

# 1

## Présentation des données

---

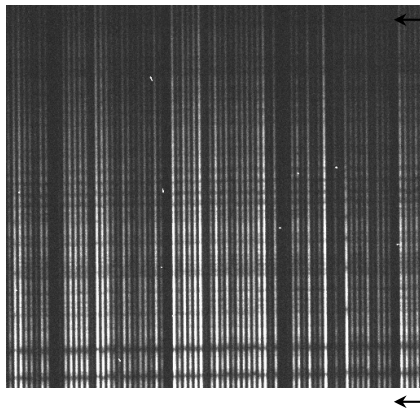


FIGURE 1.1 – Photographie d'un capteur CCD. L'axe des abscisses indique le numéro de la fibre optique. L'axe des ordonnées donne la longueur d'onde observée.

Dans le chapitre précédent, nous présentions l'instrument SDSS et le relevé eBOSS. **Nous présentons ici comment les spectres sont déduits des photons acquis avec les CCD, puis comment le champ d'absorption est reconstruit à partir de chaque spectre.**

## 1 Réduction des données

L'observation de chaque plaque fournit des données en deux dimensions : la première correspond aux différentes longueurs d'onde, la seconde aux différentes fibres (voir figure 1.1). La chaîne de réduction des données transforme ces informations en une liste de spectres. Premièrement, chaque spectre est extrait de l'image acquise par le CCD. Le spectre est étalonné en longueur d'onde à l'aide de lampes à arc. Le flux est calibré en utilisant les spectres des fibres dédiées à des étoiles standards. Puis le fond du ciel, estimé dans chaque demi plaque grâce aux fibres dédiées, est soustrait à chaque spectre. La variance dans chaque pixel est ensuite estimée. Elle prend en compte le bruit de photon et le bruit de l'électronique. Les pixels affectés par des rayons cosmiques sont rejetés. Enfin, pour chaque objet, toutes les expositions sont ajoutées pour former un seul et même spectre, avec un plus grand rapport signal sur bruit. Le nombre typique d'expositions par objet varie entre 4 et 6.

Les données que nous utilisons dans ce manuscrit ont été rendues publiques lors de la sixième publication de données SDSS (DR16<sup>1</sup>). Elles sont décrites par Ahumada et al. (2019).

## 2 Le catalogue de quasar

Une fois les spectres extraits, il est important de les classer afin de construire des catalogues utilisables par les différentes analyses. Pour ce faire, chaque spectre est traité par le pipeline de SDSS, décrite par Bolton et al. (2012). **Plusieurs modèles d'étoiles, de galaxies et de quasars sont ajustés à chaque spectre. Ces modèles sont construits à l'aide de l'analyse en composantes principales (PCA). Cette analyse fournit des spectres typiques de complexités différentes, le moins complexe étant la moyenne. Les différents spectres sont alors pondérés et combinés afin de construire un modèle qui ajuste au mieux le spectre à classer.** Une fois tous les modèles ajustés, ils sont triés selon leur  $\chi^2$  réduit. Le spectre est alors classifié selon

---

1. <https://www.sdss.org/dr16/>

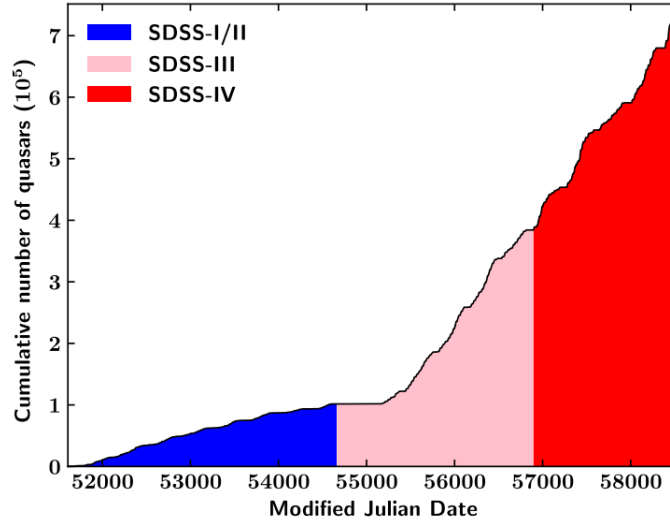


FIGURE 1.2 – Evolution du nombre de quasars observés par les différentes générations de SDSS en fonction du temps. Les générations SDSS I et II correspondent à  $MJD < 54663$  (bleu), SDSS III à  $54663 \leq MJD < 56898$  (rose) et SDSS IV à  $56898 < MJD < 58543$  (rouge). Crédits : #prov Lyke in prep

le modèle possédant le plus faible  $\chi^2$  réduit. Tous les spectres mesurés par SDSS et classifiés comme quasar constituent l'échantillon *superset*. Il contient 1 440 627 objets.

Certains quasars peuvent être difficiles à classifier à cause d'absorptions intenses comme les DLA ou les BAL<sup>1</sup>. Tous les quasars du relevé BOSS ont été inspectés visuellement (Pâris et al., 2016) afin de confirmer la classification du pipeline de SDSS, et d'estimer leur redshifts. Cet échantillon représente 297 301 objets. Cependant, à cause du grand nombre de quasars observés par eBOSS (voir figure 1.2), l'observation visuelle n'a pas pu être effectuée pour tous ces objets. **Afin de vérifier la première identification faite par le pipeline de SDSS, une seconde classification est alors effectuée (?). Elle est complétée par l'algorithme QuasarNET (Busca and Balland, 2018). Ceci réduit le nombre de mauvaises identifications et donc le nombre d'inspections visuelles requises. A la fin, 0,6 % des spectres, soit 8581 spectres, requièrent une inspection visuelle.**

Une fois les spectres classifiés, un sous-échantillon du superset est construit. Il contient 750 426 objets, confirmés comme quasar par la chaîne de traitement précédente. Pour chaque objet, le catalogue fournit plusieurs estimations de redshift. Le pipeline de SDSS produit une première estimation. L'algorithme QuasarNET en fournit une seconde. Les spectres inspectés visuellement possèdent une autre estimation. Enfin, l'algorithme redvsblue<sup>2</sup> produit plusieurs estimations de redshift, parmi lesquelles figurent Z\_PCA et Z\_LYAWG.

Différents algorithmes sont alors appliqués au catalogue, afin d'identifier les DLA et les BAL présents. L'identification **utilise l'addition des différentes expositions pour chaque objet**. Concernant les DLA, l'algorithme de détection est décrit dans Parks et al. (2017). Il est appliqué sur les quasars à un redshift  $2 \leq Z\_PCA \leq 6$ , afin d'avoir suffisamment de pixels dans la zone  $900 < \lambda_{RF} < 1346 \text{ \AA}$ . Parmi les 270 315 spectres inspectés, 39 514 DLA ont été identifiés, distribués dans 35 686 spectres. Concernant les BAL, l'algorithme utilisé est très similaire à celui décrit dans Guo and Martini (2019). Les BAL sont recherchés dans les spectres ayant un redshift entre 1,57 et 5,6. L'algorithme fournit la probabilité qu'un spectre possède un BAL. Le champ BAL\_PROB du catalogue

1. Les BAL (Broad Absorption Line) sont des quasars qui présentent des absorptions intenses au voisinage de leurs raies d'émission. Cette absorption est interprétée comme étant due à un absorbeur dense situé juste devant le quasar. La figure 1.3 présente un spectre de quasar avec un BAL.

2. <https://github.com/londumas/redvsblue>

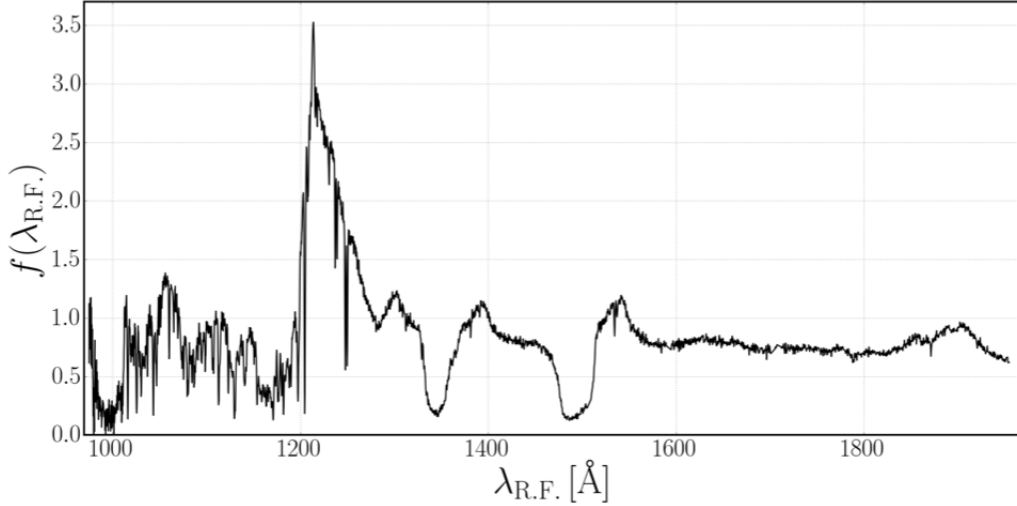


FIGURE 1.3 – Spectre d’un quasar pris par SDSS présentant un BAL. Le spectre est très fortement absorbé pour les longueurs d’onde légèrement inférieures à chaque raie d’émission.

indique cette probabilité.

A la fin, le catalogue ainsi construit (DR16Q dans la suite de ce manuscrit) contient 750 426 quasars confirmés. Nous référons le lecteur à l’article ? pour davantage d’informations.

L’analyse  $\text{Ly}\alpha$  des données complètes d’eBOSS (?) utilise le catalogue DR16Q. Le redshift des quasars est choisi comme étant  $\text{Z\_LYAWG}$ . Les quasars sont sélectionnés avec un redshift  $1.77 < z \leq 4$ . L’échantillon correspondant représente alors 341 468 objets. La distribution en redshift de ces quasars traceurs (ceux utilisés comme traceurs pour la fonction de corrélation croisée  $\text{Ly}\alpha$ -QSO) est présentée dans le graphique de gauche de la figure 1.4.

### 3 La sélection des forêts

L’analyse  $\text{Ly}\alpha$  des données complètes d’eBOSS, dont nous nous servons dans ce manuscrit, est présentée dans l’article ?. Les informations que nous donnons dans la suite de ce chapitre sont tirées de cette article. Nous y référons le lecteur pour davantage d’informations.

Les spectres produits par la chaîne de réduction des données SDSS sont rebinnés : 3 pixels du spectre original, d’une taille  $\Delta \log_{10}(\lambda) \sim 10^{-4}$ , sont combinés en 1 seul pixel d’analyse, d’une taille  $\Delta \log_{10}(\lambda) \sim 3 \times 10^{-4}$ . Ceci est fait afin de réduire le temps de calcul nécessaire pour estimer les fonctions de corrélation. Dans la suite, l’utilisation de “pixel” réfère à ces pixels d’analyse.

L’absorption  $\text{Ly}\alpha$  est mesurée dans deux régions distinctes du spectre. La première, dénommée région  $\text{Ly}\alpha$ , correspond aux longueurs d’onde  $1040 \leq \lambda_{\text{RF}} \leq 1200 \text{ \AA}$ , c’est à dire entre les raies d’émission  $\text{Ly}\beta$  et  $\text{Ly}\alpha$ . La seconde, dénommée région  $\text{Ly}\beta$ , correspond aux longueurs d’onde  $920 \leq \lambda_{\text{RF}} \leq 1020 \text{ \AA}$ , c’est à dire entre la limite de la série de Lyman et la raie d’émission  $\text{Ly}\beta$ . Les pixels d’absorption  $\text{Ly}\alpha$  dans la région  $\text{Ly}\alpha$  sont dénommés pixels  $\text{Ly}\alpha(\text{Ly}\alpha)$ , et ceux dans la région  $\text{Ly}\beta$  sont dénommés pixels  $\text{Ly}\alpha(\text{Ly}\beta)$ . De plus, l’analyse se limite aux pixels dont la longueur d’onde observée est comprise entre  $3600 \leq \lambda_{\text{obs}} \leq 6000 \text{ \AA}$ . **La limite inférieure provient de la sensibilité des CCD et de l’augmentation des absorptions atmosphériques intenses dans l’UV. La limite supérieure provient des raies d’émission du ciel dans le proche infrarouge qui bruitent le signal. Ces limites sur  $\lambda_{\text{obs}}$  correspondent à un redshift minimal  $z_{\text{QSO}} = 2$  pour les quasars utilisés pour leurs pixels dans la région  $\text{Ly}\alpha$  (quasars  $\text{Ly}\alpha$ ), et  $z_{\text{QSO}} = 2.53$  pour les quasars utilisés pour**

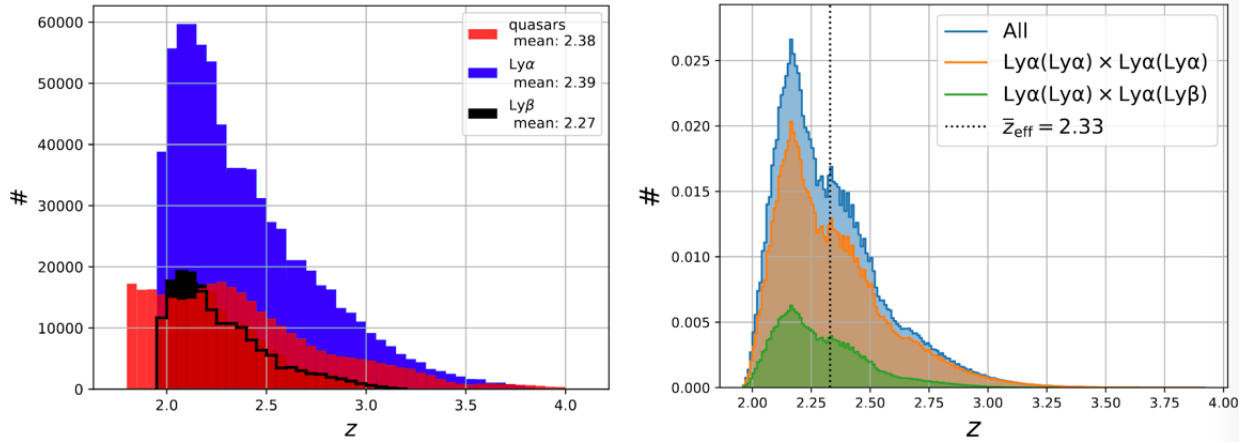


FIGURE 1.4 – Gauche : distribution en redshift des pixels  $\text{Ly}\alpha(\text{Ly}\alpha)$  (bleu) et des pixels  $\text{Ly}\alpha(\text{Ly}\beta)$  (noir) (nombres divisés par 50), ainsi que celle des quasars traceurs (rouge). Droite : distribution pondérée du redshift efficace de chaque paire de pixels utilisée pour le calcul de la fonction de corrélation du  $\text{Ly}\alpha$ . La distribution orange présente les paires de pixels  $\text{Ly}\alpha(\text{Ly}\alpha)$ - $\text{Ly}\alpha(\text{Ly}\alpha)$ , la verte les paires de pixels  $\text{Ly}\alpha(\text{Ly}\alpha)$ - $\text{Ly}\alpha(\text{Ly}\beta)$ , et la bleue la somme des deux. Les paires représentées sont celles nécessaires pour la mesure de la position du pic BAO, c'est à dire avec une séparation  $r \in [80; 120] h^{-1}$  Mpc. La ligne en pointillés indique le redshift effectif de la mesure, c'est à dire la moyenne de la distribution bleue.

leurs pixels dans la région  $\text{Ly}\beta$  (quasars  $\text{Ly}\beta$ ). Parmi les 341 468 quasars traceurs, 256 328 sont des quasars  $\text{Ly}\alpha$ , et 103 080 sont des quasars  $\text{Ly}\beta$ .

D'autres sélections sont aussi appliquées. Les quasars pour lesquels la probabilité d'avoir un BAL est supérieure à 0.9 sont écartés. Les mauvaises observations durant BOSS ou eBOSS sont mises de côté. De plus, chaque région nécessite au moins 50 pixels. Cette sélection décale le redshift minimal à  $z_{\text{QSO}} = 2.10$  pour les quasars  $\text{Ly}\alpha$ , et à  $z = 2.65$  pour les quasars  $\text{Ly}\beta$ . **Enfin, l'ajustement du continuum (voir section suivante) échoue pour environ 2 % des spectres.** Ces spectres sont aussi écartés. Après toutes ces sélections, l'échantillon final contient 210 005 quasars  $\text{Ly}\alpha$  et 69 656 quasars  $\text{Ly}\beta$ .

Enfin, des corrections sur le flux et la variance du flux sont appliquées afin de corriger les imperfections de la chaîne de réduction. De plus, certaines régions spectrales en longueur d'onde observée sont masquées, à cause de l'augmentation de la variance du flux causée par les raies du ciel. Tout ceci est décrit en détail dans ?.

## 4 Définition du champ d'absorption

Dans cette section, nous décrivons comment, du flux mesuré  $f_q(\lambda)$  du quasar  $q$  à la longueur d'onde observée  $\lambda$ , nous pouvons déduire les fluctuations du champ d'absorption  $\text{Ly}\alpha$ . La démarche que nous décrivons ici est très bien expliquée dans la thèse ?. Nous y référons le lecteur pour plus de détails.

### 4.1 Calcul des $\delta$

Comme présenté dans la section ??, le contraste de l'absorption  $\text{Ly}\alpha$   $\delta_q(\lambda)$  est défini comme

$$\delta_q(\lambda) = \frac{f_q(\lambda)}{\bar{F}(\lambda)C_q(\lambda)} - 1, \quad (1.1)$$

où  $\bar{F}(\lambda)$  est la transmission moyenne au redshift  $z = \lambda/\lambda_{\text{Ly}\alpha} - 1$ , et  $C_q(\lambda)$  donne le flux du spectre sans absorption. Il est dénommé *continuum* et est différent pour chaque quasar. Le produit  $\bar{F}(\lambda)C_q(\lambda)$  représente donc le flux moyen attendu du quasar  $q$ . **La figure ?? représente ces quantités pour les régions Ly $\alpha$  et Ly $\beta$  (#prov figure 1.17 de l'intro, la remettre ici ?).** Du fait de la faible résolution et du faible rapport signal sur bruit des données,  $\bar{F}(\lambda)$  n'est pas mesurable. Pour ne pas dépendre d'analyses externes, on détermine directement le produit  $\bar{F}(\lambda)C_q(\lambda)$  pour chaque spectre. Afin de prendre en compte la variabilité d'un spectre à un autre, le produit  $\bar{F}(\lambda)C_q(\lambda)$  est modélisé par une relation linéaire en  $\log_{10}\lambda$  :

$$\bar{F}(\lambda)C_q(\lambda) = \bar{C}(\lambda_{\text{RF}})(a_q + b_q \log_{10}(\lambda)) , \quad (1.2)$$

où  $\bar{C}(\lambda_{\text{RF}})$  donne le continuum moyenné sur tous les spectres, en fonction de la longueur d'onde dans le référentiel du quasar.  $a_q$  et  $b_q$  sont propres à chaque quasar, ils modélisent la diversité des quasars. Les termes  $a_q$ ,  $b_q$  et  $\bar{C}(\lambda_{\text{RF}})$  sont déterminés en minimisant la fonction de vraisemblance  $L$ , qui s'exprime comme

$$-2 \ln L = \sum_i \frac{[f_i - \bar{F}C_q(\lambda_i, a_q, b_q)]^2}{\sigma_q^2(\lambda_i)} + \ln[\sigma_q^2(\lambda_i)] . \quad (1.3)$$

La variance  $\sigma_q^2(\lambda)$  dans chaque pixel est donnée par

$$\sigma_q^2(\lambda) = \eta(\lambda)\sigma_{\text{instru},q}^2(\lambda) + \sigma_{\text{cosmo}}^2(\lambda)(\bar{F}C_q(\lambda))^2 + \frac{\epsilon(\lambda)(\bar{F}C_q(\lambda))^4}{\sigma_{\text{instru},q}^2(\lambda)} . \quad (1.4)$$

Le terme  $\eta(\lambda)\sigma_{\text{instru},q}^2(\lambda)$  rend compte de la variance qui est provoquée par l'instrument et liée à l'incertitude sur la mesure des flux. Le terme  $\sigma_{\text{cosmo}}(\lambda)$  est purement cosmologique et donne la variance propre au champ d'absorption du Ly $\alpha$ . Il traduit le fait que certaines régions de l'univers peuvent absorber plus ou moins que la moyenne. Du fait de l'isotropie,  $\sigma_{\text{cosmo}}$  ne dépend que de  $z$ . Le terme ad hoc  $\epsilon(\lambda)(\bar{F}C_q(\lambda))^4/\sigma_{\text{instru},q}^2(\lambda)$  rend compte du fait que la variance augmente avec le rapport signal sur bruit, probablement à cause de la diversité des quasars. **Enfin, le terme  $\ln(\sigma_q^2)$  dans l'expression de la vraisemblance provient du fait que les erreurs  $\sigma_q$  utilisées dans la détermination de  $a_q$ ,  $b_q$  et  $\bar{C}(\lambda_{\text{RF}})$  ne sont pas constantes et dépendent elles mêmes de ces paramètres.**

Afin d'obtenir le produit  $\bar{F}C_q$  pour chaque quasar, il faut maximiser la fonction de vraisemblance  $L$  (équation 1.3), et donc ajuster les paramètres  $a_q$ ,  $b_q$ ,  $\eta(\lambda)$ ,  $\sigma_{\text{cosmo}}(\lambda)$  et  $\epsilon(\lambda)$ . Cependant, celle fonction dépend elle même du produit  $\bar{F}C_q$ . Pour résoudre ce problème, l'ajustement est fait de manière itérative. Premièrement, les 5 paramètres à ajuster, ainsi que  $\bar{C}(\lambda_{\text{RF}})$ , sont initialisés. Ceci permet d'ajuster  $\bar{F}C_q$  sur  $f_q(\lambda)$  en maximisant la fonction de vraisemblance  $L$ . Dans cet ajustement, chaque pixel observé à une longueur d'onde  $\lambda$  est pondéré par un poids

$$w_q(\lambda) = \frac{1}{\sigma_q^2(\lambda)} . \quad (1.5)$$

Une fois cette ajustement fait,  $\bar{C}(\lambda_{\text{RF}})$  est de nouveau calculé. Puis, les paramètres  $\eta(\lambda)$ ,  $\sigma_{\text{cosmo}}(\lambda)$  et  $\epsilon(\lambda)$  sont ajustés de manière à ce que, à  $\lambda$  fixé,  $\sigma_q(\lambda)$  reproduise la variance estimée à partir des flux  $f_q(\lambda)$  de tous les quasars. Ce nouvel ajustement permet une nouvelle fois d'ajuster  $\bar{F}C_q$ , etc. Cette procédure est répétée jusqu'à obtenir des valeurs stables pour les paramètres ajustés. En pratique, 5 itérations sont nécessaires. Cette procédure permet donc d'estimer, pour chaque quasar, le produit  $\bar{F}(\lambda)C_q(\lambda)$ , et ainsi d'estimer les  $\delta_q(\lambda)$  (équation 1.1) indépendamment dans chaque région.

## 4.2 Prise en compte de l'ajustement du continuum

La procédure décrite dans la section précédente permet d'ajuster le continuum de chaque quasar afin d'estimer le champ  $\delta$  dans chaque région d'absorption Ly $\alpha$ . Cependant, cet ajustement biaise le

champ  $\delta$  mesuré, et introduit de fausses corrélations lors du calcul des fonctions de corrélation. Il est donc important de prendre en compte cet effet.

En redéfinissant les paramètres  $a_q$  et  $b_q$ , l'équation 1.2 peut être mise sous la forme

$$\overline{F}(\lambda)C_q(\lambda) = \overline{C}(\lambda_{\text{RF}})(a_q + b_q(\Lambda - \overline{\Lambda}_q)) , \quad (1.6)$$

où  $\Lambda = \log_{10} \lambda$ , et  $\overline{\Lambda}_q$  est la moyenne de  $\Lambda$  dans chaque forêt :

$$\overline{\Lambda}_q = \frac{\sum_{\lambda} w_q(\lambda) \Lambda}{\sum_{\lambda} w_q(\lambda)} . \quad (1.7)$$

Le champ  $\delta_q$  mesuré est donc donné par

$$\delta_q(\lambda) = \frac{f_q(\lambda)}{\overline{C}(\lambda_{\text{RF}})(a_q + b_q(\Lambda - \overline{\Lambda}_q))} - 1 . \quad (1.8)$$

Du fait que  $a_q$  et  $b_q$  sont ajustés sur les  $f_q(\lambda)$ , l'utilisation de l'équation 1.6 pour déterminer le continuum force la moyenne et la pente de chaque région spectrale à être nulle. Ainsi le champ  $\delta$  mesuré est biaisé, et de fausses corrélations sont induites dans le calcul de la fonction de corrélation. Afin de prendre en compte cet effet, le champ  $\delta$  est transformé selon la relation

$$\tilde{\delta}_q(\lambda_i) = \sum_j \eta_{ij}^q \delta_q(\lambda_j) , \quad (1.9)$$

avec

$$\eta_{ij}^q = \delta_{ij}^K - \frac{w_j}{\sum_k w_k} - \frac{w_j (\Lambda_i - \overline{\Lambda}_q) (\Lambda_j - \overline{\Lambda}_q)}{\sum_k w_k (\Lambda_k - \overline{\Lambda}_q)^2} , \quad (1.10)$$

où  $\delta_{ij}^K$  est le symbole de Kronecker. Dans ce calcul, les poids  $w_q(\lambda)$  sont corrigés de la dépendance en redshift du biais du Ly $\alpha$  :

$$w_i = \sigma_q^{-2}(\lambda_i) \left( \frac{1 + z_i}{1 + 2.25} \right)^{\gamma_{\text{Ly}\alpha} - 1} , \quad (1.11)$$

avec  $\gamma_{\text{Ly}\alpha} = 2.9$  (McDonald et al., 2006). Grâce à cette transformation, l'effet sur la fonction de corrélation peut ainsi être modélisé et pris en compte. Sa modélisation passe par le calcul de la *matrice de distorsion*, détaillée dans la section ??.

Enfin, l'utilisation de  $\overline{C}(\lambda_{\text{RF}})$  dans l'équation 1.2 force la moyenne des  $\delta_q$  dans chaque bin de longueur d'onde observée à zéro. Cependant, la transformation 1.9 modifie légèrement la moyenne des  $\delta_q$  dans chaque bin. Afin que la fonction de corrélation croisée Ly $\alpha$ -QSO tende vers zéro à grand séparation, l'effet est corrigé en soustrayant explicitement la moyenne dans chaque bin :

$$\hat{\delta}_q(\lambda_i) = \tilde{\delta}_q(\lambda_i) - \overline{\tilde{\delta}}(\lambda) . \quad (1.12)$$

Dans la suite de ce manuscript, lorsque nous parlons du champ  $\delta$ , nous référons à ces  $\hat{\delta}_q(\lambda_i)$ . Le graphique de gauche de la figure 1.4 montre la distribution en redshift des  $\delta$  dans chaque région d'absorption. Le graphique de droite présente la distribution pondérée par les poids  $w_i$  (équation 1.11) du redshift effectif de chaque paire, utilisé dans le calcul de la fonction de corrélation.





# Bibliographie

---

Romina Ahumada, Carlos Allende Prieto, Andres Almeida, Friedrich Anders, Scott F. Anderson, Brett H. Andrews, Borja Anguiano, Riccardo Arcodia, Eric Armengaud, Marie Aubert, Santiago Avila, Vladimir Avila-Reese, Carles Badenes, Christophe Balland, Kat Barger, Jorge K. Barrera-Ballesteros, Sarbani Basu, Julian Bautista, Rachael L. Beaton, Timothy C. Beers, B. Izamar T. Benavides, Chad F. Bender, Mariangela Bernardi, Matthew Bershad, Florian Beutler, Christian Moni Bidin, Jonathan Bird, Dmitry Bizyaev, Guillermo A. Blanc, Michael R. Blanton, Mederic Boquien, Jura Borissova, Jo Bovy, W. N. Brandt, Jonathan Brinkmann, Joel R. Brownstein, Kevin Bundy, Martin Bureau, Adam Burgasser, Etienne Burtin, Mariana Cano-Diaz, Raffaella Capasso, Michele Cappellari, Ricardo Carrera, Solene Chabanier, William Chaplin, Michael Chapman, Brian Chirinka, Cristina Chiappini, Peter Doohyun Choi, S. Drew Chojnowski, Haeun Chung, Nicolas Clerc, Damien Coffey, Julia M. Comerford, Johan Comparat, Luiz da Costa, Marie-Claude Cousinou, Kevin Covey, Jeffrey D. Crane, Katia Cunha, Gabriele da Silva Ilha, Yu Sophia Dai, Sanna B. Damsted, Jeremy Darling, Danny Horta Darrington, James W. Davidson, Roger Davies, Kyle Dawson, Nikhil De, Axel de la Macorra, Nathan De Lee, Anna Barbara de Andrade Queiroz, Alice Deconto Machado, Sylvain de la Torre, Flavia Dell’Agli, Helion du Mas des Bourboux, Aleksandar M. Diamond-Stanic, Sean Dillon, John Donor, Niv Drory, Chris Duckworth, Tom Dwelly, Garrett Ebelke, Sarah Eftekharzadeh, Arthur Davis Eigenbrot, Yvonne P. Elsworth, Mike Eracleous, Ghazaleh Erfanianfar, Stephanie Escoffier, Xiaohui Fan, Emily Farr, Jose G. Fernandez-Trincado, Diane Feuillet, Alexis Finoguenov, Patricia Fofie, Amelia Fraser-McKelvie, Peter M. Frinchaboy, Sebastien Fromenteau, Hai Fu, Lluís Galbany, Rafael A. Garcia, D. A. Garcia-Hernandez, Luis Alberto Garma Oehmichen, Junqiang Ge, Marcio Antonio Geimba Maia, Doug Geisler, Joseph Gelfand, Julian Goddy, Jean-Marc Le Goff, Violeta Gonzalez-Perez, Kathleen Grabowski, Paul Green, Catherine J. Grier, Hong Guo, Julien Guy, Paul Harding, Sten Hasselquist, Adam James Hawken, Christian R. Hayes, Fred Hearty, S. Hekker, David W. Hogg, Jon Holtzman, Jiamin Hou, Bau-Ching Hsieh, Daniel Huber, Jason A. S. Hunt, J. Ider Chitham, Julie Imig, Mariana Jaber, Camilo Eduardo Jimenez Angel, Jennifer A. Johnson, Amy M. Jones, Henrik Jonsson, Eric Jullo, Yerim Kim, Karen Kinemuchi, Charles C. Kirkpatrick, George W. Kite, Mark Klaene, Jean-Paul Kneib, Juna A. Kollmeier, Hui Kong, Marina Kounkel, Dhanesh Krishnarao, Ivan Lacerna, Ting-Wen Lan, Richard R. Lane, David R. Law, Henry W. Leung, Hannah Lewis, Cheng Li, Jianhui Lian, Lihwai Lin, Dan Long, Penelope Longa-Pena, Britt Lundgren, Brad W. Lyke, J. Ted Mackereth, Chelsea L. MacLeod, Steven R. Majewski, Arturo Manchado, Claudia Maraston, Paul Martini, Thomas Masseron, Karen L. Masters, Savita Mathur, Richard M. McDermid, Andrea Merloni, Michael Merrifield, Szabolcs Meszaros, Andrea Miglio, Dante Minniti, Rebecca Minsley, Takamitsu Miyaji, Faizan Gohar Mohammad, Benoit Mosser, Eva-Maria Mueller, Demitri Muna, Andrea Munoz-Gutierrez, Adam D. Myers, Seshadri Nadathur, Preethi Nair, Janaina Correa do Nascimento, Rebecca Jean Nevin, Jeffrey A. Newman, David L. Nidever, Christian Nitschelm, Pasquier Noterdaeme, Julia E. O’Connell, Matthew D Olmstead, Daniel Oravetz, Audrey Oravetz, Yeisson Osorio, Zachary J. Pace, Nelson Padilla, Nathalie Palanque-Delabrouille, Pedro A. Palicio, Hsi-An Pan, Kaike Pan, James Parker, Romain Paviot, Sebastien Peirani, Karla Pena Ramrez, Samantha Penny, Will J. Percival, Ismael Perez-Fournon,

Ignasi Perez-Rafols, Patrick Petitjean, Matthew M. Pieri, Marc Pinsonneault, Vijith Jacob Poovelil, Joshua Tyler Povick, Abhishek Prakash, Adrian M. Price-Whelan, M. Jordan Raddick, Anand Raichoor, Amy Ray, Sandro Barboza Rembold, Mehdi Rezaie, Rogemar A. Riffel, Rogerio Riffel, Hans-Walter Rix, Annie C. Robin, A. Roman-Lopes, Carlos Roman-Zuniga, Benjamin Rose, Ashley J. Ross, Graziano Rossi, Kate Rowlands, Kate H. R. Rubin, Mara Salvato, Ariel G. Sanchez, Laura Sanchez-Menguiano, Jose R. Sanchez-Gallego, Conor Sayres, Adam Schaefer, Ricardo P. Schiavon, Jaderson S. Schimoia, Edward Schlafly, David Schlegel, Donald P. Schneider, Mathias Schultheis, Axel Schwöpe, Hee-Jong Seo, Aldo Serenelli, Arman Shafieloo, Shoaib Jamal Shamsi, Zhengyi Shao, Shiyin Shen, Matthew Shetrone, Raphael Shirley, Victor Silva Aguirre, Joshua D. Simon, M. F. Skrutskie, Anze Slosar, Rebecca Smethurst, Jennifer Sobeck, Bernardo Cervantes Sodi, Diogo Souto, David V. Stark, Keivan G. Stassun, Matthias Steinmetz, Dennis Stello, Julianna Stermer, Thaisa Storchi-Bergmann, Alina Streblyanska, Guy S. Stringfellow, Amelia Stutz, Genaro Suarez, Jing Sun, Manuchehr Taghizadeh-Popp, Michael S. Talbot, Jamie Tayar, Aniruddha R. Thakar, Riley Theriault, Daniel Thomas, Zak C. Thomas, Jeremy Tinker, Rita Tojeiro, Hector Hernandez Toledo, Christy A. Tremonti, Nicholas W. Troup, Sarah Tuttle, Eduardo Unda-Sanzana, Marica Valentini, Jaime Vargas-Gonzalez, Mariana Vargas-Magana, Jose Antonio Vazquez-Mata, M. Vivek, David Wake, Yuting Wang, Benjamin Alan Weaver, Anne-Marie Weijmans, Vivienne Wild, John C. Wilson, Robert F. Wilson, Nathan Wolthuis, W. M. Wood-Vasey, Renbin Yan, Meng Yang, Christophe Yèche, Olga Zamora, Pauline Zarrouk, Gail Zasowski, Kai Zhang, Cheng Zhao, Gongbo Zhao, Zheng Zheng, Guangtun Zhu, and Hu Zou. The Sixteenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys : First Release from the APOGEE-2 Southern Survey and Full Release of eBOSS Spectra. dec 2019. URL <http://arxiv.org/abs/1912.02905>.

Adam S Bolton, David J Schlegel, Éric Aubourg, Stephen Bailey, Vaishali Bhardwaj, Joel R Brownstein, Scott Burles, Yan-Mei Chen, Kyle Dawson, Daniel J Eisenstein, James E Gunn, G R Knapp, Craig P Loomis, Robert H Lupton, Claudia Maraston, Demitri Muna, Adam D Myers, Matthew D Olmstead, Nikhil Padmanabhan, Isabelle Pâris, Will J Percival, Patrick Petitjean, Constance M Rockosi, Nicholas P Ross, Donald P Schneider, Yiping Shu, Michael A Strauss, Daniel Thomas, Christy A Tremonti, David A Wake, Benjamin A Weaver, and W Michael Wood-Vasey. Spectral {Classification} and {Redshift} {Measurement} for the {SDSS}-{III} {Baryon} {Oscillation} {Spectroscopic} {Survey}. *The Astronomical Journal*, 144 :144, nov 2012. ISSN 0004-6256. doi : 10.1088/0004-6256/144/5/144. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2012AJ....144..144B>.

Isabelle Pâris, Patrick Petitjean, Nicholas P. Ross, Adam D. Myers, Éric Aubourg, Alina Streblyanska, Stephen Bailey, Éric Armengaud, Nathalie Palanque-Delabrouille, Christophe Yèche, Fred Hamann, Michael A. Strauss, Franco D. Albareti, Jo Bovy, Dmitry Bizyaev, W. Niel Brandt, Marcella Brusa, Johannes Buchner, Johan Comparat, Rupert A. C. Croft, Tom Dwelly, Xiaohui Fan, Andreu Font-Ribera, Jian Ge, Antonis Georgakakis, Patrick B. Hall, Linhua Jian, Karen Kinemuchi, Elena Malanushenko, Viktor Malanushenko, Richard G. McMahon, Marie-Luise Menzel, Andrea Merloni, Kirpal Nandra, Pasquier Noterdaeme, Daniel Oravetz, Kaike Pan, Matthew M. Pieri, Francisco Prada, Mara Salvato, David J. Schlegel, Donald P. Schneider, Audrey Simmons, Matteo Viel, David H. Weinberg, and Liu Zhu. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog : twelfth data release. aug 2016. doi : 10.1051/0004-6361/201527999. URL <https://arxiv.org/abs/1608.06483>.

Nicolas Busca and Christophe Balland. QuasarNET : Human-level spectral classification and redshifting with Deep Neural Networks. aug 2018. URL <http://arxiv.org/abs/1808.09955>.

David Parks, J. Xavier Prochaska, Shawfeng Dong, and Zheng Cai. Deep Learning of Quasar Spectra to Discover and Characterize Damped Ly $\alpha$  Systems. sep 2017. doi : 10.1093/mnras/sty196. URL <http://arxiv.org/abs/1709.04962><http://dx.doi.org/10.1093/mnras/sty196>.

Zhiyuan Guo and Paul Martini. Classification of Broad Absorption Line Quasars with a Convolutional Neural Network. jan 2019. doi : 10.3847/1538-4357/ab2590. URL <http://arxiv.org/abs/1901.04506><http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab2590>.

P McDonald, U Seljak, and et al. Burles. The  $\{\text{Ly}\alpha\}$   $\{\text{Forest}\}$   $\{\text{Power}\}$   $\{\text{Spectrum}\}$  from the  $\{\text{Sloan}\}$   $\{\text{Digital}\}$   $\{\text{Sky}\}$   $\{\text{Survey}\}$ . *\textbackslashapjs*, 163 :80–109, mar 2006. doi : 10.1086/444361.