

# L'histoire de l'expansion de l'Univers dévoilée

Étienne Burtin (etienne.burtin@cea.fr)

Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu),  
CEA et Université Paris-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Depuis que les êtres humains regardent la voûte céleste, ils essaient de trouver une explication aux motifs qu'ils y observent. Les différentes civilisations ont regroupé les étoiles visibles en constellations auxquelles elles ont donné des noms et ont attribué des vertus. Puis, elles ont compris que la Voie lactée qui barre le ciel rassemble une centaine de milliards d'étoiles en une galaxie dont notre étoile, le Soleil, et la Terre font partie.

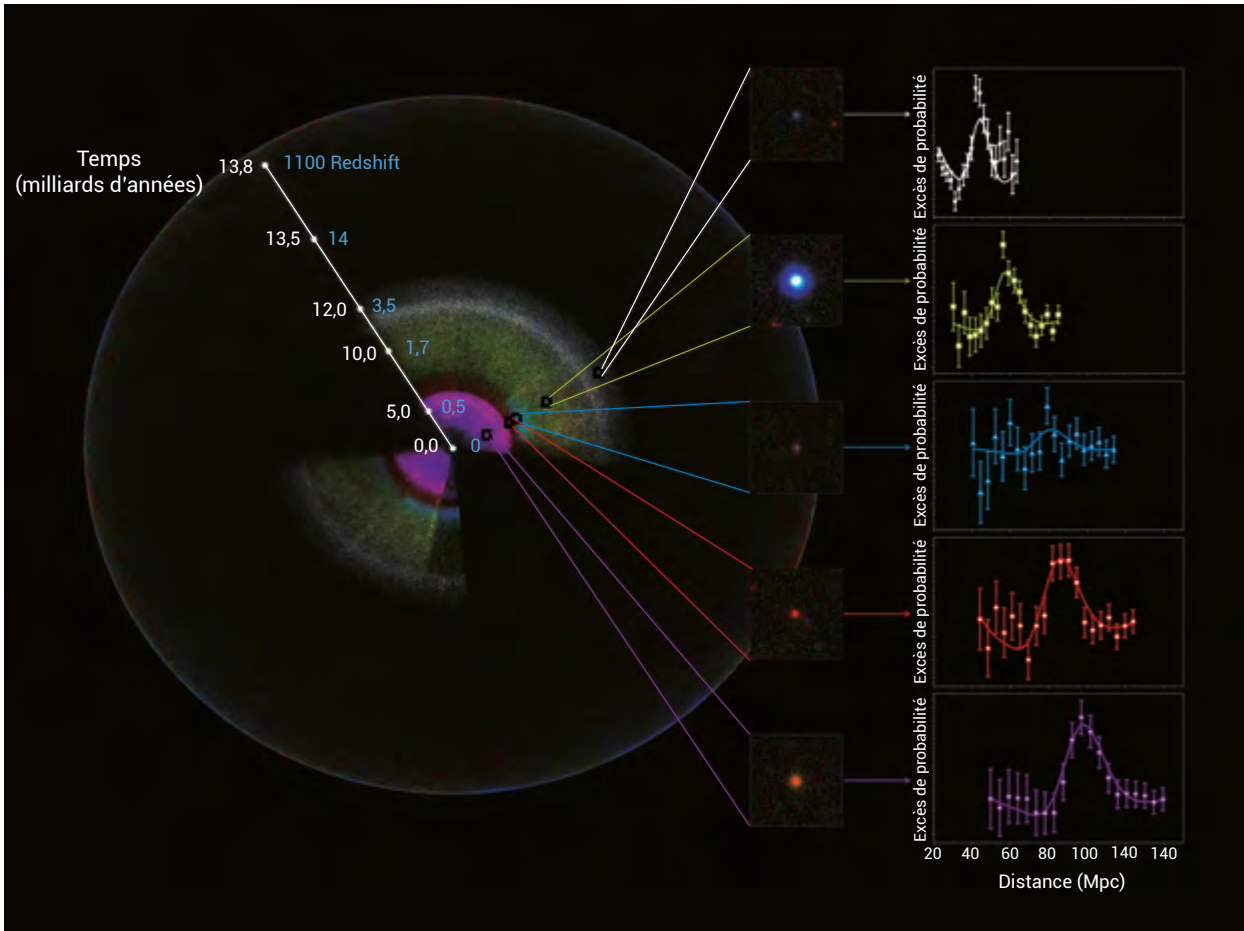
Avec l'avènement des premiers télescopes, il a été établi que d'autres galaxies existaient au-delà de la Voie lactée, que leur nombre n'avait de limite que celle des instruments d'observation et qu'elles s'éloignent de nous d'autant plus vite qu'elles sont lointaines. Ainsi sont nés les « relevés de galaxies » dont les objectifs sont de dresser une carte de l'Univers pour améliorer la compréhension que l'on a de son évolution, et de déterminer la nature de ses constituants.

“ Les observations convergent vers une description de l'énergie sombre par une constante cosmologique dans les équations de la relativité générale.”

## Une « règle standard » pour mesurer l'expansion de l'Univers

Quelques fractions de seconde après le *Big Bang*, l'Univers vient de sortir d'une hypothétique phase d'expansion exceptionnelle appelée « inflation ». Même si de nombreux indices pointent vers un épisode de cette nature dans l'évolution de l'Univers, il reste toujours à établir s'il a réellement eu lieu et quels en étaient les mécanismes physiques. Dans le modèle cosmologique communément admis, à la fin de l'inflation, l'Univers est composé de rayonnement sous la forme de photons, de matière sous la forme de quarks et de gluons, mais aussi d'une sorte de matière dite « sombre » qui interagit seulement par gravité. Trois minutes après le *Big Bang*, les noyaux légers se sont formés et l'Univers est alors un plasma de photons, d'électrons, de protons et de noyaux légers. Les fluctuations de densité primordiales grossissent par attraction gravitationnelle et donneront naissance, des milliards d'années plus tard, aux galaxies que nous observons.

Les surdensités du plasma primordial voient deux phénomènes s'opposer : d'une part, les particules ont tendance à « tomber » dans les puits de potentiel gravitationnel et, d'autre part, les



**1. Carte de l'Univers mesurée par les relevés BOSS et eBOSS<sup>(a)</sup> du programme Sloan Digital Sky Survey (SDSS).** La dimension radiale représente le temps qu'a mis la lumière pour nous parvenir. Chaque type d'objet astrophysique utilisé dans cette étude est représenté par une couleur différente (blanc et jaune pour les quasars, bleu pour les galaxies à raie d'émission, rouge et magenta pour les galaxies rouges lumineuses), et est utilisé pour accéder à une époque différente de l'évolution de l'Univers. Les encadrés à droite montrent l'excès de probabilité de trouver deux galaxies séparées d'une certaine distance (les unités sont des mégaparsecs (Mpc), 1 parsec = 3,26 années-lumière). On observe que les galaxies (et les quasars) sont séparées par une distance caractéristique, mettant ainsi en évidence le phénomène de propagation d'ondes acoustiques baryoniques dans le plasma primordial. L'augmentation de cette distance au cours du temps permet ainsi de caractériser l'évolution de l'expansion de l'Univers sur les douze derniers milliards d'années. (Crédit : Anand Raichoor, EPFL/Berkeley Lab)

photons exercent une pression de radiation qui s'y oppose. De manière analogue à ce qui se produit dans les plasmas en laboratoire, il se crée ainsi dans le plasma primordial des ondes de pression dites acoustiques, que l'on nomme « Oscillations Acoustiques Baryoniques » (en anglais "Baryonic Acoustic Oscillations", BAO; les baryons étant le nom générique des particules composées de quarks et de gluons, comme les protons et les noyaux atomiques).

Cependant, environ 380 000 ans après le *Big Bang*, il se produit un phénomène important dans l'évolution de l'Univers et qui apporte les « clés » pour établir le modèle standard de la cosmologie. Du fait de l'expansion de l'Univers, la température du plasma diminue et, à

une température d'environ 3000 K, les protons et les électrons se combinent pour former des atomes d'hydrogène neutres. La probabilité d'interaction entre les photons et le milieu chute alors rapidement et la vitesse de propagation des ondes acoustiques tend vers zéro. Ainsi, les ondes acoustiques s'arrêtent, après avoir parcouru une distance caractéristique qui dépend des lois de la physique ainsi que des paramètres cosmologiques de l'Univers primordial.

La première conséquence de ce phénomène est que les photons se propagent sans interactions et qu'ils forment alors un rayonnement fossile, le « fond diffus cosmologique », qui porte les caractéristiques de l'Univers au moment du découplage entre la

matière et le rayonnement. Ce fond diffus cosmologique est l'objet de mesures depuis plus de cinquante ans, et les derniers résultats du satellite Planck apportent des contraintes très fortes sur les modèles cosmologiques [1].

La deuxième conséquence est que la répartition de la matière n'est pas aléatoire et qu'il doit exister une distance caractéristique, une « règle standard », séparant les galaxies, qui vaut environ 150 mégaparsecs (1 parsec = 3,26 années lumière) dans l'Univers d'aujourd'hui. L'enjeu des grands relevés de galaxies a été dans un premier temps de mettre en évidence cette distance caractéristique, en appliquant des méthodes statistiques aux cartes tridimensionnelles de l'Univers (fig. 1).

>>>

>>>

Désormais, l'existence de cette règle standard est un outil incontournable car, en mesurant cette échelle des distances à différentes époques de l'évolution de l'Univers, il permet de retracer l'histoire de son expansion et de tenter de comprendre le phénomène à l'origine de l'accélération récente de cette expansion, observée par les relevés de Supernovæ de type Ia, explosions thermonucléaires d'étoiles utilisées comme des « chandelles standard » et ainsi comme indicateurs de distance [2].

## Accélération de l'expansion de l'Univers et énergie sombre

L'origine de cette accélération n'est pour l'instant pas connue. On la décrit donc empiriquement en introduisant dans la description de l'Univers une composante dite d'énergie sombre, qui représente 70% de son contenu énergétique. Même si le concept d'énergie sombre correspond à un modèle particulier, la communauté scientifique a adopté ce terme de manière générique pour se référer au phénomène qui donne lieu à l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Dans le cas d'une description de l'énergie en terme de fluide parfait de nature inconnue, on introduit un paramètre  $w$  appelé « équation d'état de l'énergie sombre », qui est le rapport entre la pression du fluide et sa densité d'énergie. Le cas où  $w = -1$  est singulier, car il correspond à un fluide dont la densité d'énergie, constante au cours du temps, serait interprétée comme une constante cosmologique fondamentale de la nature,  $\Lambda$ , ajoutée aux équations de la relativité générale d'Einstein.

Ainsi, le modèle cosmologique  $\Lambda$ -CDM (CDM pour "Cold Dark Matter"), qui représente au mieux les données existantes, considère que l'Univers est décrit par la relativité générale et qu'il est composé de rayonnement sous la forme de photons, de matière sous la forme de matière ordinaire telle que nous la connaissons, de matière sombre dite froide qui n'est sensible qu'à la gravitation, et d'énergie sombre décrite par une constante cosmologique  $\Lambda$ . Les succès de ce modèle, mais aussi le fait qu'il est basé sur des

constituants dont nous ne savons pas grand-chose, ont été soulignés par James Peebles, qui a reçu le prix Nobel de physique en 2019 pour ses travaux sur la cosmologie physique moderne : « Nous avons un modèle qui est merveilleusement bien établi mais... qui est plein de trous. »

Il revient donc à l'observation de l'Univers, et aux grands relevés de galaxies en particulier, de mesurer les paramètres du modèle et notamment l'équation d'état de l'énergie sombre et sa possible évolution au cours de l'histoire de l'Univers, afin de comprendre la nature de ce phénomène.

## Les grands relevés de galaxies

Dans les grands relevés de galaxies tels que le Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [3] et les futurs programmes Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) et Euclid (voir p. 25), les positions de millions d'objets astrophysiques (galaxies et quasars) sont mesurées au moyen de spectrographes multifibres couplés à des télescopes à grand champ de vue (quelques degrés carrés). Les spectres de milliers d'objets sont mesurés simultanément. La distance de chacun de ces objets est déterminée à partir de l'analyse du spectre, et ils peuvent ainsi être placés dans une carte tridimensionnelle de l'Univers, dont l'analyse révélera les propriétés. Examinons maintenant comment ces grands relevés sont réalisés.

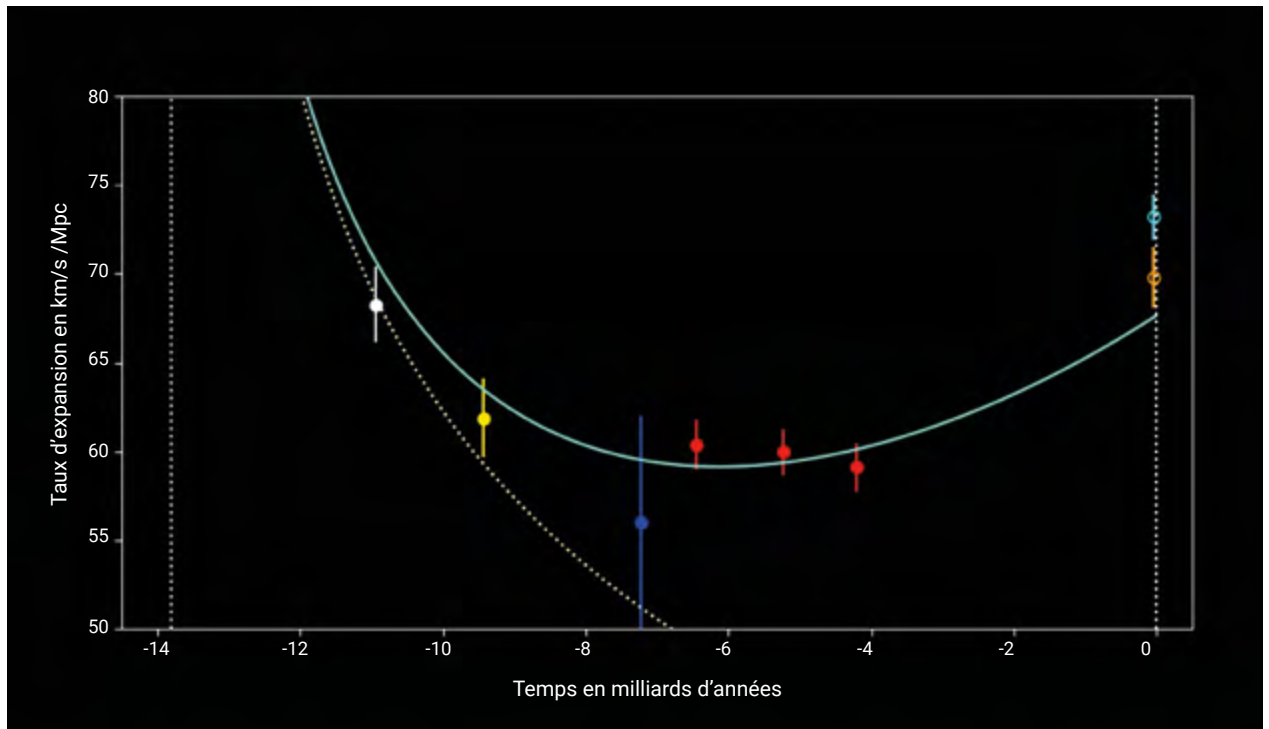
Pour mesurer l'histoire de l'expansion de l'Univers à différentes époques, il faut choisir des objets astrophysiques spécifiques. Par exemple, les galaxies lumineuses rouges sont des galaxies anciennes qui ont fini de former leurs étoiles et qui permettent d'étudier l'Univers tel qu'il était il y a entre deux et sept milliards d'années. Les galaxies bleues à raies d'émission sont des galaxies plus jeunes (jeunes par rapport à leur évolution) qui formaient des étoiles à un rythme soutenu ; elles permettent d'accéder à l'Univers plus ancien, entre six et neuf milliards d'années. Pour accéder à l'Univers encore plus ancien, il faut détecter la lumière d'objets astrophysiques très lointains et, par conséquent, utiliser les objets dont la luminosité intrinsèque est la plus élevée possible, les « quasars ». Ce sont des noyaux actifs

de galaxies au centre desquels se trouve un trou noir supermassif de plusieurs millions de fois la masse du Soleil et qui, lors du processus d'accrétion de la matière autour du trou noir, émettent une lumière phénoménale. La lumière des quasars a également la particularité d'être absorbée par les nuages de gaz intergalactiques, et le spectre des quasars présente une « forêt d'absorptions » qui conserve l'empreinte des fluctuations de densité de matière le long de chaque ligne de visée.

La sélection des sources astrophysiques est faite à partir de relevés photométriques du ciel. Lors de ces relevés, des millions d'images de la voûte céleste sont prises par des caméras équipées de filtres à large bande dans les longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge. Ces programmes peuvent prendre plusieurs années d'observation auprès de différents observatoires. Ils produisent une carte à deux dimensions, l'ascension droite et la déclinaison, et pour chaque objet de la carte le flux lumineux pour chaque filtre est déterminé. C'est à partir de ces informations que le choix des cibles doit s'opérer. L'objectif est de sélectionner les objets qui ont le plus de chance d'appartenir aux différentes catégories de traceurs de la matière que le relevé spectroscopique souhaite cibler. À partir d'une information parcellaire, il faut à la fois « deviner » l'âge des différentes sources pour choisir celles dont on mesurera le spectre, mais également s'assurer que la densité de sources à mesurer soit suffisamment grande pour atteindre les buts scientifiques du relevé.

## Spectrographie multi-objets auprès des télescopes

Le cœur des grands relevés spectroscopiques est bien évidemment la mesure du spectre de la lumière reçue de chacun des objets astrophysiques ciblés. Ce spectre nous renseigne sur la nature des objets sélectionnés et surtout, à partir du décalage vers le rouge du spectre, de la distance à laquelle les objets se trouvent. En effet, du fait de l'expansion de l'Univers les galaxies lointaines semblent s'éloigner les unes des autres et les longueurs d'onde du rayonnement électro-



**2. Mesure de l'histoire de l'expansion de l'Univers à partir des données du relevé SDSS [3].** Chacun des points à gauche provient d'un type d'objet astrophysique différent, qui permet de sonder une époque différente. La courbe pleine bleue montre la prédiction du modèle  $\Lambda$ -CDM. Elle utilise les résultats de l'analyse des données sur le fond diffus cosmologique récoltées par le satellite Planck, pour lesquels l'énergie sombre représente 70% du contenu énergétique de l'Univers. La courbe en pointillés correspond au modèle précédent, mais sans cette composante d'énergie sombre. À droite, les deux points à  $t = 0$  correspondent aux mesures du taux d'expansion dans l'Univers local faites en utilisant les Céphéides (cyan) [4] ou les géantes rouges (orange) [5] dans la calibration des échelles de distance.

magnétique sont « étirées », résultant ainsi en un décalage du spectre vers les plus grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire vers la partie rouge du spectre. En plus de cet effet, s'ajoute un effet Doppler dû aux vitesses particulières des galaxies liées aux objets qui les entourent. Le décalage vers le rouge (en anglais *redshift*) est une quantité importante, car il se déduit du spectre sans hypothèse sur le modèle cosmologique d'une part, et parce qu'il est relié directement au facteur d'échelle de l'Univers d'autre part. Dans le cadre d'un modèle cosmologique, la distance et le temps que la lumière a mis pour nous parvenir peuvent être déterminés à partir du *redshift*.

La mesure d'un spectre est une opération qui dure entre vingt minutes et plusieurs heures, il est donc impératif de prendre le spectre d'un grand nombre d'objets en même temps. Cette technique, dite de spectrographie multi-objet, est utilisée depuis une vingtaine d'années, et le nombre d'objets astrophysiques mesurés simultanément ne fait qu'augmenter,

passant de 1000 pour le relevé SDSS (téléscope Sloan de 2,5 m, Apache Point Observatory, Nouveau-Mexique), à 5000 pour le relevé du Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI, télescope Mayall de 4 m, Kitt Peak National Observatory, Arizona) qui vient de débuter son programme d'observation de cinq ans ; les relevés futurs envisagent de mesurer plus de 20 000 spectres en même temps.

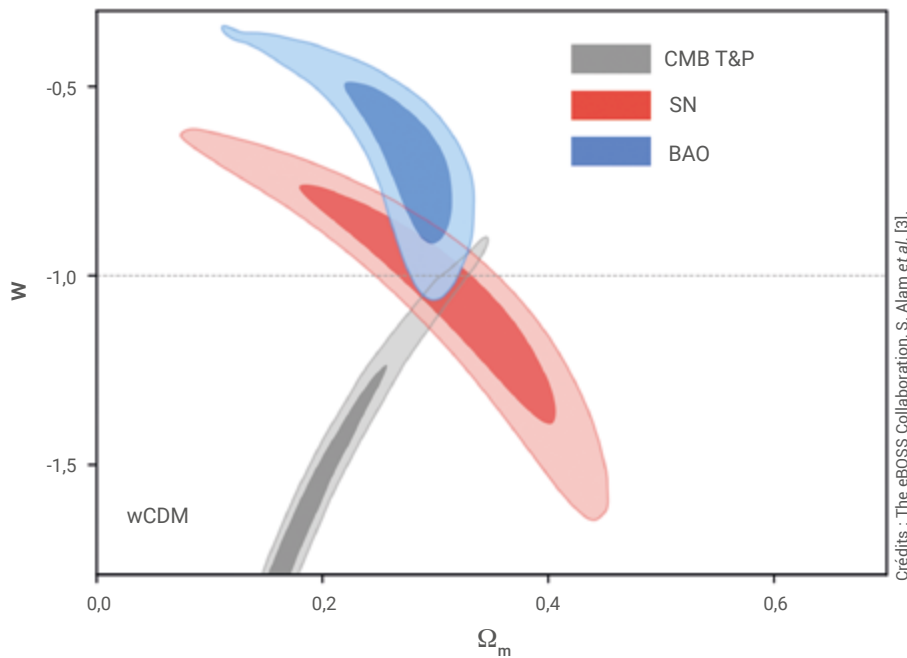
Une autre technique intéressante mais à moins haute résolution, consistant en une dispersion de la lumière de tous les objets du champ de vue par un réseau de diffraction situé devant l'imageur, sera utilisée par le télescope spatial européen Euclid.

### Énergie sombre ou constante cosmologique ?

La carte du ciel produite par le relevé SDSS [3], présentée sur la figure 1, est constituée de près de quatre millions de galaxies et de quasars. Elle montre la répartition tridimensionnelle des objets astrophysiques observés. Les zones sans observations de part et

d'autre de la carte correspondent à la Voie lactée, et les observations d'objets très peu lumineux y sont impossibles. Chaque traceur de la matière est représenté par une couleur différente et permet d'accéder à une époque différente de l'évolution de l'Univers. En mesurant la distance entre tous les objets de la carte pour chaque type de traceur, on observe un excès dans la probabilité de trouver des paires de galaxies séparées par une distance donnée. C'est une mise en évidence du phénomène d'oscillations acoustiques baryoniques (voir p. 23). Les encarts de la figure 1 montrent que la distance caractéristique obtenue pour chaque traceur de la matière, et ainsi pour chaque époque, augmente avec le temps et que la détermination précise de cette distance conduira à une mesure de l'histoire de l'expansion de l'Univers, comme représenté sur la figure 2. Les mesures de l'expansion de l'Univers y sont comparées à la prédiction du modèle  $\Lambda$ -CDM, dont les paramètres ont été ajustés sur les données du fond diffus cosmologique mesuré par le satellite Planck (courbe

&gt;&gt;&gt;



### 3. Résultats du relevé SDSS et comparaison avec les autres types de mesures cosmologiques, fond diffus cosmologique et supernovæ de type Ia.

Le graphe montre les domaines autorisés pour l'équation d'état  $w$  de l'énergie sombre et la quantité de matière  $\Omega_m$  dans l'Univers, pour les trois sondes cosmologiques utilisées : température et polarisation du fond diffus cosmologique mesuré par la mission Planck (gris, CMB T&P), supernovæ de type Ia (rouge, SN) et grand relevé de galaxies par SDSS (BAO, bleu). Les contours correspondent à 68% de confiance (foncé) et à 95% de confiance (clair). Les résultats convergent vers une valeur de  $w = -1$ , telle qu'attendue pour la description de l'énergie sombre par une constante cosmologique dans les équations de la relativité générale.

Crédits : The eBOSS Collaboration, S. Alam et al. [3].

>>>

bleue). Elles confirment que l'expansion de l'Univers s'accélère depuis environ six milliards d'années. Dans un modèle sans énergie sombre et avec la même quantité de matière que le modèle précédent (courbe en pointillés), l'expansion de l'Univers est sans cesse ralentie et est en complet désaccord avec les observations.

L'expansion de l'Univers est également mesurée dans l'Univers proche, en utilisant les propriétés de certains objets astrophysiques comme les supernovæ de type Ia et les étoiles variables de type Céphéides ; ces dernières présentent une corrélation entre la

période de variation de la luminosité et la luminosité intrinsèque, qui peut être utilisée pour déterminer la distance à laquelle ces étoiles se trouvent. Ces mesures de distances conduisent à une détermination de l'expansion de l'Univers présent, la « constante de Hubble », qui est environ 10% plus élevée que celle obtenue avec les grands relevés et le fond diffus cosmologique (fig. 2) [4]. Une autre technique de mesure de la constante de Hubble utilise les étoiles géantes rouges, dont la luminosité absolue présente une valeur maximale due aux processus physiques mis en jeu. Les résultats récents obtenus avec les géantes rouges se situent entre les deux mesures précédentes [5]. Ces différences constituent une des grandes énigmes que la communauté scientifique tente de résoudre, tant du point de vue des observations que par des développements théoriques ; mais il n'y a pas encore de consensus dans l'interprétation de ces résultats.

L'histoire de l'expansion de l'Univers, que nous venons d'évoquer, est utilisée

pour tenter de préciser la nature de l'énergie sombre grâce à la mesure de son équation d'état,  $w$  (voir p. 24). Les résultats montrent que les grands relevés de galaxies, grâce à la détection des oscillations acoustiques baryoniques, apportent une contrainte complémentaire aux autres sondes que sont le fond diffus cosmologique et les supernovæ de type Ia (fig. 3). Chacune des sondes apporte sa pierre à l'édifice, et la combinaison de toutes les informations montre que l'équation d'état de l'énergie sombre est compatible à 3% près avec la valeur  $w = -1$  attendue pour sa description par une constante cosmologique dans les équations de la relativité générale.

Au cours de la prochaine décennie, les programmes d'observation dans lesquels la France est fortement engagée, tels DESI, Euclid (voir p. 25) et LSST<sup>(b)</sup>, permettront d'affiner notre compréhension de l'Univers, de résoudre certaines des énigmes que nous venons d'évoquer, ou peut-être de révéler d'autres surprises. ■



- 1• Planck collaboration, *A&A* **641** (2020) A1.  
N. Aghanim et H. Dole, « Les résultats cosmologiques de la mission Planck », *Reflète de la physique* **64** (2020) 4-10.
- 2• S. Perlmutter et al., *Astrophys. J.* **517** (1999) 565-586. A. Riess et al., *Astron. J.* **116** (1998) 1009-1038.
- 3• S. Alam et al., *Phys. Rev. D* **103** (2021) 083533.
- 4• A. Riess et al., *Astrophys. J. Lett.* **908** (2021) L6.
- 5• W.L. Friedmann, *Astrophys. J.* **919** (2021) 16.

(a) BOSS et eBOSS (extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey) sont des programmes des phases III et IV du SDSS, démarrés respectivement en 2008 et 2014. Ils ont permis d'observer les galaxies et quasars jusqu'à 12 milliards d'années-lumière, et ainsi pu reconstituer la distribution tridimensionnelle de la matière à grande échelle dans une large portion de l'Univers.

(b) Le Large Synoptic Survey Telescope (LSST, dénommé maintenant Vera C. Rubin Observatory) est un télescope américain de 8,4 m en construction au nord du Chili, qui aura un champ d'observation très large (3,5° de côté) et une résolution spatiale de 0,2 seconde d'arc.