



PARIS
5 NOVEMBRE 2020

DE
COMMUNIQUÉ
PRESSE

Grand challenge *Extreme-Horizon*: comprendre l'Univers « noir » et la formation de galaxies primordiales

La collaboration *Extreme-Horizon*, menée par des équipes du CEA, du CNRS, de Sorbonne Université et de l'Université Paris-Saclay, a produit une simulation inédite de l'évolution des structures cosmiques – galaxies, étoiles et trous noirs supermassifs – qui débute quelques instants après le Big-Bang et se poursuit jusqu'à aujourd'hui. Les régions intergalactiques qui représentent 90 % du volume de l'Univers y sont décrites avec une résolution sans précédent. Cette simulation, qui conduit à deux résultats surprenants aux échelles galactiques et cosmologiques, constitue l'un des principaux « grands challenges » réalisés sur le supercalculateur Joliot-Curie de GENCI¹, au sein du Très grand centre de calcul du CEA (TGCC). Ces résultats font l'objet d'une publication dans *MNRAS* et *A&A Letters*.

La matière visible ne constitue que 16 % de la masse totale de l'Univers. Le reste de la masse dont la nature reste encore mal connue, porte le nom de matière noire. De manière encore plus surprenante, la masse totale de l'Univers ne représente que 30 % de son contenu énergétique. Le reste forme l'énergie noire, totalement inconnue mais responsable de l'expansion accélérée de l'Univers.

Pour en savoir plus sur la matière et l'énergie noires, les astrophysiciens exploitent les sondages à grande échelle de l'Univers ou encore l'étude détaillée des propriétés des galaxies. Mais ils ne peuvent interpréter leurs observations qu'en les confrontant aux prédictions de modèles théoriques de matière et d'énergie noires. Or de telles simulations requièrent des dizaines de millions d'heures de calcul sur des supercalculateurs.

La collaboration *Extreme-Horizon* a pu conduire une simulation de l'évolution des structures cosmiques depuis les premiers instants suivants le Big-Bang et jusqu'à aujourd'hui sur le supercalculateur Joliot-Curie, qui offre une puissance de 22 petaflops (22 x 10¹⁵ opérations flottantes par seconde). Le volume de données numériques traitées a dépassé 3 To (10¹² octets) à chaque pas du calcul, justifiant la mise en œuvre de nouvelles techniques d'écriture (code numérique à raffinement adaptatif de maille RAMSES) et de lecture des données de simulation.

Cosmologie : corriger les données issues de la forêt Lyman- α

Le premier résultat de cette simulation concerne l'interprétation de grandes structures de l'Univers lointain : les « nuages » d'hydrogène intergalactiques. Les

CONTACT PRESSE

Tuline LAESER
tuline.laeser@cea.fr
01.64.50.20.97 /
06.12.04.40.22

¹ Grand équipement national de calcul intensif

astrophysiciens les détectent en mesurant l'absorption de la lumière des quasars – des sources extrêmement lumineuses en raison de la présence d'un trou noir supermassif qui attire la matière dans son disque d'accrétion. Tous les nuages situés le long de la ligne de visée produisent une « raie d'absorption » (Lyman- α) présentant chacune un « décalage vers le rouge » spécifique, en raison de l'expansion de l'Univers. L'ensemble de ces raies forme donc une « forêt » touffue qui révèle la répartition unidimensionnelle des nuages d'hydrogène, et donc de la matière, à des distances comprises entre 10 et 12 milliards d'années-lumière (al).

Or, de nombreux trous noirs supermassifs, situés entre ces quasars et nous, expulsent une quantité considérable d'énergie dans le milieu intergalactique, modifiant son état thermique et les propriétés de la forêt Lyman- α . Le modèle physique utilisé dans la simulation *Extreme-Horizon* décrit finement ces rétroactions qui biaisent les estimations des paramètres cosmologiques de quelques pour cent. Le facteur correctif calculé sera crucial en particulier pour l'expérience DESI (*Dark Energy Spectroscopic Instrument*), en construction en Arizona (États-Unis), car il peut dépasser 5 % alors que la précision visée est 1 %.

Des galaxies massives ultra-compactes formées en « essaim d'abeilles »

Par ailleurs, la haute résolution de la simulation *Extreme-Horizon* dans les régions de faible densité a permis de décrire l'accrétion de gaz « froid » sur les galaxies et la formation des galaxies massives ultra-compactes lorsque l'Univers n'avait que 2 à 3 milliards d'années. Ces galaxies atypiques, observées récemment grâce au radiotélescope Alma (*Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array*), au Chili, se forment par agglomération rapide de nombreuses galaxies très petites. Ce mode de croissance « en essaim d'abeilles » n'a pu être révélé que par la résolution exceptionnelle d'*Extreme-Horizon*.

Grand challenge sur le supercalculateur Joliot-Curie

Conçu par la société Atos pour GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif), le supercalculateur Joliot-Curie, basé sur l'architecture BullSequana d'Atos, a atteint une puissance crête de 22 petaflops en 2020.

Les grands challenges constituent des simulations et calculs exceptionnels qui ont été réalisés lors de la période dite de « Grand challenge ». Faisant suite à l'installation d'une nouvelle partition du calculateur, cette période de trois mois constitue une occasion unique pour un nombre d'utilisateurs limité d'accéder à une grande partie des ressources de la machine. Ils bénéficient alors du support des équipes du TGCC et du constructeur, collaborant ensemble pour optimiser le fonctionnement du calculateur lors de cette phase de « démarrage ».

Extreme-Horizon a ainsi été réalisé sur la nouvelle partition de calcul AMD ROME du supercalculateur Joliot-Curie de GENCI et opéré par les équipes d'informaticiens de la Direction des applications militaires (DAM) du CEA au sein du Très grand centre de calcul (TGCC à Bruyères-Le-Châtel). Cette simulation a utilisé cinquante millions d'heures de calcul et a nécessité la mise en œuvre de nouvelles techniques de lecture et d'écriture des données afin de réduire l'utilisation de l'espace disque et accélérer l'accès aux données. Ce travail a été accompli grâce au concours de plusieurs instituts et directions du CEA et du Laboratoire en informatique haute performance pour le calcul et la simulation de l'Université Paris-Saclay.

Ce projet a été réalisé en collaboration entre le CEA-Irfu, l'AIM (CEA, CNRS, Université de Paris), l'IAP (CNRS, Sorbonne Université) et le LIHPC (Université Paris-Saclay, CEA-DAM).

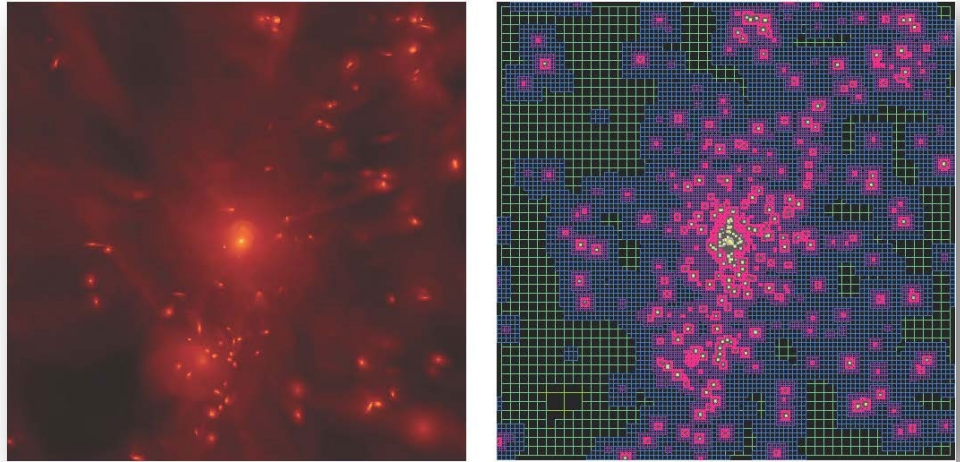
CONTACT PRESSE

Tuline LAESER
tuline.laeser@cea.fr
 01.64.50.20.97 /
 06.12.04.40.22

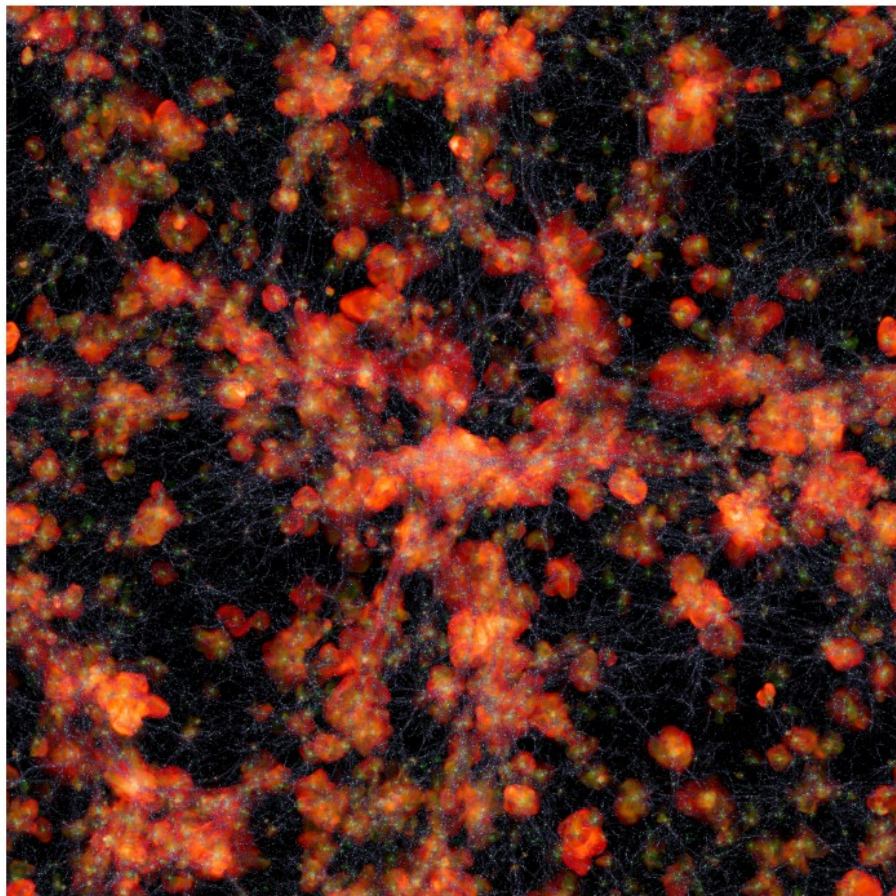
Références :

The impact of AGN feedback on the 1D power spectra from the Ly- α forest using the Horizon-AGN suite of simulations, MNRAS. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa1242>

Formation of compact galaxies in the Extreme-Horizon simulation, A&A Letters. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038614>



Le code de simulation RAMSES est un code numérique pour l'astrophysique et la cosmologie. Il est basé sur une technique de calcul à base de maille adaptative. La figure illustre bien la configuration du maillage adaptatif en fonction de la densité de matière.



DE
COMMUNIQUÉ
PRESSE

CONTACT PRESSE

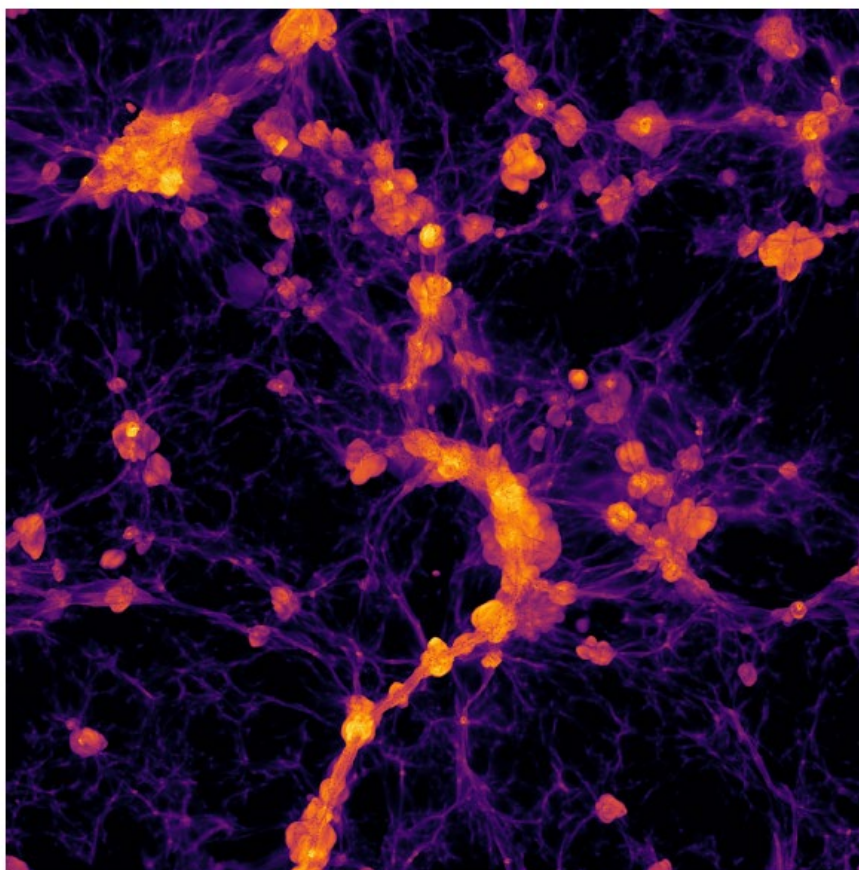
Tuline LAESER

tuline.laeser@cea.fr

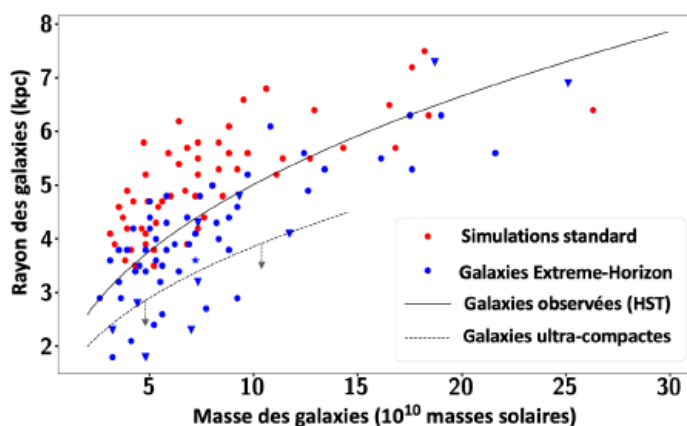
01.64.50.20.97 /

06.12.04.40.22

Vue de la simulation Extreme-Horizon. Le rouge correspond au gaz chaud, généralement expulsé des galaxies par les trous noirs supermassifs. Le gris correspond au gaz primordial, froid, qui alimente les galaxies le long des filaments cosmiques. Le vert correspond au gaz enrichi en éléments lourds (métaux) sous l'effet des explosions d'étoiles massives (supernovae). Chabanier, Solène; Bournaud, Frédéric; Dubois, Yohan; Palanque-Delabrouille, Nathalie; Yèche, Christophe; Armengaud, Eric; Peirani, Sébastien. MNRAS, 495, 1825 (2020)



Vue de la simulation Extreme Horizon montrant une région de 50 Mpc de côté. La température du gaz est montrée ici (violet $\sim 10^4\text{K}$ - jaune $\sim 10^7\text{K}$). Les principales galaxies apparaissent comme des points froids au sein de vastes halos de gaz chaud. Chabanier, S; Bournaud, F.; Dubois, Y. et al., A&A Letters, submitted.



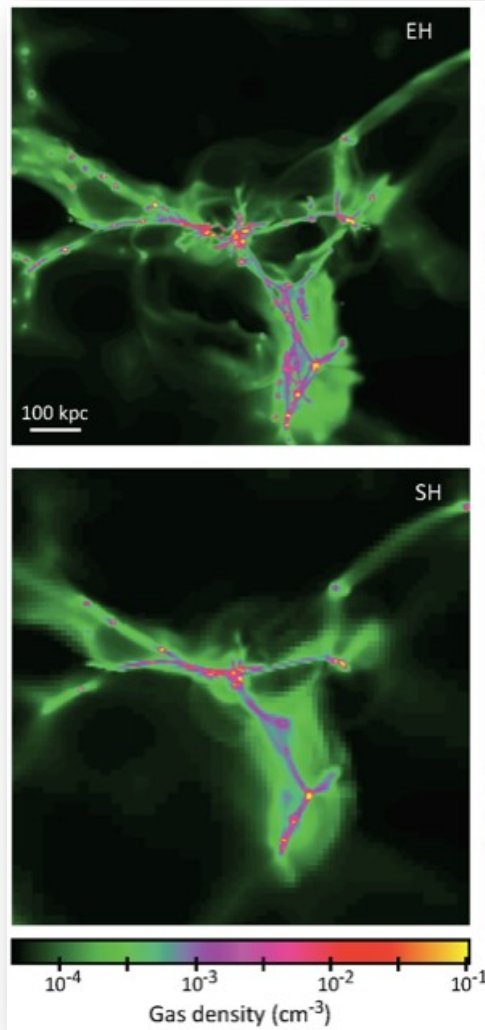
CONTACT PRESSE

Tuline LAESER
tuline.laeser@cea.fr
 01.64.50.20.97 /
 06.12.04.40.22

En haut : Extreme-Horizon, zoom sur un amas de galaxies avec en jaune des galaxies de type Voie Lactée alimentées par des filaments cosmologiques de gaz diffus. En bas : Même région dans la simulation Standard-Horizon qui modélise le gaz intergalactique à la résolution standard des grandes simulations cosmologiques existantes.

CONTACT PRESSE

Tuline LAESER
tuline.laeser@cea.fr
01.64.50.20.97 /
06.12.04.40.22



Relation masse-taille des galaxies de la simulation Extreme-Horizon (bleu) comparée à celle de la même région de l'Univers resimulée à la résolution habituelle des simulations cosmologiques (rouge). Extreme-Horizon reproduit la relation masse-taille des galaxies observées (courbe noire) et explique la présence de galaxies ultra-compactes (sous la courbe en pointillés) observées dans l'Univers primordial, grâce au gain de résolution dans le milieu diffus qui alimente la formation des galaxies. Starbursts in and out of the star-formation main sequence - Elbaz, D.; Leiton, R.; Nagar, N.; Okumura, K.; et al. A&A 616, A110 (2018)