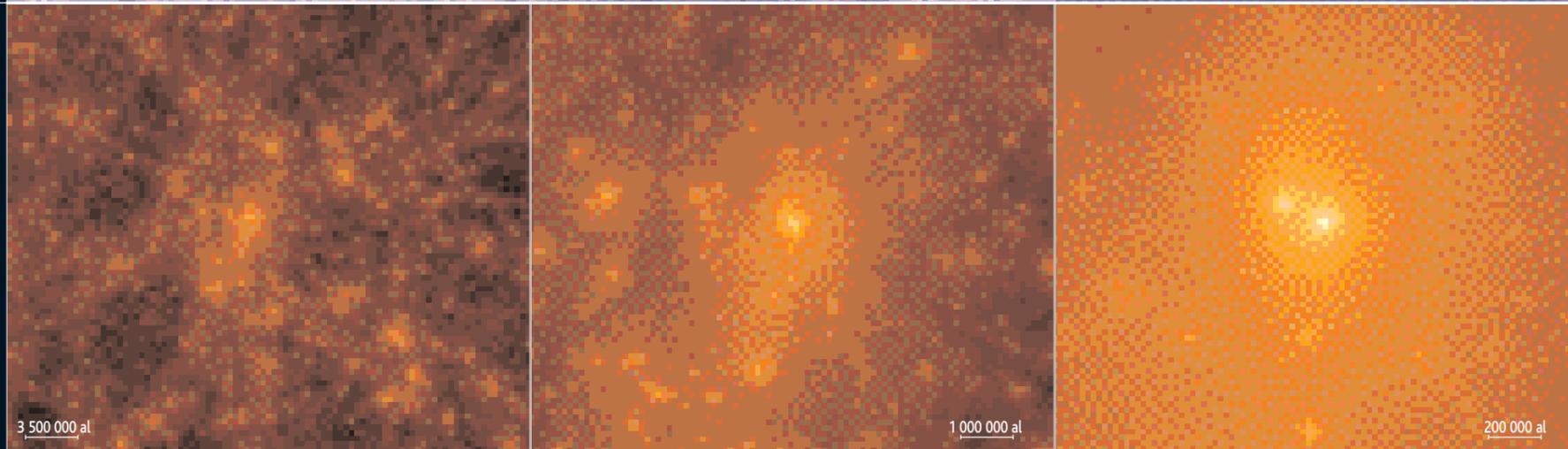
**CE QUE L'ON NE VOIT PAS**

... mais en réalité, l'Univers est surtout rempli de gaz (en bleu), qui baigne ces étoiles et ces galaxies, et qui est plus difficile à repérer...



**CE QUE L'ON IMAGINE**

... sans compter cette mystérieuse matière sombre (ici représentée en orange), totalement invisible, mais qui constituerait pourtant, d'après les modèles cosmologiques actuels, la majeure partie du contenu en matière de l'Univers.



L'Univers aujourd'hui [un film de 13,7 milliards...]

**P**renez une poignée de cosmologistes français passionnés. Étalez votre pâte, à savoir la plus ancienne image de l'Univers : le fameux « rayonnement cosmologique fossile ». Saupoudrez le tout d'équations de la relativité générale et de la mécanique des fluides. Faites cuire à feu vif plusieurs semaines dans l'un des plus gros supercalculateurs du monde, sans oublier d'ajouter une pincée d'informaticiens motivés. Puis laissez mijoter plusieurs mois sur des ordinateurs plus classiques... Vous obtiendrez alors un film à faire rougir les scénaristes les plus ambitieux : une saga qui se déroule sur près de 13,7 milliards d'années et qui retrace l'évolution de l'Univers, de ses tout premiers grumeaux de matière jusqu'aux galaxies et amas de galaxies qui le peuplent aujourd'hui. Imperceptiblement, vous verrez la pâte originelle se muer en longs filaments de matière entremêlés, à la manière d'un réseau de neurones. Un voyage extraordinaire dans le temps et dans l'espace. Et une première scientifique. « *La France était en retard en matière de simulation cosmologique* », raconte Romain Teyssier, chercheur au service d'astrophysique du Commissariat à l'énergie atomique.

#### L'EXPLOIT DES SUPERCALCULATEURS

« *Nous n'avions pas d'ordinateurs suffisamment puissants pour concurrencer nos collègues européens ou américains*, continue-t-il, *et le calcul numérique était mal considéré par les astrophysiciens, qui lui préféraient la théorie ou l'observation, à leurs yeux plus "nobles"... Nous avons voulu remettre notre pays à niveau, en rassemblant tous les spécialistes en France et en leur offrant accès à des supercalculateurs.* » C'était en 2001. Sept ans plus tard, la mission est plus qu'accomplie. La collaboration Horizon, que dirige Romain Teyssier, et qui rassemble une vingtaine de chercheurs basés à Paris, Meudon et Lyon, a propulsé la France au premier rang mondial des simulations cosmologiques. Et cela, grâce à deux coups de maître.

Pour le premier, ils ont réussi à recréer, virtuellement, l'émergence de pas moins de 100 000 galaxies, toutes différentes les unes des autres, et de suivre leur évolution à coup de fusions ou de violentes collisions. Pour cela, à quatre reprises entre l'automne 2006 et l'automne 2007, les cosmologistes français ont investi pendant une semaine une ancienne chapelle espagnole. A l'intérieur, MareNostrum, le supercalculateur IBM alors le plus puissant d'Europe, géré par le Centre de calcul de Barcelone. Dans ce décor mi-mystique mi-high-tech, ils sont parvenus à simuler les mouvements, sur 13,7 milliards d'années, de la matière sombre (qui représente la majeure partie du contenu en matière de l'Univers), du gaz (qui se trouve dans les galaxies) et de la matière visible (les étoiles) dans une tranche d'Univers de 150 millions d'années-lumière de large. Pour cela, ils ont utilisé pas moins de 10 milliards de particules indépendantes ! Une finesse de détails qui a été combinée

C'est avec le supercalculateur MareNostrum, près de Barcelone, que les cosmologistes français ont simulé la naissance des galaxies.

au recours, inédit dans une simulation aussi grande, aux lois de la mécanique des fluides (qui guident les flux de gaz dans les galaxies), et non plus seulement à celles de la relativité générale (la gravitation, qui régit les grands mouvements de matière). Résultat : des galaxies spirales ou ellip-

lègues astrophysiciens ont été surpris lorsqu'ils ont vu nos images. Ils ne s'attendaient pas à ce réalisme. » Des images que le chercheur passe de longues heures à fabriquer, à traiter puis à étudier sur son ordinateur, à partir des données générées par le supercalculateur. « *Il faut régler les contrastes, appliquer les bonnes couleurs. On se base sur le spectre lumineux d'une vraie population*

#### Comparées à des images réelles de galaxies, les simulations des chercheurs font vraiment illusion. Plongeon dans l'Univers garanti!

tiques plus vraies que nature, en tous points semblables à celles que les astronomes observent dans le ciel. « *Ce qui est spectaculaire, c'est que ces galaxies sont générées spontanément à partir des lois physiques, c'est presque magique !* commente Christophe Pichon, de l'Institut d'astrophysique de Paris, l'un des quatre coresponsables du projet. *Et ce n'était pas garanti au départ. Beaucoup de col-*

*d'étoiles, puis on adapte le rougissement plus ou moins fort de nos galaxies virtuelles en fonction de leur éloignement.* » L'effet est saisissant. Plongeon dans l'Univers garanti ! « *Quand on compare une vraie image d'Univers avec nos simulations, on a du mal à voir où est la réalité* », avoue Bruno Guiderdoni, directeur du Centre de recherche astrophysique de Lyon et autre coresponsable d'Horizon. Et



L'Univers aujourd'hui [un film de 13,7...]

cette ressemblance est justement le but de la manœuvre : il s'agit de fournir aux observateurs des images si réalistes qu'ils peuvent les confronter avec leurs observations réelles du ciel. Bruno Guiderdoni s'occupe d'ailleurs de créer une base de données sur Internet consultable librement. C'est à ce prix que les théoriciens sauront alors si leur scénario est bien en phase avec la véritable histoire du cosmos. « *Les simulations sont le moyen de tester notre compréhension de l'Univers* », atteste Jean-Michel Alimi, troisième coresponsable du projet. Théoricien à l'observatoire de Paris-Meudon, il incorpore dans ses propres simulations différentes formes d'énergie sombre (cette énergie qui semble remplir l'Univers mais dont la véritable nature échappe encore aux cosmologistes) et regarde comment cela affecte la vitesse d'effondrement des amas de galaxies ou encore le nombre de galaxies formées et leur distribution.

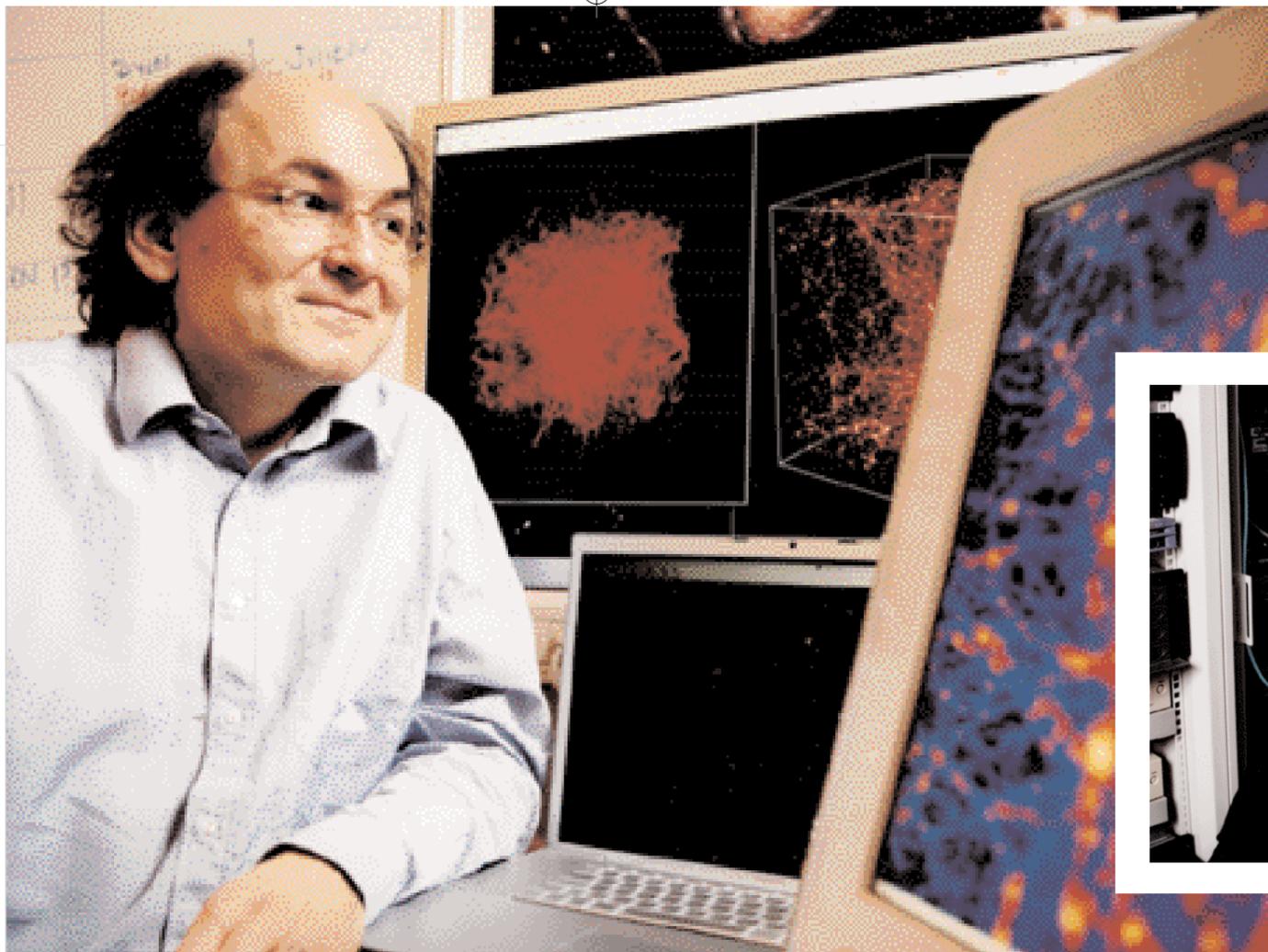
#### UN TOURNANT DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE

Mais les images du projet Horizon ne servent pas seulement à tester l'Univers dans son ensemble. Elles constituent aussi une base de travail précieuse pour ceux qui font des simulations de détail. « *On est arrivé à un tournant de la simulation numérique*, analyse Bruno Guiderdoni, *car on travaille sur des volumes suffisamment grands pour que ce soit représentatif de l'Univers, et en même temps, on a une finesse suffisante pour commencer à décrire le comportement d'une galaxie.* » Une base à partir de laquelle les scientifiques qui cherchent à comprendre la formation et l'évolution galactique peuvent ensuite travailler. C'est le cas de Françoise Combes, astronome à l'Observatoire de Paris, quatrième copilote de la mission : « *Jusqu'à présent, dans les simulations cosmologiques à l'échelle de l'Univers, les galaxies étaient représentées par des points. On ne voyait ni leur forme,*

### **L'équipe a réussi une percée à 13,7 milliards d'années dans le passé, soit jusqu'à l'horizon de l'Univers observable. Un coup de maître !**

*ni leur taille, ni leur taux de gaz ou de matière sombre. Ces nouvelles simulations changent complètement mon travail. À partir d'elles, je peux modéliser la formation et l'évolution d'une galaxie de manière beaucoup plus réaliste.* »

Non contents de ce premier coup de maître, Romain Teyssier et ses collègues ont renouvelé l'exploit pendant l'été 2007. Le Commissariat à l'énergie atomique avait bien voulu leur prêter son tout



C'est après de longues heures de travail des images sur ordinateur que la mission Horizon, codirigée notamment par Christophe Pichon (à g.)...

...et Romain Teyssier (ci-dessous), a obtenu la plus grande reconstitution du cosmos.



nouveau supercalculateur civil BULL, classé 5<sup>e</sup> au niveau européen, pendant deux mois. Cette fois, les cosmologistes ont reconstitué, sur la même image, la plus grosse portion d'Univers jamais modélisée : une sphère centrée sur la Terre, de 6 milliards d'années-lumière de rayon, soit la moitié de l'Univers observable ! Un résultat extraordinaire, mais

au prix de quelques sueurs froides, comme le raconte Romain Teyssier : « *On a tâtonné pendant les trois premières semaines. Astrophysiciens et informaticiens ont travaillé de concert pour faire tout entrer dans l'ordinateur "au chausse-pied". Et puis on a repris des couleurs et on est partis dans les calculs. On devait rendre l'ordinateur le 20 août, et on avait une sacrée contrainte : l'âge de l'Univers à terminer ! On se relayait pour faire les 3/8. Mais*

*le 19 août à 10 heures du matin, on avait fini.* » Patiemment, ils ont simulé 700 cubes d'Univers de 6 milliards d'années-lumière de côté, un pour chaque étape de son vieillissement.

#### LA PREMIÈRE CARTE VIRTUELLE DU CIEL

Pour cela, ils ont dû mettre en mouvement 70 milliards de particules, un record absolu. S'ils avaient dû le faire sur un ordinateur personnel, cela leur aurait pris... 1000 ans ! Puis ils ont arrangé ces cubes, en les plaçant les uns dans les autres, de manière à reconstituer ce que verrait un observateur sur Terre : un Univers en forme de sphère, centré autour de l'observateur, et de plus en plus jeune à mesure qu'il regarde de plus en plus loin. Avec, ce soir sur le gâteau, une percée à 13,7 milliards d'années-lumière, soit pratiquement jusqu'au big bang ! Jusqu'à l'« horizon » de l'univers observable. D'où le nom donné à la collaboration : Horizon. Au final, les cosmologistes ont construit une image en « trou

de serrure » qui n'a rien à voir avec la forme réelle de l'Univers, mais qui était le seul moyen, avec les capacités de calcul et de stockage dont ils disposent, pour avoir une vision du cosmos remontant presque jusqu'à sa naissance. En effet, une représentation de l'Univers observable en entier, soit une sphère de 13,7 milliards d'années-lumière de rayon, n'est pas envisageable à l'heure actuelle. « *Nous avons fait la première carte virtuelle du ciel* », aime à dire Romain Teyssier. Cette image est si grande qu'aucun relevé de galaxies n'a sondé l'Univers aussi largement et aussi profondément. Il faudra attendre au moins une dizaine d'années et la mise en fonctionnement de la prochaine génération d'instruments, comme le LSST (Large Synoptic Survey Telescope) sur Terre ou le DUNE (Dark UNiverser Explorer) dans l'espace, pour savoir si cette vision de l'Univers correspond bien à la réalité. ●

VALÉRIE GREFFOZ