

1

Le relevé eBOSS de SDSS

1.1 Le Sloan Digital Sky Survey

Le *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) est né dans les années 1990 de l'ambition de réaliser un relevé spectroscopique à la fois profond et étendu dans le but d'étudier, entre autres, la structuration de l'univers à grande échelle. Cette idée a été rendue possible par l'apparition des capteurs CCD, des spectrographes à fibres optiques ainsi que par les capacités à analyser des lots de données de plus en plus grands. En 1991, la fondation Sloan décide donc d'investir dans ce projet ambitieux, permettant sa construction et lui donnant ainsi son nom. Le télescope fut construit à l'Apache Point Observatory (APO) au Nouveau Mexique, et la première lumière prise en 1998. Ce télescope capable de mesurer le spectre de centaines d'objets à la fois, générant ainsi de grandes quantités de données, a marqué une nouvelle ère, à la fois en terme de relevé cosmologique et de manière d'analyser de telles quantités de données.

1.1.1 SDSS I-II-III

Les deux premières générations du SDSS, SDDS-I de 2000 à 2005 puis SDSS-II de 2005 à 2008, ont produit plusieurs résultats importants.

Premièrement, un relevé photométrique multi-bandes de plus de 11600 deg^2 , couvert par les filtres u , g , r , i and z ¹. Parmi ces 11600 deg^2 , 7500 forment le relevé contigu appelé *the Legacy Survey*. Ce relevé photométrique a permis de sélectionner plus de 930 000 galaxies et 120 000 quasars candidats, afin d'en mesurer les spectres. Il a été rendu public lors de la septième publication de données de SDSS² et est détaillé dans ABAZAJIAN (2008). Son étude a conduit à la première détection à $3,6\sigma$ des BAO (D. J. EISENSTEIN et al. 2005), mesurant ainsi l'échelle BAO moyennée sur le volume, D_V , à un redshift effectif de 0,35 et avec une précision de 5%.

Un second relevé photométrique et spectroscopique de 3500 deg^2 , contenant 460 000 étoiles de notre galaxie, a été produit dans le but d'étudier la structure et la composition de la Voie Lactée. Ce relevé est nommé *SEGUE* (Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration (THE SDSS-II SEGUE COLLABORATION et al. 2009)).

Enfin, le *SDSS Supernova Survey*, un relevé d'environ 250 deg^2 observé à plusieurs reprises et visant à contraindre l'accélération de l'expansion de l'univers grâce à l'étude des supernovae de type 1a, a produit un échantillon d'environ 500 SNe 1a, toutes confirmées spectroscopiquement entre $z = 0,1$ et $z = 0,4$.

Au vu du succès de SDSS-I et II, une troisième génération de SDSS débuta fin 2008. Elle se compose de 4 relevés différents (Daniel J. EISENSTEIN et al. 2011), avec le même télescope que les deux générations précédentes.

Parmi ces relevés figure *SEGUE-2*, suite du programme SEGUE. Il a produit un relevé d'étoiles de la Voie Lactée dans le but de mieux comprendre la formation et l'évolution de notre galaxie. Le relevé *MARVEL* (Multi Object APO Radial Velocity Exoplanet Large-area Survey) a opéré de 2008 à 2012. Ce programme étudie les exo-planètes via deux spectrographes interférométrique de 60 fibres chacun, en mesurant la vitesse radiale d'environ 11 000 étoiles brillantes. *APOGEE-1*, pour APO Galactic Evolution Experiment 1, vise à mieux comprendre la formation et l'évolution de notre galaxie. Il a produit un relevé spectrométrique dans l'infra rouge de très haute résolution et très haut rapport signal sur bruit d'environ 150 000 étoiles. Ce relevé ainsi que celui de SEGUE-2 jouent un rôle important dans la compréhension de la formation de notre galaxie et dans l'étude de la distribution de matière noire à petite échelle.

Enfin, le 4e relevé de SDSS-III est nommé *BOSS*, pour Baryon Oscillation Spectroscopic Survey. Il

1. Ces filtres couvrent les longueurs d'onde allant de 400 à 1000 nm. Voir 1.4

2. SDSS DR7 : <http://www.sdss.org/dr7>

poursuit la mesure de l'échelle BAO faite avec le Legacy Survey et inclut un nouveau traceur : la forêt Lyman alpha dans le spectre de quasars lointains. Afin d'observer un plus grand nombre d'objets et d'avoir une mesure plus précise, le spectrographe initialement présent sur SDSS a été amélioré : la gamme de longueur d'onde observée est plus grande, le diamètre des fibres a été réduit, ce qui conduit à un nombre total de 1000 fibres. Les observations commencèrent en 2009 et se terminèrent, en avance, en 2014. Le temps d'observation restant permit de mener plusieurs programmes d'observation en dark time¹, tel que *SEQUELS* (Sloan Extended QUasars, ELG and LRG Survey) qui a réalisé un relevé de 300deg² avec le spectrographe de BOSS, afin de tester la sélection des cibles pour SDSS-IV.

BOSS mena à de nombreux résultats importants. Il produisit un relevé de plus de 1,5 million de galaxies, qui donna une mesure de D_M avec une précision de 2,0 % et une mesure de D_H avec une précision de 3,2 % à un redshift $z = 0,38$, une mesure de D_M avec une précision de 1,9 % et une mesure de D_H avec une précision de 3,0 % à $z = 0,51$, ainsi qu'une mesure de D_M avec une précision de 1,9 % et une mesure de D_H avec une précision de 3,0 % à $z = 0,61$ (ALAM, ATA et al. 2016). L'étude du Ly α conduisit à une mesure de D_M avec une précision de 4 % et une mesure de D_H avec une précision de 4,8 % à un redshift effectif $z = 2,4$ (DU MAS DES BOURBOUX et al. 2019). L'ensemble des données de SDSS-III a été rendu public lors de la douzième publication de données de SDSS² (ALAM, ALBARETI et al. 2015).

1.1.2 SDSS-IV

La quatrième génération de SDSS débuta courant 2014. Elle comporte 3 programmes spectroscopiques majeurs (Michael R. BLANTON et al. 2017), dont nous donnons une brève description ici :

- *APOGEE-2*, suite d'*APOGEE-1*, effectuée de la spectroscopie stellaire grâce à un spectrographe de haute résolution dans le proche infrarouge. En plus du relevé dans le *NGC* (North Galactic Cap) mené à l'APO, le programme comporte un relevé dans le *SGC* (South Galactic Cap). Le relevé sud est produit grâce au télescope du Pont, de 2,5 mètres, situé à Las Campanas au Chili. L'objectif final est d'obtenir le spectre de plus de 400 000 étoiles dans le proche infrarouge, afin d'accéder aux régions clés de la Voie Lactée non-observable en optique, et ainsi mieux comprendre la formation et l'évolution des galaxies.
- *MaNGA* est un nouveau programme de SDSS. C'est le premier à utiliser un spectrographe de champ intégré³. Contrairement aux programmes précédents qui obtenaient le spectre du centre de la galaxie cible, MaNGA va mesurer le spectre en plusieurs points répartis sur toute la surface de la galaxie observée. Ce procédé va permettre d'étudier la structure interne d'environ 10 000 galaxies proches ($z < 0,03$), en mesurant notamment les cartes des vitesses dans le plan transverse à la ligne de visée et des dispersions de vitesse des étoiles, ainsi que leur métallicité.
- *eBOSS* pour Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey, est le troisième programme majeur de SDSS-IV. C'est le programme qui fournit les données de ce manuscrit, il est décrit en détail dans la section suivante ainsi que dans DAWSON et al. (2015). En plus du programme principal, eBOSS inclut deux sous-programmes : *SPIDERS* et *TDSS*.

SPIDERS étudie la nature des émissions en X. Il utilise 5 % des fibres d'eBOSS afin de viser des sources émettant en X. Ces sources sont issues principalement du relevé *ROSAT All Sky Survey* ainsi que des sources observées par le satellite *eROSITA*.

TDSS vise à comprendre la nature des sources variables. Il utilise lui aussi 5 % des fibres d'eBOSS, afin de mesurer le spectre de sources variables présentes dans le relevé *Pan-STARRS1* (PS1) ou dans l'imagerie de SDSS. Parmi les sources identifiées par PS1, environ 60 % sont des quasars,

1. Le dark time correspond au moment où le ciel est le plus sombre et le plus propice à observer des objets peu lumineux.

2. SDSS DR12 : <http://www.sdss.org/dr12>

3. *integral field spectrograph* en anglais

et 40 % des étoiles variables. A la fin, TDSS aura produit un relevé d'environ 200 000 spectres, jusqu'à une magnitude¹ limite de 21.

1.2 eBOSS

Suite au succès de BOSS, la collaboration SDSS poursuit la mesure de l'échelle BAO avec le programme eBOSS. Celui-ci inclut deux nouveaux traceurs, afin de sonder une époque clé qui est l'époque de transition de la domination de la matière à celle de l'énergie noire. L'objectif principal est d'étendre la mesure de distance effectuée avec les galaxies de BOSS à un redshift $0,6 < z < 1$, ainsi que de permettre la première analyse RSD² à l'aide de quasars en tant que traceurs et la première mesure de l'échelle BAO à un redshift $1 < z < 2$. La précision visée sur la mesure de distance avec l'échantillon de galaxies est de 1 %, et de 2 % pour les nouveaux traceurs.

1.2.1 Les traceurs de eBOSS

Afin d'étendre la gamme de redshift sondée par BOSS, eBOSS inclut donc deux nouveaux traceurs : les ELG et les quasars en tant que traceurs de la matière. Auxquels s'ajoutent les traceurs déjà présents dans BOSS : les LRG et les forêts $\text{Ly}\alpha$ des quasars. Ces traceurs sont présentés ici :

- LRG : l'échantillon de *Luminous Red Galaxies* déjà observé lors du programme BOSS est étendu. Un total de 298 762 nouvelles cibles avec une densité de $60/\text{deg}^2$ sont ajoutées. Ces cibles couvrent la gamme $0,6 < z < 1$, portant le redshift moyen de cet échantillon à $z = 0,72$.
- ELG (*Emission Line Galaxies*) : ce sont des galaxies bleues formant beaucoup d'étoiles, facilement identifiables par leurs raies d'émission. Leur relevé couvre les redshifts $0,6 < z < 1,1$. Le nombre de cibles de ce nouveau traceur est de 269 889, correspondant à une densité d'environ 130 cibles par deg^2 .
- QSO : nouveaux traceurs, ils sont utilisés afin de construire un relevé spectroscopique au même titre que les LRG, mais à plus grand redshift. Ils permettent ainsi de mener une analyse RSD et de mesurer l'échelle BAO dans une époque jusque là insondée ($0,9 < z < 2,2$). Cet échantillon contient 434 820 cibles, avec une densité de $90/\text{deg}^2$. Du fait que ce relevé est dominé par le bruit de grenaille (*shot noise*), de futurs relevés pourront venir le compléter et ainsi augmenter la précision statistique de la mesure.
- $\text{Ly}\alpha$ QSO : ces quasars sont les objets dont les spectres fournissent la forêt $\text{Ly}\alpha$. Contrairement aux traceurs directs, la quantité d'information contenue dans la forêt $\text{Ly}\alpha$ dépend du rapport signal sur bruit. Les quasars $\text{Ly}\alpha$ de BOSS possédant un faible rapport signal sur bruit sont donc réobservés dans eBOSS. Le gain attendu sur le rapport signal sur bruit grâce à cette réobservation est d'environ 40 %. La densité moyenne de ces objets est de l'ordre de $8/\text{deg}^2$. En plus de ces objets, eBOSS a observé de nouveaux quasars $\text{Ly}\alpha$, avec une densité moyenne de $11/\text{deg}^2$.

La répartition en redshift de ces quatre traceurs est représentée sur la figure 1.1. Pour la suite, nous nous intéresserons uniquement aux quasars $\text{Ly}\alpha$, qui constituent l'ensemble des données traitées dans cette étude. Ils seront simplement désignés par quasars ou QSO.

1. La magnitude est une mesure de la luminosité des objets célestes. Elle est construite sur une échelle logarithmique inversée : plus la magnitude est importante, et moins l'objet est lumineux.

2. Les analyses RSD désignent les analyses qui visent à mesurer le taux de croissance f afin de contraindre la gravité.

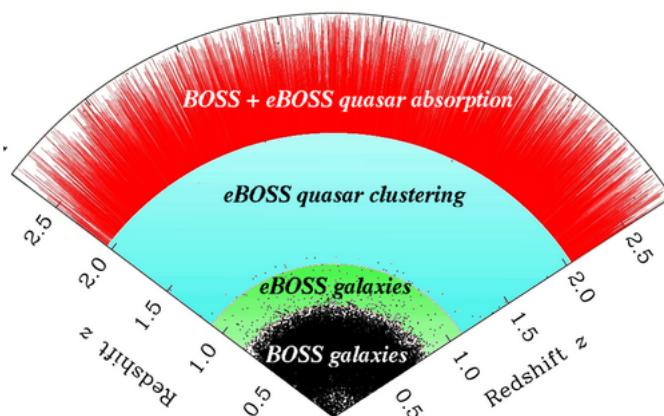


FIGURE 1.1 – Représentation des quatre différents traceurs d’eBOSS et leur répartition en redshift.

1.2.2 Sélection des cibles

La sélection des cibles s’effectue sur la base du relevé photométrique dans les bandes *ugriz* réalisé par SDSS-I et II et rendu public lors de la neuvième publication de donnée SDSS (DR9¹). Lors de la sélection des cibles de BOSS, la photométrie provenant de *UKIDSS* (UKIRT Infrared Deep Sky Survey, LAWRENCE et al. (2006)) et de *GALEX* (Galaxy Evolution Explorer, MARTIN et al. (2004)) a été utilisée. De la même manière, la photométrie de SDSS est complétée par plusieurs relevés afin de définir les nouveaux quasars à observer dans eBOSS :

- Les bandes W1 et W2 (3,4 μ m et 4,6 μ m) du relevé photométrique du satellite *WISE* (Wide-field Infrared Survey Explorer, WRIGHT et al. (2010))
- La photométrie multi-époque de *PTF* (Palomar Transient Factory, LAW et al. (2009))
- Les données de *FIRST* (Faint Images of the Radio Sky at Twenty-Centimeters, BECKER, WHITE et HELFAND (1995))

Pour BOSS, le relevé de QSO a été construit en utilisant d’une part l’algorithme *XDQSO* (BOVY et al. 2010) pour l’échantillon *QSO_CORE*, ce qui a permis d’avoir un échantillon homogène, et d’autre part en incluant des QSO sélectionnés via différentes techniques afin d’augmenter au maximum la densité de quasars Ly α . Contrairement aux relevés d’objets utilisés en tant que traceurs directs pour la mesure de l’échelle BAO ou pour les analyses RSD, les quasars Ly α ne nécessitent pas un relevé homogène (voir l’introduction de la section ??). C’est pour cette raison que l’échantillon de QSO Ly α peut être complété sans se soucier de dégrader l’homogénéité. Cependant, la présence d’un échantillon homogène de quasars à grand redshift permet d’autres sciences que la mesure de l’échelle BAO. Par exemple, le papier LAURENT et al. (2016) étudie l’homogénéité cosmique en utilisant l’échantillon de quasars DR12 de BOSS.

Pour eBOSS, la présence d’un échantillon de quasars à $0,9 < z < 2,2$ destiné à la fois à la mesure de l’échelle BAO et aux analyses RSD permet de relâcher le critère d’homogénéité imposé pour les quasars de BOSS, et ainsi d’augmenter le nombre de cibles de quasars Ly α . L’algorithme *XDQSO* est donc utilisé avec des paramètres moins strictes que pour BOSS, afin d’augmenter la densité de quasars Ly α . Ainsi, 6,6 nouveaux quasars par deg² sont ajoutés à l’échantillon de cette manière. Ensuite, les QSO de

1. <http://www.sdss.org/dr9>

BOSS ayant un rapport signal sur bruit $0,75 < S/R < 3$ et ne comprenant pas de BAL sont réobservés. Enfin, de nouveaux candidats quasars sont sélectionnés grâce aux données de PTF, avec une densité de $3,2 \text{ deg}^{-2}$. Les catalogues FIRST fournissent eux aussi de nouveaux quasars potentiels, avec une densité de 1 deg^{-2} . Ainsi, un total de total d'environ 8 QSO par deg^2 sera réobservé, accompagné d'environ 11 nouveaux quasars par deg^2 .

1.2.3 Pavage du ciel

Une fois que les cibles ont été sélectionnées grâce aux observations photométriques, la phase d'observation spectroscopique peut commencer. Les données sont acquises via 1000 fibres optiques insérées dans une plaque, que l'on dispose au centre du plan focal du télescope. Le processus de "pavage" (M. R. BLANTON et al. 2001) consiste donc à assigner chaque cible ou presque à une fibre optique dans une plaque d'observation, en minimisant le nombre de plaques nécessaires et en maximisant le nombre de cibles qui reçoivent une fibre. Cette opération est réalisée par l'algorithme de sélection des cibles ainsi que du nombre de fibres disponibles.

Afin d'observer les 9000 deg^2 constituant le relevé d'eBOSS, celui-ci est divisé en environ 1800 plaques. Chaque plaque couvre une surface de 7 deg^2 sur le ciel, et en moyenne, un centre de plaque est assigné tous les 5 deg^2 afin d'éviter les trous dans le relevé. Étant donné le nombre d'heures allouées à eBOSS et le nombre de plaques à observer, chaque plaque est observée durant environ 1,5 heure.

Parmi les 1000 fibres disposées sur chaque plaque, 100 sont destinées aux programmes TDSS et SPI-DERS et 100 fibres supplémentaires sont réservées à la calibration. Il reste donc 800 fibres par plaque destinées aux traceurs de eBOSS. Ces fibres sont assignées aux LRG et QSO. Le relevé des ELG se fait sur des plaques indépendantes. Afin de mener ce relevé des ELG, la taille du relevé des LRG et QSO est réduit de 9000 à 7500 deg^2 . Ainsi 300 plaques sont rendues disponibles pour l'observation des ELG ($\sim 1500 \text{ deg}^2$).

Une fois le pavage du ciel effectué, la position des fibres sur le ciel est convertie en coordonnées dans le plan focal du télescope. A cause de la chromaticité de l'instrument, la position dans le plan focal de chaque objet observé dépend de la longueur d'onde. Ainsi chaque fibre dite de science est positionnée de manière à maximiser la lumière en sortie à 5400 Å pour les galaxies et les quasars destinés aux analyses RSD, et à 4000 Å pour les quasars $\text{Ly}\alpha$.

Parmi les 100 fibres allouées à la calibration, 80 sont destinées à la soustraction du fond de ciel. Pour chaque plaque, il est requis que chaque spectrographe reçoivent au moins 30 fibres de ciel. Les 20 fibres restantes sont destinées à la calibration du flux. Celle-ci se fait en pointant des étoiles standards de type F. De la même manière, parmi ces 20 fibres, au minimum 6 fibres sont requises sur chaque spectrographe.

1.2.4 Phase d'observation

Une fois le pavage du ciel réalisé et la position de chaque fibre dans le plan focale déterminée, les plaques sont préparées puis percées. Ces plaques sont en aluminium de $3,2 \text{ mm}$ d'épaisseur et de 80 cm de diamètre. La zone contenant les fibres mesure $65,2 \text{ cm}$ de diamètre. La préparation des plaques est faite à l'université de Washington. Elle est décrite dans Michael R. BLANTON et al. (2017).

Une fois les plaques prêtes, les observations peuvent commencer. La prise de données a débuté en juillet 2014. Pendant les deux premières années, seules les plaques des LRG et des QSO ont été observées. Les deux années suivantes, les plaques des ELG ont été observées en alternance avec les plaques assignées aux LRG et QSO. Les 305 plaques formant le relevé d'ELG ont fini d'être observées en février 2018. En mars 2019, les observations sont arrêtées afin de laisser les autres programmes observer. Contrairement à BOSS, les observations pour eBOSS ont connu un mauvais temps, retardant l'avancement du relevé. Ce retard a été essentiellement répercuté sur l'observation des plaques contenant les LRG et

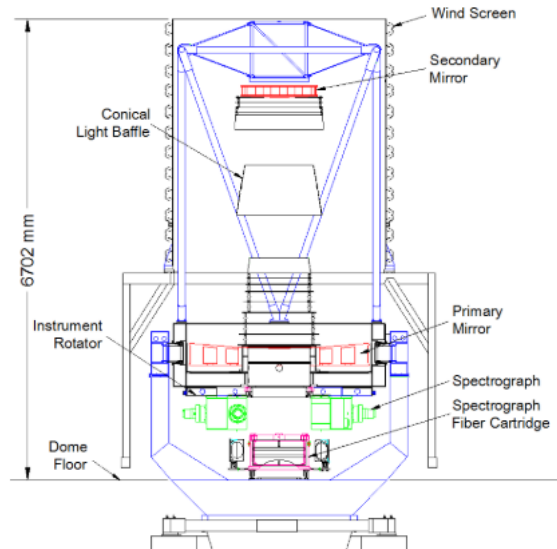


FIGURE 1.2 – Schéma du télescope SDSS. Le miroir principal est représenté en bas en rouge. Le miroir secondaire est visible au sommet du télescope en rouge. Les spectrographes sont représentés en vert sous le télescope. Une cartouche, pas encore disposée au plan focal du télescope, est représentée sous les spectrographes. Crédits : SMEE et al. (2012).

QSO : environ 1000 plaques sur les 1500 initialement prévues ont pu être observées, réduisant le relevé de 7500 à environ 4700 deg².

1.2.5 Caractéristiques techniques de l'instrument

L'instrument (J. E. GUNN, SIEGMUND et AL 2006) utilisé pour eBOSS est celui de SDSS, situé à l'APO. Nous décrivons ici ses composantes importantes.

Le télescope

Le télescope est installé à l'APO. Il est commun à tous les programmes SDSS. Afin de mener à bien ces différents programmes, le télescope doit être capable de réaliser un relevé photométrique d'un quart du ciel, puis mesurer le spectre de millions de cibles identifiées via cette photométrie. Ainsi le télescope doit avoir un grand champ de vue, avec très peu de distorsions dans le plan focal. Ces prérequis ont conduit à la construction du télescope SDSS de 2,5m de diamètre de type Ritchey-Chrétien. Il est représenté schématiquement sur la figure 1.2.

Le télescope se compose d'un miroir primaire de 2,5m de diamètre et d'ouverture $f/2,25$, et d'un miroir secondaire de 1,08m de diamètre situé à 3,6m du miroir primaire. Avec un plan focal situé à 0,76m derrière le miroir primaire, l'ouverture finale du télescope est $f/5$. Le champ de vue qui en résulte est de 3deg de diamètre sur le ciel (7deg²), correspondant à un diamètre de 0,65m dans le plan focal.

Le télescope inclut aussi 2 correcteurs optiques. Le premier est un correcteur d'astigmatisme de type Gascoigne. Le second est un jeu de correcteurs hautement asphériques et interchangeable situés près du plan focal. L'un, épais, est utilisé pour la photométrie ; l'autre, beaucoup plus fin, est utilisé lors des phases de spectrométrie.

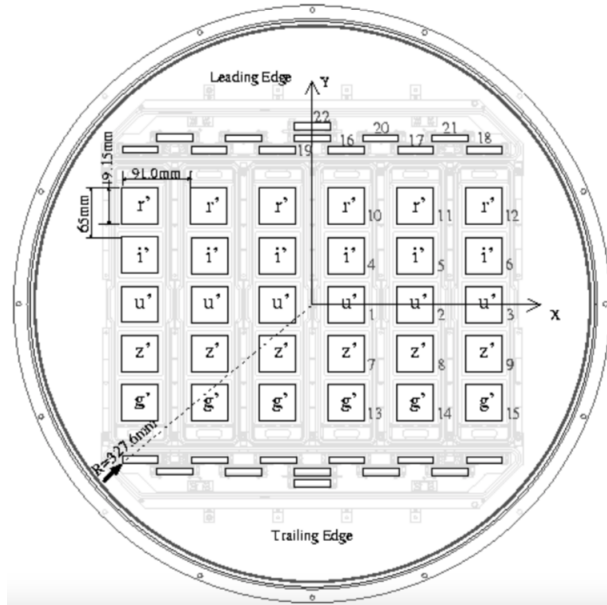


FIGURE 1.3 – Schéma de la disposition des CCD dans le plan focal du télescope SDSS. Les capteurs 1 à 15 sont les CCD dédiés à la photométrie. Le module d’astrométrie se compose des CCD 16 à 21. Enfin le CCD 22 sert au contrôle de la mise au point.

La caméra

L’instrument nécessite une caméra (J. GUNN et al. 1998) capable de couvrir l’entièreté du plan focal du télescope. Le très grand champ de vue du télescope a imposé l’utilisation des CCD les plus grands disponibles à l’époque : les Tektronix Tk2048E. Ces CCD sont des grilles de 2048×2048 pixels de $24\mu\text{m}$. Etant donné la longueur focale du télescope, ces $24\mu\text{m}$ représentent $0,4''$ sur le ciel. Ainsi, la PSF¹ d’une largeur à mi-hauteur d’environ $1''$ est bien échantillonnée.

La caméra est constituée de 2 modules, le premier comportant 5 (filtres²) \times 6 (colonnes) CCD est destiné à la photométrie. En plus de ces 30 CCD, 22 CCD 400×2048 et de même taille de pixel sont ajoutés au dessus et en dessous du module dédié à la photométrie. Ces CCD permettent de relier les étoiles standards brillantes aux objets observés lors de la phase photométrique. Ils constituent le module d’astrométrie. Deux CCD supplémentaires sont ajoutés comme dispositif de contrôle pour la mise au point. La figure 1.3 résume leur disposition.

Lors de la phase d’observation photométrique, la caméra est utilisée en mode *time delay integration* (TDI). Ce mode d’observation consiste à laisser le ciel défiler devant la caméra. La lumière de chaque objet est ainsi accumulée durant tout le transit de l’objet. Cette technique permet de gagner en efficacité d’observation, en réduisant le temps de lecture (qu’il y aurait en mode exposition classique) et le temps de pointage du télescope.

Le spectrographe

Une fois la phase de photométrie effectuée et les cibles sélectionnées, la phase de spectroscopie commence. Les plaques d’observations sont d’abord percées aux positions des cibles dans le plan focal. Ces plaques sont ensuite disposées au plan focal du télescope (à la place de la camera). Les fibres, insérées dans ces plaques et placées à la position de chaque cible, sont ensuite envoyées vers les spectrographes (SMEE et al. 2012) afin de mesurer le spectre de ces cibles.

1. La PSF (*Point Spread Function*) désigne la réponse d’un système optique à une source ponctuelle.

2. Il s’agit des 5 filtres u, g, r, i et z. Voir figure 1.4

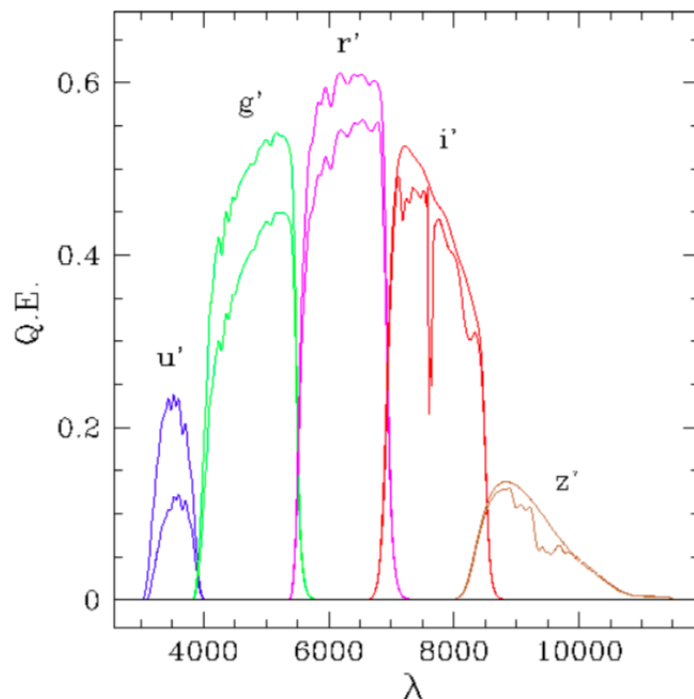


FIGURE 1.4 – Efficacité de chacun des 5 filtres utilisés lors de la phase photométrique de SDSS. Les courbes incluent l'efficacité quantique des CCD, ainsi que l'efficacité du système optique. Les courbes en dessous incluent en plus la transmission de l'atmosphère.

Les spectrographes utilisés dans eBOSS sont les mêmes que ceux utilisés dans BOSS. Ces spectrographes, initialement présents dans SDSS, ont été améliorés afin d'atteindre les objectifs de BOSS. Comparé à SDSS, BOSS a augmenté le nombre de spectres mesurés de 35 %, ses objets étant à plus grand redshift, donc de plus faible luminosité. Ainsi le nombre de fibres des spectrographes de BOSS passe de 640 à 1000. Les objets observés étant plus lointains et donc ayant une taille sur le ciel plus petite, le diamètre de ces fibres est réduit d'un tiers, passant à $120\mu\text{m}$, afin d'augmenter le rapport signal sur bruit des spectres. BOSS inclut aussi un nouveau traceur : la forêt $\text{Ly}\alpha$. Afin de mesurer l'absorption dans la forêt $\text{Ly}\alpha$ des quasars à un redshift $z = 2,2$, la longueur d'onde d'observation minimale a été diminuée de 3900 à 3560 Å. De la même manière, la longueur d'onde d'observation maximale a été augmentée de 9100 à 10400 Å pour améliorer la détermination des redshifts de l'échantillon de galaxies.

Pour limiter les risques de dommage aux fibres lors du montage et du démontage des différentes plaques, chaque plaque est montée sur un support rigide. Ce support rigide est appelé cartouche, il comporte la plaque d'observation en aluminium, les 1000 fibres insérées dans cette plaque, et deux *slitheads* qui sont ensuite insérés dans chacun des spectrographes. La figure 1.5 donne un aperçu de ces cartouches.

L'instrument dispose de deux spectrographes. Ils sont schématisés sur la figure 1.6. Les 1000 fibres d'une plaque sont séparées en deux. Chaque lot de 500 fibres constitue une *demi-plaque*. Chaque spectrographe reçoit donc les fibres optiques d'une demi-plaque, via les *slitheads*. La lumière issue de ces fibres est collimatée grâce à un miroir sphérique. Le faisceau parallèle ainsi créé passe à travers un miroir semi-réfléchissant, permettant de séparer les longueurs d'onde plus petites que 6050 Å des

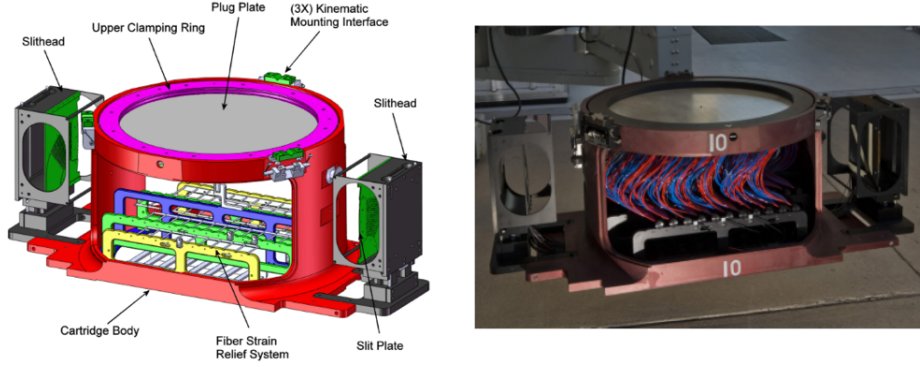


FIGURE 1.5 – Le schéma de gauche présente les différents éléments d’une cartouche. On peut y reconnaître la plaque en aluminium sur le dessus en gris. Sur la droite, une photo d’une cartouche sur laquelle les fibres optiques ont été insérées dans la plaque d’aluminium. L’extrémité des fibres est reliée aux slitheads, visibles à droite et à gauche, qui seront insérés dans les 2 spectrographes. Crédits : SMEE et al. (2012).

longueurs d’onde plus grandes. Enfin, chaque demi-faisceau passe au travers d’un grisme¹, et arrive sur la caméra bleue pour les longueurs d’onde plus petites que 6050 \AA , ou sur la caméra rouge pour les longueurs d’onde plus grandes. Après avoir traversé toutes les pièces d’optique, la lumière arrive sur des CCD de 4000×4000 pixels, avec une taille de pixel de $15 \mu\text{m}$. Ainsi une des dimensions du CCD correspond à la longueur d’onde observée, selon l’axe de dispersion, l’autre dimension parcourt les différentes fibres. Selon cette dimension, chaque spectre possède un profil de 3 pixels de large et est séparé de son voisin par 6 pixels afin d’éviter la contamination d’un spectre à un autre.

Les performances

Les améliorations apportées à l’instrument pour BOSS ont permis d’augmenter le nombre maximal de spectres observables par nuit, ainsi que la magnitude limite atteignable. Cette dernière est directement liée à l’efficacité optique du système. L’efficacité optique est définie comme le ratio du flux mesuré d’une source ponctuelle sur le flux de cette même source situé en dehors de l’atmosphère. La figure 1.7 présente les estimations des différentes composantes participant à l’efficacité optique globale de l’instrument.

Le pouvoir de résolution traduit la capacité de l’instrument à identifier et mesurer des raies spectrales. Pour mesurer ce pouvoir de résolution, le spectre de lampes à arc dédiées à la calibration est mesuré, puis chaque raie d’émission est ajustée par une gaussienne de largeur σ_λ . Ce σ_λ est ensuite ajusté par un polynôme en fonction de λ , ce qui donne une estimation de la largeur d’une raie spectrale en fonction de la longueur d’onde observée. Enfin, le pouvoir de résolution est défini comme $R = \frac{\lambda}{FWHM}$, où la largeur à mi-hauteur FWHM (pour *Full Width at Half Maximum*) vaut $2,36\sigma_\lambda$ et donne la résolution de l’instrument. Le pouvoir de résolution a été mesuré sur 100 plaques SDSS et 100 plaques BOSS. La comparaison est présentée sur la figure 1.8. Le pouvoir de résolution est légèrement moins grand pour BOSS que pour SDSS, mais reste au dessus des prérequis.

1. Association d’un prisme et d’un réseau de diffraction. Le grisme permet de décomposer la lumière tout en gardant le faisceau parallèle.

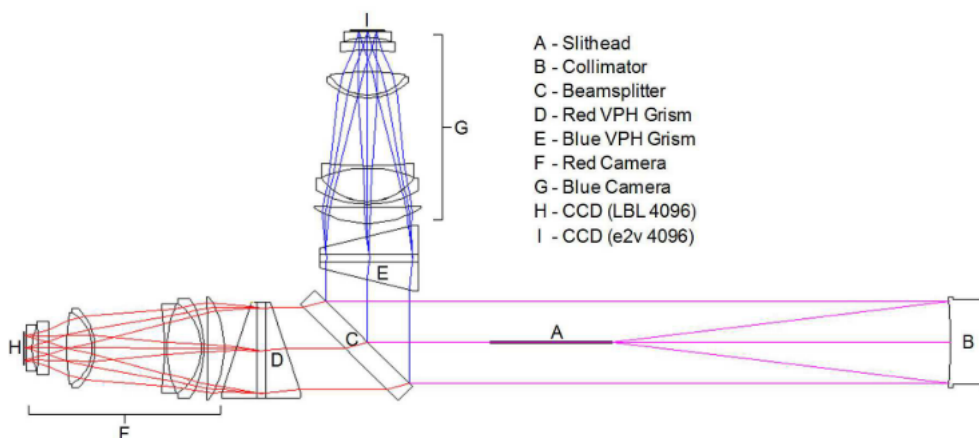


FIGURE 1.6 – Schéma des spectrographes de BOSS. La lumière arrive via les fibres optiques (A). Elle est ensuite collimatée (B) en un faisceau parallèle, puis séparée par le miroir semi-réfléchissant (C). Les longueurs d'ondes $\lambda < 6050$ sont réfléchies vers la caméra bleu (G), les autres entrent dans le bras rouge (F) du spectrographe. Chaque bras comporte un grisme (D et E), une série de lentille puis le CCD (H et I). Crédits : SMEE et al. (2012).

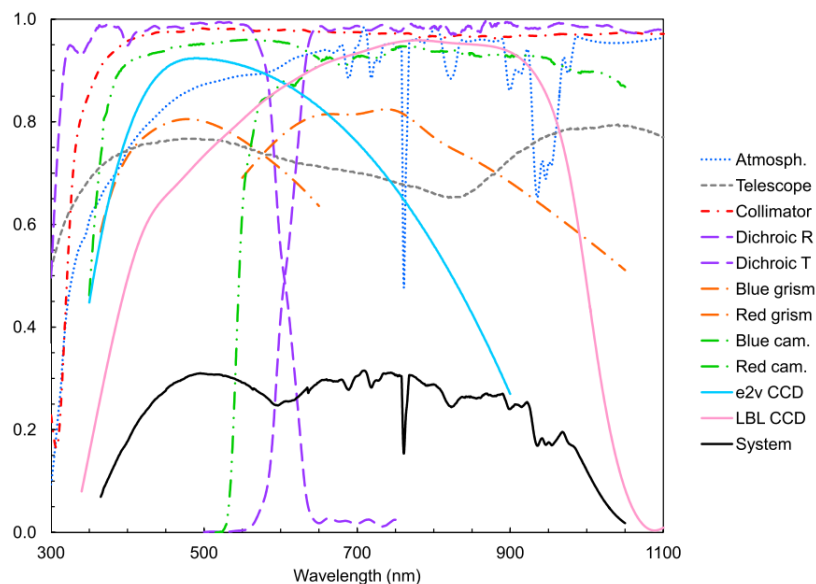


FIGURE 1.7 – Efficacité optique en fonction de la longueur d'onde. Le graphique présente les prévisions de l'efficacité optique de l'instrument avec toutes ses composantes. Crédits : SMEE et al. (2012).

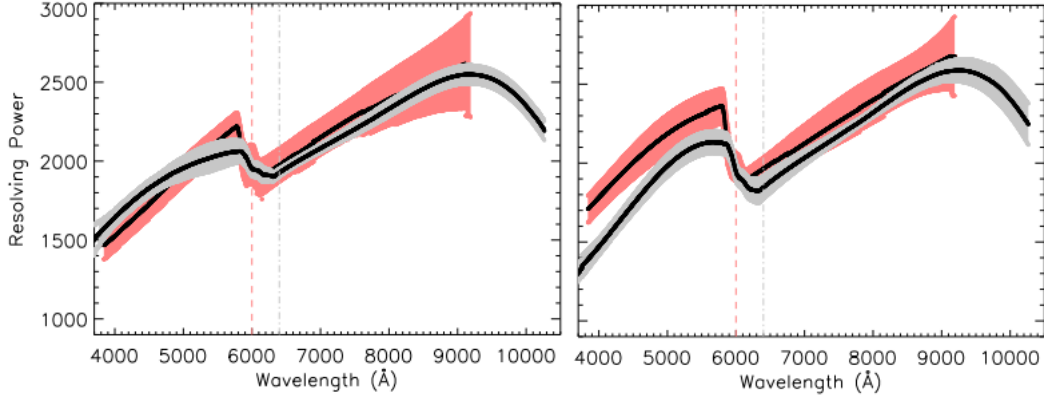


FIGURE 1.8 – Pouvoir de résolution en fonction de la longueur d’onde pour les spectrographes de SDSS (rouge) et BOSS (gris). La courbe de gauche correspond à la mesure sur le spectrographe 1, et celle de droite sur le spectrographe 2. Les régions colorées représentent les régions contenant 68 % des mesures. Crédits : SMEE et al. (2012).

1.2.6 Résultats

Le relevé eBOSS fournit les mesures de l’échelle BAO et du taux de croissance $f\sigma_8$ les plus précises à ce jour. Ces mesures, grâce à la diversité de traceurs utilisés, sont réparties dans une large gamme en redshift, allant de $z \sim 0.15$ avec les galaxies locales à $z \sim 2.4$ avec le Ly α . La figure 1.9 présente l’ensemble de ces mesures. Parmi les nombreux résultats produits par eBOSS, nous pouvons citer la mesure de l’échelle BAO qui favorise une densité d’énergie noire non nulle à plus de 8 sigmas. La figure 1.10 montre les contraintes sur les paramètres Ω_Λ et Ω_m apportées uniquement par la mesure de l’échelle BAO. En ajoutant les mesures de la BBN (*Big Band Nucleosynthesis*), la mesure de l’échelle BAO faite par eBOSS produit une mesure de H_0 en accord avec les mesures de Planck, et en tension avec les mesures directes. La figure 1.11 montre les contraintes sur les paramètres H_0 et Ω_m apportées par la mesure de l’échelle BAO. La combinaison des mesures à $z > 1$ et $z < 1$ permet de mesurer précisément à la fois H_0 et Ω_m . La zone horizontale grise montre la mesure directe de H_0 faite par **Riess2019**. Enfin, eBOSS permet de réduire la limite supérieure de la somme des masses des neutrinos à 0,115 eV. Tous les résultats et contraintes cosmologiques produits par eBOSS sont présentés et discutés dans **EBOSSCollaboration2020**.

1.3 DESI

Le *Dark Energy Spectroscopic Instrument* (DESI, DESI COLLABORATION et al. (2016)) est un projet américain de mesure d’énergie noire de génération 4. Il a vu sa première lumière en octobre 2019. Le début de la prise de données devait avoir lieu en juillet 2020. Cependant, à cause de la pandémie de 2020, les phases de *commissioning* et *survey validation* durant laquelle l’instrument et la qualité des données sont testés ont été interrompues. Actuellement, le début de la prise de données est estimé à janvier 2021.

Comme eBOSS, DESI étudie les BAO et la croissance des structures à l’aide d’un très grand relevé de galaxies et de quasars. À l’issue des 5 ans d’observation prévus, DESI aura mesuré plus de 30 millions de spectres, distribués sur un relevé de plus de 14000 deg^2 . Pour atteindre ses objectifs, DESI utilise le télescope Mayall, mesurant 4m de diamètre et situé au Kitt Peak en Arizona. Le champ de vue du télescope est le même que celui de SDSS : 3deg de diamètre sur le ciel. L’instrument inclut un système de fibres optiques, au nombre de 5000, mais celles-ci sont placées au plan focal à l’aide de robots qui ajustent la position de chaque fibre avant chaque exposition. Dix spectrographes reçoivent

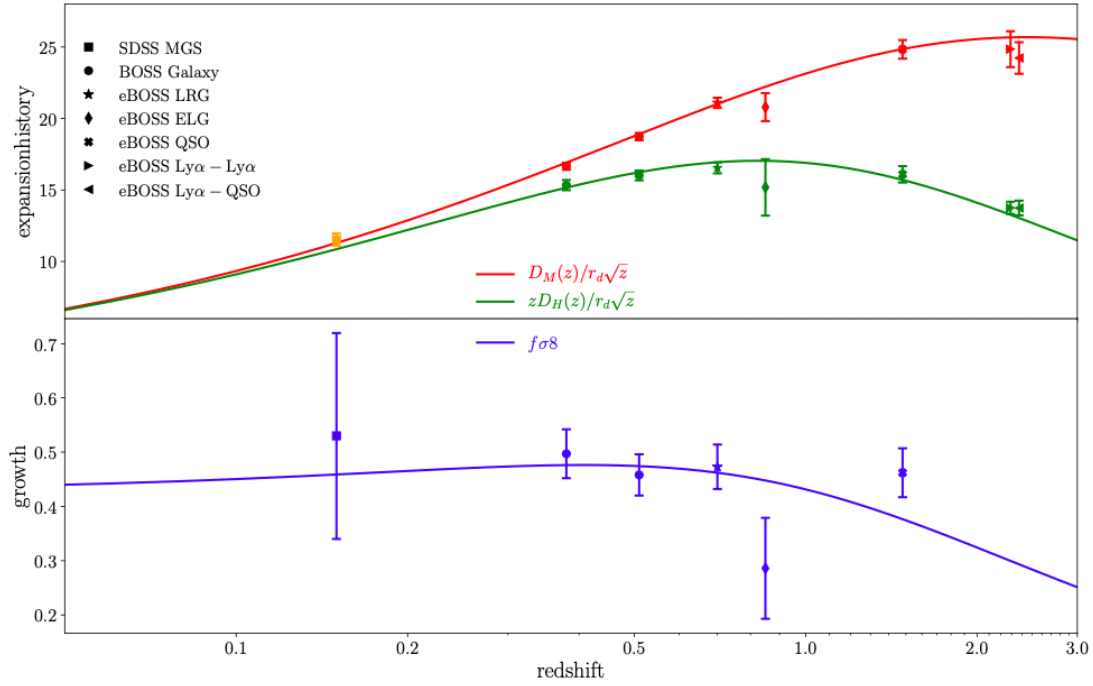


FIGURE 1.9 – L’ensemble des mesures de l’échelle BAO (graphique du haut) et du taux de croissance $f\sigma_8$ (graphique du bas) produites par tous les relevés SDSS. Les lignes continues indiquent les prédictions produites par Planck en supposant un modèle Λ CDM plat.

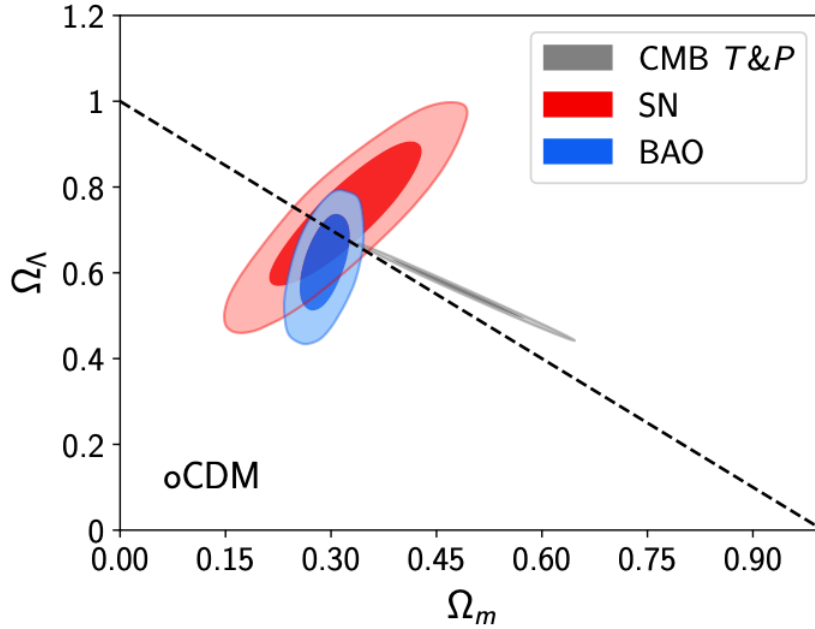


FIGURE 1.10 – Contraintes cosmologiques sur les paramètres Ω_Λ et Ω_m , avec l’hypothèse d’un modèle Λ CDM de courbure libre. Les contours rouges indiquent les contraintes à 1 et 2 sigmas produites à partir des données du relevé de supernovae Pantheon (**Scolnic2017**), les gris indique les contraintes produites par Planck (température et polarisation), et les bleus donnent les contraintes produites par la mesure de l’échelle BAO avec l’ensemble des relevés SDSS.

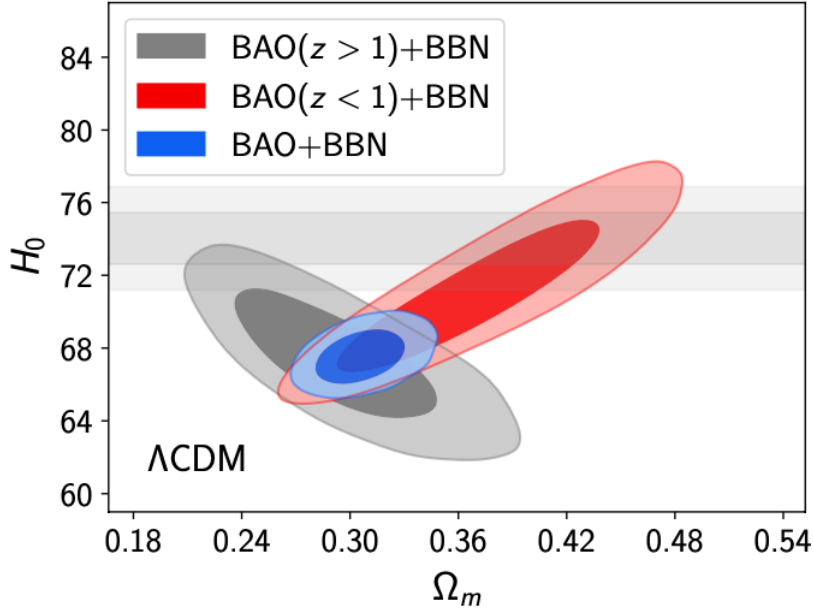


FIGURE 1.11 – Contraintes cosmologiques sur les paramètres H_0 et Ω_m produites par la mesure de l'échelle BAO avec l'ensemble des relevés SDSS, en supposant un modèle Λ CDM plat. Les contours rouges et gris indiquent les contraintes à 1 et 2 sigmas produites par les mesures à $z > 1$ et $z < 1$ respectivement. Les contours bleus indiquent la combinaison de toutes les mesures. Enfin, la zone horizontale grise montre la mesure de H_0 faite par **Riess2019**

ces fibres, chacun comportant 3 caméras et couvrant les longueurs d'onde de 3600 à 9800 Å. DESI observe les 4 mêmes traceurs qu'eBOSS : les LRG jusqu'à $z = 1,0$, les ELG jusqu'à $z = 1,7$, ainsi que les quasars en tant que traceurs directs de la matière et les quasars $\text{Ly}\alpha$ sur la gamme $2,1 < z < 3,5$. La densité visée de quasars $\text{Ly}\alpha$ est de 50 par deg^2 . En plus de ces traceurs, DESI observera des galaxies brillantes (BG : *Bright Galaxies*) pendant le grey time¹. Le relevé de ces galaxies contiendra 10 millions d'objets, avec un redshift moyen $z = 0,2$.

A la fin des 5 ans d'observations, DESI fournira plus de 30 points de mesure des distances cosmologiques, chacun avec une précision meilleure que le pourcent, et couvrant la gamme $0 < z < 3,5$. La figure 1.12 illustre la différence entre BOSS et DESI pour la mesure du taux d'expansion $H(z)$. De plus, DESI donnera une mesure de la somme des masses des neutrinos, avec une incertitude de 0,020 eV. Cette précision est suffisante pour exclure la hiérarchie de masse inversée à 3σ .

1. Le grey time, par opposition au dark time, correspond au moment où le ciel n'est pas totalement sombre, lorsqu'il est éclairé par la lune par exemple.

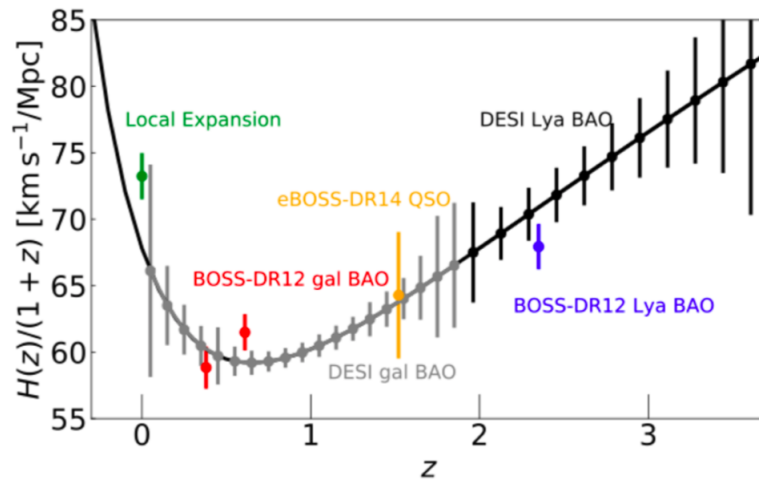


FIGURE 1.12 – Mesure de la distance de Hubble en fonction du redshift. Les points vert (mesure local à l'aide des SN1a), rouge, jaune et bleu donnent les mesures existantes. Les points gris donnent la prédiction pour les galaxies et quasars de DESI, les points noirs donnent la prédiction pour le Ly α de DESI.

Bibliographie

- ABAZAJIAN, K. (2008). « The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey ». In : DOI : 10.1088/0067-0049/182/2/543. arXiv : 0812.0649.
- ALAM, Shadab, Franco D. ALBARETI et al. (2015). « The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III ». In : DOI : 10.1088/0067-0049/219/1/12. arXiv : 1501.00963.
- ALAM, Shadab, Metin ATA et al. (2016). « The clustering of galaxies in the completed SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: cosmological analysis of the DR12 galaxy sample ». In : DOI : 10.1093/mnras/stx721. arXiv : 1607.03155.
- BECKER, Robert H., Richard L. WHITE et David J. HELFAND (1995). « The FIRST Survey: Faint Images of the Radio Sky at Twenty Centimeters ». In : *The Astrophysical Journal* 450, p. 559. ISSN : 0004-637X. DOI : 10.1086/176166.
- BLANTON, M. R. et al. (2001). « An Efficient Algorithm for Positioning Tiles in the Sloan Digital Sky Survey ». In : DOI : 10.1086/344761. arXiv : 0105535 [astro-ph].
- BLANTON, Michael R. et al. (2017). « Sloan Digital Sky Survey IV: Mapping the Milky Way, Nearby Galaxies, and the Distant Universe ». In : DOI : 10.3847/1538-3881/aa7567. arXiv : 1703.00052.
- BOVY, Jo et al. (2010). « Think Outside the Color Box: Probabilistic Target Selection and the SDSS-XDQSO Quasar Targeting Catalog ». In : DOI : 10.1088/0004-637X/729/2/141. arXiv : 1011.6392.
- DAWSON, Kyle S. et al. (2015). « The SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Overview and Early Data ». In : DOI : 10.3847/0004-6256/151/2/44. arXiv : 1508.04473.
- DESI COLLABORATION et al. (2016). « The DESI Experiment Part I: Science, Targeting, and Survey Design ». In : arXiv : 1611.00036.
- DU MAS DES BOURBOUX, Héliot et al. (2019). « The extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: measuring the cross-correlation between the MgII flux transmission field and quasars and galaxies at $z=0.59$ ». In : arXiv : 1901.01950.
- EISENSTEIN, D. J. et al. (2005). « Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies ». In : DOI : 10.1086/466512. arXiv : 0501171 [astro-ph].
- EISENSTEIN, Daniel J. et al. (2011). « SDSS-III: Massive Spectroscopic Surveys of the Distant Universe, the Milky Way Galaxy, and Extra-Solar Planetary Systems ». In : DOI : 10.1088/0004-6256/142/3/72. arXiv : 1101.1529.
- GUNN, James E., Walter A. SIEGMUND et Edward J. Mannery et AL (2006). « The 2.5 m Telescope of the Sloan Digital Sky Survey ». In : DOI : 10.1086/500975. arXiv : 0602326 [astro-ph].
- GUNN, J. et al. (1998). « The Sloan Digital Sky Survey Photometric Camera ». In : DOI : 10.1086/300645. arXiv : 9809085 [astro-ph].
- LAURENT, Pierre et al. (2016). « A $14 h^{-3} \text{ Gpc}^3$ study of cosmic homogeneity using BOSS DR12 quasar sample ». In : DOI : 10.1088/1475-7516/2016/11/060. arXiv : 1602.09010.
- LAW, N. M. et al. (2009). « The Palomar Transient Factory: System Overview, Performance and First Results ». In : DOI : 10.1086/648598. arXiv : 0906.5350.

- LAWRENCE, A. et al. (2006). « The UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS) ». In : DOI : 10.1111/j.1365-2966.2007.12040.x. arXiv : 0604426 [astro-ph].
- MARTIN, D. Christopher et al. (2004). « The Galaxy Evolution Explorer: A Space Ultraviolet Survey Mission ». In : DOI : 10.1086/426387. arXiv : 0411302 [astro-ph].
- SMEE, Stephen et al. (2012). « The Multi-Object, Fiber-Fed Spectrographs for SDSS and the Baryon Oscillation Spectroscopic Survey ». In : DOI : 10.1088/0004-6256/146/2/32. arXiv : 1208.2233.
- THE SDSS-II SEGUE COLLABORATION et al. (2009). « SEGUE: A Spectroscopic Survey of 240,000 stars with $g=14-20$ ». In : DOI : 10.1088/0004-6256/137/5/4377. arXiv : 0902.1781.
- WRIGHT, Edward L. et al. (2010). « The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance ». In : DOI : 10.1088/0004-6256/140/6/1868. arXiv : 1008.0031.