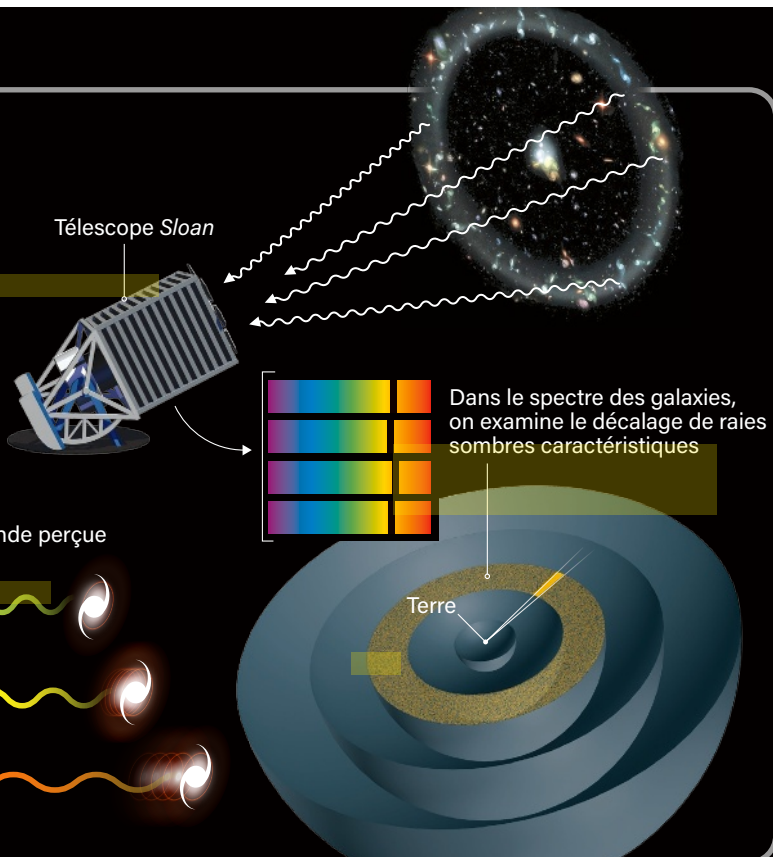


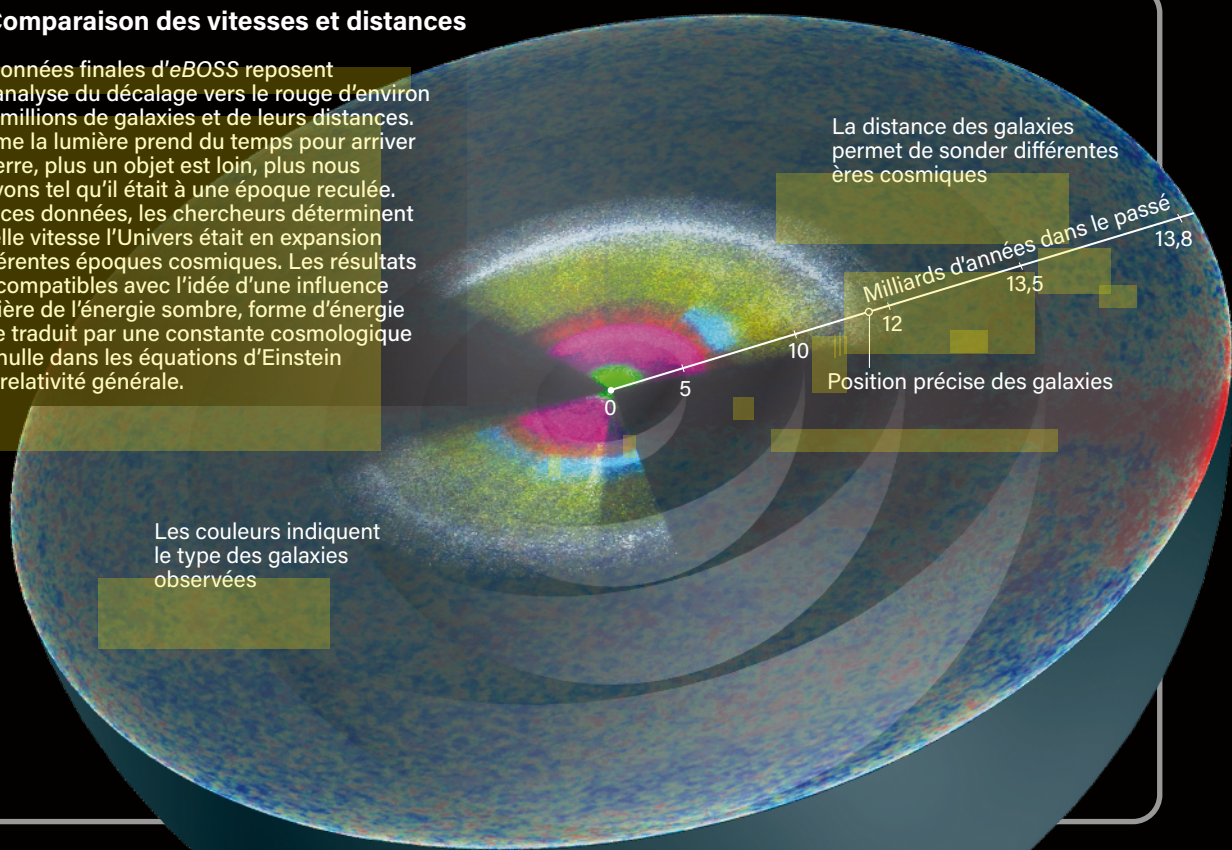
C Mesure des vitesses

L'étape suivante consiste à déterminer la vitesse à laquelle les galaxies du motif des BAO s'éloignent de nous. Comme l'Univers est en expansion, tout élément de l'Univers semble s'écarter de nous. Ce mouvement conduit les objets à paraître d'autant plus rouges qu'ils s'éloignent vite – un phénomène analogue à l'effet Doppler. Les astronomes mesurent ainsi le « décalage vers le rouge » du spectre pour en déduire la vitesse de fuite.



D Comparaison des vitesses et distances

Les données finales de eBOSS reposent sur l'analyse du décalage vers le rouge d'environ deux millions de galaxies et de leurs distances. Comme la lumière prend du temps pour arriver sur Terre, plus un objet est loin, plus nous le voyons tel qu'il était à une époque reculée. Avec ces données, les chercheurs déterminent à quelle vitesse l'Univers était en expansion à différentes époques cosmiques. Les résultats sont compatibles avec l'idée d'une influence régulière de l'énergie sombre, forme d'énergie qui se traduit par une constante cosmologique non nulle dans les équations d'Einstein de la relativité générale.



pointait vers une zone particulière du ciel pour une durée d'exposition de une heure, l'extrémité de la fibre à l'intérieur de chaque trou s'alignait parfaitement avec le centre de la galaxie ou du quasar cible.

Toutes les nuits entre décembre 2009 et mars 2019 où la Lune n'était pas trop brillante, le télescope a observé une zone du ciel et les fibres ont transmis la lumière des galaxies aux deux spectrographes. Ces instruments ont mesuré l'intensité de la lumière en fonction de la longueur d'onde et nous avons calculé le décalage vers le rouge de chaque galaxie.

Au cours des dix années pendant lesquelles BOSS et eBOSS ont recueilli des données, nous avons mesuré la position et le décalage vers le rouge de plus de deux millions de galaxies. Comme la lumière des galaxies lointaines met beaucoup de temps à atteindre le télescope, les cartes de BOSS et eBOSS permettent de voir loin et ainsi de remonter le temps, pour couvrir près de 11 milliards d'années de l'histoire de l'Univers.

SONDER L'ÉNERGIE SOMBRE

En combinant nos mesures de décalage vers le rouge avec nos estimations de distance à partir de l'étalon standard des BAO, nous avons étudié la vitesse d'expansion de l'Univers et ses variations au cours du temps. Ces informations nous permettent de mieux comprendre l'une des plus grandes énigmes de la cosmologie: l'énergie sombre.

En 1998, deux équipes d'astrophysiciens ont découvert que l'expansion de l'Univers accélérât. L'explication la plus probable était que l'Univers contenait un ingrédient dont la nature exacte reste à préciser, l'énergie sombre (ou noire). Le modèle mathématique le plus simple pour décrire l'action de l'énergie sombre est celui de la constante cosmologique, un terme qui correspond à l'énergie présente dans l'espace vide. Dans les équations de la théorie de la relativité générale d'Einstein, ce terme agit comme une force répulsive qui augmente la vitesse d'expansion de l'Univers, et s'oppose à l'effet gravitationnel de la matière, qui ralentit l'expansion. Au cours des vingt dernières années, le modèle cosmologique noté Λ CDM (avec une constante cosmologique, notée Λ , et de la matière noire dite «froide», *cold dark matter*) a résisté à de nombreux tests. Bien que nous ne le comprenions pas entièrement, il s'agit du modèle qui rend le mieux compte des observations à ce jour.

Trois observations récentes laissent entrevoir des failles dans le modèle Λ CDM. La première concerne la constante de Hubble, qui est le taux actuel d'expansion de l'espace. La deuxième suggère que l'espace serait légèrement plus courbé que ne le prévoit la théorie de l'inflation. Enfin, la troisième est liée à la

vitesse de formation des grandes structures. Le temps nous dira si ces tensions entre théorie et observations sont les premiers signes qu'un nouveau modèle cosmologique est nécessaire ou si elles reflètent simplement des imprécisions dans les mesures. Quoi qu'il en soit, les observations d'eBOSS contribuent à cette réflexion en apportant leur lot de contraintes très précises.

Elles montrent par exemple qu'une transition s'est produite lorsque l'Univers avait 60% de sa taille actuelle: l'expansion de l'espace a cessé de décélérer et a commencé à s'accélérer. Ces résultats sont en accord avec le modèle Λ CDM, qui suggère que c'est à ce moment-là que l'énergie sombre l'a emporté sur l'effet gravitationnel de la matière.

La géométrie de l'espace est un autre élément crucial du modèle cosmologique. La théorie de l'inflation prédit que l'Univers est quasiment «plat», c'est-à-dire doté d'une géométrie euclidienne dans laquelle, par exemple, la somme des angles d'un triangle est égale à 180 degrés. Mais certaines données du satellite *Planck* sur le fond diffus cosmologique sug-



Les résultats d'eBOSS sont en accord avec le modèle standard de la cosmologie



gèrent que l'espace est légèrement courbé. Grâce aux cartes de eBOSS, nous avons amélioré la précision des mesures de la géométrie spatiale d'un facteur dix par rapport aux observations précédentes. Nous n'avons trouvé aucune preuve que l'Univers est courbé, ce qui conforte l'image standard de l'inflation.

Nous avons aussi testé les modèles cosmologiques en examinant la rapidité avec laquelle les structures – amas et filaments de galaxies – se sont formées. Les décalages vers le rouge que nous avons mesurés dans notre étude indiquent la vitesse relative des galaxies par rapport à nous, les observateurs. Une grande partie de ces décalages est due à l'expansion cosmique, c'est-à-dire au fait que tous les objets de l'espace s'éloignent les uns des autres, mais une petite partie est aussi liée à la croissance des structures. Au fur et à mesure que les galaxies se regroupent en amas et s'éloignent des vides, leurs vitesses, et donc leurs décalages vers le rouge, changent.