

eau ne devrait pas diminuer avant le milieu du siècle, en partie grâce à l'augmentation des pluies de mousson, mais les prévisions à plus long terme sont sombres. Nous prévoyons ainsi que 50 à 60% du volume de glace seront perdus d'ici à la fin du siècle, à moins que l'humanité ne réduise radicalement ses émissions de gaz à effet de serre.

À court terme, le grand défi pour les populations de ces régions d'Asie sera de faire face aux changements du régime des rivières et aux risques naturels. Dans certains bassins, la fonte des neiges débutera peut-être plusieurs semaines plus tôt qu'auparavant, ce qui obligera les agriculteurs à modifier leurs cultures ou à décaler les semailles. Les accumulations de neige, moins intenses, auront un rôle tampon plus limité. On peut donc s'attendre à une augmentation des niveaux d'eau dans les rivières dans une région du monde déjà confrontée à de fortes inondations chaque année.

Les pluies extrêmes dans les montagnes provoquent aussi davantage de glissements de terrain, notamment lors de la mousson. Une fonte accrue remplit les lacs glaciaires à ras bord, provoquant des inondations désastreuses lorsque les barrages morainiques qui les endiguent cèdent sous la pression de l'eau. Au cours des deux dernières décennies, les catastrophes naturelles telles que les avalanches, les glissements de terrain et les inondations soudaines ont fait des milliers de victimes et causé des milliards d'euros de dommages matériels. L'augmentation future des précipitations extrêmes et le réchauffement vont exacerber ces risques. Les dégâts se multiplieront aussi, car les populations en croissance construisent des villes et des barrages hydroélectriques à des altitudes croissantes.

Bien que ces tendances générales soient claires, chaque région doit être étudiée en détail afin que l'on puisse fournir à ses habitants des informations pertinentes.

Ainsi, la partie de l'Asie centrale reliant les chaînes orientales du Pamir et du Karakoram à la partie occidentale de la cordillère de Kunlun constitue une anomalie. Les glaciers y sont stables, voire grandissent, ce que l'on ne voit presque nulle part ailleurs sur la planète. Les données recueillies l'année dernière suggèrent que le développement des activités agricoles et de l'irrigation dans le bassin du Tarim tout proche pourrait jouer un rôle. L'eau prélevée dans les nappes phréatiques et les sources pour irriguer les champs s'évapore dans l'atmosphère. L'évapotranspiration des cultures contribue encore à augmenter l'humidité de l'atmosphère. Et cette vapeur d'eau vient se condenser au-dessus des montagnes pour former de la neige. Cela illustre une fois de plus à quel point les activités humaines modifient les écosystèmes.

Les recherches sur le cycle de l'eau à haute altitude font déjà prendre conscience de l'importance de l'eau en montagne pour des milliards de personnes dans le monde. Les autorités devraient commencer à agir dès maintenant pour la sauvegarder.

QUELLES POLITIQUES POUR LES MONTAGNES ?

La première étape consiste à inclure les montagnes dans les discussions plus larges sur la préservation des ressources naturelles de la Terre. Au niveau local, les autorités peuvent créer des parcs nationaux afin de protéger les hautes montagnes du développement. Elles peuvent mettre en place des politiques visant à réduire la pollution et les émissions de suie, afin de diminuer le nombre de particules en suspension dans l'air. Elles peuvent aussi faire construire des réservoirs pour stocker l'eau provenant de la pluie ou de la fonte du manteau neigeux au printemps – à condition d'analyser les effets de telles structures sur l'hydrologie et les écosystèmes.

Un bon exemple nous vient de la vallée du Langtang. Il y a encore deux ans, le village le plus haut de la vallée n'avait pas d'électricité; puis, avec l'aide d'une organisation non gouvernementale, les villageois ont construit une centrale hydroélectrique qui leur fournit aujourd'hui de l'électricité et un accès à internet.

Des pays voisins auraient intérêt à collaborer afin de réduire la demande d'eau et de réguler les prélèvements sur les cours d'eau qui traversent des frontières nationales. Des ministres de huit pays allant de l'Hindou Kouch à l'Himalaya ont montré l'exemple en octobre 2020: réunis lors d'un sommet consacré à la montagne, ils se sont engagés par écrit à s'appuyer sur la science pour améliorer les politiques relatives à la montagne, à écouter les populations très diverses de la région et à parler d'une seule voix dans les négociations internationales. L'approvisionnement en eau de millions de personnes en Afghanistan, au Bangladesh, au Bhoutan, en Chine, en Inde, au Myanmar, au Népal et au Pakistan dépend en effet de l'immense massif montagneux qui s'étend de l'Hindou Kouch à l'Himalaya. Or le régime des précipitations et les rendements agricoles sont déjà en train de se modifier dans ces régions.

Les hauts sommets de la planète se transforment rapidement. Au cours des prochaines décennies, de nombreux habitants des plaines vont devoir s'adapter à des conditions météorologiques plus extrêmes, à des risques naturels plus importants et à des modifications des ressources en eau. Les chercheurs, les ingénieurs et les autorités politiques doivent unir leurs forces et agir dès maintenant pour garantir que les ressources en eau des montagnes soient durables et que les générations futures continuent d'en bénéficier. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Wagnon et al., **Reanalysing the 2007-19 glaciological mass-balance series of Mera Glacier, Nepal, Central Himalaya, using geodetic mass balance**, *Journal of Glaciology*, vol. 67, pp. 117-125, 2021.

W. W. Immerzeel et al., **Importance and vulnerability of the world's water towers**, *Nature*, vol. 577, pp. 364-369, 2020.

R. Alley, **Le géant Thwaites va-t-il fondre ?**, *Pour la Science*, n° 502, pp. 54-61, juillet 2019.

F. Brun et al., **A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016**, *Nature Geoscience*, vol. 10, pp. 668-673, 2017.

P. Crouzet, **L'eau comptabilisée à l'échelle européenne**, *Pour la Science*, n° 420, pp. 17-18, septembre 2012.

Tester les fondements du modèle du Big Bang

Certains résultats d'observations astrophysiques semblent inconciliables. C'est peut-être le signe que les hypothèses de base du modèle du Big Bang sont à revoir. Il faut donc tester ces prémisses, mais comment ?

En tout juste un siècle, les astrophysiciens ont bâti un modèle mathématique et physique de notre Univers. Ce modèle du Big Bang s'est progressivement imposé, parce qu'il parvient à interpréter et concilier un vaste ensemble d'observations et parce qu'il offre une vision cohérente de l'histoire cosmique. Cependant, des questions sur les premiers instants de l'Univers et sur la nature de son contenu matériel restent encore ouvertes.

Au-delà de ces énigmes, des observations récentes ont fait apparaître des tensions au sein du modèle. Cette situation concerne par exemple la mesure de la constante de Hubble, qui caractérise le taux d'expansion actuel de l'Univers, ou, depuis quelques mois, la densité moyenne de matière baryonique (la matière ordinaire). Diverses méthodes pour en déterminer la valeur, reposant sur des observables très différentes, conduisent actuellement à des résultats incompatibles entre eux. Les astrophysiciens s'efforcent de comprendre l'origine de ces désaccords. Les observations ou une mauvaise interprétation des données sont-elles en cause ?

Ces tensions émergent dans un cadre particulier, le modèle du Big Bang. Celui-ci s'est construit progressivement. Initialement

très qualitatif et peu contraint par les observations, il a évolué grâce aux avancées théoriques et techniques. Les chercheurs ont affiné leur description de l'Univers et le modèle est devenu plus quantitatif. Les paramètres du modèle sont aujourd'hui mesurés avec une précision de l'ordre de quelques pourcents. On parle de « cosmologie de précision » ou de « cosmologie au pourcent ».

Une autre façon d'aborder le problème de ces tensions consiste à se rappeler que tout modèle, comme celui du Big Bang, repose sur un ensemble d'hypothèses qu'il est nécessaire de questionner de façon constante. Alors que la précision des mesures augmente, ces hypothèses, et donc le modèle lui-même, sont-elles toujours adaptées pour interpréter les observations ? Faut-il en abandonner certaines, les modifier ? Avec de nombreux collègues, nous avons exploré cette voie de réflexion. En testant les hypothèses du modèle du Big Bang, notre objectif est de consolider et d'améliorer les fondements du modèle cosmologique, et éventuellement d'identifier des pistes pour résoudre les questions ouvertes et les tensions qui y persistent.

Un modèle, en cosmologie, mais de façon générale en science, est un cadre théorique qui donne une description simplifiée d'un phénomène. Il est voué à

L'AUTEUR



JEAN-PHILIPPE UZAN
cosmologiste du CNRS
à l'institut d'astrophysique
de Paris

À l'image des « Piliers de la Création », un nuage de gaz photographié par le télescope spatial Hubble, quelques hypothèses constituent le socle du modèle du Big Bang. Les progrès observationnels peuvent les remettre en cause, d'où l'importance de tester leur robustesse.

© Nasa, ESA, et l'équipe Hubble Heritage (STScI/AURA)



L'ESSENTIEL

> Le modèle du Big Bang décrit l'Univers et son évolution. De nombreuses observations le confirment.

> Il repose sur quelques grandes hypothèses : la nature est décrite par la relativité générale et la physique quantique, l'Univers est homogène et isotrope.

> Ces dernières années, différentes mesures de certaines grandeurs comme la constante de Hubble et la densité de matière baryonique ont abouti à des valeurs incompatibles.

> Les hypothèses du modèle sont peut-être devenues insuffisantes au regard de la précision des observations. Les chercheurs imaginent des façons de les tester.

> évoluer. Par exemple, il faut accepter que certaines questions restent en dehors de son champ explicatif à un moment donné. Les premiers modèles cosmologiques des années 1920, fondés sur la relativité générale d'Albert Einstein, décrivaient la matière comme un «gaz» d'étoiles ou de galaxies dont il suffisait de connaître la densité moyenne. Par construction, ils étaient inadaptés à l'étude de la formation des galaxies et de leur évolution. Ils ont néanmoins permis d'établir un résultat majeur: loin d'être statique, l'Univers est en expansion. Le Russe Alexander Friedmann et le Belge Georges Lemaître avaient prédit cette dynamique, qui a ensuite été confirmée dès 1929 par l'astronome américain Edwin Hubble en mesurant la vitesse d'éloignement des galaxies en fonction de leur distance. Bien que très limité initialement, ce modèle a fourni le cadre dans lequel allait se construire notre vision actuelle de l'Univers.

UNE CONSTRUCTION PAR ÉTAPES

Le modèle a connu une évolution importante à partir de la fin des années 1930. Des physiciens tels que Robert Herman, Ralph Alpher et George Gamow ont mis en évidence les implications du fait que, dans un espace en expansion, la matière se dilue et se refroidit inévitablement. Ainsi, en remontant le temps, l'Univers devait être dans un état très dense et chaud. Ces chercheurs en ont déduit que les éléments atomiques légers (hydrogène, deutérium, hélium et des traces de lithium) ne pouvaient pas exister dans l'Univers primordial et ont été synthétisés dans les premières minutes de l'histoire cosmique (les autres éléments ne se sont formés que plus tard, dans les étoiles notamment).

On a ensuite compris qu'environ 380 000 ans après le Big Bang, la matière jusqu'alors ionisée est devenue neutre: les noyaux atomiques se sont combinés avec les électrons du milieu. L'Univers est ainsi devenu transparent et le rayonnement électromagnétique (les photons) s'est alors propagé librement. On l'observe aujourd'hui sous la forme du «fond diffus cosmologique». Ces prédictions (l'abondance des éléments légers et le fond diffus cosmologique), confirmées par les observations, représentent deux arguments forts en faveur du modèle du Big Bang.

À partir des années 1960, le modèle a évolué pour inclure la question de l'origine et de l'évolution des grandes structures de l'Univers. Grâce au développement des simulations numériques et des grands relevés observationnels, les astrophysiciens ont commencé à étudier comment les galaxies et les amas de galaxies se forment. Puis, dès les années 1980, les théoriciens se sont penchés sur la

dynamique de l'Univers primordial et ont formulé les théories d'inflation, qui rendent compte des «germes» initiaux nécessaires à la formation de ces grandes structures.

Ces quatre grandes étapes de la construction du modèle du Big Bang se reflètent dans son aspect modulaire. Chaque pan de la théorie complète le précédent en abordant des questions qui étaient en dehors de son champ explicatif et en considérant de nouvelles observations. Certains éléments sont plus solides que d'autres: la physique du fond diffus cosmologique ou de la formation des noyaux légers repose sur l'électromagnétisme et la physique nucléaire, théories bien testées en laboratoire, alors que les théories d'inflation sont plus spéculatives et, bien qu'en accord avec les données actuelles, attendent d'être consolidées aussi bien d'un point de vue théorique qu'observationnel.

Le modèle du Big Bang définit le cadre théorique pour prédire et interpréter les observations. Pour le tester, il faut prédire ce qu'un observateur mesurerait, ce qui nécessite de décrire finement la propagation de la lumière et les biais associés à la position de l'observateur, car ce sont ces prédictions qui sont confrontées aux mesures. Le cadre théorique dicte mais restreint aussi les questions et affirmations que nous pouvons poser sur l'Univers, si bien qu'elles ne peuvent être détachées des hypothèses du modèle. Par exemple, l'affirmation que l'Univers est âgé de 13,8 milliards d'années n'est pas le résultat d'une mesure directe, mais une conclusion reposant sur un ensemble d'observations et d'hypothèses (voir l'encadré page 38).

En pratique, on détermine les valeurs des paramètres cosmologiques (dont la définition et le nombre dépendent du modèle; celui du Big Bang en comprend six principaux) qui donnent le meilleur accord entre les prédictions et un jeu d'observations. Quand la qualité des observations augmente, l'estimation des paramètres cosmologiques s'affine. Ainsi, deux observables dont les mesures sont de plus en plus précises peuvent conduire à un désaccord ou une tension qui n'existait pas à un niveau de précision moindre, comme dans le cas de la mesure de la constante de Hubble (voir l'encadré page 40). Il faut alors démontrer que la précision des prédictions théoriques est au moins aussi bonne que celle des observations.

On doit ainsi se demander si ce désaccord remet en question les observables et leur interprétation ou l'une des hypothèses du modèle, s'il s'agit d'un biais que l'on pouvait jusqu'alors négliger ou si le désaccord est annonciateur d'une «nouvelle physique» à découvrir. Si une observation unique peut mettre en défaut la construction théorique, faire évoluer le modèle est plus compliqué. Il >

LE MODÈLE STATIONNAIRE

Dans les années 1940, le Britannique Fred Hoyle et ses collègues ont proposé un modèle cosmologique dit «stationnaire» où une création continue de matière compense la dilution due à l'expansion de l'Univers. Dans ce cas, il n'y a pas de phase primordiale dense et chaude. Ce cadre théorique a longtemps été un concurrent sérieux au modèle du Big Bang. Mais il est tombé en désuétude, principalement à la suite de la découverte du fond diffus cosmologique.