

# L'Univers dans ma poche

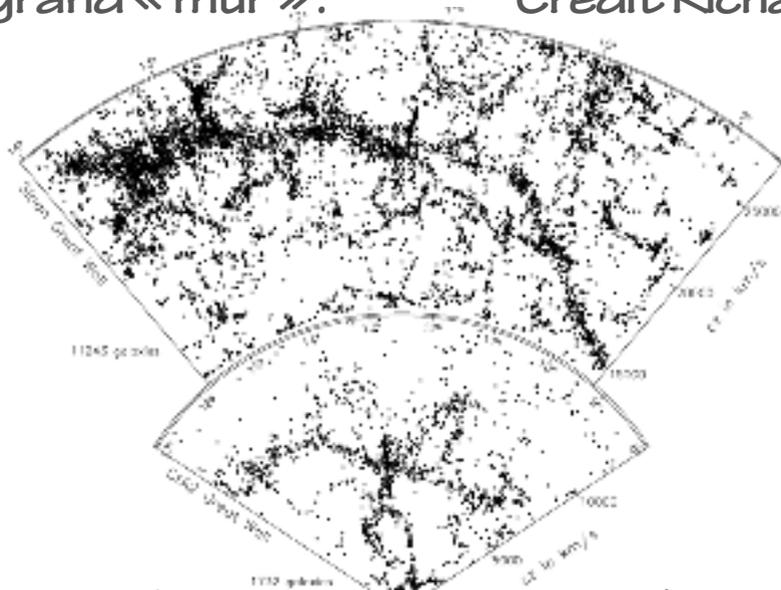
A visualization of the cosmic web, showing a complex network of purple and blue filaments with bright yellow and orange nodes representing galaxy clusters and individual galaxies.

## La toile cosmique

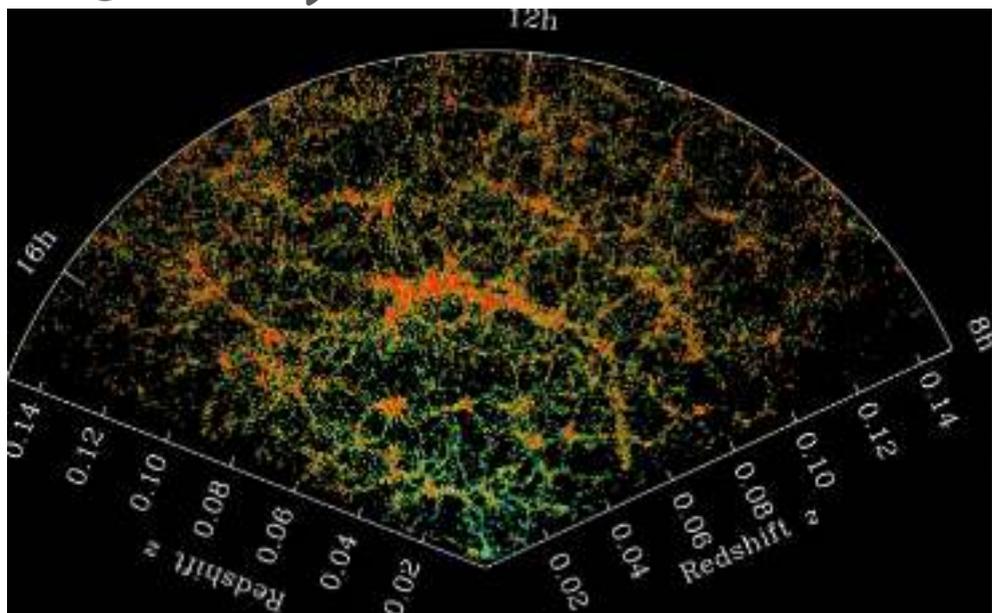


**Françoise Combes**  
Observatoire de Paris

Tranche d'Univers, cartographiée par le CfA2. Chaque point est une galaxie. On distingue un grand « mur » .  
Crédit Richard Gott



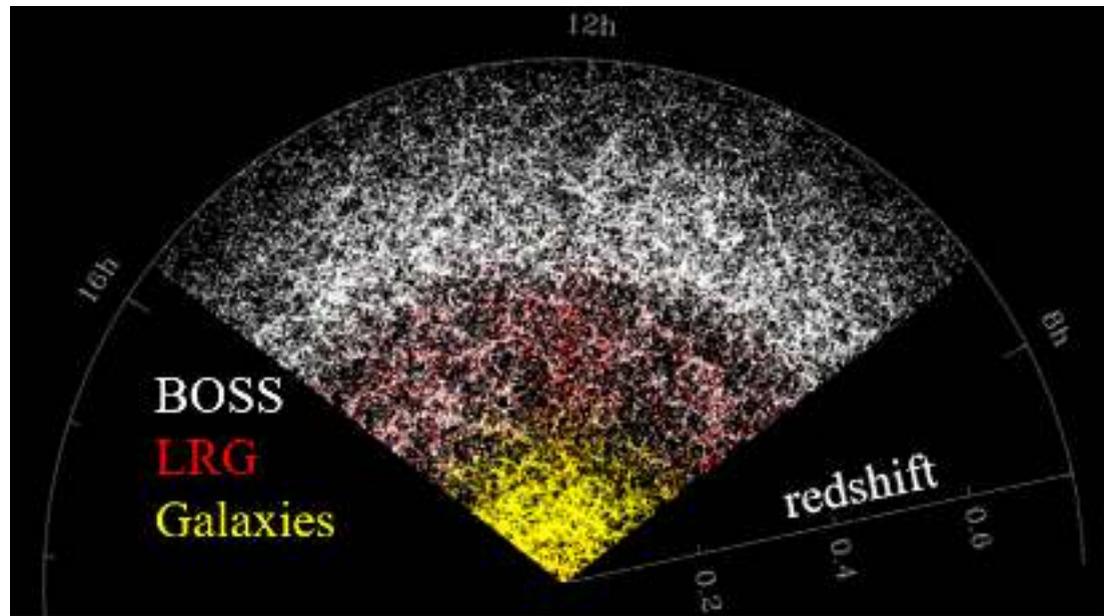
Tranche d'Univers, cartographiée par le SDSS en 2000. On y voit des « murs » encore plus grands que celui du CfA2.



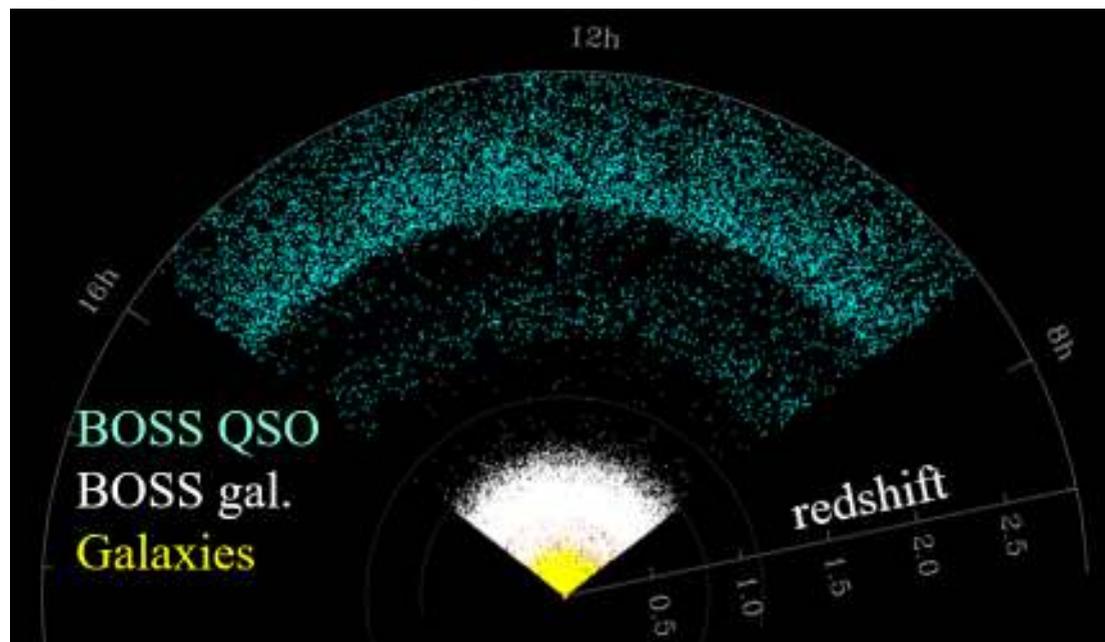
## L'Univers proche est structuré

Dès la fin du grand débat en 1925, qui conclut à l'existence de galaxies en dehors de la nôtre, on entreprit de grands relevés de galaxies. On découvrit ainsi que l'Univers « proche » n'est pas homogène mais constitué d'amas de galaxies plus ou moins aplatis avec une structure en gruyère et de grands vides. C'est ce qu'on appelle la toile cosmique. Le premier relevé « volumique », donnant les positions des galaxies avec leurs distances (mesurées par le redshift\*), fut le CfA2, à la fin du XXe siècle. Il a fallu dix ans pour observer 18.000 objets. Les spectrographes d'aujourd'hui permettent d'observer des centaines de galaxies en même temps et de réaliser des relevés comptant des millions de galaxies (comme le 2dF en Australie, le SDSS aux USA).

\* ou décalage des raies spectrales vers le rouge, voir TUIMPs 2 et 12. 3



L'échantillon principal des galaxies du SDSS est représenté en jaune. Celui des galaxies lumineuses rouges (LRG) en rouge, et celui des galaxies du projet BOSS en blanc. Les quasars (QSO) du projet BOSS sont en vert.



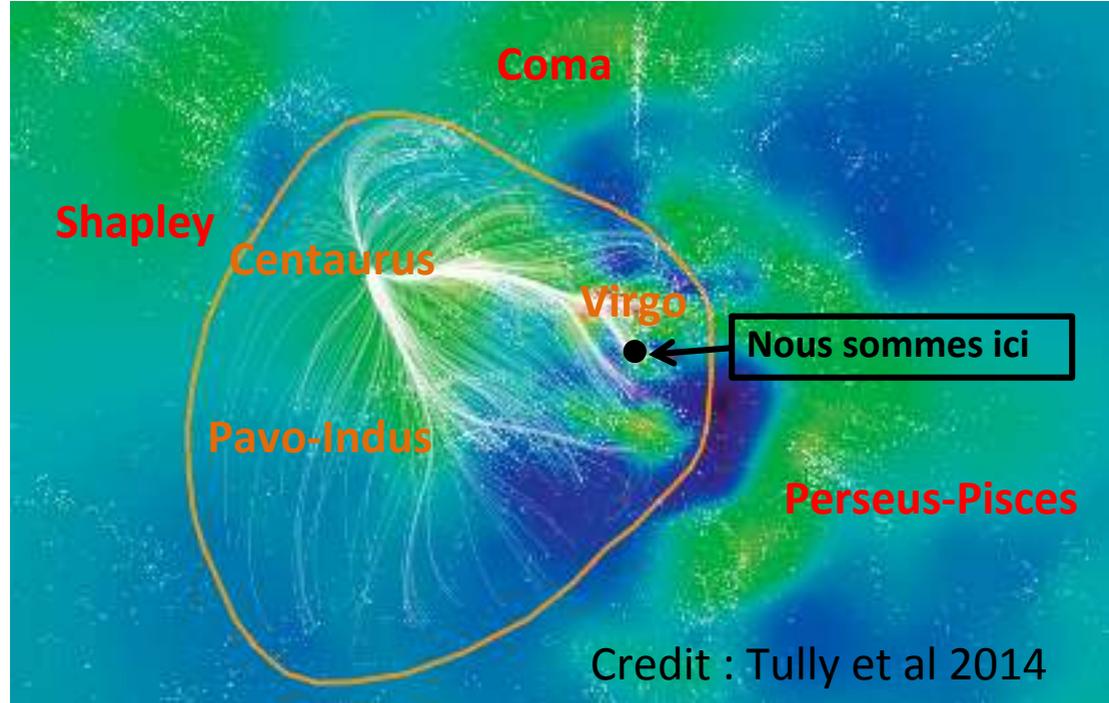
## Des relevés plus profonds

L'échantillon principal des galaxies du SDSS avait un redshift moyen  $z = 0,1$ , correspondant à une distance de 1,5 milliards d'années-lumière.

Celui des galaxies lumineuses rouges permettait d'aller jusqu'à  $z = 0,7$ . Le projet BOSS va jusqu'à  $z = 1$  (22 milliards d'années-lumière). Avec les quasars, qui sont plus lumineux que les galaxies, on atteint  $z = 5$  (155 milliards d'années-lumière).

Comme on s'y attend, l'Univers est moins structuré à plus grand redshift, c'est à dire lorsqu'il était plus jeune\*. Les amas de galaxies se forment à  $z = 2$  (c'est à dire 3,3 milliards d'années après le Big Bang). La structure en filaments et gruyère est déjà présente, mais moins contrastée qu'à faible redshift.

\* Voir TUIMP 12



Une représentation du super-amas local Laniakea qui veut dire « ciel immense » en Hawaïen. Il a été appelé ainsi en honneur des navigateurs polynésiens qui utilisaient leur connaissance du ciel pour naviguer sur l'Océan Pacifique.

Notre Galaxie se trouve près du gros point noir central. Les galaxies sont les points blancs. Les lignes blanches indiquent les courants de galaxies. Les zones en bleu sont des vides cosmiques. La ligne orange délimite le super-amas Laniakea. Ainsi, Coma ou Perseus-Pisces ne font pas partie de Laniakea.

## Laniakea : notre super-amas

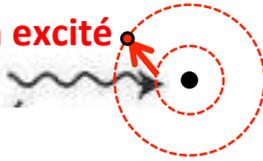
Notre Galaxie se trouve au bord d'un super-amas de galaxies, découvert en 2014 et appelé Laniakea. C'est une structure en train de se diluer qui mesure 500 millions d'années-lumière et contient plus de cent mille galaxies.

Pour la déceler, il a fallu mesurer les distances par des méthodes qui n'utilisent pas les vitesses radiales et la loi de Hubble-Lemaître\*. En effet, les vitesses radiales des galaxies, en plus de la composante d'expansion cosmologique, sont affectées de perturbations dues à l'attraction gravitationnelle qu'elles exercent mutuellement. Elles permettent ainsi de savoir si une galaxie a un lien dynamique avec d'autres et appartient au même groupe.

\* Voir TUIMP 12



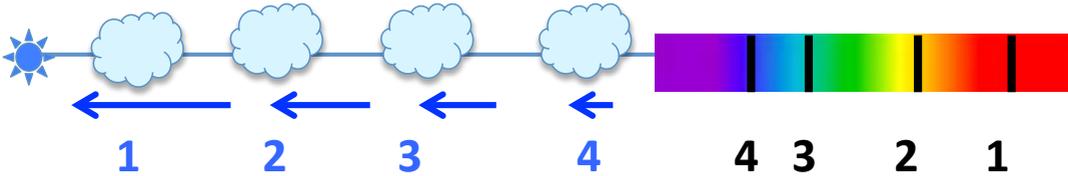
électron excité



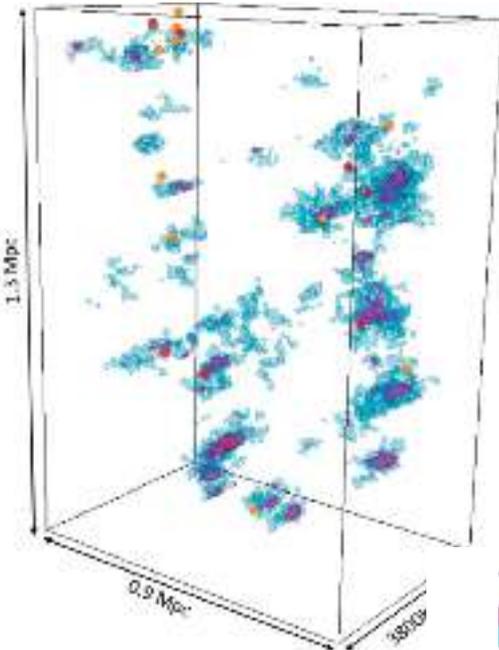
raie d'absorption

quasar photon **hydrogène** spectre du quasar

Les photons issus d'un quasar qui ont une énergie permettant d'exciter un atome d'hydrogène sont absorbés et créent une raie d'absorption dans le spectre du quasar.



Chaque nuage de gaz entre le quasar et nous absorbe les photons dont la longueur d'onde correspond au redshift du nuage.



A gauche : distribution spatiale des filaments dans l'amas SSA2. En bleu et magenta : le gaz. En rouge et orange : les galaxies. Les filaments mesurent plusieurs millions d'années-lumière.

D'après Umehata et al. (2019).

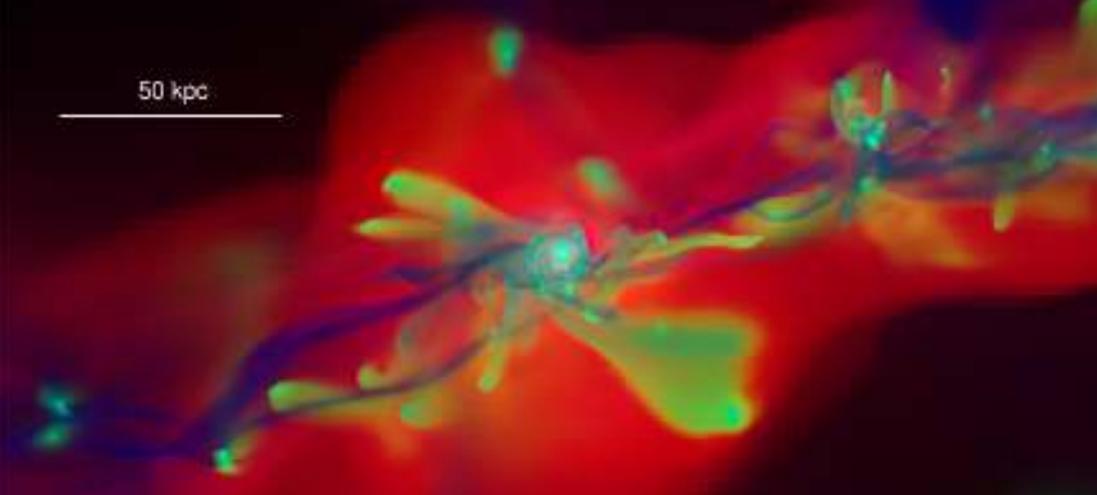


## Le gaz des filaments

Jusqu'à tout récemment, les filaments cosmiques n'étaient détectés que par les galaxies qu'ils contiennent. Or ils sont aussi composés de matière noire, invisible, et de gaz dilué. Les atomes d'hydrogène de ce gaz absorbent la lumière des quasars lointains. On peut ainsi cartographier la distribution volumique des filaments (voir p. 8).

Le gaz des filaments peut aussi être détecté par son émission, lorsqu'il est excité par des étoiles chaudes ou des quasars. On a ainsi détecté 270 halos de gaz autour de galaxies à des redshifts entre 3 et 6. Cette découverte a été faite par un groupe d'astronomes européens, grâce à l'extrême sensibilité de l'instrument MUSE sur le très grand télescope (VLT) de l'ESO.

50 kpc



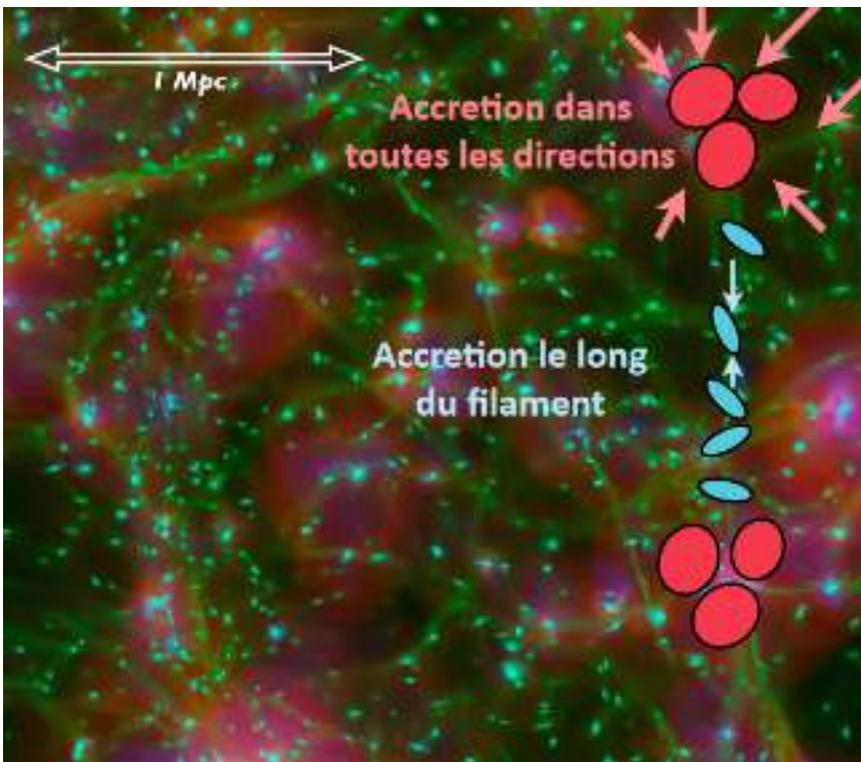
Résultat d'une simulation numérique \* par Agertz et al. (2009) montrant l'accrétion de gaz froid sur les galaxies le long des filaments cosmiques et l'éjection de gaz enrichi en éléments produits dans les étoiles. **En bleu, le gaz froid. En rouge, un halo de gaz chauffé à très haute température. En vert, le gaz enrichi éjecté par les galaxies.**

\* Une simulation numérique est un calcul effectué sur ordinateur qui cherche à représenter un système réel en tenant compte des lois de la physique. Par exemple on peut simuler l'écoulement d'une rivière, la formation d'une galaxie etc. Les simulations peuvent prendre des mois de calculs sur les plus grands ordinateurs.

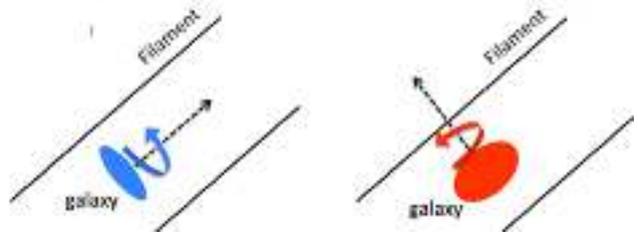
# Baryons dans les filaments

Contrairement à ce qu'on pourrait penser, l'essentiel de la matière ordinaire (les baryons) n'est pas dans les galaxies. Dans l'Univers, il y a 5% de baryons, 25% de matière noire et 70% d'énergie noire. La fraction de baryons dans la matière est donc de  $5/(25+5) = 17\%$ . Dans les galaxies, on a mesuré que la fraction de baryons ne dépasse pas 3%. Plus de 80% des baryons se trouvent donc en-dehors des galaxies. On pense que ces baryons ont été éjectés par les supernovae dans les galaxies de faible masse, et par les noyaux actifs\* dans les galaxies plus massives. Cette éjection de matière enrichit le milieu intergalactique en éléments produits par les étoiles, comme le carbone, l'oxygène, le fer.

\* Voir TUIMP 6



Les galaxies elliptiques, massives et rouges, se concentrent à la croisée des filaments, et les galaxies bleues spirales dans les filaments.

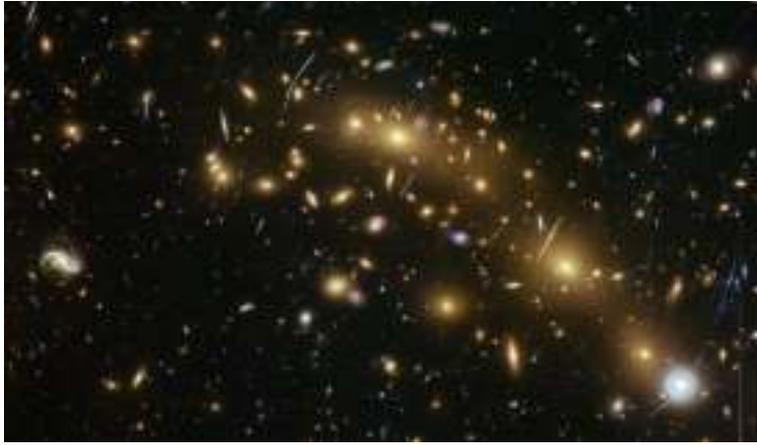


Les galaxies spirales, bleues, ont leur axe de rotation le long du filament. Les galaxies rouges, fusion de spirales, ont leur axe perpendiculaire au filament.

## L'orientation des galaxies

Selon l'environnement, la morphologie des galaxies n'est pas la même. Dans les amas, à la croisée des filaments, on trouve surtout des galaxies elliptiques, massives et ne contenant que des étoiles vieilles (leur couleur est rouge). Dans les filaments, on trouve surtout des galaxies spirales, qui accrètent du gaz froid à partir duquel se forment des étoiles qui leur donnent une couleur bleue.

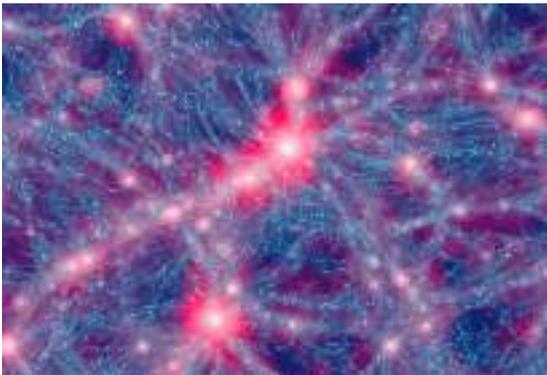
D'autre part, l'accrétion du gaz sur les galaxies bleues vient de la partie externe des filaments, et leur axe de rotation tend à être orienté parallèlement au filament. C'est le contraire pour les galaxies rouges, elliptiques, qui sont souvent le résultat de la fusion de deux galaxies à disque. La page 12 montre ces tendances dans les simulations numériques.



# Jeu

Laquelle de ces images montre :

- Des galaxies alignées?
- Des filaments cosmiques?
- Une toile d'araignée ?



Réponses au dos

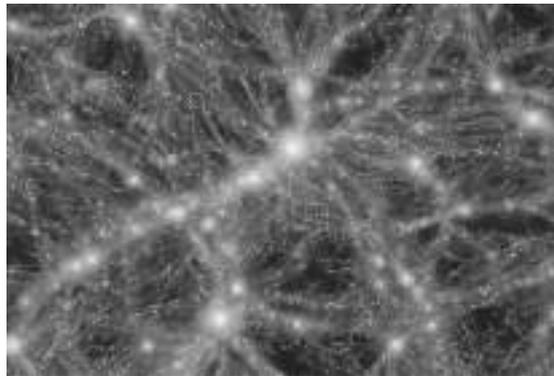
Alignement de galaxies  
dans l'amas MACS  
J0416.1-2403  
Image Télescope  
Spatial de Hubble

# Réponses



Une toile d'araignée

Simulation de la toile  
cosmique



# L'Univers dans ma poche N° 13

Ce mini-livre a été écrit en 2020 par Françoise Combes de l'Observatoire de Paris (France).

Nr 1

Image de couverture : Simulation de la distribution de la matière noire dans la toile cosmique. Plus la couleur est claire, plus la densité est forte. Les galaxies se forment le long des filaments, et les amas de galaxies à la croisée des filaments. Cette simulation fait partie du projet Millenium, Crédit Springel et al. (2005).



Pour en savoir plus sur cette collection et sur les thèmes présentés dans ce mini-livre tu peux visiter

<http://www.tuimp.org>

TUIMP Creative Commons

