

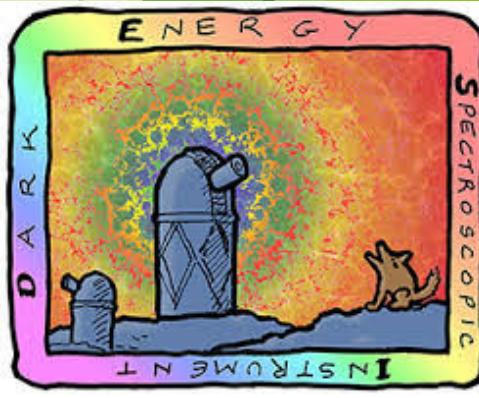
Les forêts Ly α des quasars du relevé eBOSS: comprendre les fonctions de corrélation et les systématiques

Thèse préparée au DPhP - IRFU

sous la direction de Jean-Marc Le Goff

et soutenue le 24 septembre 2020 à l'Orme des merisiers

Thomas Etourneau



Sommaire

- I
- II
- III
- IV
- V

Introduction

Analyse des données

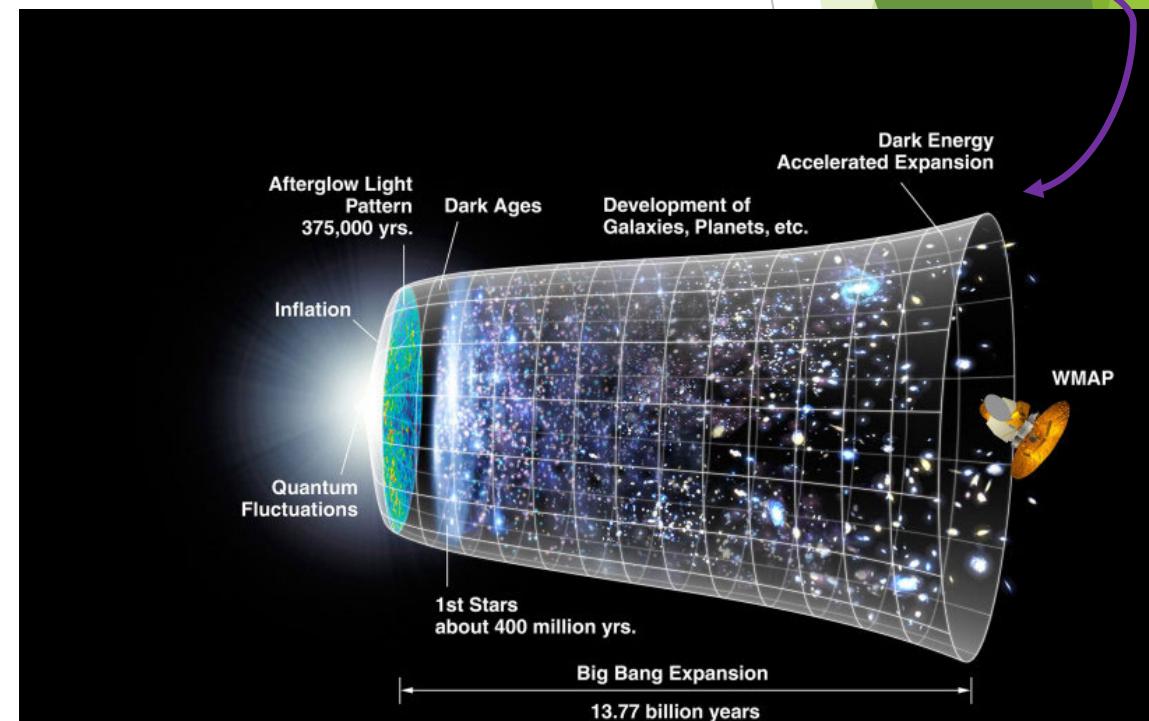
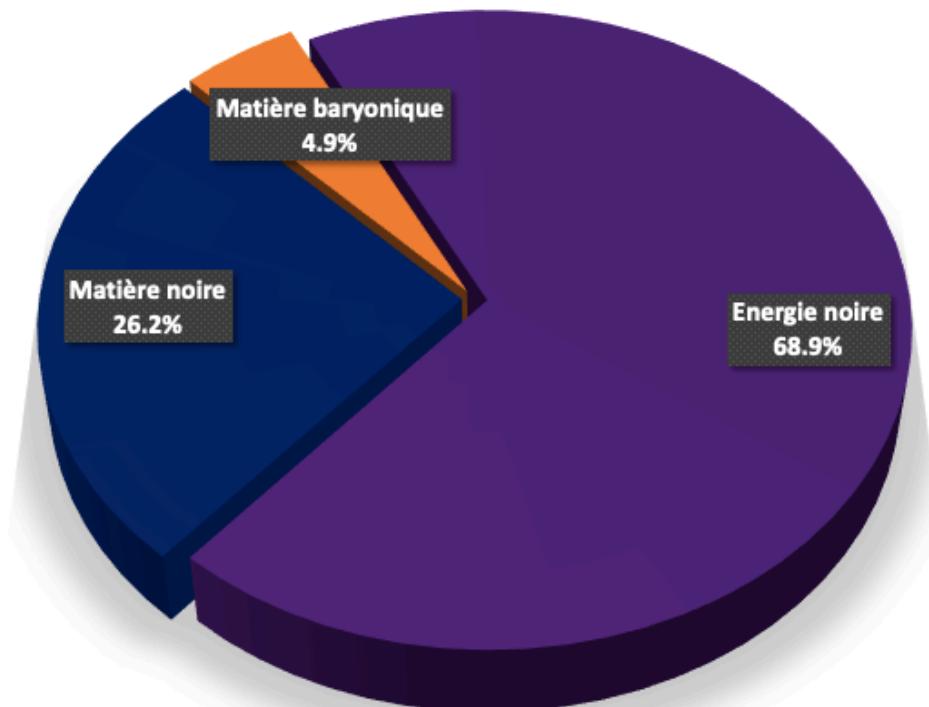
Les mocks

Analyse des mocks

Etude des systématiques

I. Introduction

- Λ CDM : modèle à 6 paramètres fondé sur la relativité générale
- 3 composantes de l'univers actuel
 - matière baryonique
 - matière noire
 - énergie noire

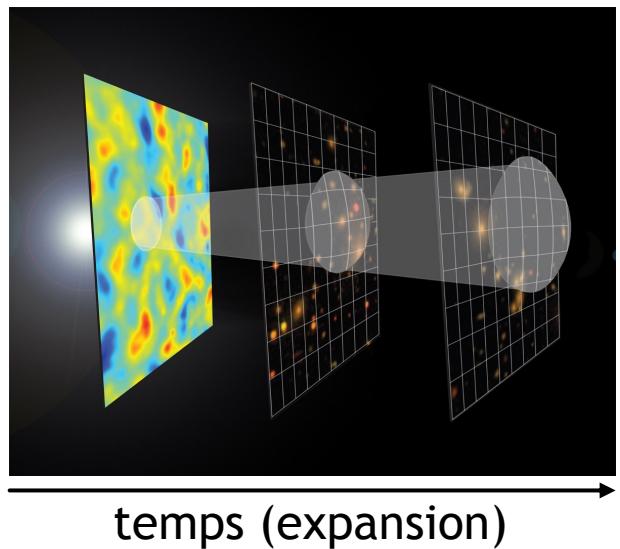


I. Introduction

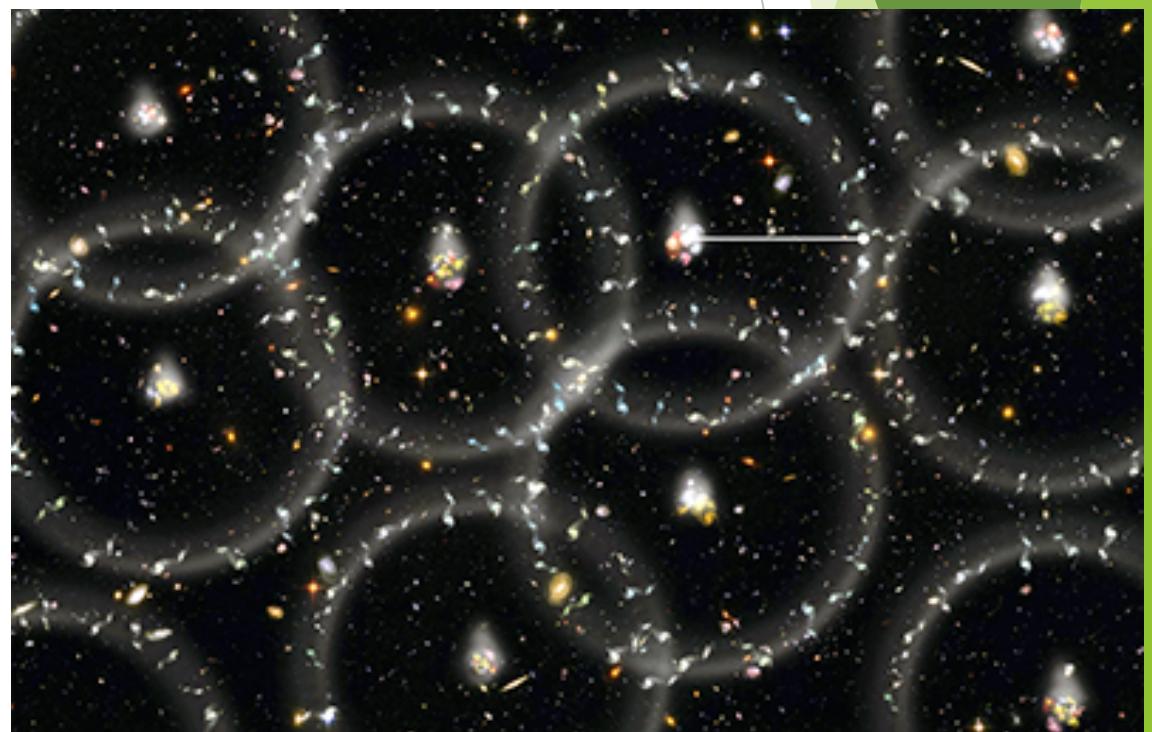
- Comment étudier l'histoire de l'expansion de l'univers ?
→ Les oscillations acoustiques de baryons (BAO)

plasma photons + baryons
(+ matière noire)
→ ondes acoustiques

Mesure de l'expansion :



BAO = échelle standard
(~100 Mpc/h comobiles)



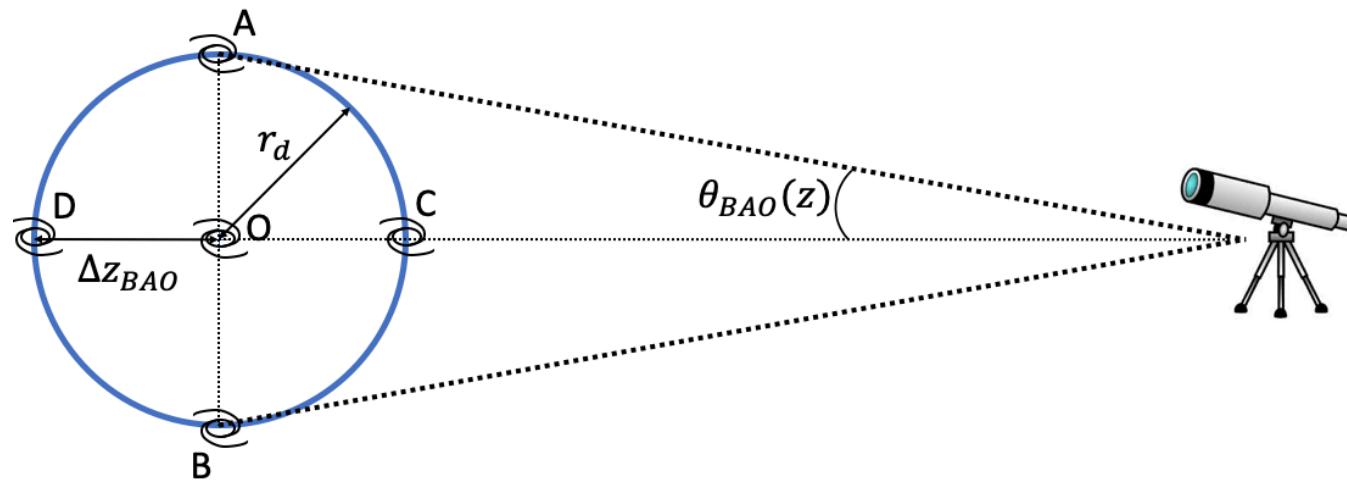
Crédits : Edward L. Wright

I. Introduction

- Mesurer l'échelle BAO :

Distribution de masse via des traceurs (galaxies) → 2 rapports de distance :

- $\Delta\theta_{BAO} = r_d/D_M$ (transverse)
- $\Delta z_{BAO} = r_d/D_H$ (radiale)



Cosmologie « fiduciel » :

$$\Delta\theta, \Delta z \rightarrow h^{-1}\text{Mpc}$$

→ Mesure les déviations :

$$\begin{aligned} - \alpha_{\parallel} &= \frac{D_H/r_d}{(D_H/r_d)_{fiduciel}} \\ - \alpha_{\perp} &= \frac{D_M/r_d}{(D_M/r_d)_{fiduciel}} \end{aligned}$$

I. Introduction

- Fonction de corrélation de la matière

contraste de densité :

$$\delta(\vec{x}) = \frac{\rho(\vec{x})}{\bar{\rho}} - 1$$

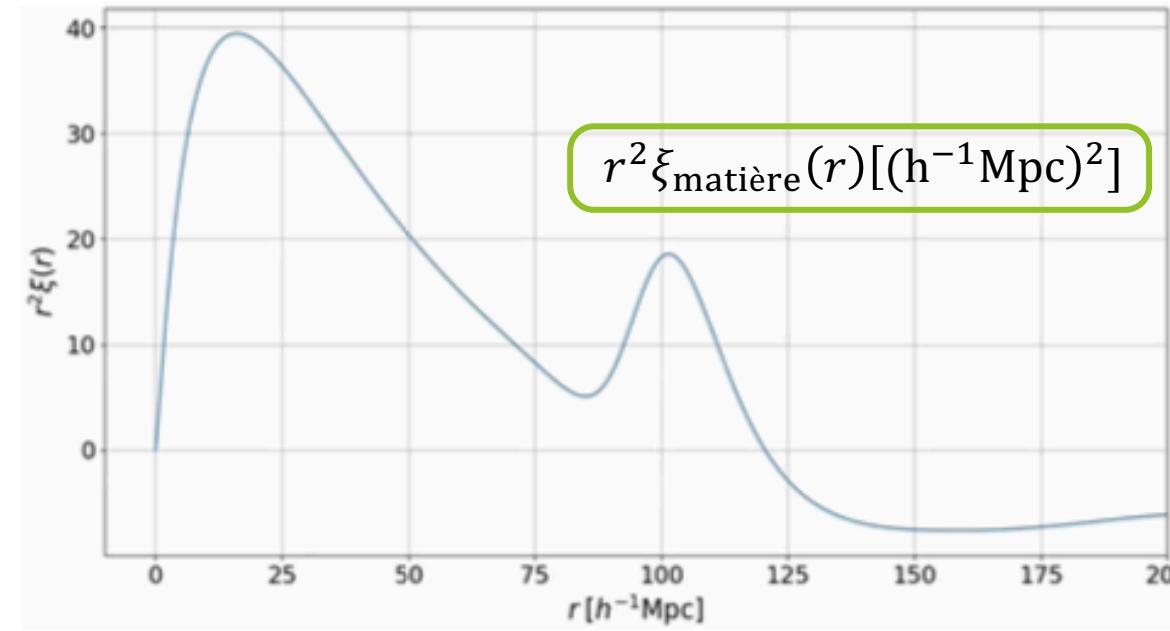
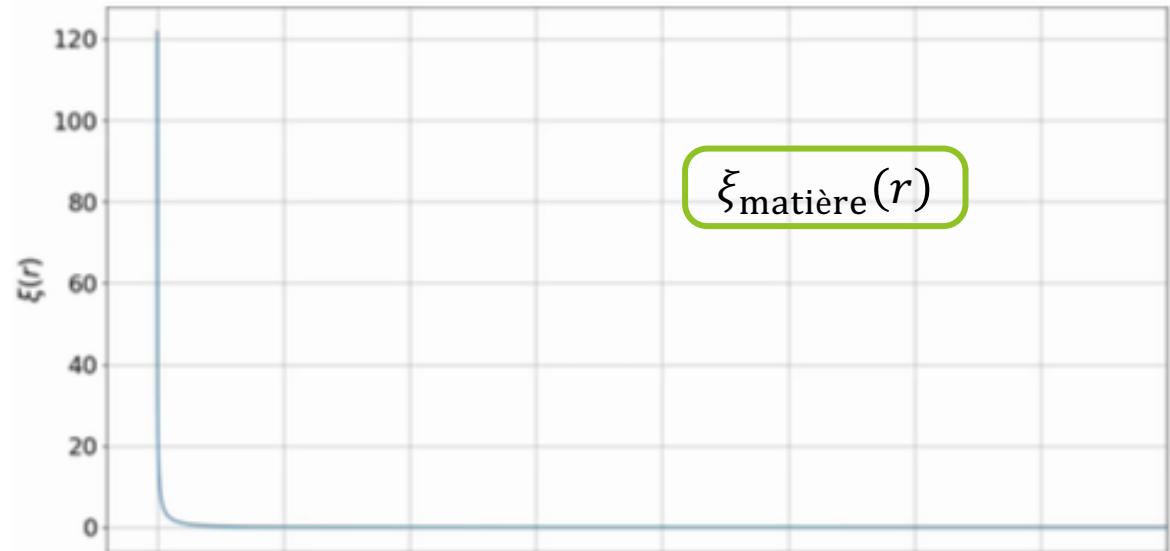
fonction de corrélation :

$$\xi(\vec{r}) = \langle \delta(\vec{x}) \delta(\vec{x} + \vec{r}) \rangle_x$$

Comment estimer $\delta_{\text{matière}}(\vec{x})$?
→ **traceurs** (galaxies,...)

$$\delta_i = b_i \delta_{\text{matière}}$$

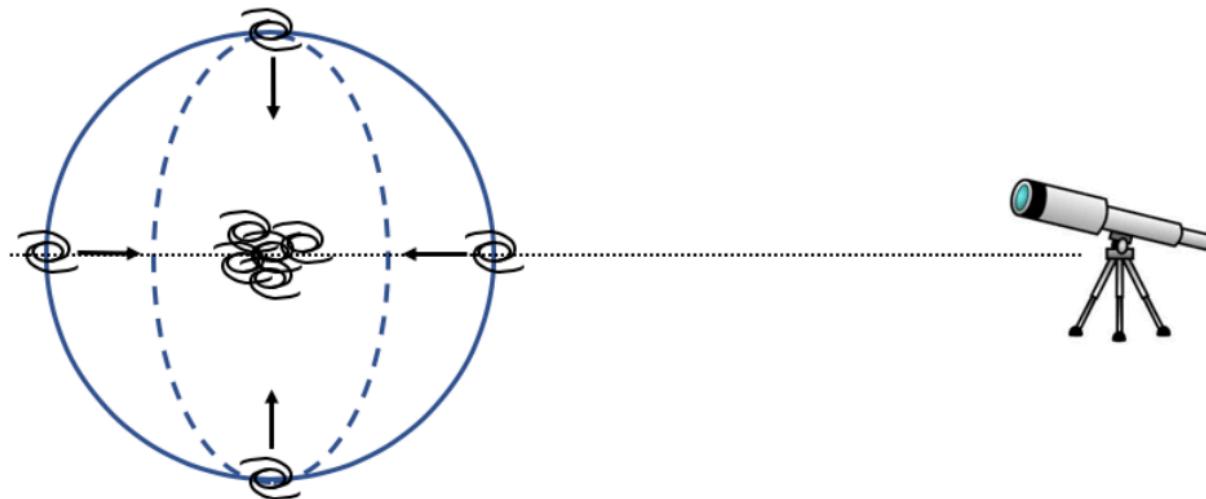
→
biais linéaire du traceur i



I. Introduction

- Les RSD (redshift space distortions)

$$z_{\text{mesure}} = z_{\text{cosmo}} + \frac{v_{\parallel}}{c}$$



→ Analyses RSD :
tests des théories de gravité

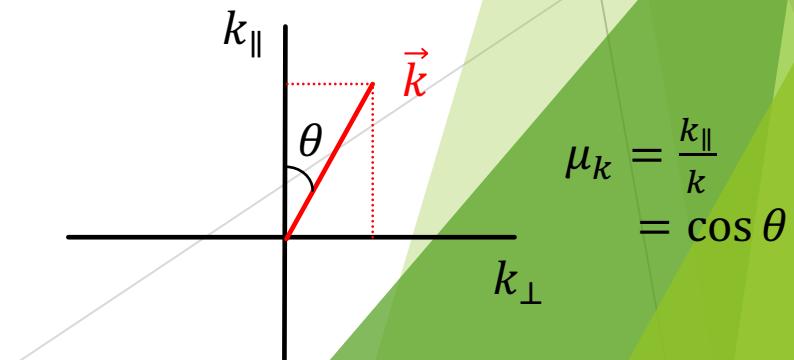
Les structures sphériques sont « aplatis » dans l'espace des redshifts

à petit k (grande échelle) :

$$\delta_i^s(\vec{k}) = b_i(1 + \beta_i \mu_k^2)\delta_{\text{matière}}(\vec{k}) \quad (\text{Kaiser 1987})$$

biais

paramètre RSD



I. Introduction

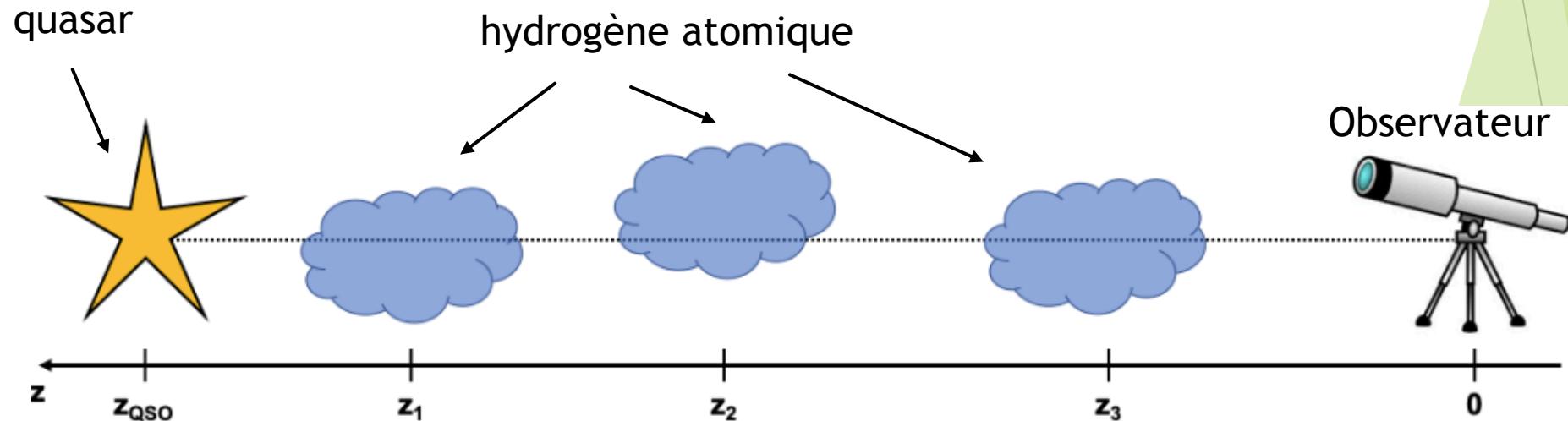
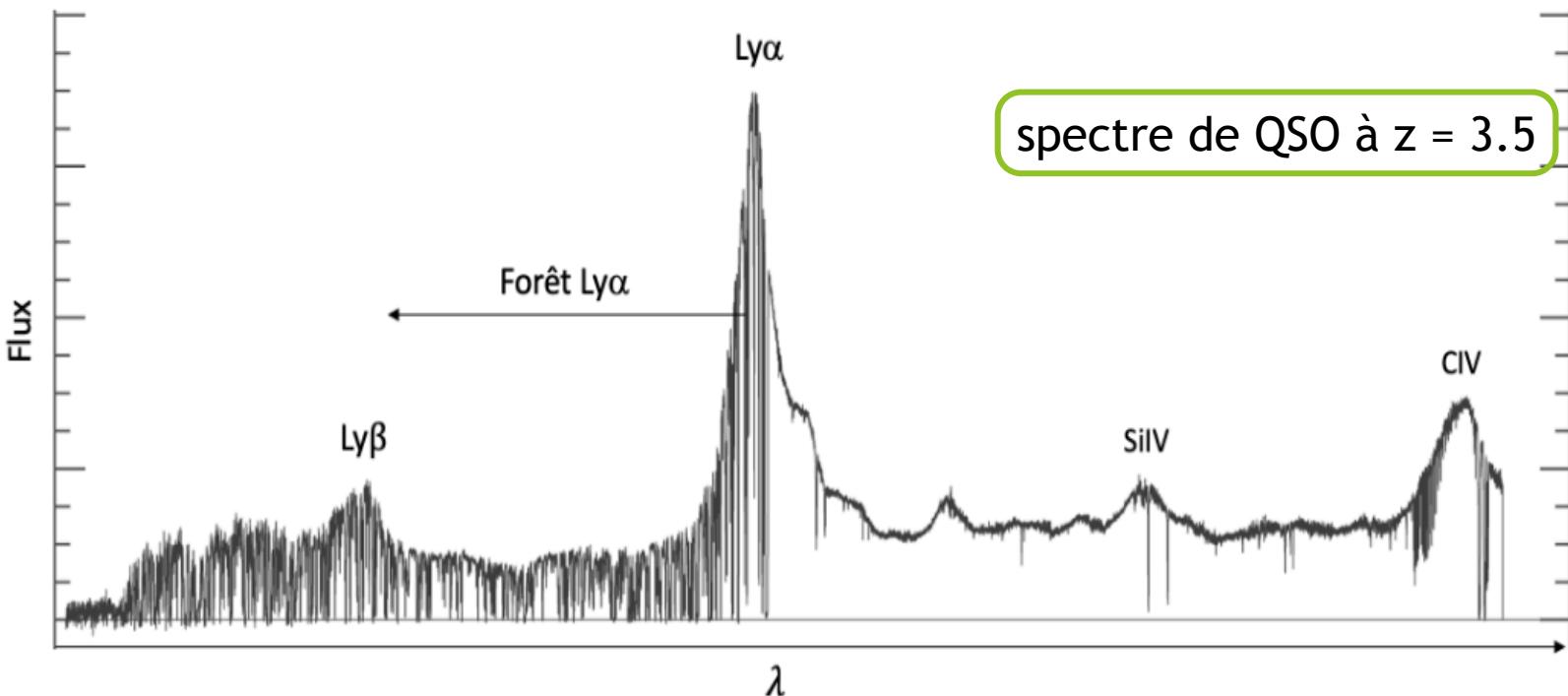
- La forêt Lyman-alpha (Ly α)

raie atomique de l'hydrogène

transition Ly α : $\lambda_{\text{Ly}\alpha} = 1215.67 \text{ \AA}$

transition Ly β : $\lambda_{\text{Ly}\beta} = 1025.72 \text{ \AA}$

$$\lambda_{\text{obs}} = (1 + z_{\text{abs}})\lambda_{\text{Ly}\alpha}$$



I. Introduction

- Le relevé eBOSS de SDSS-IV

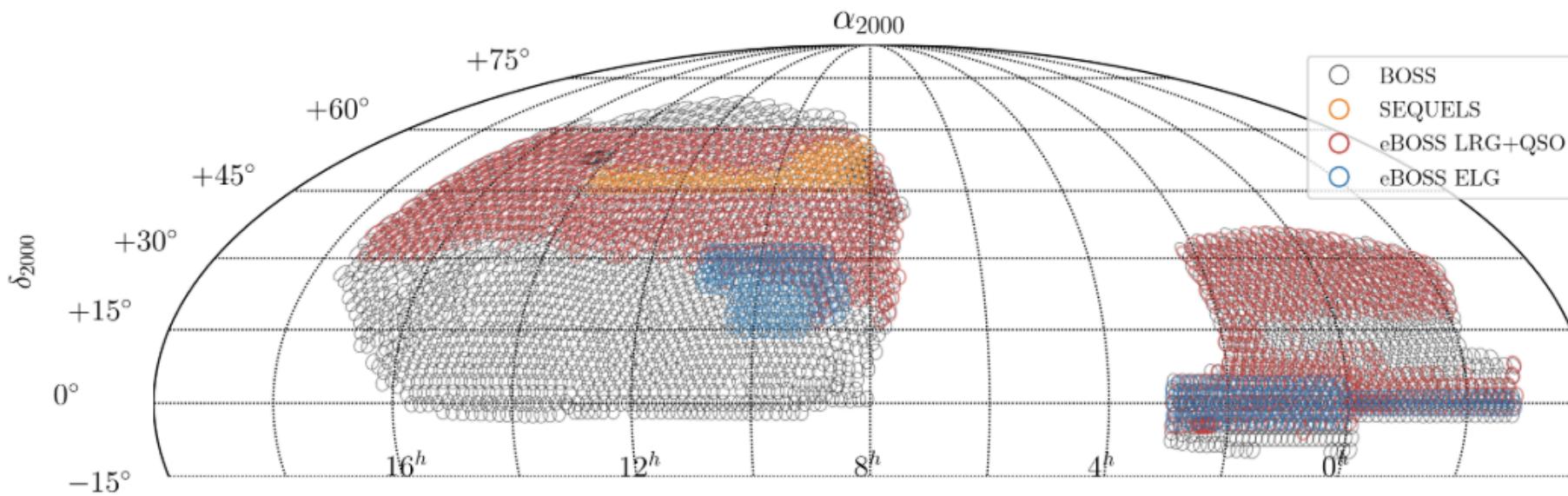
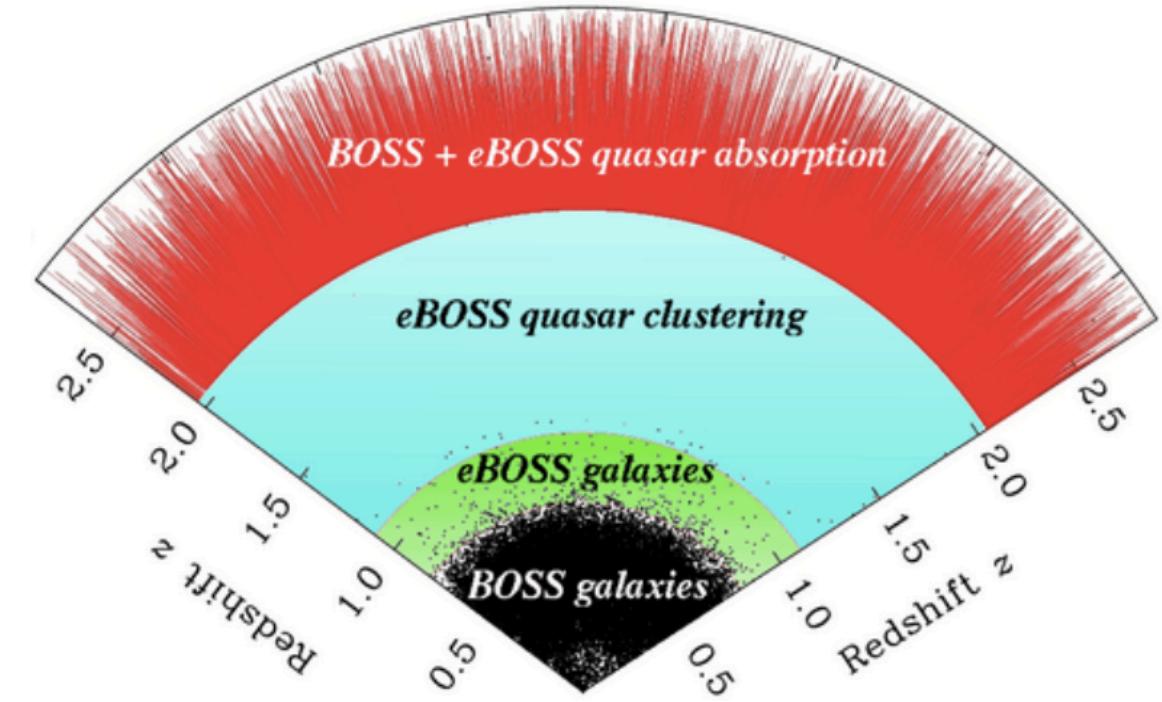
10 ans d'observation Ly α (2009-2014 : BOSS

+ 2014 - 2019 : eBOSS)

→ plus de 210 000 quasars Ly α à $z > 2.1$

sur $\sim 10\,000 \text{ deg}^2$ ($\sim 21/\text{deg}^2$)

→ mesure de $\alpha_{\parallel}(3\%)$ et $\alpha_{\perp}(5\%)$

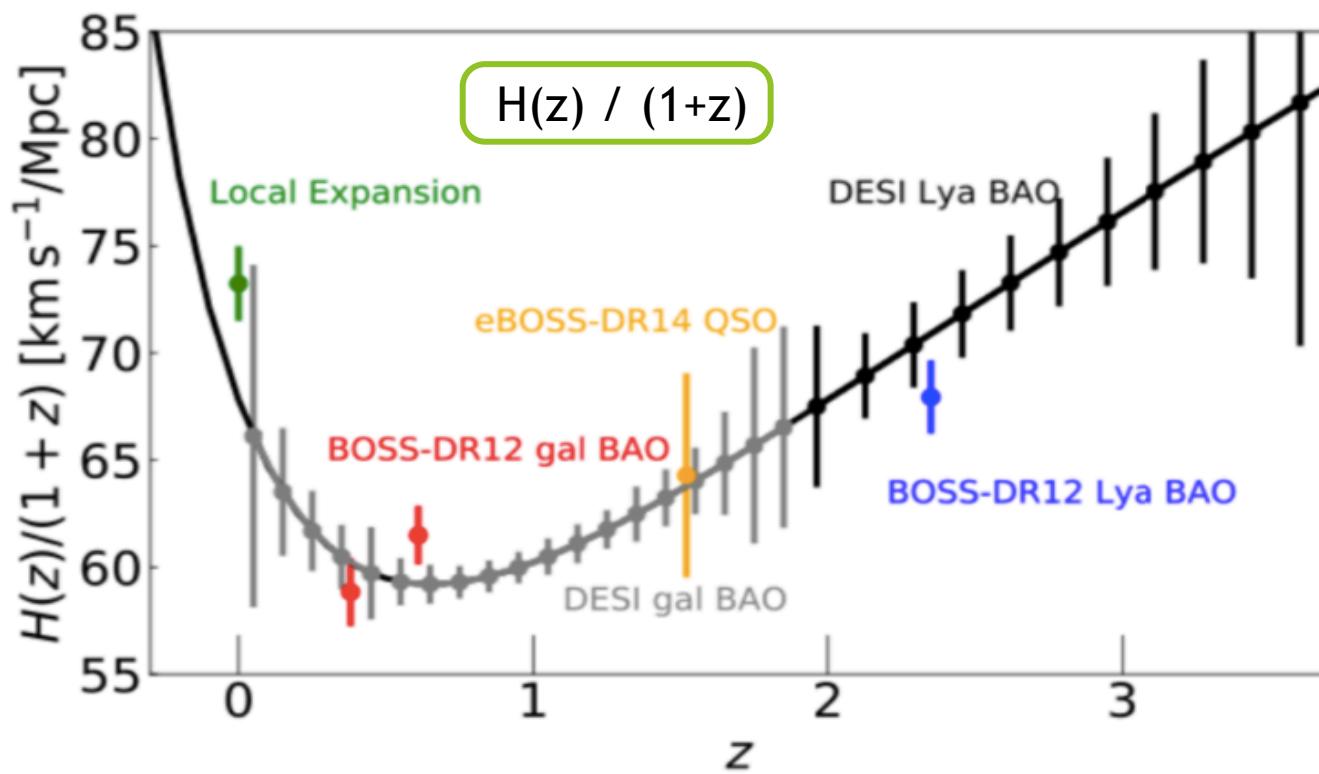
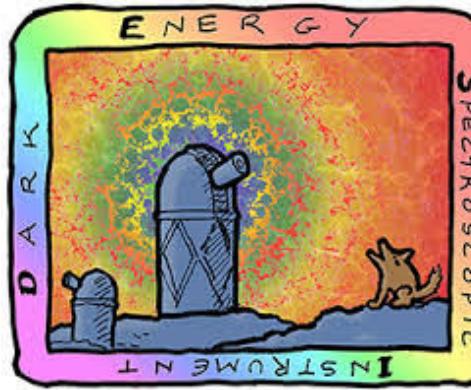


I. Introduction

- Le relevé DESI

expérience stage 4

~ 14 000 deg², 50 quasars Ly α / deg² z > 2.1



Grande précision statistique
→ Bon contrôle des systématiques

Simulations qui reproduisent les données (mocks)
→ test de l'analyse
→ étude des systématiques

Sommaire

- I
- II
- III
- IV
- V

Introduction

Analyse des données

Les mocks

Analyse des mocks

Etude des systématiques

II. Analyse des données eBOSS

- eBOSS DR16 (du Mas des Bourboux et al 2020) :

Analyse BAO à $z_{\text{eff}} = 2.334$

- Pour les mocks :

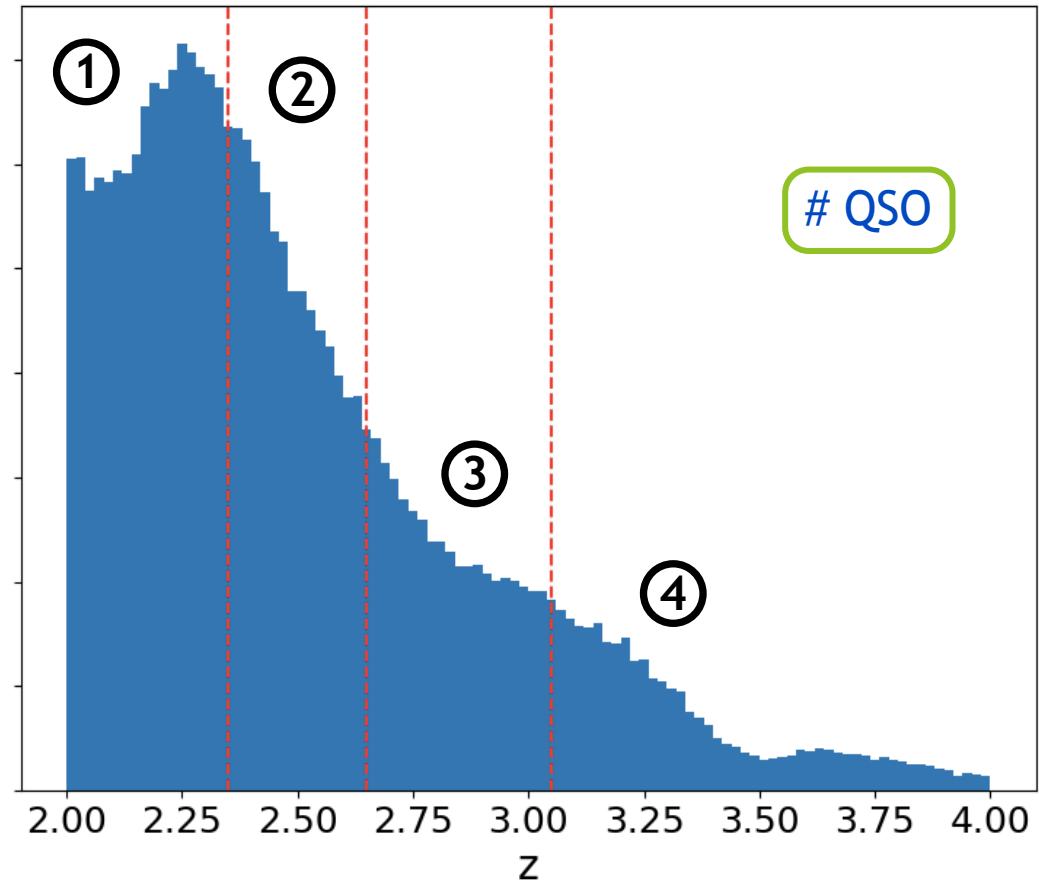
besoin de $b_{\text{Ly}\alpha}(z)$ et $\beta_{\text{Ly}\alpha}(z)$

$$\delta_F^s(\vec{k}) = b_{\text{Ly}\alpha}(1 + \beta_{\text{Ly}\alpha} \mu^2) \delta_{\text{matière}}(\vec{k}) \quad (\text{Kaiser 1987})$$

biais

paramètre RSD

→ Analyse en 4 bins en z



II. Analyse des données eBOSS

- Calcul de δ_F

$$\delta_F(\lambda) = \frac{f_q(\lambda)}{\bar{F}(\lambda)C_q(\lambda_{RF})} - 1$$

flux

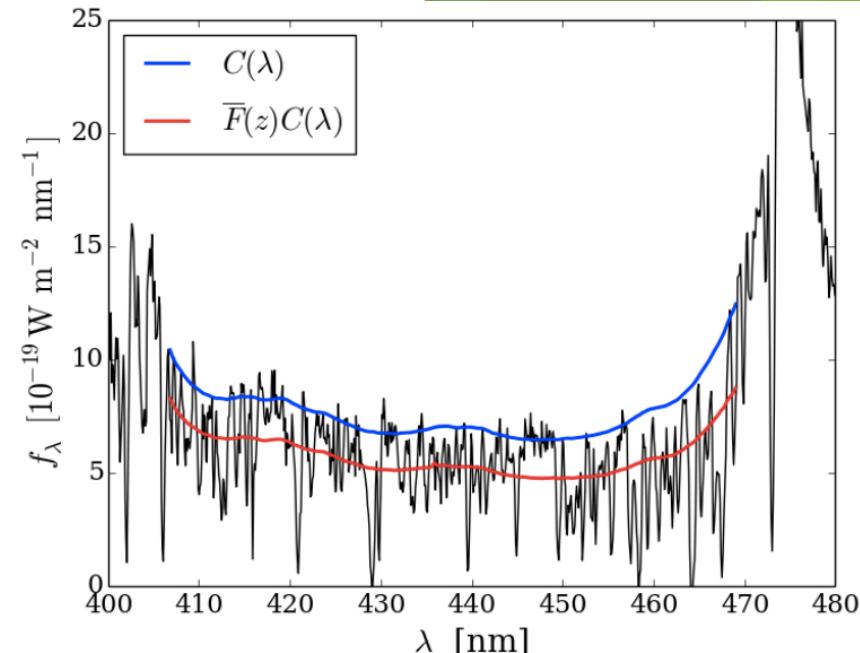
transmission moyenne

continuum du quasar q

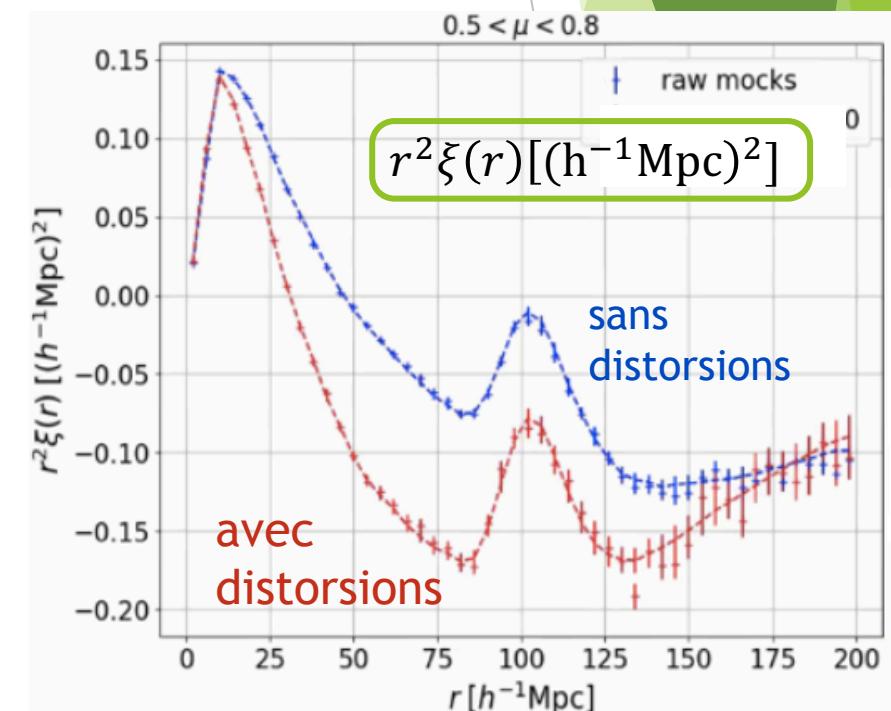
$\bar{F}(\lambda)C_q(\lambda_{RF})$ ajusté pour chaque quasar q

- chaque δ_F : combinaison linéaire des δ_F de la forêt
- distorsions dans la fonction de corrélation
- distorsions modélisées avec la matrice de distortion

(Bautista et al. 2017)



Crédits : Bautista et al 2017
0.5 < μ < 0.8



II. Analyse des données eBOSS

- Calcul des corrélations

Auto-corrélation Ly α x Ly α :

$$\hat{\xi}_A = \frac{\sum_{(i,j) \in A} w_i w_j \delta_i \delta_j}{\sum_{(i,j) \in A} w_i w_j}$$

A : bin en séparation

w_i : poids (bruit des pixels)

- + matrice de covariance
- + matrice de distorsion

II. Analyse des données eBOSS

- Modélisation des corrélations → mesure BAO ($\alpha_{\parallel}, \alpha_{\perp}$)

$$P_{\text{modèle}}(\vec{k}) = b_{\text{Ly}\alpha}^2 (1 + \beta_{\text{Ly}\alpha} \mu_k^2)^2 P_{QL}(\vec{k}) F_{NL}(\vec{k}) G(\vec{k})$$

biais et paramètre RSD
de l'absorption Ly α

spectre de puissance
quasi-linéaire

non-linéarités des
petites échelles

binning de la
fonction de corrélation

II. Analyse des données eBOSS

- Modélisation des HCD (High Column Density systems)

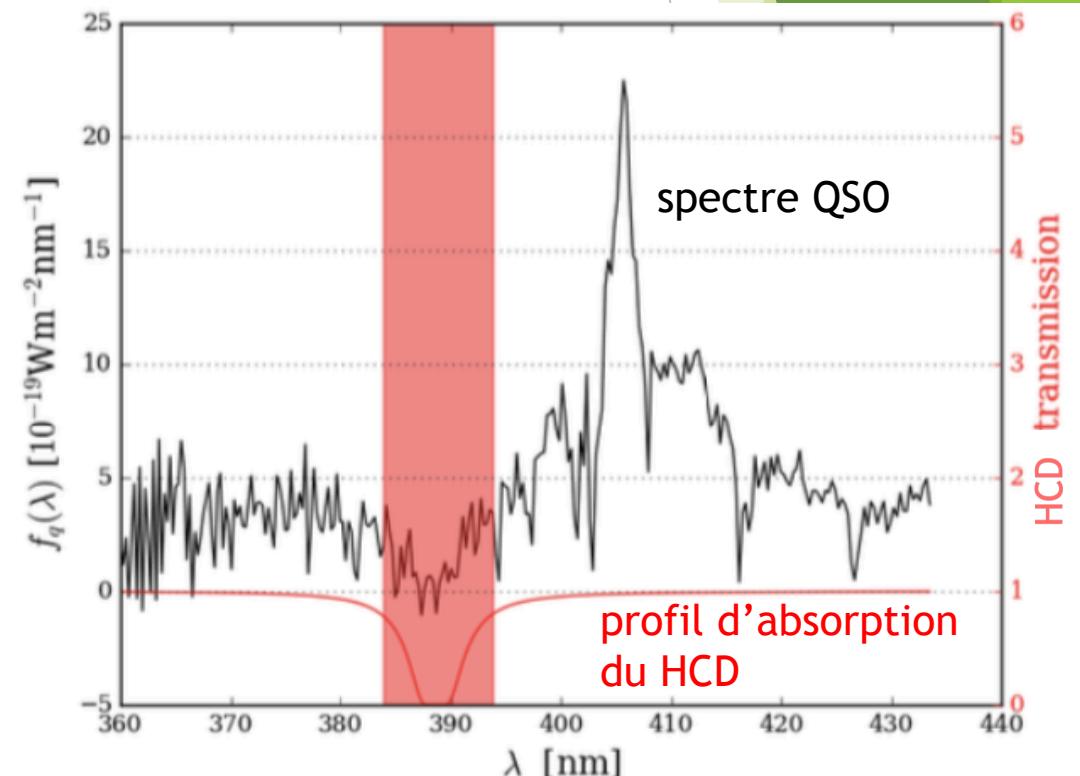
HCD avec densité de colonne $\log n_{HI} > 20.3$ masqués

HCD avec densité de colonne $\log n_{HI} < 20.3$ modélisés

Contribution du Ly α et des HCD au biais :

$$b'_{\text{Ly}\alpha} = b_{\text{Ly}\alpha} + b_{\text{HCD}} F_{\text{HCD}}(k_{\parallel}) \quad (\text{Rogers et al 2018})$$
$$F_{\text{HCD}}(k_{\parallel}) = \exp(-L_{\text{HCD}} k_{\parallel})$$

L_{HCD} : taille caractéristique des HCD non masqués fixée à 10 Mpc/h
(voir section V.)



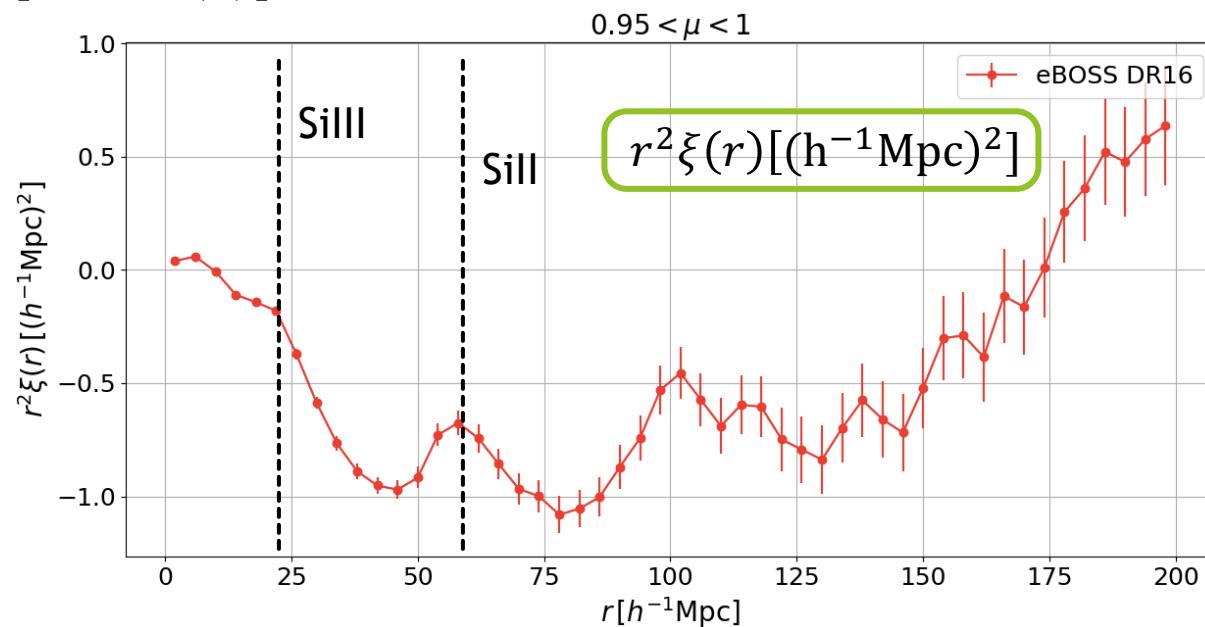
II. Analyse des données eBOSS

- Modélisation de la corrélation Ly α x Ly α

$$\xi = \xi_{\text{Ly}\alpha \times \text{Ly}\alpha} + \sum_{m,n} \xi_{m \times n} + \xi_{\text{ciel}}$$

FFT $[P_{\text{modèle}}(\vec{k})]$

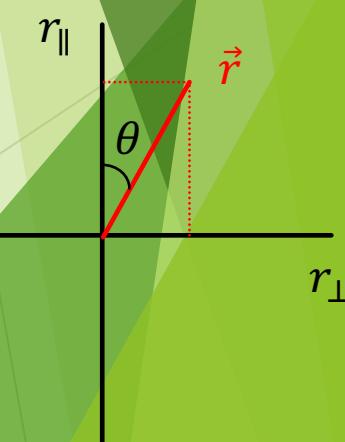
corrélations des métaux



- $0.95 < \mu < 1$ données eBOSS

avec $\mu = \frac{r_{\parallel}}{r} = \cos(\theta)$

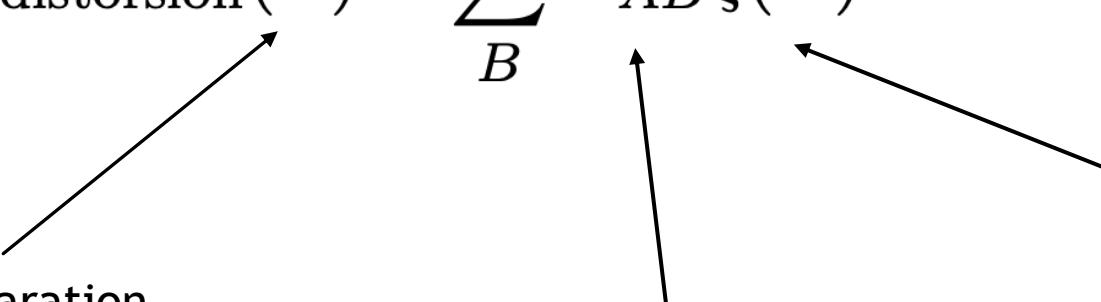
corrélations induites par la soustraction du fond du ciel



II. Analyse des données eBOSS

- Modélisation des distorsions

Modèle distordu ajusté à la corrélation estimée à partir des données :

$$\xi_{\text{distortion}}(A) = \sum_B D_{AB} \xi(B)$$


A, B : bins en séparation

Matrice de distortion

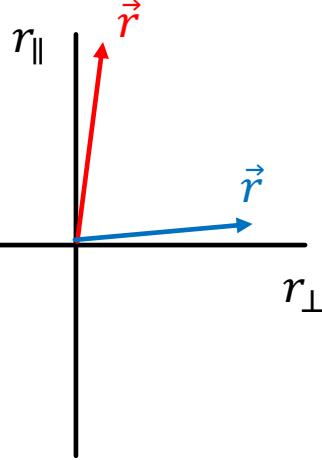
modèle non distordu

II. Analyse des données eBOSS

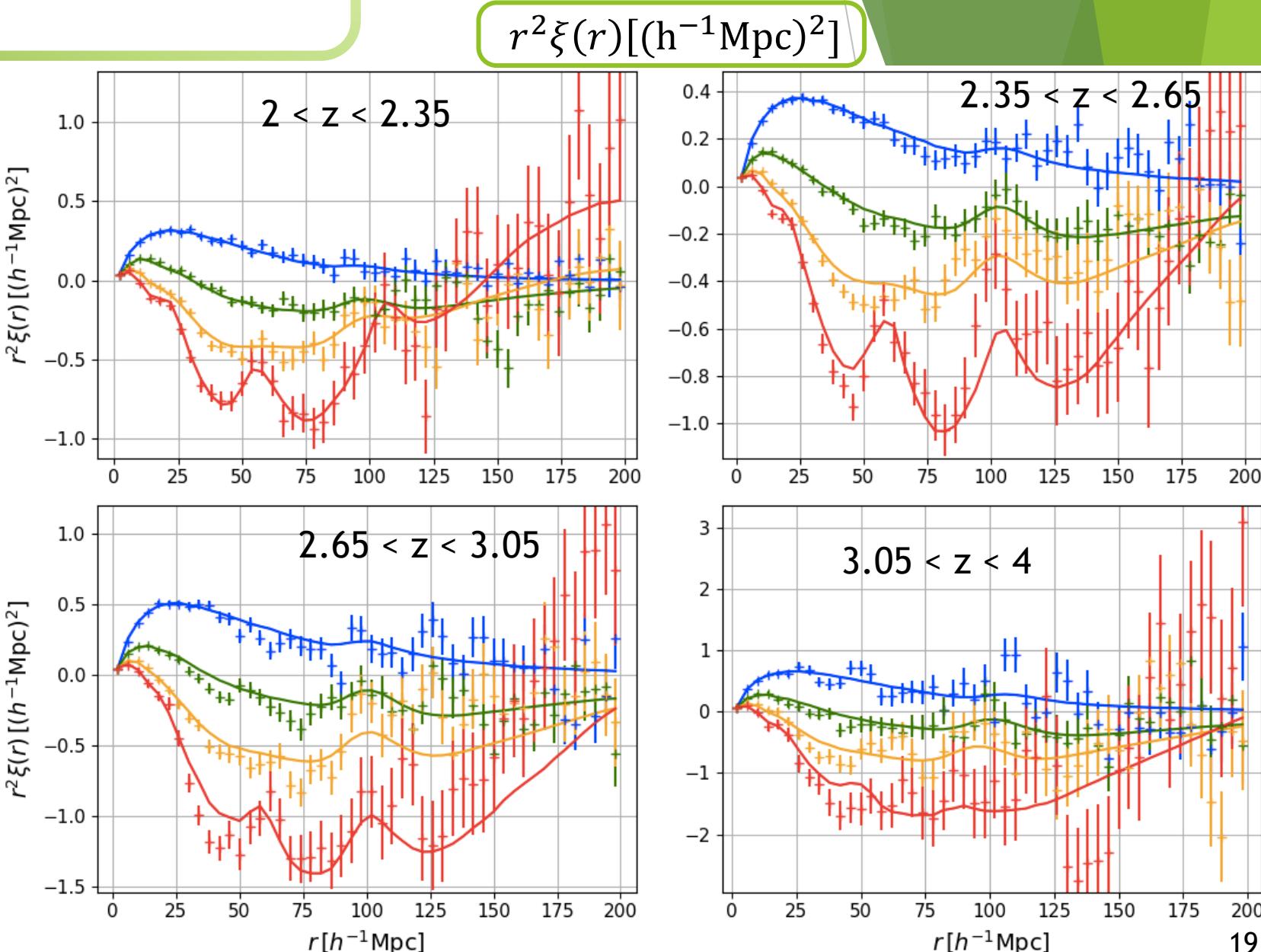
- Calculs des deltas, corrélations, covariances, ...
+ ajustements faits avec picca

- 4 bins en z

- eBOSS DR16



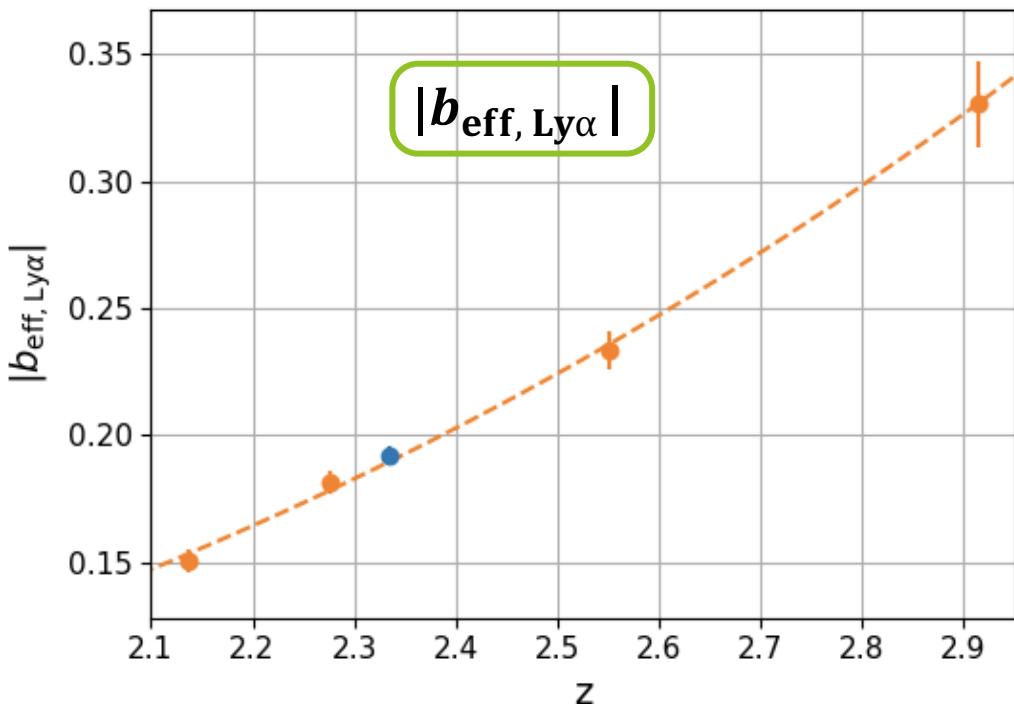
$0 < \mu < 0.5$
 $0.5 < \mu < 0.8$
 $0.8 < \mu < 0.95$
 $0.95 < \mu < 1$



II. Analyse des données eBOSS

- Les mocks : besoin de $b_{\text{eff, Ly}\alpha}(z)$ et $\beta_{\text{Ly}\alpha}(z)$
- input = ajustement des 4 mesures par $A(1 + z)^\gamma$

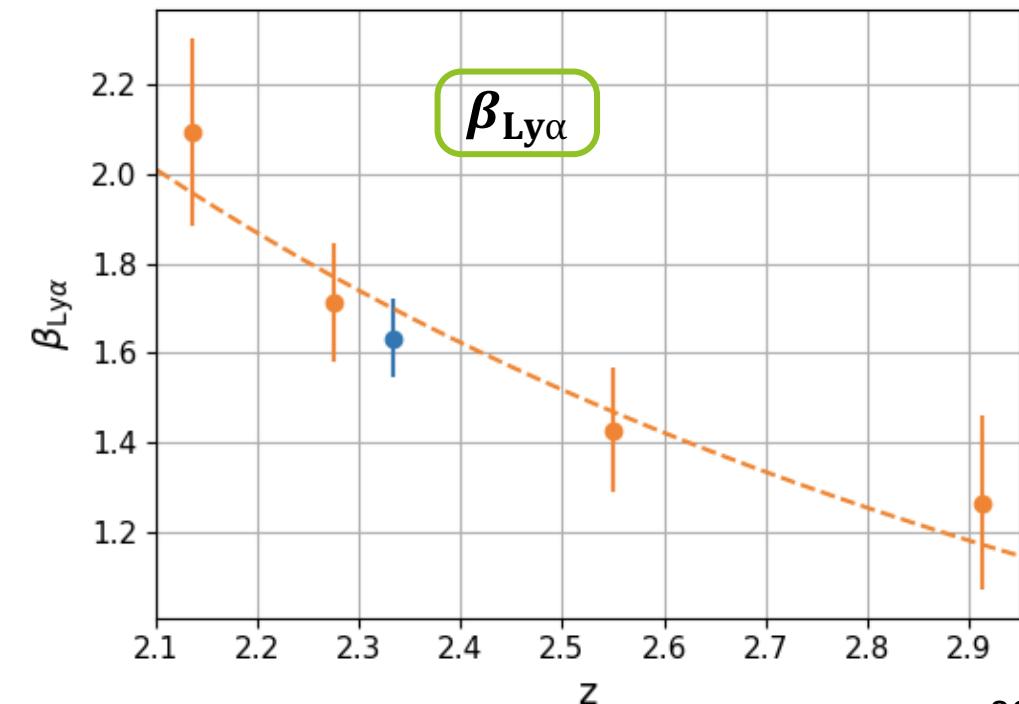
- mon analyse
- $A(1 + z)^\gamma$
- du Mas des Bourboux et al 2020



- $\xi_0 \propto b_{\text{eff, Ly}\alpha}^2$
- biais effectif :

$$b_{\text{eff, Ly}\alpha} = b_{\text{Ly}\alpha} \sqrt{1 + 2/3 \beta_{\text{Ly}\alpha} + 1/5 \beta_{\text{Ly}\alpha}^2}$$

(Hamilton 1992)



Sommaire

- I
- II
- III
- IV
- V

Introduction

Analyse des données

Les mocks

Analyse des mocks

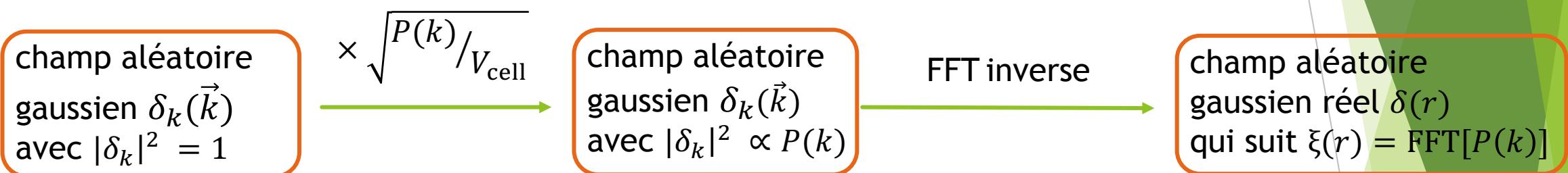
Etude des systématiques

III. Les mocks : définition et objectifs

- Simulations des données : un relevé de QSO dont les forêts Ly α possèdent les bonnes fonctions de corrélations
- Pas N-body, mais champs aléatoires gaussiens (GRF) : beaucoup plus rapide
- Objectifs :
 - tester l'analyse
 - identifier les potentielles systématiques
 - vérifier l'estimation de la matrice de distorsions
 - vérifier l'estimation de la matrice de covariance

III. Les mocks : idée générale

- Idée générale



- Objectif

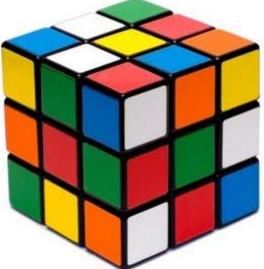
$$\xi_F(r, z) = \text{FFT} \left[b_{\text{Ly}\alpha}^2(z) \left(1 + \beta_{\text{Ly}\alpha}(z) \mu_k^2 \right)^2 G^2(z) P_{\text{linéaire}}(k, z=0) \right]$$

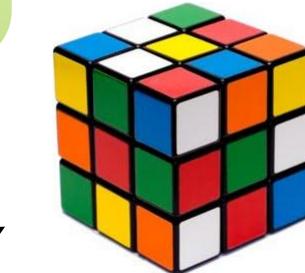
facteur de croissance des structures

Toute la physique dans la formule $\rightarrow P_{\text{linéaire}}(k, z=0)$ & $b_{\text{Ly}\alpha}(z)$ & $\beta_{\text{Ly}\alpha}(z)$

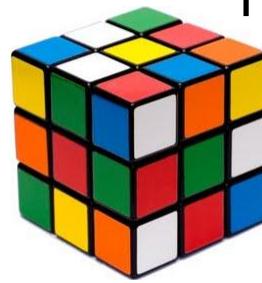
III. Construction des mocks

- Les boîtes

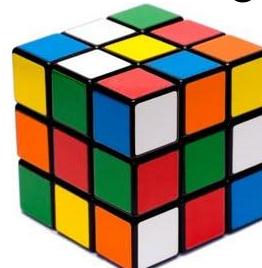
1 GRF : δ_k

2560x2560x1536
 $2.19 \text{ h}^{-1}\text{Mpc}$



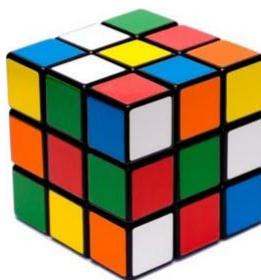
3 champs log-normaux : δ_{QSO}
→ quasars



1 densité : $\delta_{\text{matière}}$
→ Ly α



3 vitesses : v_i
→ RSD



6 gradients de vitesse : η_{ij}
→ RSD

1 boîte $\delta_k \rightarrow 13$ boîtes dans l'espace réel

$$\times \sqrt{P(k)/V_{\text{cell}}} \\ + \\ \text{FFT inverse}$$

III. Construction des mocks

- Le Ly α

$$\delta_{\text{matière}} = \text{FFT}^{-1} \left[\delta_k \times \sqrt{P_{\text{matière}}(k) / V_{\text{cell}}} \right]$$

$\rightarrow F = \exp(-\tau)$ avec $\tau = a \exp[b G(z) \delta_{\text{matière}}]$ (FGPA)

- Les vitesses

$$v_n(\vec{k}) = \frac{ik_n}{k^2} a H f \delta_k(\vec{k}) \quad ; \quad n \in [x, y, z]$$

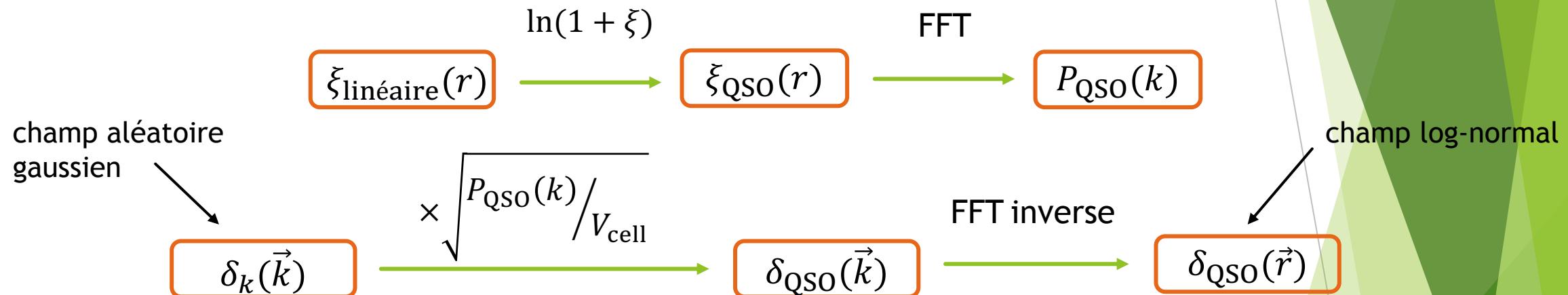
- Les gradients de vitesse

$$\eta_{nm}(\vec{k}) = \frac{k_n k_m}{k^2} f \delta_k(\vec{k}); \quad (n, m) \in [x, y, z]^2$$

Même boîte δ_k

III. Construction des mocks

- Les quasars : tirés aléatoirement avec $P \propto \exp(\delta_{\text{QSO}})$



3 champs log-normaux δ_{QSO} à $z_1 = 1.9$, $z_2 = 2.75$, $z_3 = 3.6$ combinés

→ 1 champ $\delta_{\text{QSO}}(z)$: correct $b_{\text{QSO}}(z)$

+ déplacés selon $\Delta z = v_{\parallel}/c$ (RSD)

III. Construction des mocks

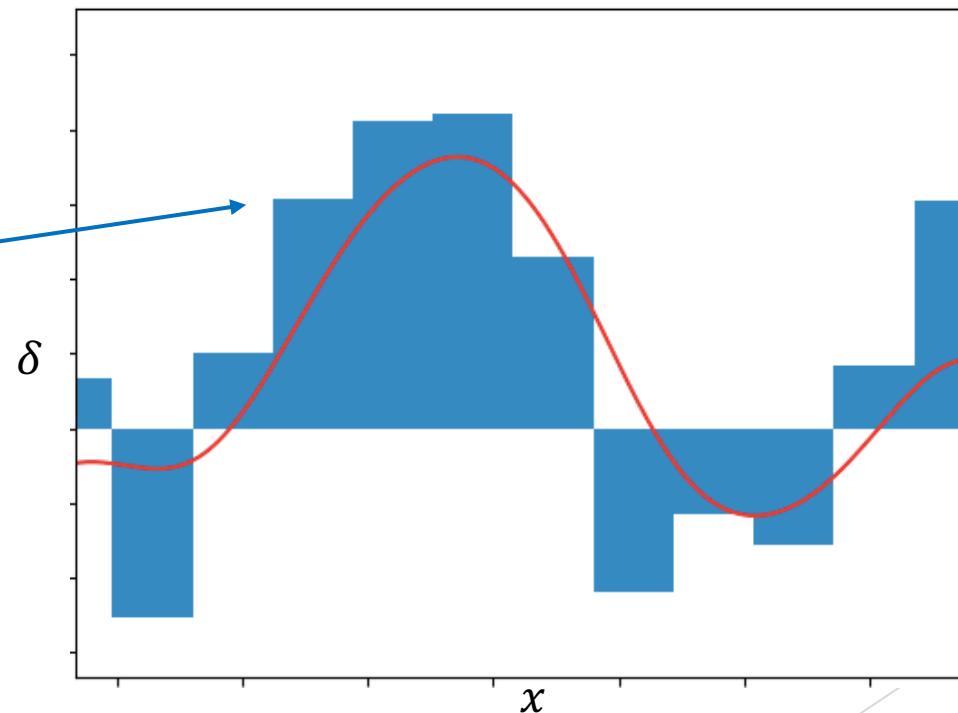
- Crédit des lignes de visée

Interpolation de la densité le long du spectre de chaque QSO

Eviter les discontinuités
à l'échelle des voxels

→ lissage gaussien avec $\sigma = 2.19 \text{ Mpc/h}$

discontinuités
→ puissance à
petite échelle



III. Construction des mocks

- Le champ d'absorption

$$F = \exp[-a(z) \exp(b(z)G(z)(\delta_l + \delta_s + c(z)\eta_{\parallel}))] \quad (\text{modification de FGPA})$$

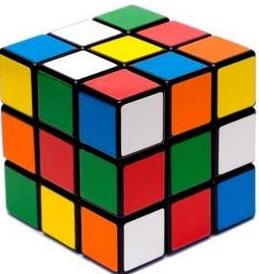
III. Construction des mocks

- Le champ d'absorption

$$F = \exp[-a(z) \exp(b(z)G(z)(\delta_l + \delta_s + c(z)\eta_{||}))] \text{ (modification de FGPA)}$$

δ_l : densité à grande échelle

correspond à la boîte $\delta_{\text{matière}}$



III. Construction des mocks

- Le champ d'absorption

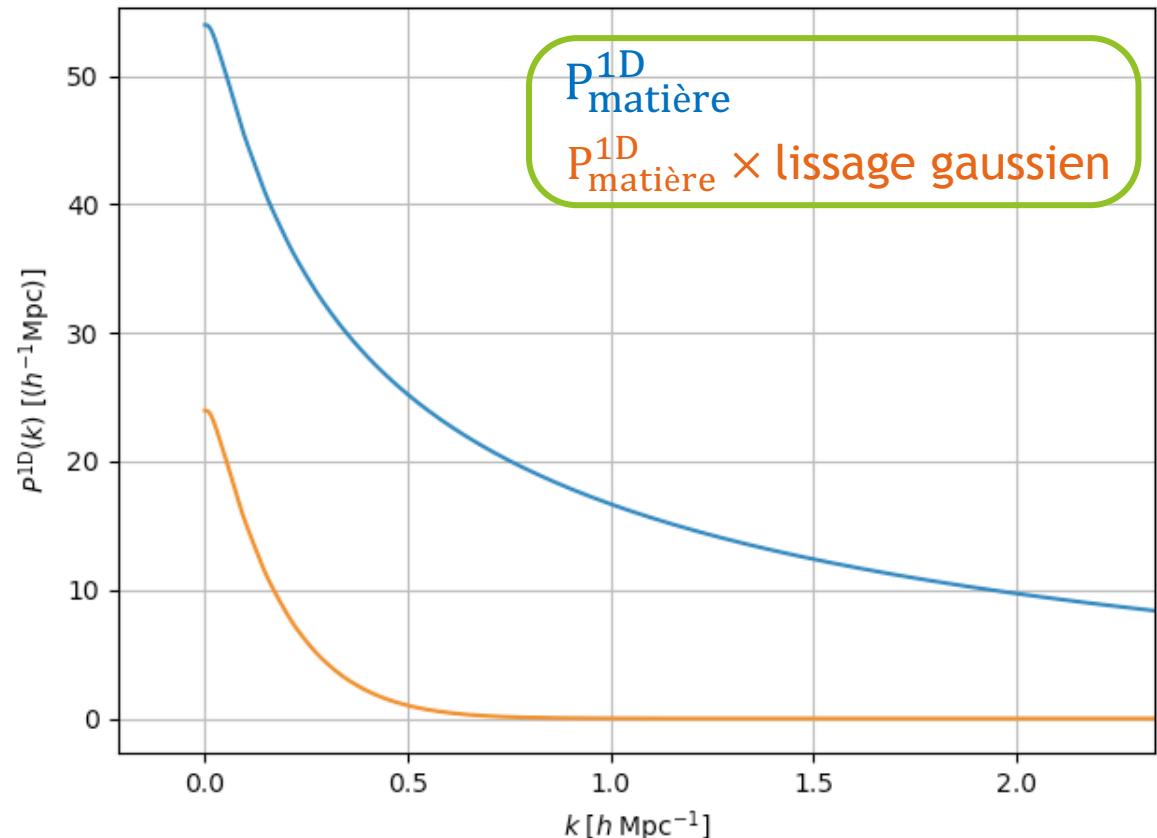
$$F = \exp[-a(z) \exp(b(z)G(z)(\delta_l + \delta_s + c(z)\eta_{\parallel}))] \quad (\text{modification de FGPA})$$

δ_l : densité à grande échelle

δ_s : densité à petite échelle

Taille des voxels + lissage gaussien
 $\rightarrow \sigma_F^2 = \int P^{1D}$ trop faible

Ajout d'un GRF δ_s indépendant sur
chaque ligne de visée qui suit $P_s(k)$
 \rightarrow pas de corrélation 3D
 $\rightarrow P^{1D}(k)$ correct $\rightarrow \sigma_F^2$ correcte



III. Construction des mocks

- Le champ d'absorption

$$F = \exp[-a(z) \exp(b(z)G(z)(\delta_l + \delta_s + c(z)\eta_{\parallel}))] \quad (\text{modification de FGPA})$$

δ_l : densité à grande échelle

δ_s : densité à petite échelle

η_{\parallel} : gradient de vitesse le long de la ligne de visée

→ produit les RSD

→ Permet d'avoir une prédition de la fonction de corrélation ξ_{pred}

$$\begin{aligned}\delta_k^s(\vec{k}) &= \delta_k(\vec{k}) + \eta_{\parallel}(\vec{k}), & (\eta_{\parallel}(\vec{k}) &= f\mu_k^2\delta(\vec{k})) \\ &= (1 + f\mu_k^2)\delta_k(\vec{k}). & (\text{Kaiser})\end{aligned}$$

III. Construction des mocks

- Le champ d'absorption

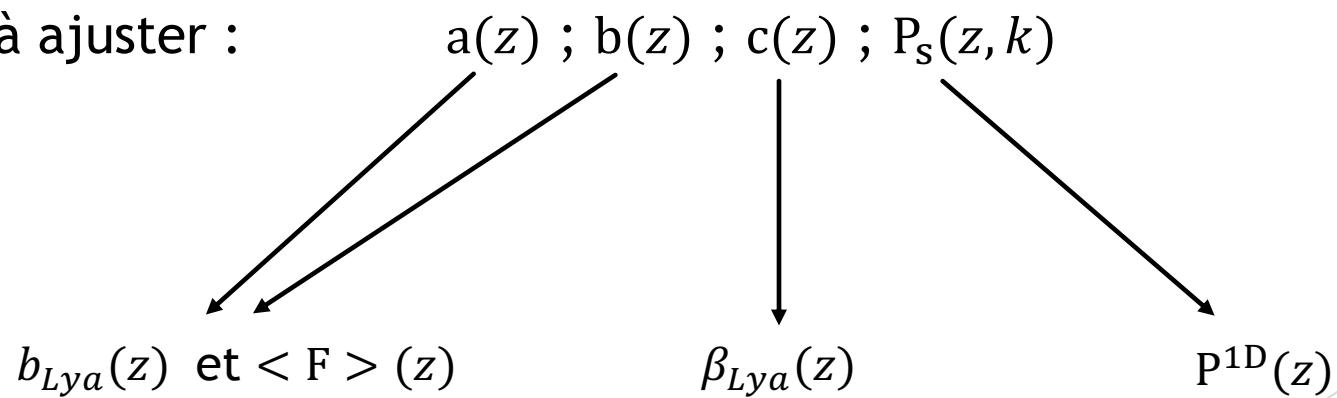
$$F = \exp[-a(z) \exp(b(z)G(z)(\delta_l + \delta_s + c(z)\eta_{\parallel}))] \quad (\text{modification de FGPA})$$

δ_l : densité à grande échelle

δ_s : densité à petite échelle

η_{\parallel} : gradient de vitesse le long de la ligne de visée

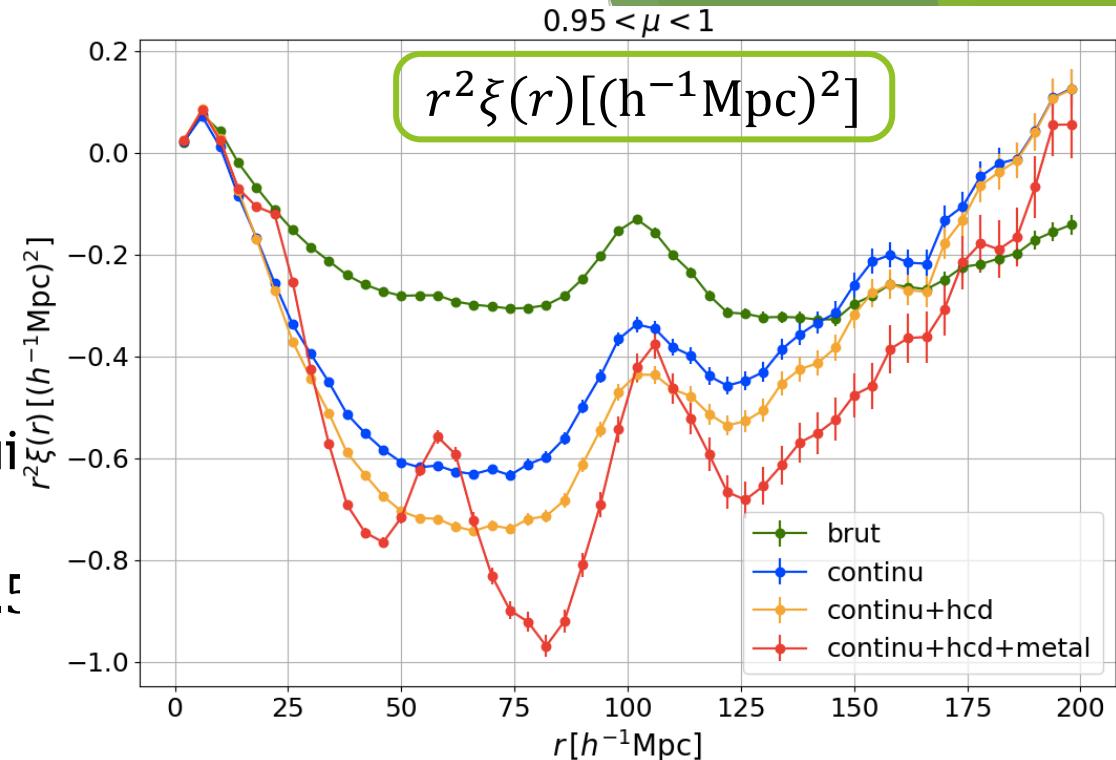
4 paramètres à ajuster :



III. Construction des mocks

- Catalogue des HCD

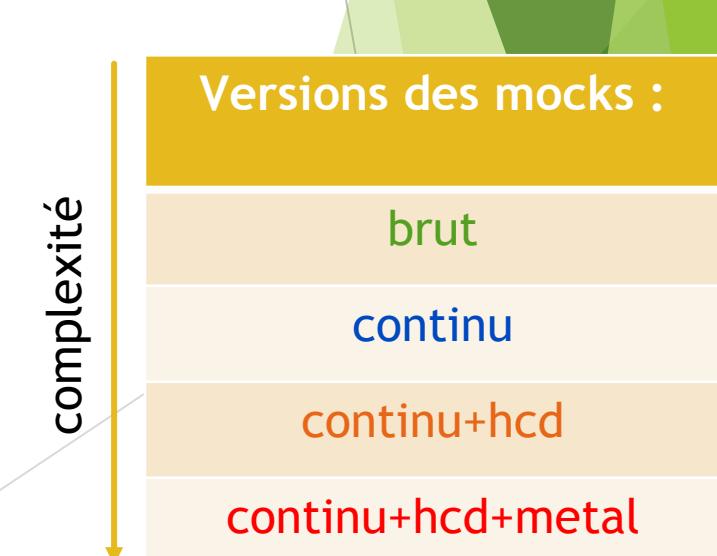
placés où $\delta_l > \delta_{min}$; δ_{min} : seuil
 + déplacés selon $\Delta z = v_{\parallel}/c$ (RSD)
 densité de colonne : $17.2 < \log n_{\text{HI}} < 22.5$



- Après la production :
 code quickquasars (González-Morales et al. in prep)

Ajoute :

- continuum + bruit de mesure
- profil d'absorption des HCD
- absorptions des métaux (même position physique mais λ différent)



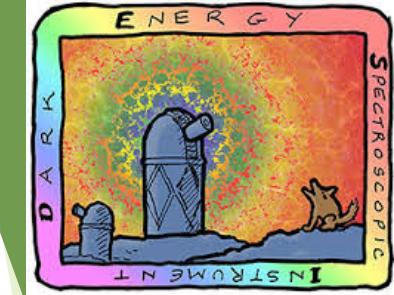
III. Ajustement des paramètres

$$F = \exp[-\textcolor{red}{a(z)} \exp(\textcolor{red}{b(z)} G(z)(\delta_l + \delta_s + \textcolor{red}{c(z)} \eta_{\parallel}))]$$

4 paramètres à ajuster : $a(z)$; $b(z)$; $c(z)$; $P_s(k, z)$
afin d'obtenir : $b_{\text{Ly}\alpha}(z)$, $\beta_{\text{Ly}\alpha}(z)$, $\langle F \rangle(z)$ et $P^{1D}(z)$

- Procédure itérative effectuée pour :
 $z_1 = 1.8$; $z_2 = 2.2$; $z_3 = 2.6$; $z_4 = 3.0$; $z_5 = 3.6$
- Utilisation de la prédiction de la corrélation des mocks ξ_{pred}
→ beaucoup plus rapide
- Première itération correcte → seulement quelques itérations nécessaires

III. Production des mocks



Production en 2 temps :

- 1) boîtes + lignes de visées → pré-production
- 2) appliquer FGPA → post-production

Pré-production : CPU intensif

Post-production : rapide

100 réalisations pré-produites
50 réalisations post-produites



Sommaire

- I
- II
- III
- IV
- V

Introduction

Analyse des données

Les mocks

Analyse des mocks

Etude des systématiques

IV. Analyse des mocks

Corrélations → 4 bins en z

Même modélisation que pour les données :

$$\bullet P_{\text{modèle}}(\vec{k}) = b_i^2 (1 + \beta_i \mu_k^2)^2 P_{QL}(\vec{k}) \cancel{F_{NL}}(\vec{k}) G(\vec{k})$$

- HCD avec densité de colonne $\log n_{HI} > 20.3$ masqués
- HCD avec densité de colonne $\log n_{HI} < 20.3$ modélisés

$$\bullet \xi = \xi_{\text{Ly}\alpha \times \text{Ly}\alpha} + \sum_{m,n} \tilde{\xi}_{m \times n} + \cancel{\xi_{\text{ciel}}}$$

$$\bullet \xi_{\text{distorsion}}(A) = \sum_B D_{AB} \xi(B)$$

→ Matrice de distorsion estimée à partir
des mocks
→ Uniquement pour les mocks avec continu



$$b'_{\text{Ly}\alpha} = b_{\text{Ly}\alpha} + b_{\text{HCD}} F_{\text{HCD}}(k_{\parallel})$$
$$F_{\text{HCD}}(k_{\parallel}) = \exp(-L_{\text{HCD}} k_{\parallel})$$

avec $L_{\text{HCD}} = 10 h^{-1} \text{Mpc}$

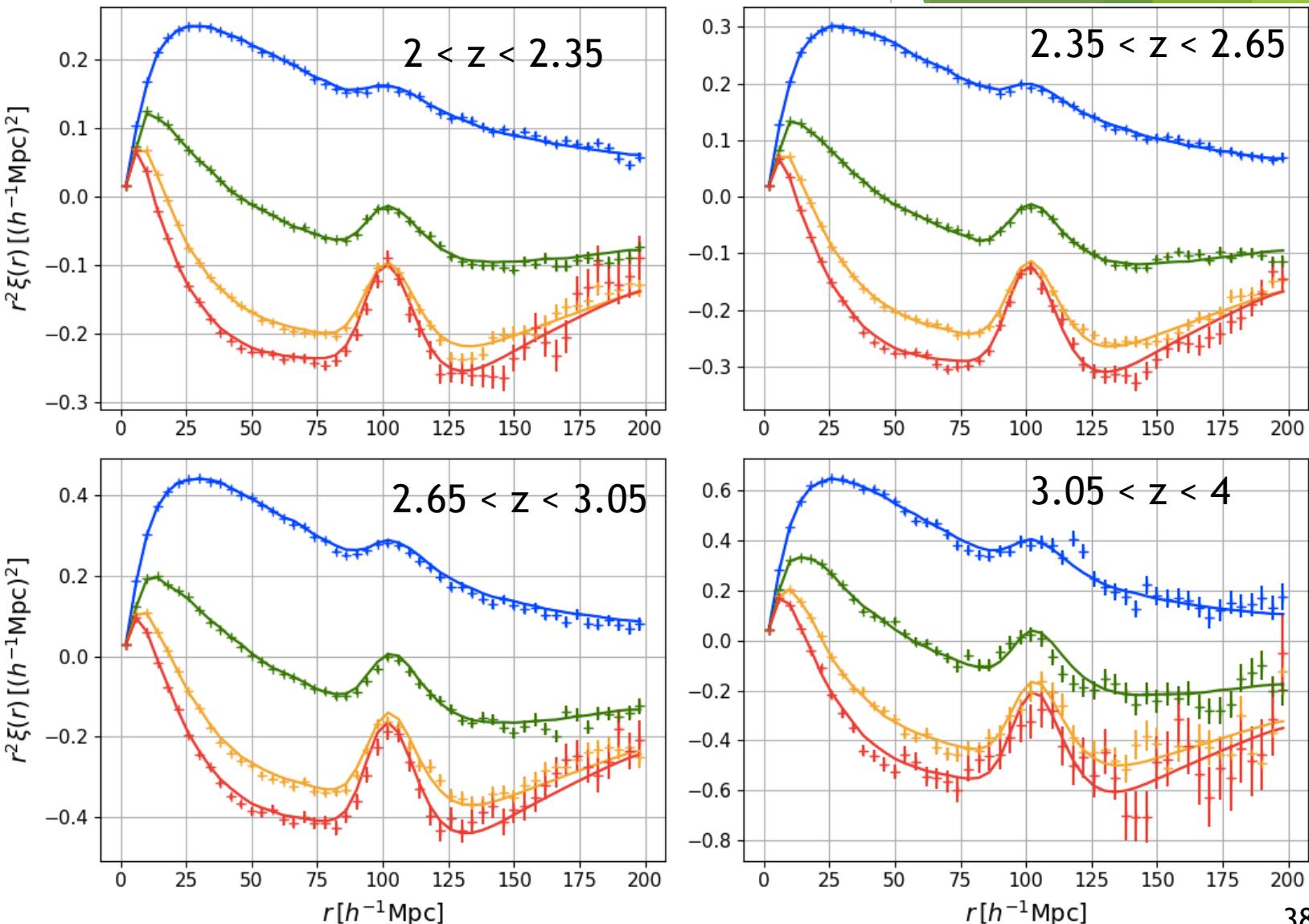
IV. Auto-corrélation Ly α x Ly α

$$r^2 \xi(r) [(h^{-1}\text{Mpc})^2]$$

- Mocks bruts:

auto-corrélations Ly α x Ly α
 30 réalisations
 4 bins en z

$0 < \mu < 0.5$
 $0.5 < \mu < 0.8$
 $0.8 < \mu < 0.95$
 $0.95 < \mu < 1$



IV. Auto-corrélation Ly α x Ly α

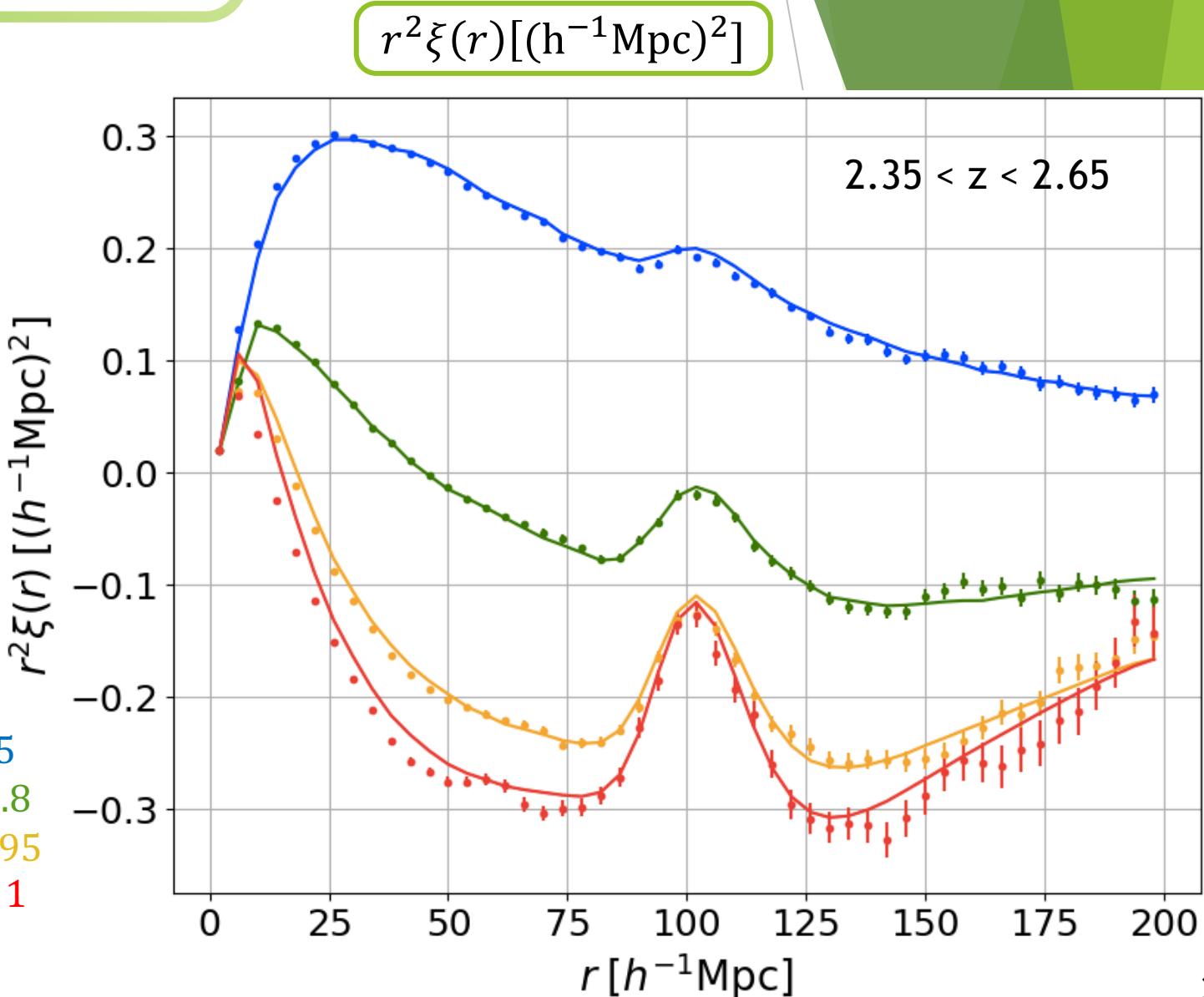
- Mocks bruts:

auto-corrélations Ly α x Ly α
30 réalisations

+
prédition de la corrélation des
mocks ξ_{pred}

→ Prédiction des mocks en
accord avec les mocks bruts

$0 < \mu < 0.5$
 $0.5 < \mu < 0.8$
 $0.8 < \mu < 0.95$
 $0.95 < \mu < 1$



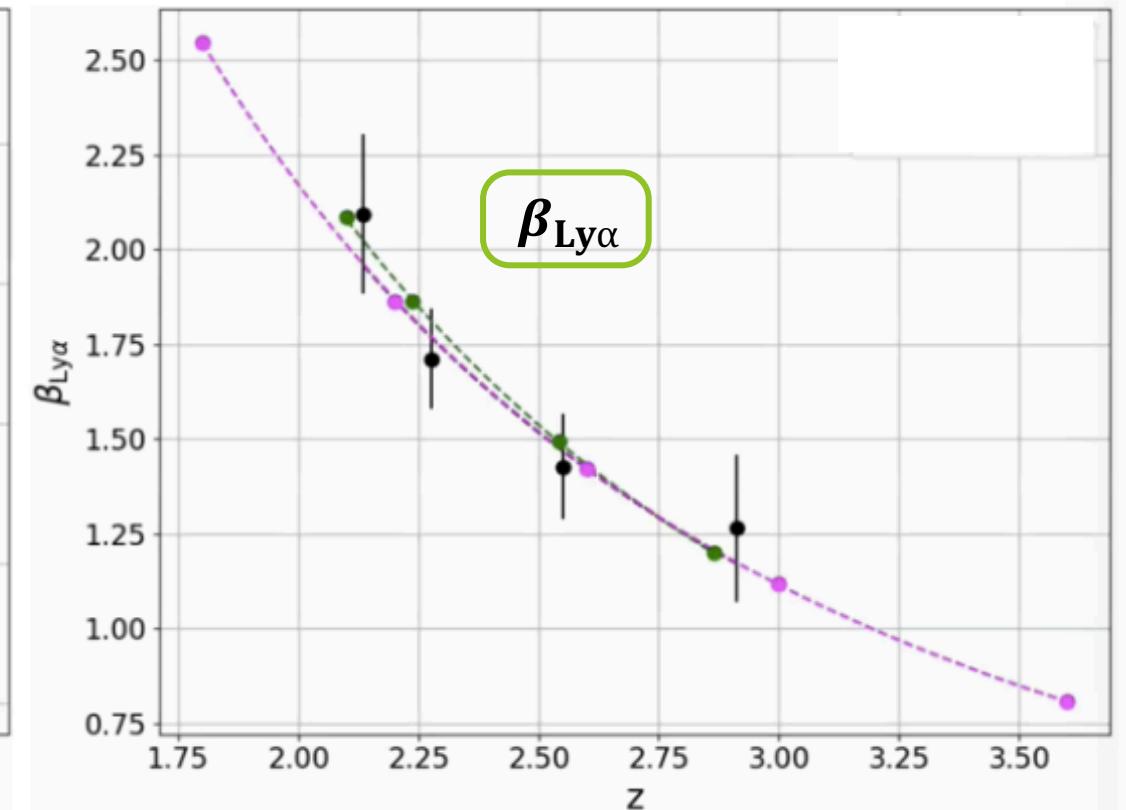
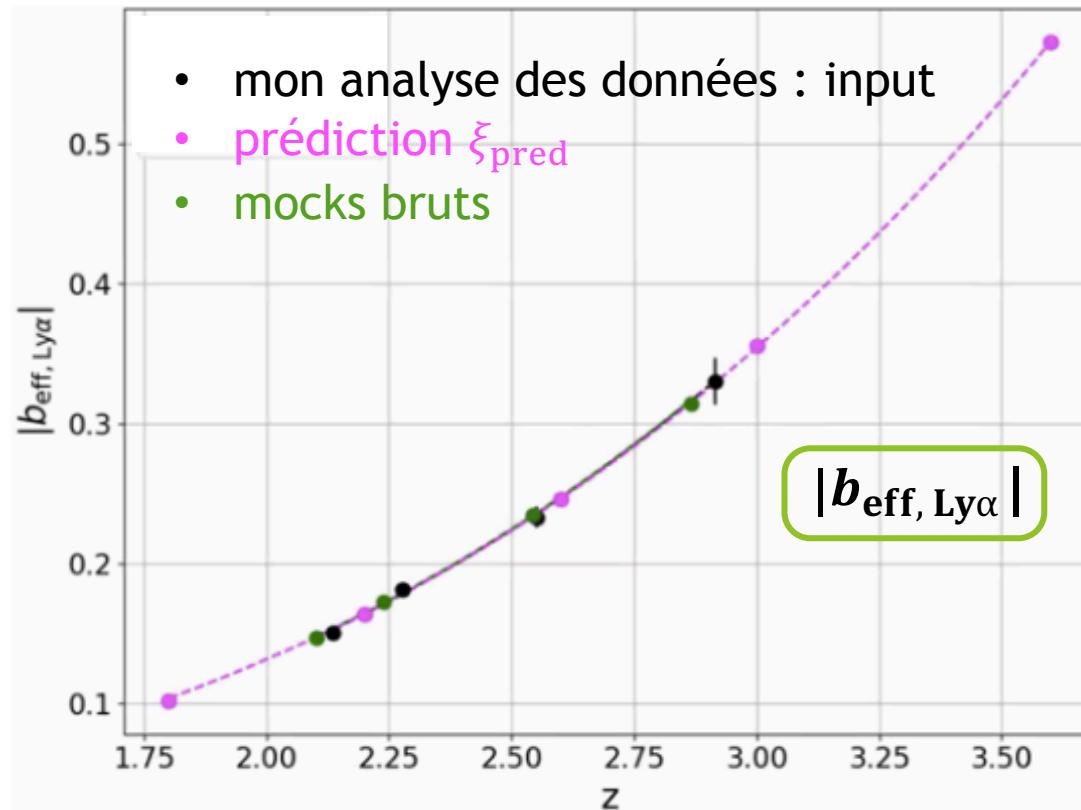
IV. Analyse des mocks bruts

- Mocks bruts :

auto-corrélations Ly α x Ly α

30 réalisations

→ $b_{\text{eff, Ly}\alpha}(z)$ et $\beta_{\text{Ly}\alpha}(z)$ mesurés
en accord avec l'input

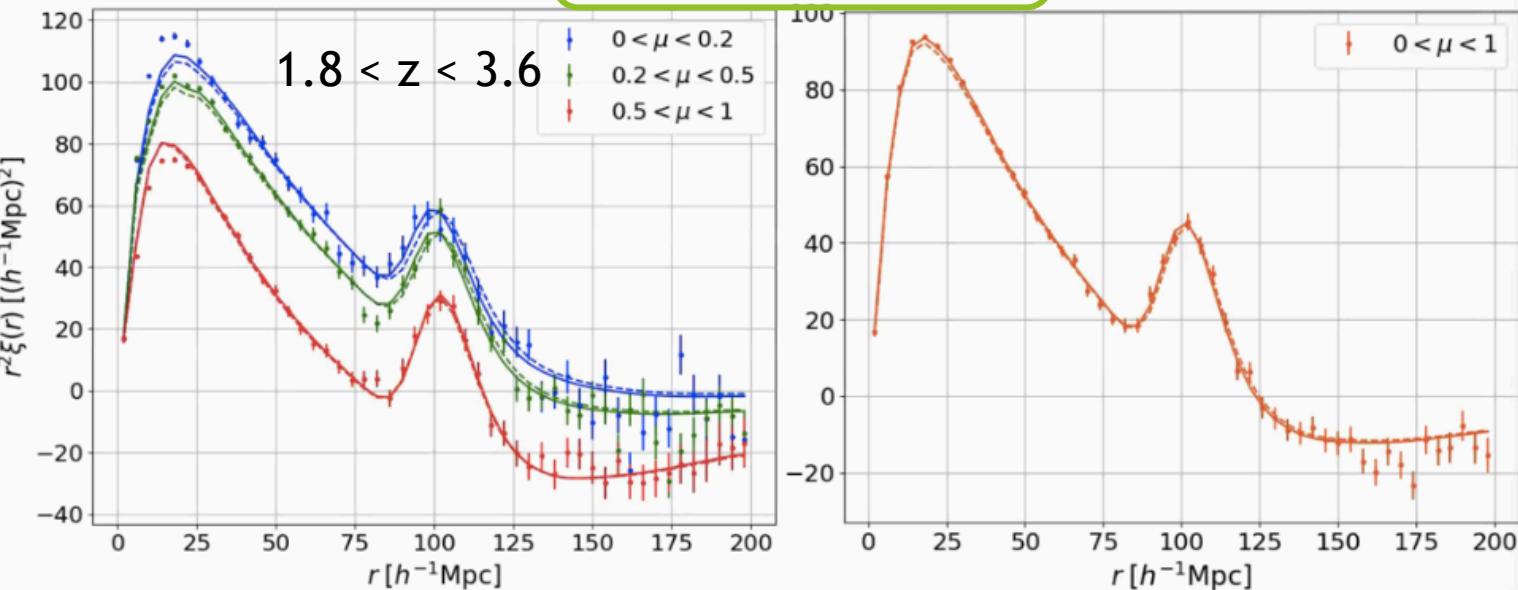


IV. Auto-corrélation QSO x QSO

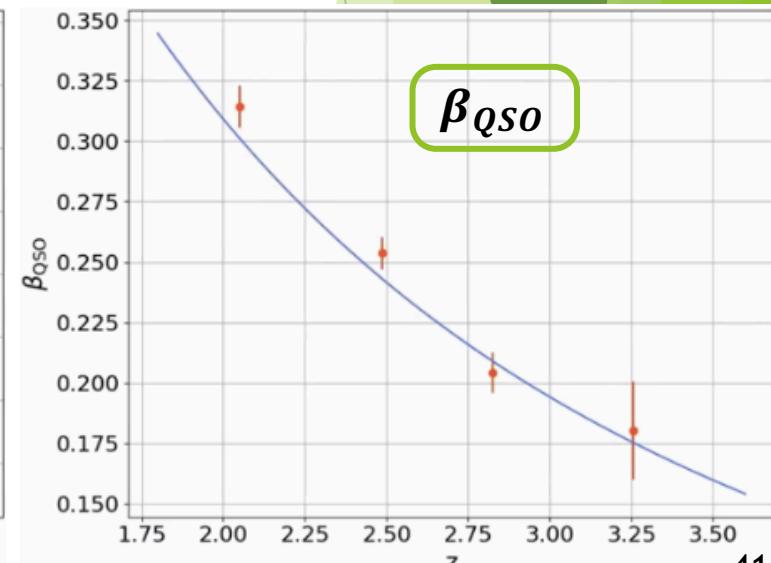
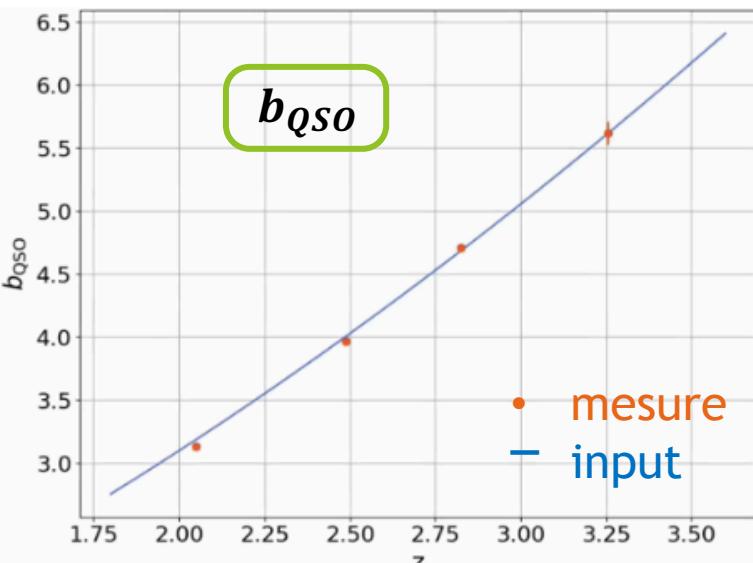
$$r^2 \xi(r) [(h^{-1}\text{Mpc})^2]$$

- Mocks bruts :

auto-corrélations QSO x QSO
10 réalisations



Très bon accord :
 - corrélation et modèle pour $r > 20 \text{ Mpc}/h$
 - $b_{\text{QSO}}(z)$ et $\beta_{\text{QSO}}(z)$ mesurés et visés



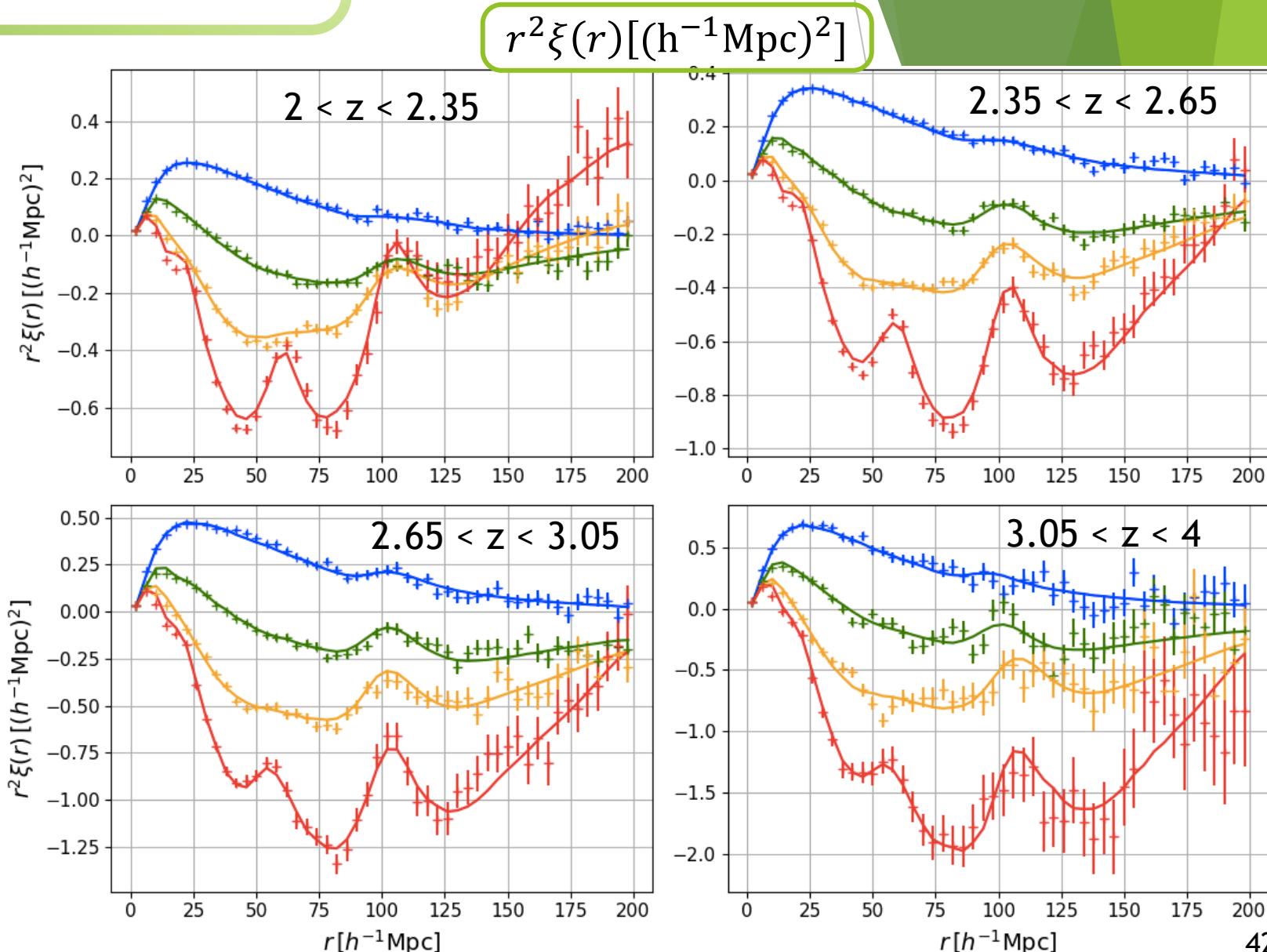
IV. Auto-corrélation Ly α x Ly α

- Mocks continu+hcd+metal :

auto-corrélations Ly α x Ly α
10 réalisations

→ Biais des métaux
mesurés dans les mocks
en accord avec les
données eBOSS

$0 < \mu < 0.5$
 $0.5 < \mu < 0.8$
 $0.8 < \mu < 0.95$
 $0.95 < \mu < 1$

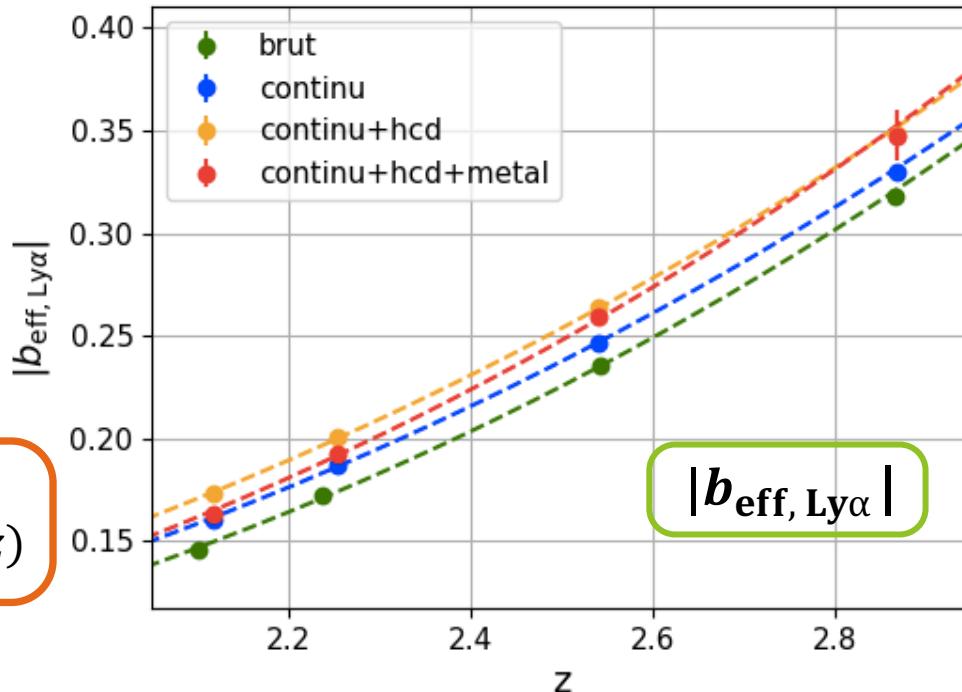


IV. Analyse des mocks : Bilan

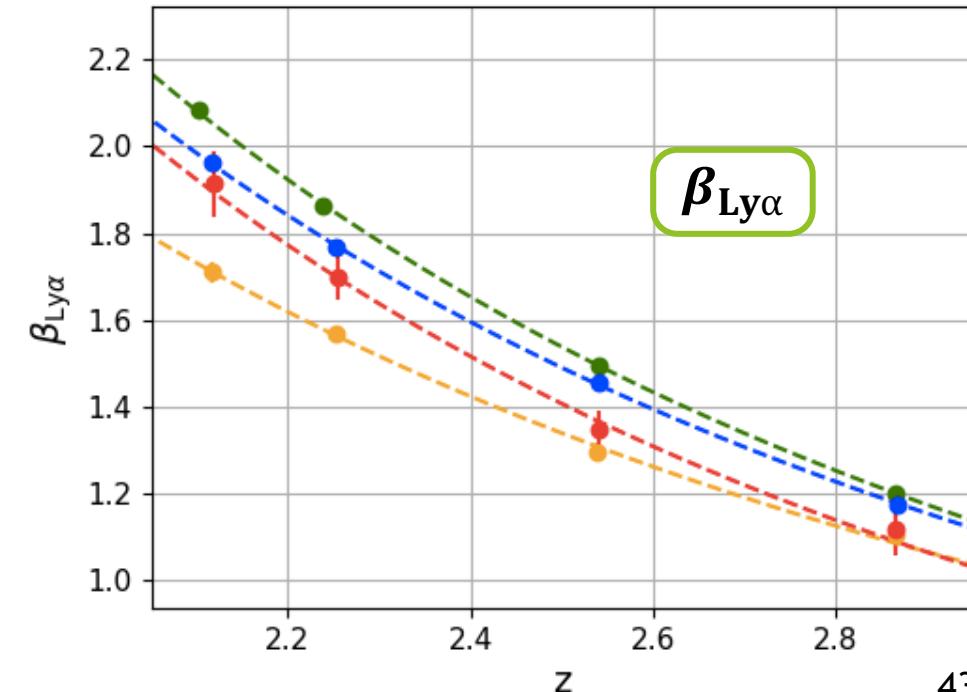
- Mesure non biaisée des paramètres α_{\parallel} et α_{\perp} (à 1% avec 30 réalisations)
- Mesures de $b_{\text{eff}, \text{Ly}\alpha}(z)$ et $\beta_{\text{Ly}\alpha}(z)$ différentes selon les versions !

Ecart entre :

- brut et continu → matrice de distortion
- continu et continu+hcd → modélisation des HCDs
- continu+hcd et continu+hcd+metal → modélisation des HCDs



→ Effet ~20% sur
 $b_{\text{eff}, \text{Ly}\alpha}(z)$ et $\beta_{\text{Ly}\alpha}(z)$



Sommaire

- I
- II
- III
- IV
- V

Introduction

Analyse des données

Les mocks

Analyse des mocks

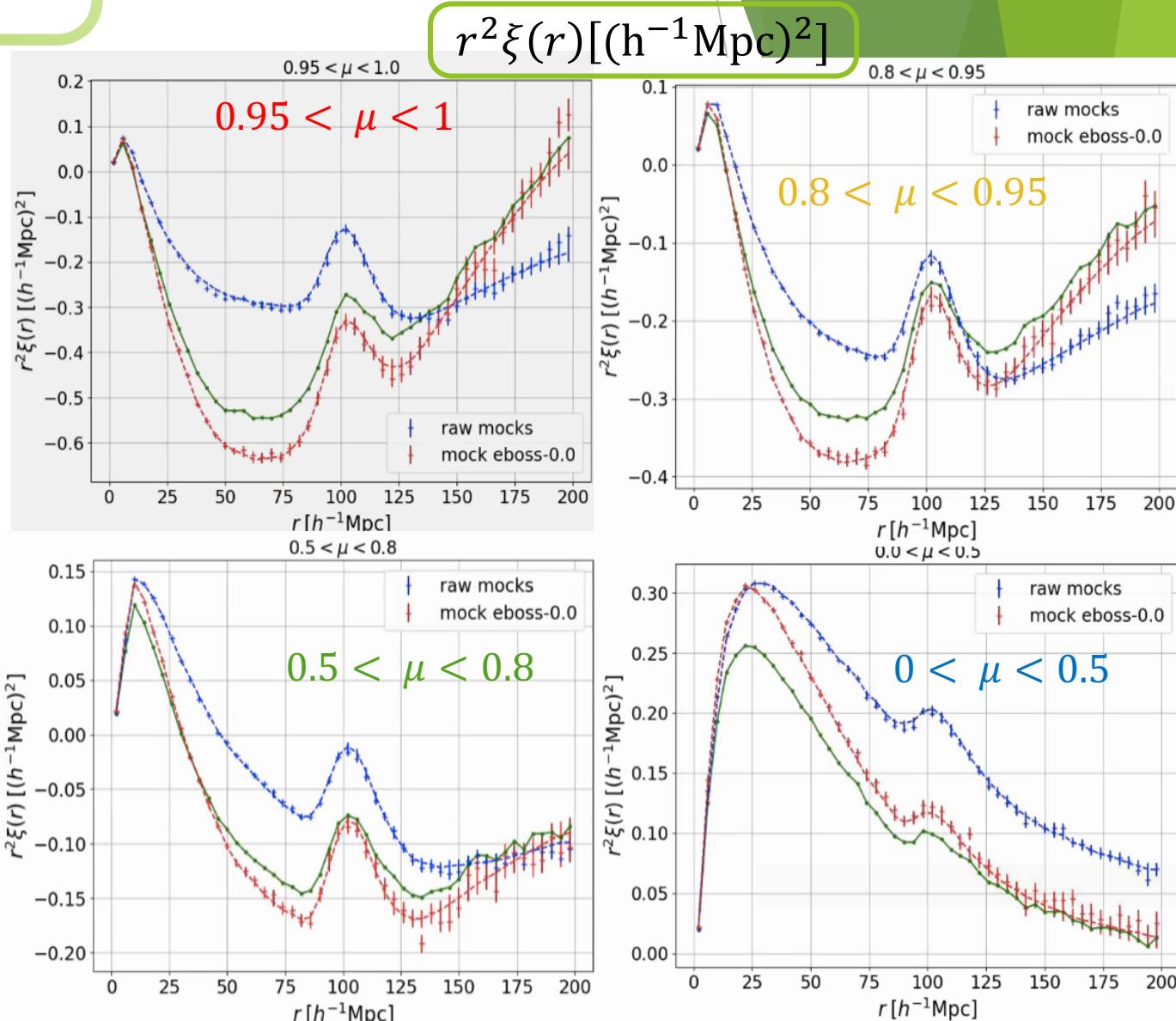
Etude des systématiques

V. Etude des systématiques

- Différence brut / continu

- + brut
- + continu
- + brut * dmat

→ Distorsions pas complètement prises en compte (effet ~15 à 20%)



V. Etude des systématiques

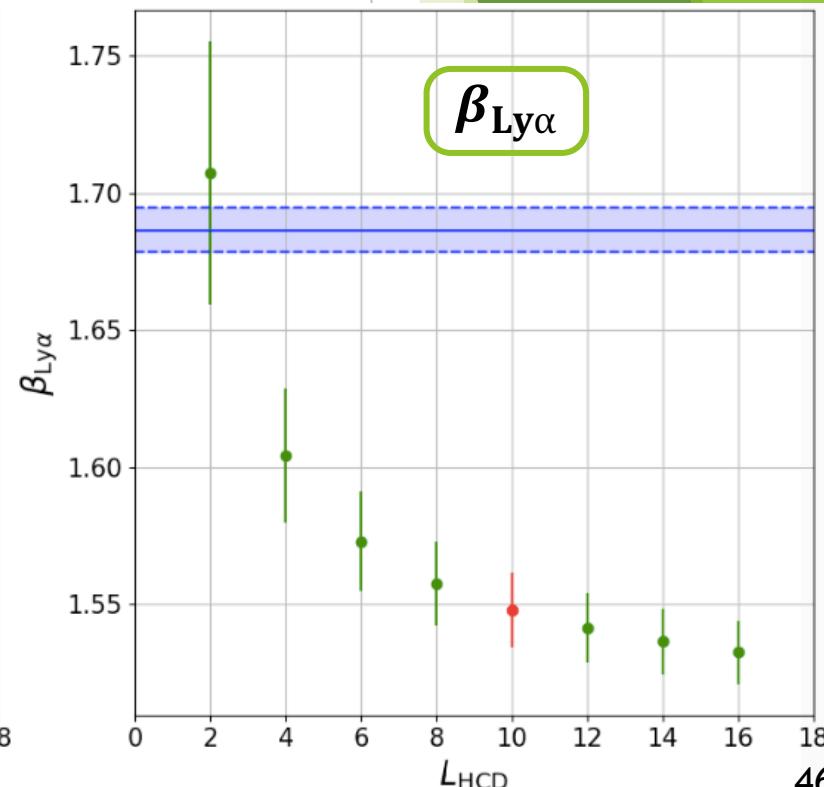
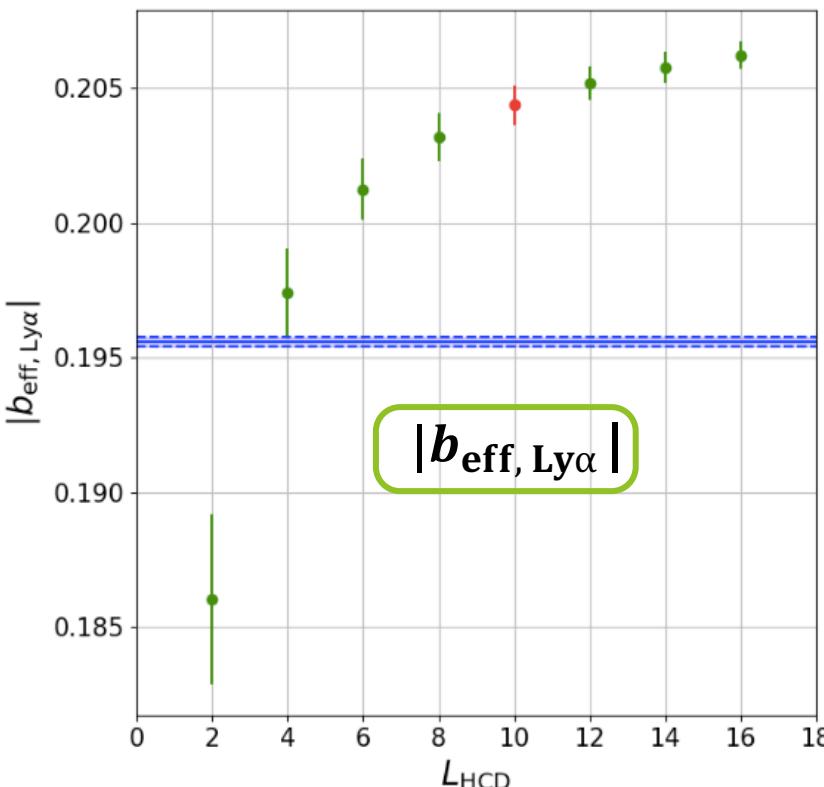
- Stabilité des paramètres Ly α avec les HCD

$b_{\text{eff, Ly}\alpha}(z)$ et $\beta_{\text{Ly}\alpha}(z)$ très corrélés avec L_{HCD}

$$F_{\text{HCD}}(k_{\parallel}) = \exp(-L_{\text{HCD}} k_{\parallel})$$

- continu
- continu+hcd
- continu+hcd avec
 $L_{\text{HCD}} = 10 h^{-1} \text{Mpc}$ (analyse eBOSS DR16)

→ Suggère $L_{\text{HCD}} \sim 3 h^{-1} \text{Mpc}$



V. Etude des systématiques

- Modèle alternatif des HCD

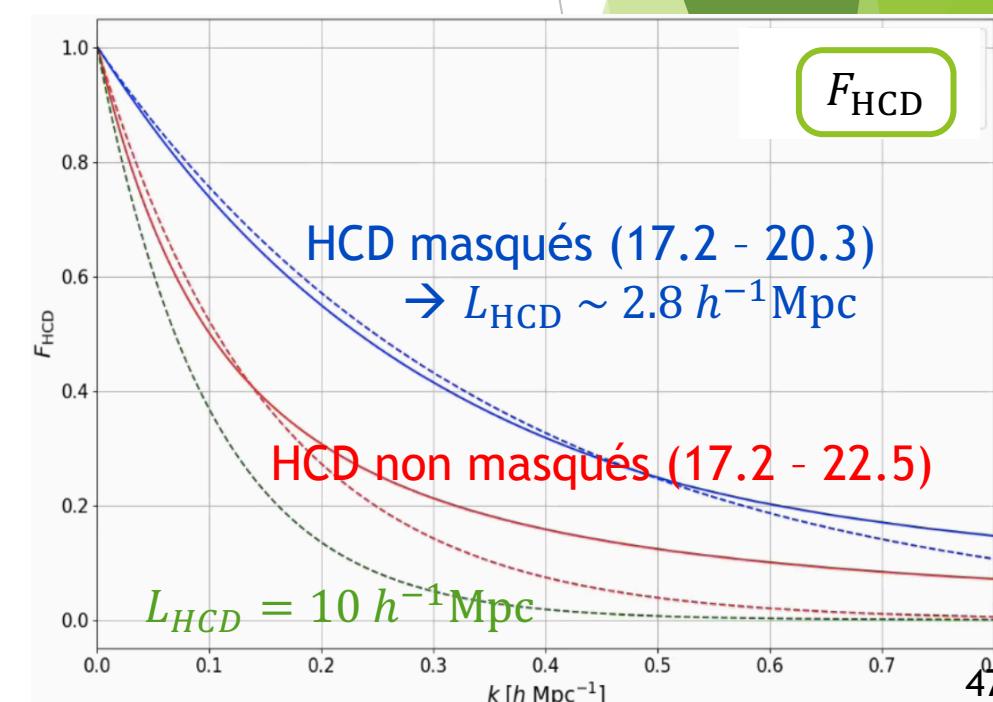
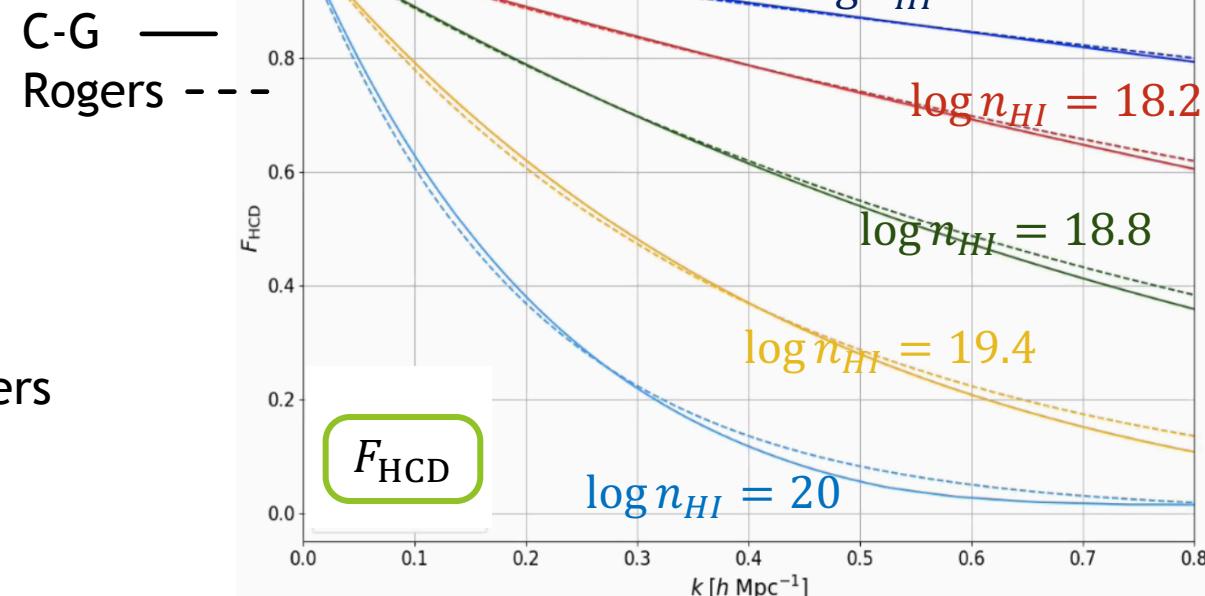
modèle C-G (Chaussidon - Guy) : similaire au modèle Rogers

$$b'_{\text{Ly}\alpha} = b_{\text{Ly}\alpha} + b_{\text{HCD}} F_{\text{HCD}}(k_{\parallel})$$

$$F_{\text{HCD}}(k_{\parallel}) = \exp(-L_{\text{HCD}} k_{\parallel})$$

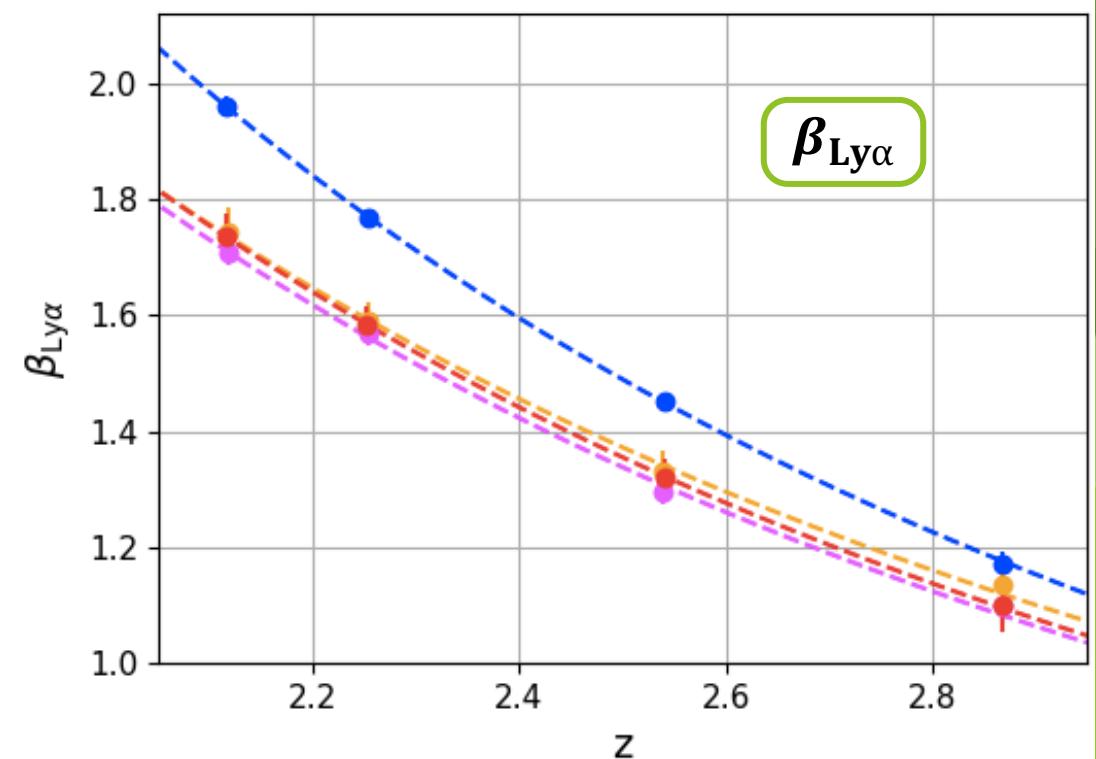
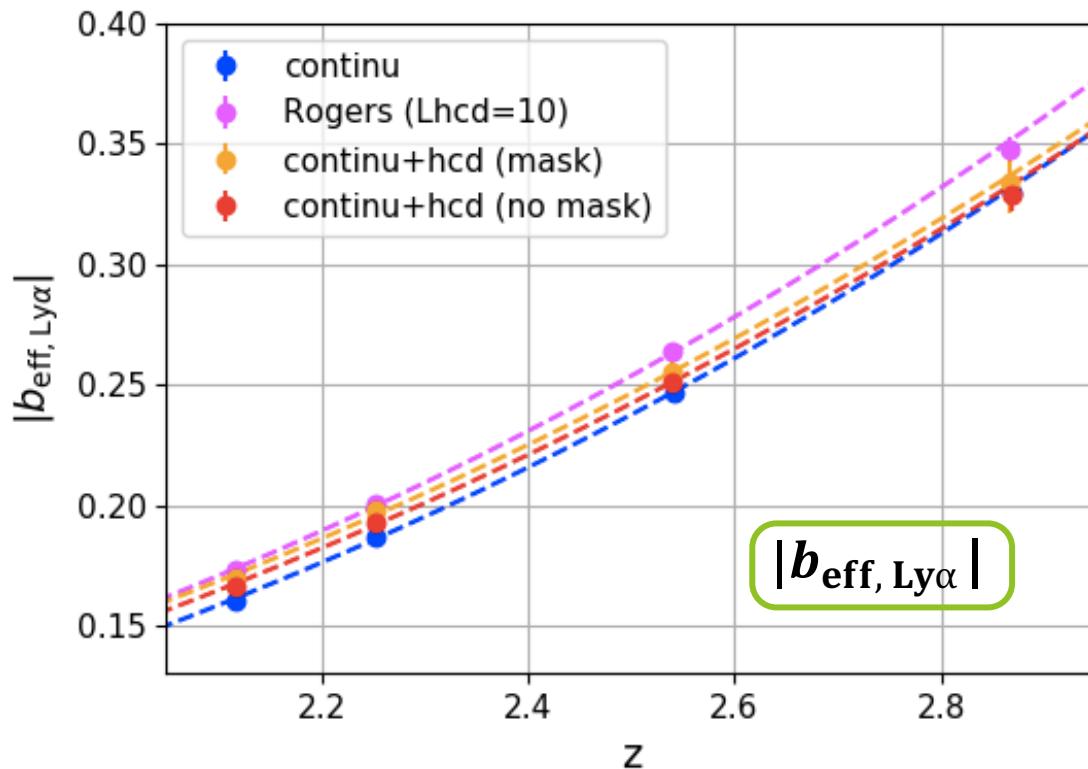
→ F_{HCD} calculé à partir de la distribution en $\log n_{\text{HI}}$ des HCD

- $L_{\text{HCD}} = 10 h^{-1}\text{Mpc}$ trop grand
- Rogers et C-G pas en accord pour les grandes valeurs de $\log n_{\text{HI}}$ et pour les gammes trop large en $\log n_{\text{HI}}$ → utiliser C-G



V. Etude des systématiques

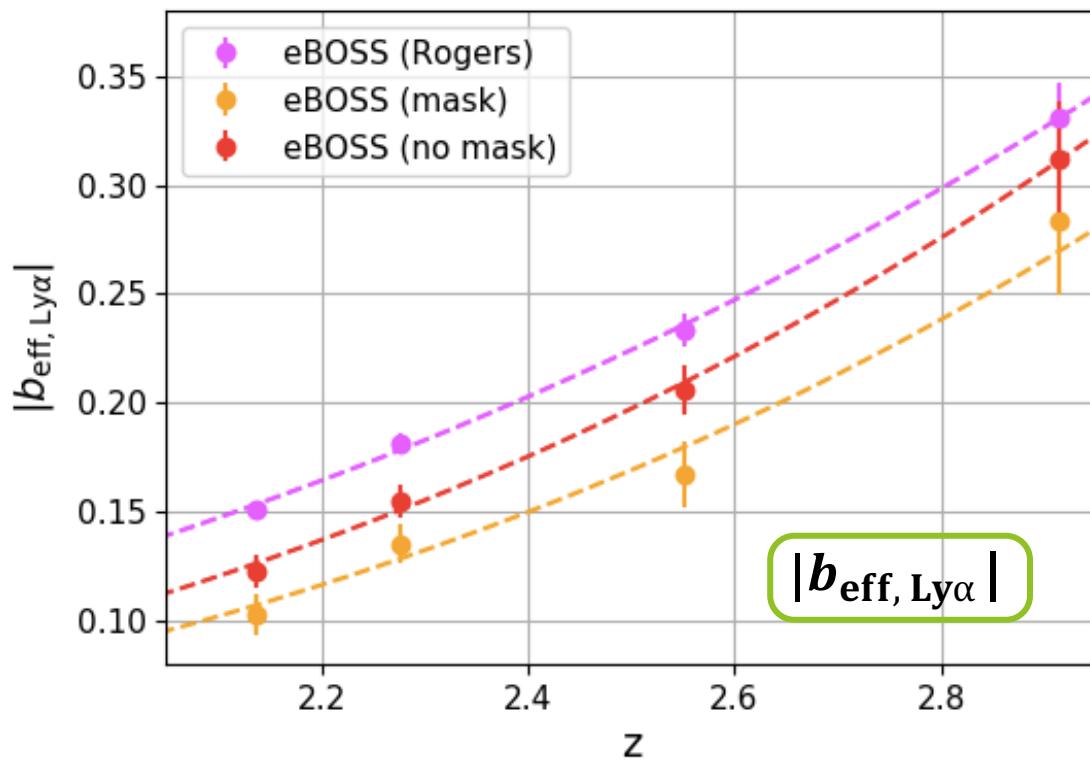
- Modèle C-G
 - mesures avec et sans masquage compatibles
 - meilleur accord pour $b_{\text{eff}, \text{Ly}\alpha}(z)$ mais pas pour $\beta_{\text{Ly}\alpha}(z)$



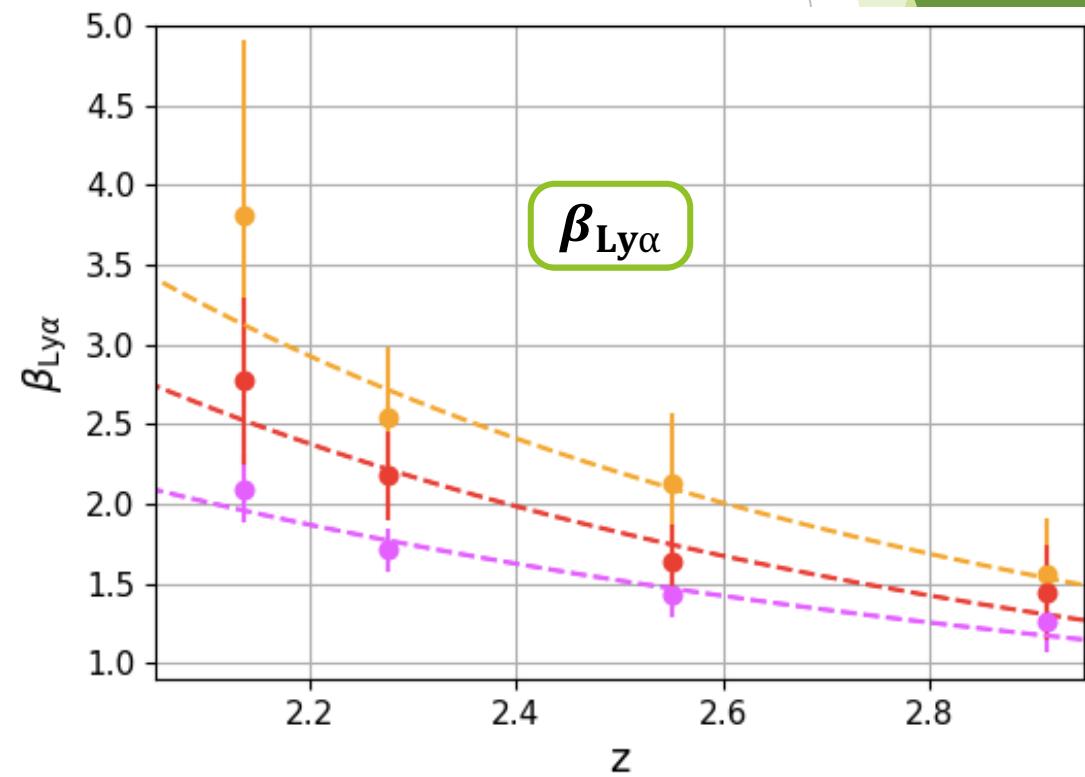
V. Etude des systématiques

- Modèle C-G

mesures des données eBOSS avec et sans masquage des HCD pas en accord



→ Effet inconnu dans les données pris en compte par le modèle des HCD ?

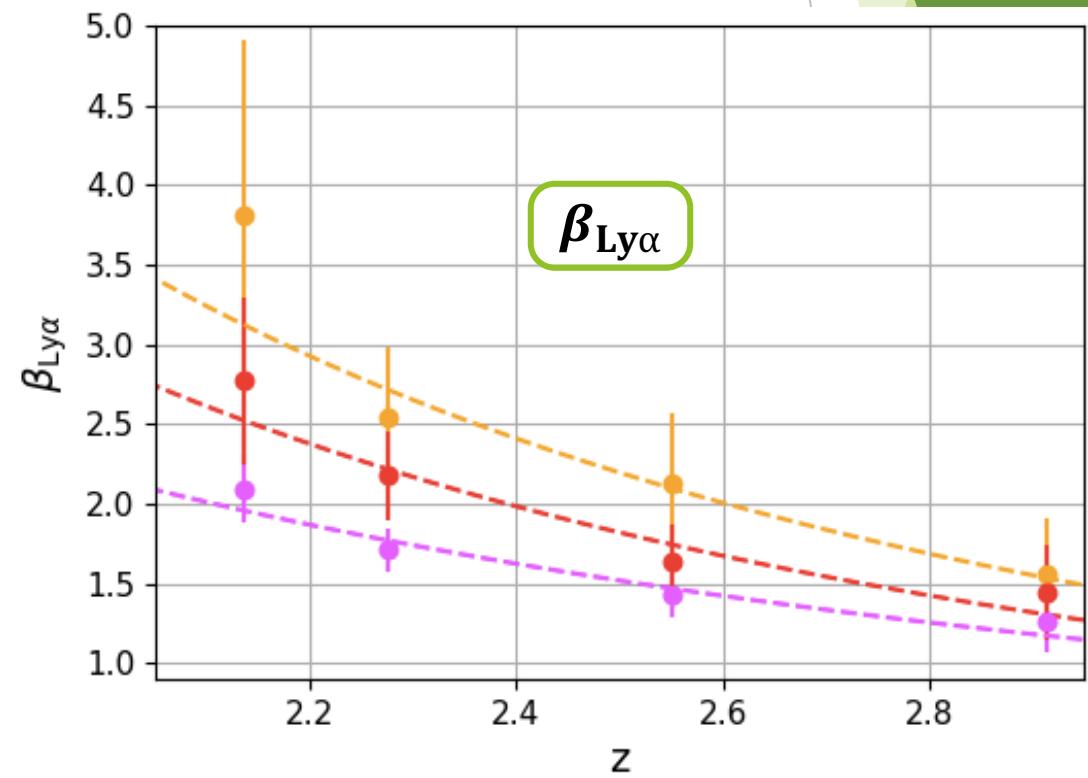
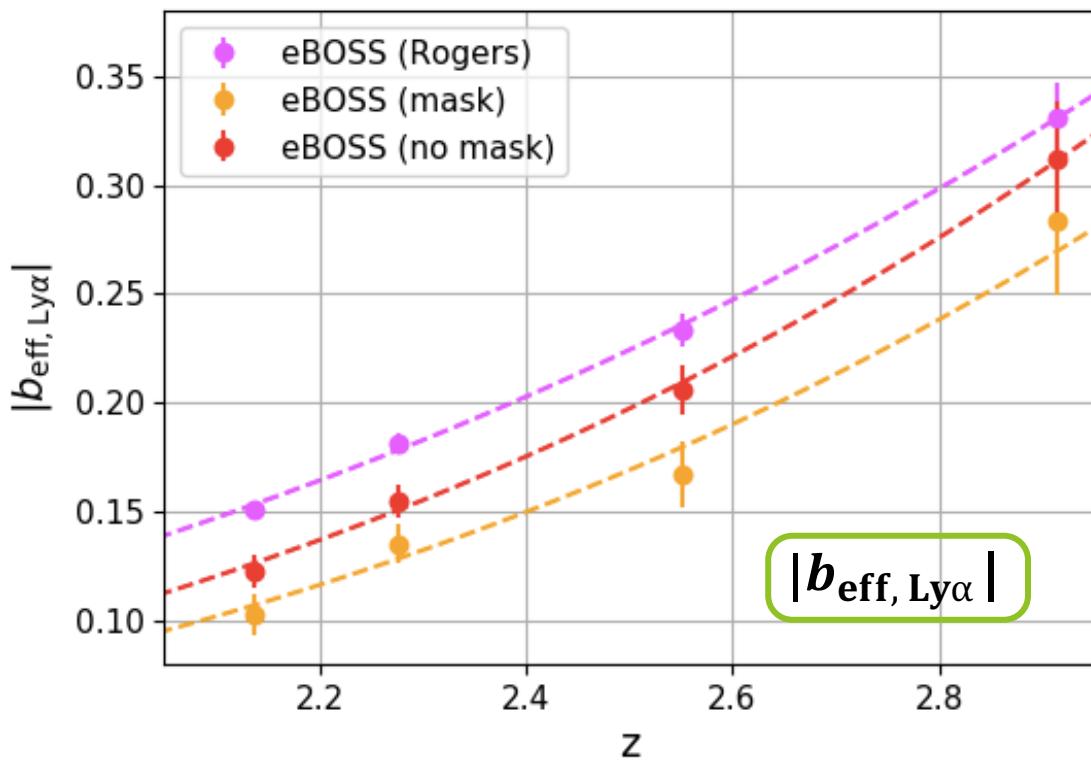


V. Etude des systématiques

- Modèle C-G

préférable de ne pas masquer les HCD :

- paramètres Ly α et HCD moins corrélés
- évite d'introduire des systématiques



Conclusions

- Réalisation et production de **mocks** utilisés par eBOSS et DESI :
 - corrélations satisfaisantes :
 $\text{Ly}\alpha \times \text{Ly}\alpha$, $\text{Ly}\alpha \times \text{QSO}$, $\text{QSO} \times \text{QSO}$, $\text{HCD} \times \text{HCD}$
 - procédure d'ajustement efficace :
 $b_{\text{Ly}\alpha}(z)$, $\beta_{\text{Ly}\alpha}(z)$, $\langle F \rangle(z)$ et $P^{1D}(z)$
 - fonctions de corrélation prédictibles
- Etude des **systématiques** :
 - mesure de α_{\parallel} et α_{\perp} non biaisée (1%)
 - forme de ξ_F ($b_{\text{Ly}\alpha}(z)$, $\beta_{\text{Ly}\alpha}(z)$) comprise à ~20% près
 - distorsions pas complètement prises en compte
 - $L_{\text{HCD}} = 10 h^{-1}\text{Mpc}$ trop grand, $L_{\text{HCD}} = 2.8 h^{-1}\text{Mpc}$ mieux adapté
 - modèle C-G (no mask) préférable
 - Suffisant pour BAO avec eBOSS (position du pic peu sensible à la forme de ξ_F)

Perspectives : DESI

Améliorations de l'analyse pour DESI :

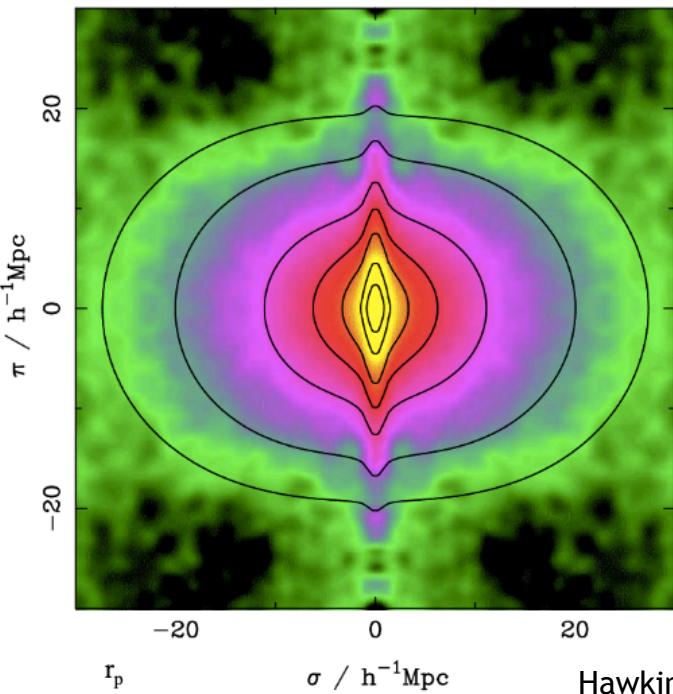
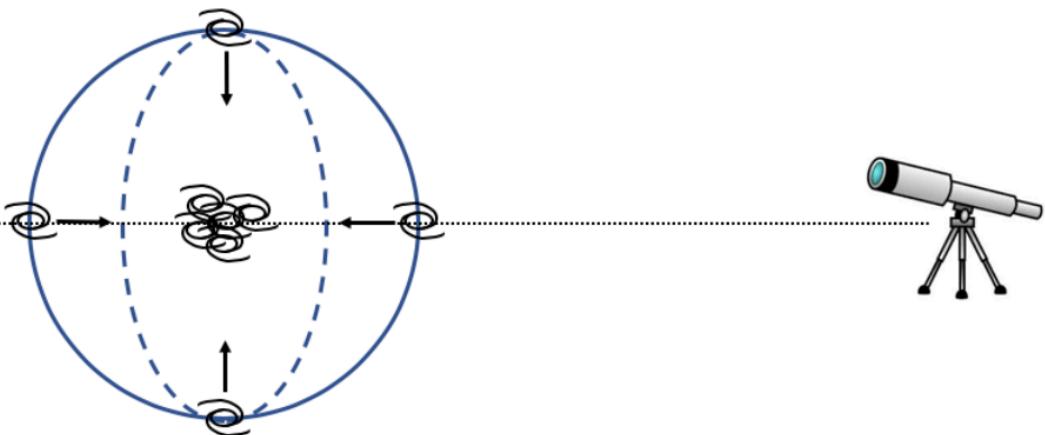
- Résoudre les problèmes de la matrice de distorsion
- Mieux comprendre la modélisation des HCD
- Comprendre les différences de mesure entre ($\text{Ly}\alpha \times \text{Ly}\alpha$) et ($\text{Ly}\alpha \times \text{QSO}$)
- Comprendre les différences de mesure entre les bins en z et les coadd

Les mocks :

- mocks prêts pour les analyses BAO
- si analyse mieux comprise :
 - mesure de $b_{\text{Ly}\alpha}(z)$, $\beta_{\text{Ly}\alpha}(z)$
 - analyse RSD avec ($\text{Ly}\alpha \times \text{Ly}\alpha$) + ($\text{Ly}\alpha \times \text{QSO}$)

SPARES

Redshift space distortions



Hawkins et al. 2003

- Finger of God :
élongation le long de la ligne de visée
- Kaiser
aplatissement le long de la ligne de visée
+ amplification de la puissance

$$\delta_i^s(\vec{k}) = b_i (1 + \beta_i \mu_k^2)^2 \delta_{\text{matière}}(\vec{k}) \quad (\text{Kaiser 1987})$$

Calcul de δ_F

- Calcul :

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

- Continu :

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

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

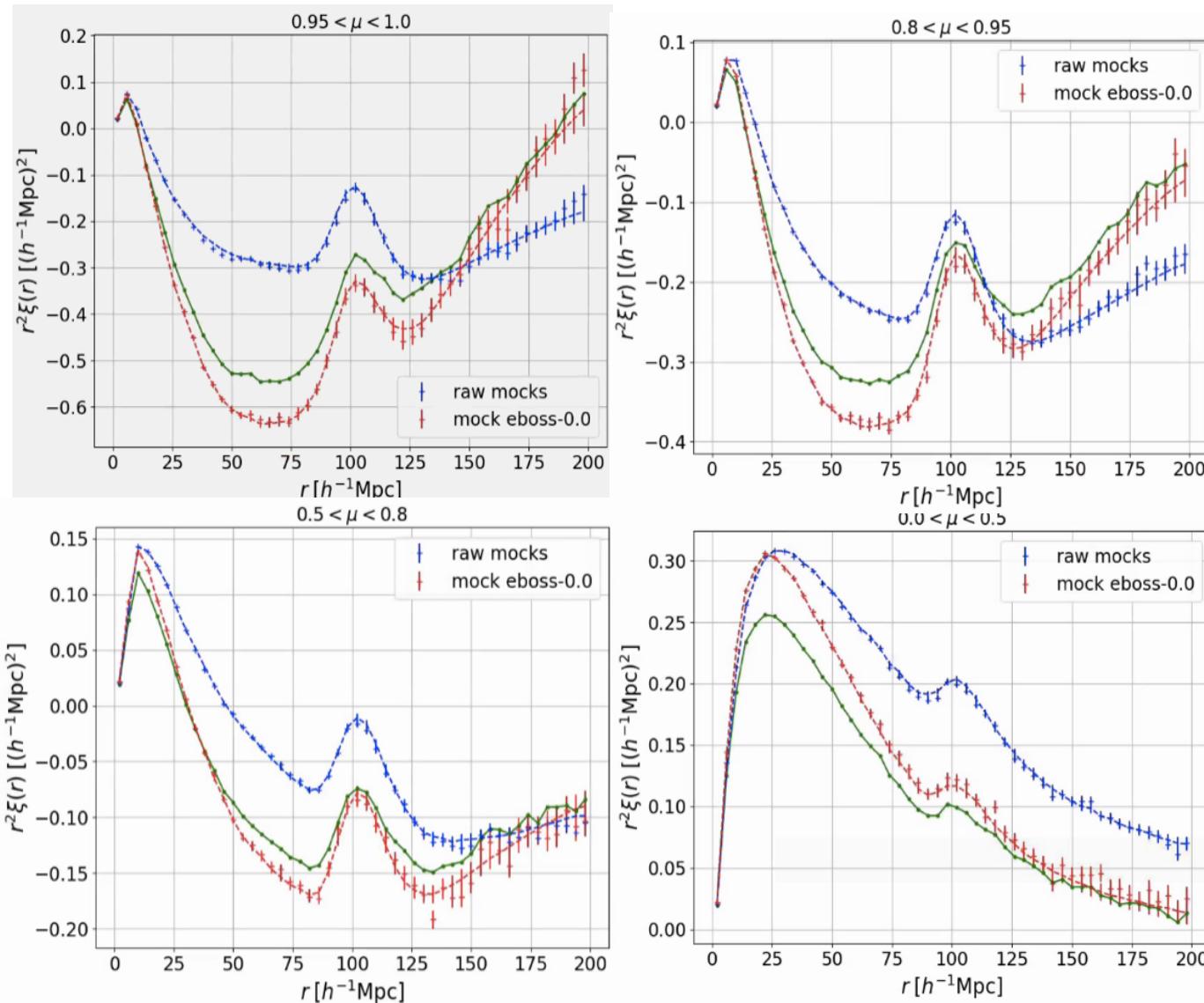
$$\sigma_q^2(\lambda) = \eta(\lambda)\sigma_{\text{instru},q}^2(\lambda) + \sigma_{\text{cosmo}}^2(\lambda)(\bar{F}C_q(\lambda))^2 + \frac{\epsilon(\lambda)(\bar{F}C(\lambda))^4}{\sigma_{\text{instru},q}^2(\lambda)}$$

- Distorsions :

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

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

Distorsions



$$\xi_{\text{distortion}}(A) = \sum_B D_{AB} \xi_{\text{vraie}}(B)$$

$$D_{AB} = \frac{1}{W_A} \sum_{(i,j) \in A} w_i w_j \left(\sum_{(i',j') \in B} \eta_{ii'} \eta_{jj'} \right)$$

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

Covariances

- Covariance du bin A avec le bin B

$$C_{AB} = \langle \xi_A \xi_B \rangle - \langle \xi_A \rangle \langle \xi_B \rangle$$

$$C_{AB} = \frac{1}{W_A W_B} \sum_s W_A^s W_B^s (\xi_A^s \xi_B^s - \xi_A \xi_B)$$

Poids du bin A : $W_A = \sum_{(i,j) \in A} w_i w_j$

Champs des QSO

- Les quasars

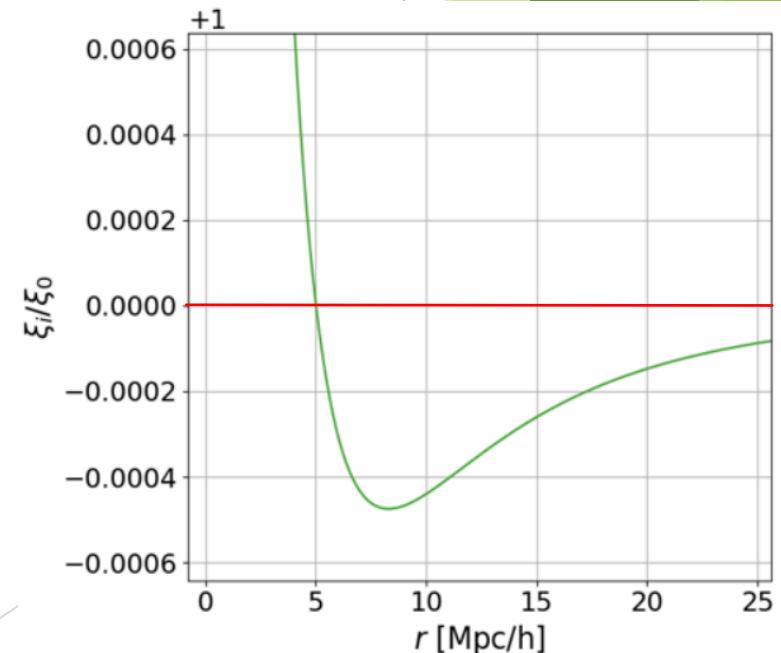
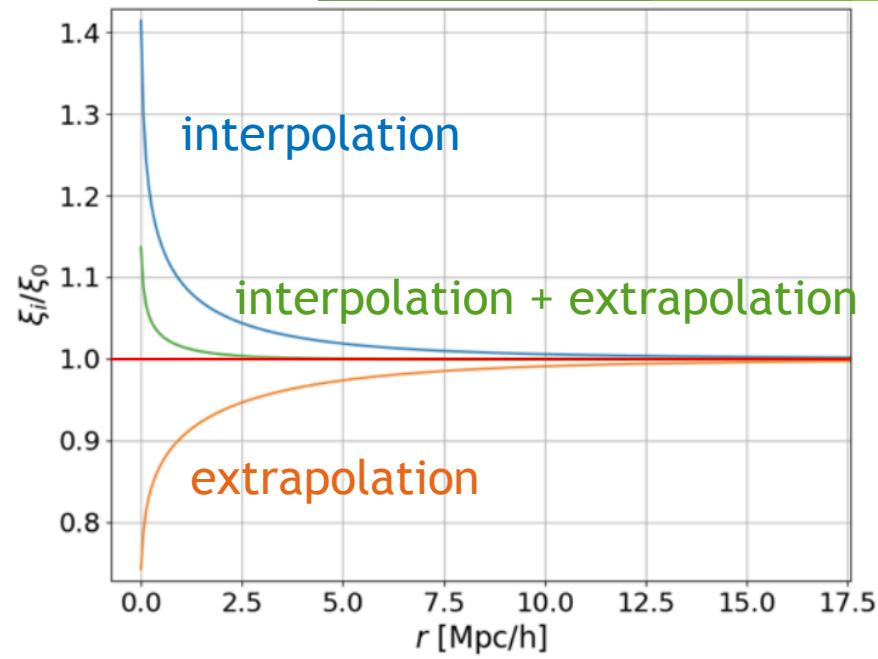
Champ log-normal : $\xi_{\text{QSO}} = \ln(1 + \xi)$

$$\delta_{\text{QSO}} = \text{FFT}^{-1} \left[\delta_k \times \sqrt{P_{\text{QSO}}(k) / V_{\text{cell}}} \right] \text{ avec } P_{\text{QSO}} = \text{FFT} [\xi_{\text{QSO}}]$$

3 champs log-normaux à $z_1 = 1.9$, $z_2 = 2.75$, $z_3 = 3.6$
+ combinaison d'1 interpolation et d'1 extrapolation

→ 1 champ $\delta_{\text{QSO}}(z)$ → correct $b_{\text{QSO}}(z)$

QSO tirés selon $P \propto \exp(\delta_{\text{QSO}}(z))$
+ déplacés selon $\Delta z = v_{\parallel}/c$

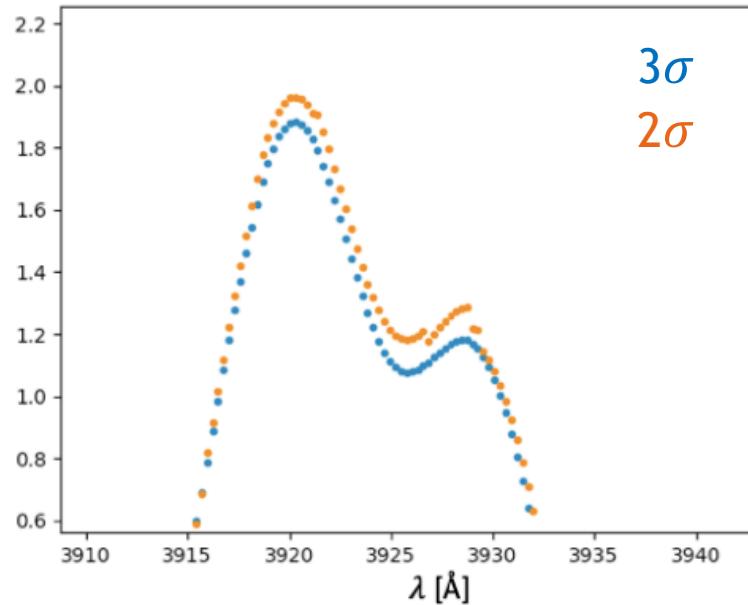
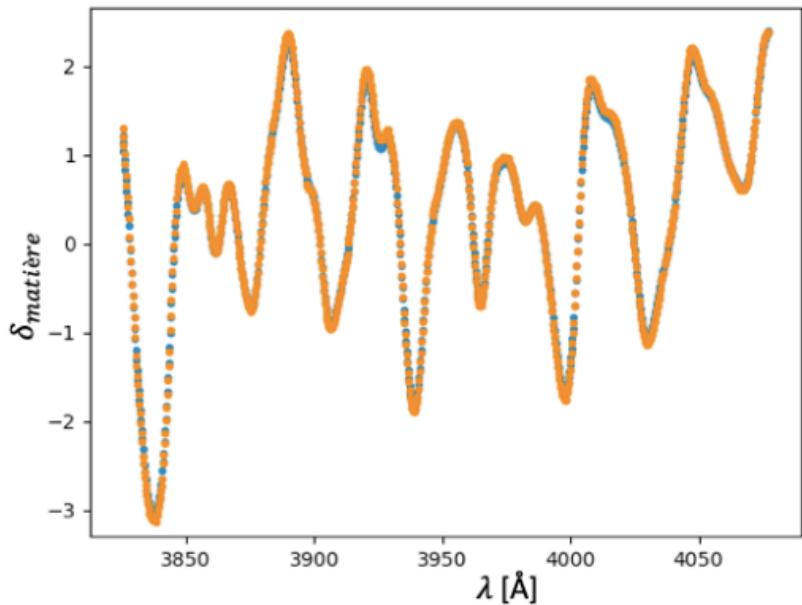
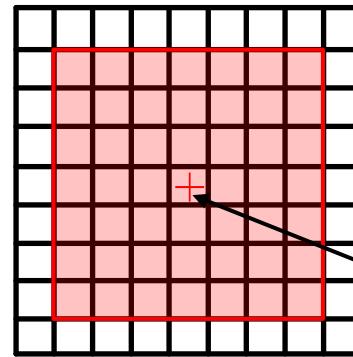


III. Construction des mocks

- Création des lignes de visée

Tableau 6524 pixels, 0.2 Mpc/h , $3476.2 < \lambda < 5591.6 \text{ \AA}$

Eviter l'aliasing \rightarrow lissage gaussien avec $\sigma = 2.19 \text{ Mpc/h}$
Prend en compte uniquement les voxcel à $\pm 3\sigma$



Différence entre 3 et 4 σ
négligeable

FGPA formula



photo-ionization equilibrium :

$$n_\gamma n_{HI} \langle \sigma_{ioniz} c \rangle = n_p n_e \langle \sigma_{rec} v \rangle_T$$

$$n_{HI} = n_b^2 \frac{\langle \sigma_{rec} v \rangle_T}{n_\gamma \langle \sigma_{ioniz} c \rangle} \quad \langle \sigma_{rec} v \rangle_T \propto T^{-0.7}$$

$$\rightarrow n_{HI} \propto \frac{(1+z)^6 \Omega_b^2 (1+\delta)^2 T^{-0.7}}{\text{ionizing photon flux}}$$

with

$$T = \bar{T}(z)(1+\delta)^{\gamma(z)-1}$$

and

$$\gamma(z \sim 3) \sim 1.6$$

$$\rightarrow \tau(z) \propto \Omega_B^2 \frac{(1+z)^6 \bar{T}(z)^{-0.7}}{H(z) J_\gamma(z)} \frac{(1+\delta(z))^\beta}{(1+\eta(z))^1}$$

$$\eta \equiv \frac{v'_p(z)}{H(z)}$$

$$\beta = 2 - 0.7(\gamma(z) - 1) \sim 1.6$$

III. Construction des mocks

- Le champ d'absorption

$$F = \exp[-a(z) \exp(b(z)G(z)(\delta_l + \delta_s + c(z)\eta_{\parallel}))] \quad (\text{modification de FGPA})$$

δ_l : densité à grande échelle

δ_s : densité à petite échelle

Taille des voxels + lissage gaussien

→ manque de puissance à petite échelle :

- pas important pour ζ^{3D}

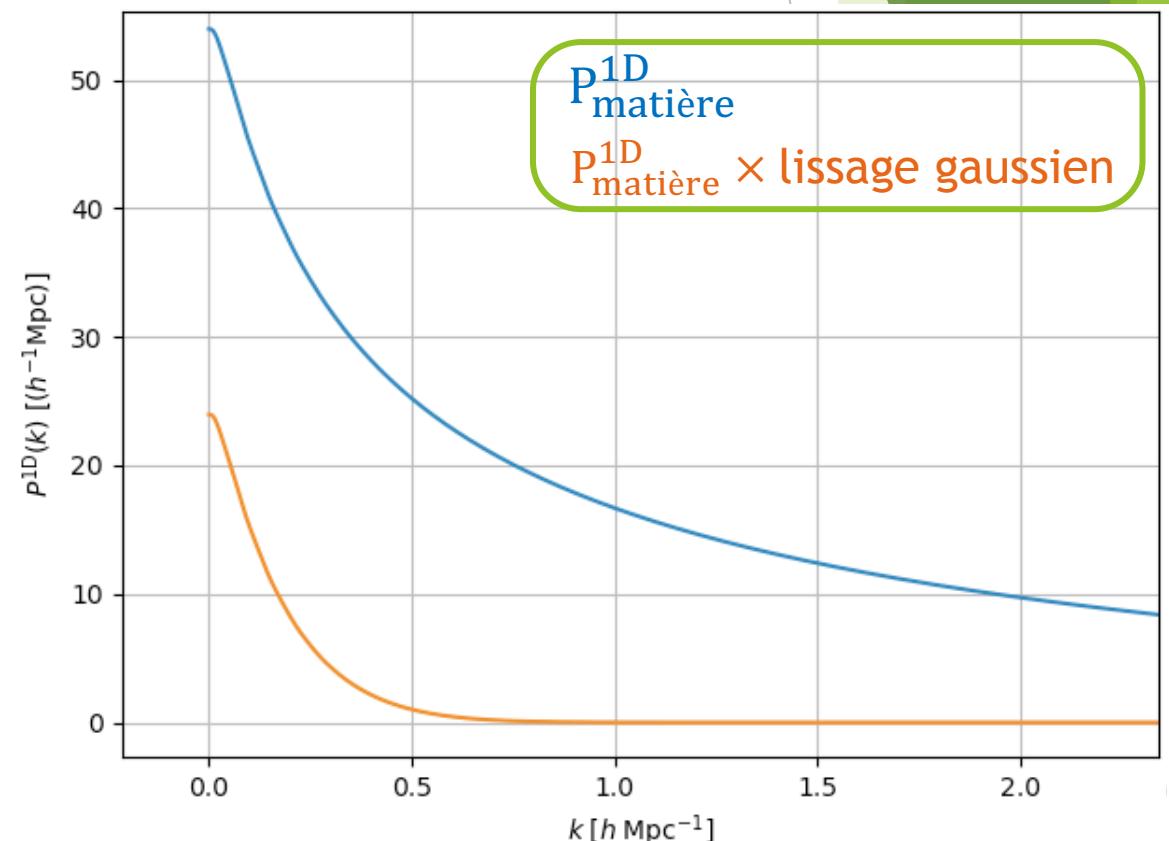
- important pour le P^{1D}

→ important pour $\sigma_F^2 = \int P^{1D}$

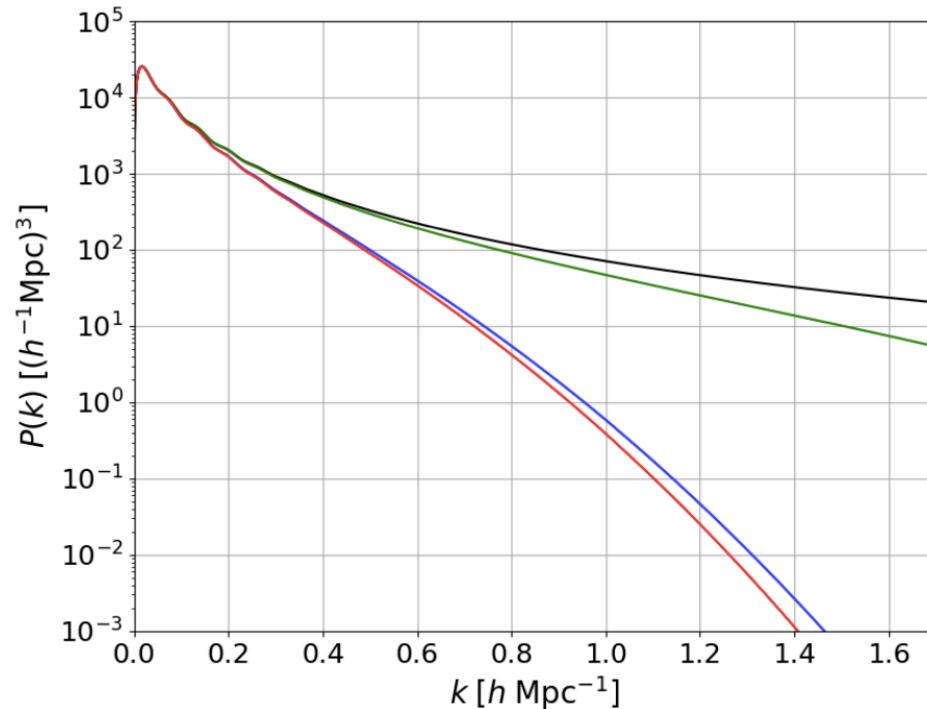
Ajout d'un GRF δ_s indépendant sur chaque ligne de visée qui suit $P_s(k)$

→ pas de corrélation 3D

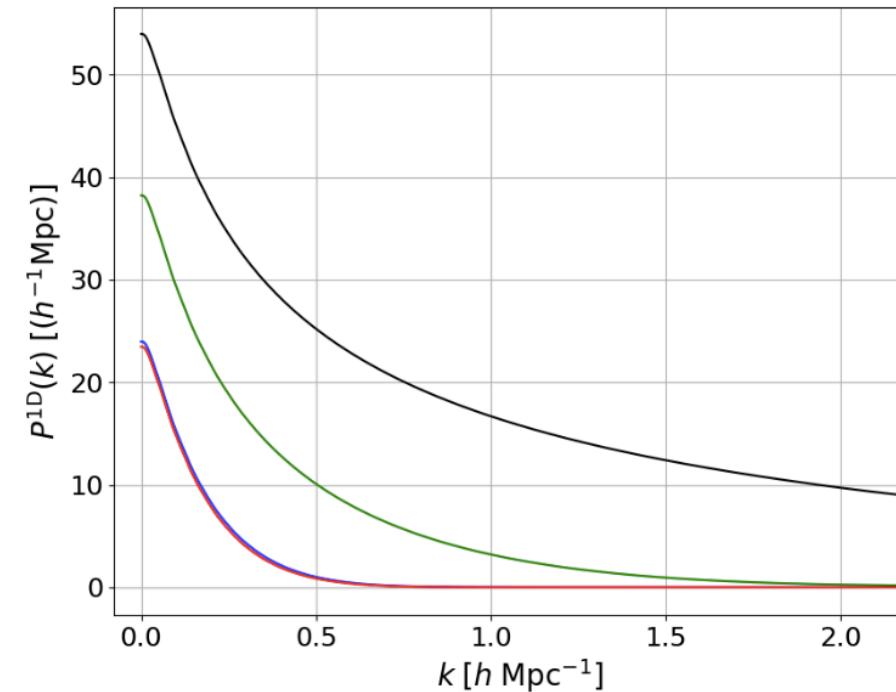
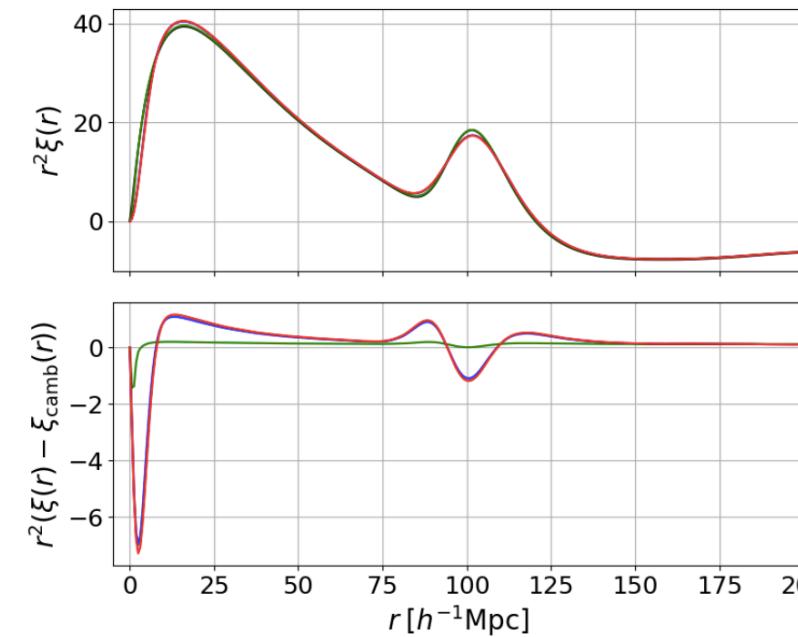
→ $P^{1D}(k)$ correct → σ_F^2 correcte



Les petites échelles



matière
+ lissage gaussien
+ effet de la taille des voxels
+ lissage gauss + taille voxels



Les RSD Ly α

$$\tau \rightarrow \tau + \bar{\tau} \eta_{\parallel}$$

→ 1st solution, too few RSD

$$\tau = a \exp[bG(\delta_l + \delta_s)] + \bar{\tau}(\eta_l + \eta_s)$$

→ right amount of RSD, but a lot of pixels with $\tau < 0$

$$F = \exp[-a(z) \exp(b(z)G(z)(\delta_l + \delta_s + c(z)\eta_{\parallel}))]$$

→ right amount of RSD, all pixels with $\tau > 0$,
gives Kaiser formula
+ allow for prediction

La prédition

$$\xi_F(r_{12}) = \int_{-\infty}^{\infty} d\delta_{g1} \int_{-\infty}^{\infty} d\delta_{g2} \frac{\exp\left[-\frac{\delta_{g1}^2 + \delta_{g2}^2 - 2\delta_{g1}\delta_{g2}\xi_g(r_{12})}{2(1 - \xi_g^2(r_{12}))}\right]}{2\pi\sqrt{1 - \xi_g^2(r_{12})}} \delta_F(\delta_{g1})\delta_F(\delta_{g2})$$

Font-Ribera, McDonald et Miralda-Escudé (2012)

$$\xi_g(r, \mu) = \xi_0(r) + P_2(\mu)\xi_2(r) + P_4(\mu)\xi_4(r)$$

Hamilton (1992)

$$\xi_0(r) = \left(1 + \frac{2}{3}c + \frac{1}{5}c^2\right) \xi(r),$$

$$\xi_2(r) = \left(\frac{4}{3}c + \frac{4}{7}c^2\right) [\xi(r) - \bar{\xi}(r)],$$

$$\xi_4(r) = \frac{8}{35}c^2 \left[\xi(r) + \frac{5}{2}\bar{\xi}(r) - \frac{7}{2}\bar{\bar{\xi}}(r) \right],$$

$$\bar{\xi}(r) = 3r^{-3} \int_0^r \xi(s)s^2 ds,$$

$$\bar{\bar{\xi}}(r) = 5r^{-5} \int_0^r \xi(s)s^4 ds.$$

III. Construction des mocks

FGPA :

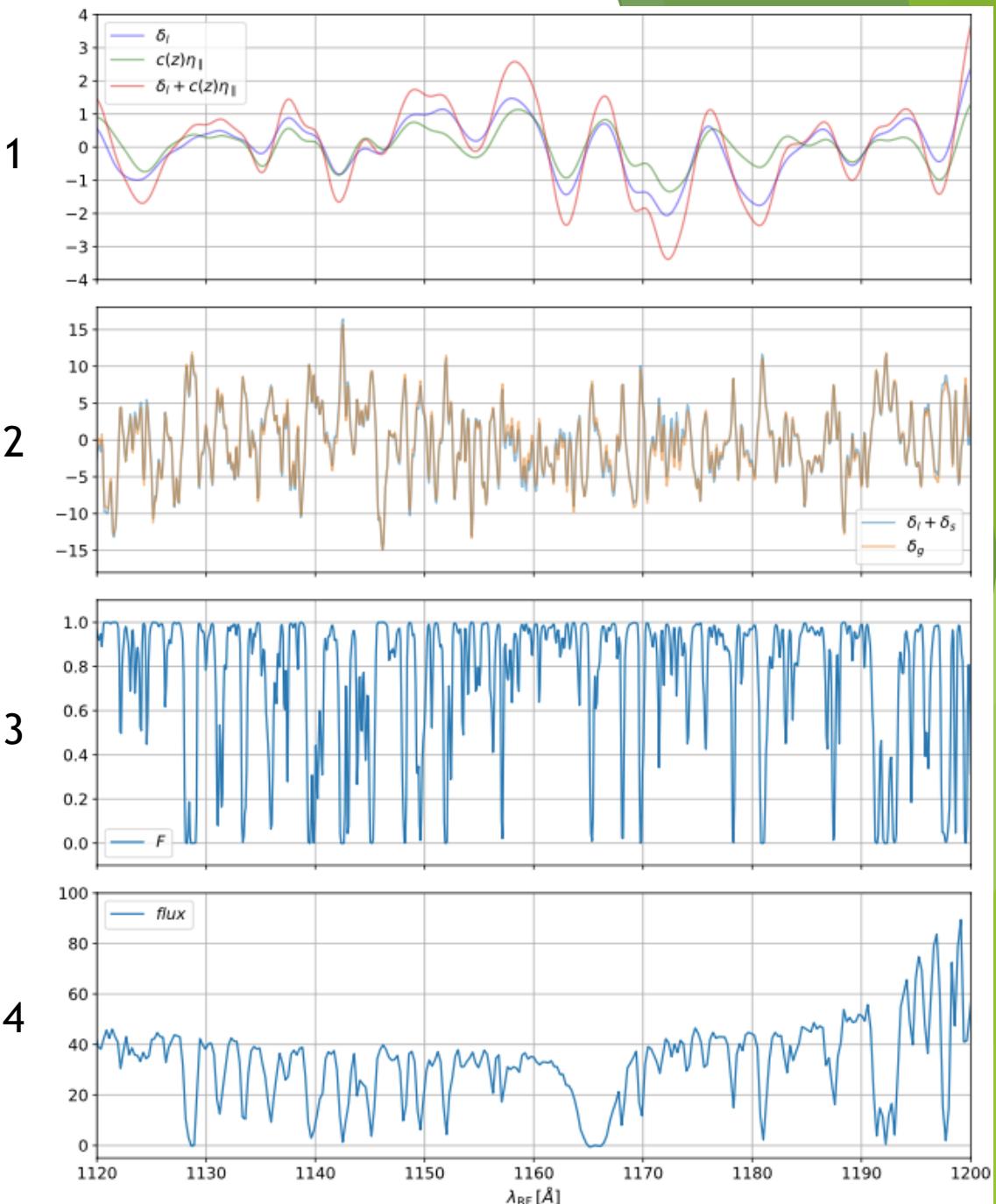
$$F = \exp[-a(z) \exp(b(z)G(z)(\delta_l + \delta_s + c(z)\eta_{\parallel}))]$$

1 : δ_l
 $c(z)\eta_{\parallel}$
 $\delta_l + c(z)\eta_{\parallel}$

2 : $\delta_l + \delta_s$
 $\delta_l + \delta_s + c(z)\eta_{\parallel}$

3 : F

4 : spectre (flux)

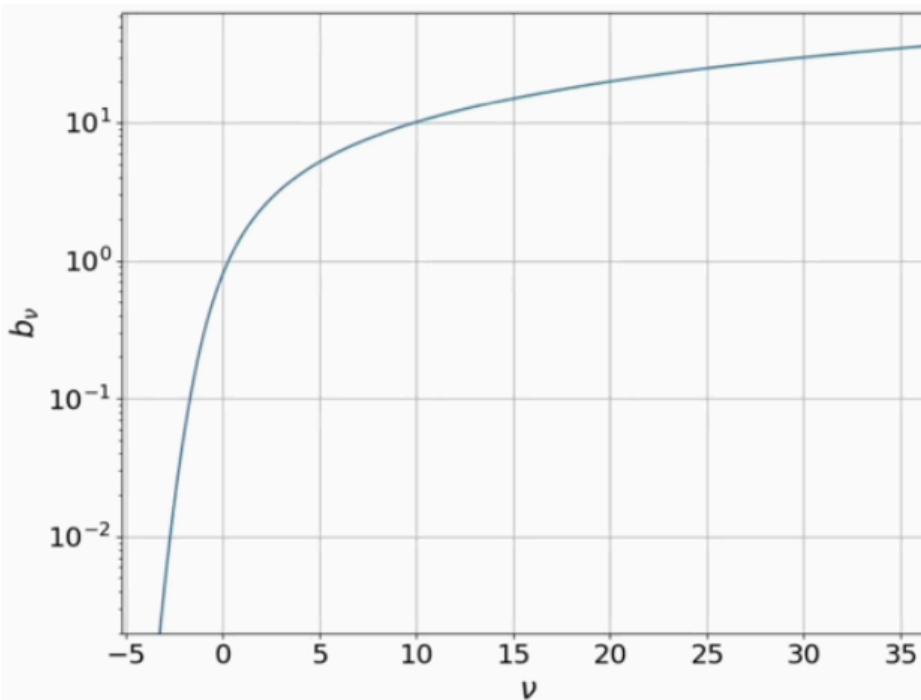


Les HCD

$$\left(\frac{b_\nu}{b_g}\right)^2 = \frac{p_g(\nu)}{\left(\int_\nu^\infty d\delta_g p_g(\delta_g)\right)^2} \int_\nu^\infty dy_1 p_g(y_1) y_1$$

Font-Ribera et Miralda-Escudé (2012)

$$b_\nu = \frac{p_g(\nu)}{\int_\nu^\infty d\delta_g p_g(\delta_g)}$$



Ajustement des paramètres

$$F = \exp[-a(z) \exp(b(z)G(z)(\delta_l + \delta_s + c(z)\eta_{||}))]$$

4 paramètres à ajuster : $a(z)$; $b(z)$; $c(z)$; $P_s(k, z)$
afin d'obtenir les bons : $b_{\text{Ly}\alpha}(z)$, $\beta_{\text{Ly}\alpha}(z)$, $\langle F \rangle(z)$ et $P^{1D}(z)$

- Procédure itérative effectuée pour :

$$z_1 = 1.8 ; z_2 = 2.2 ; z_3 = 2.6 ; z_4 = 3.0 ; z_5 = 3.6$$

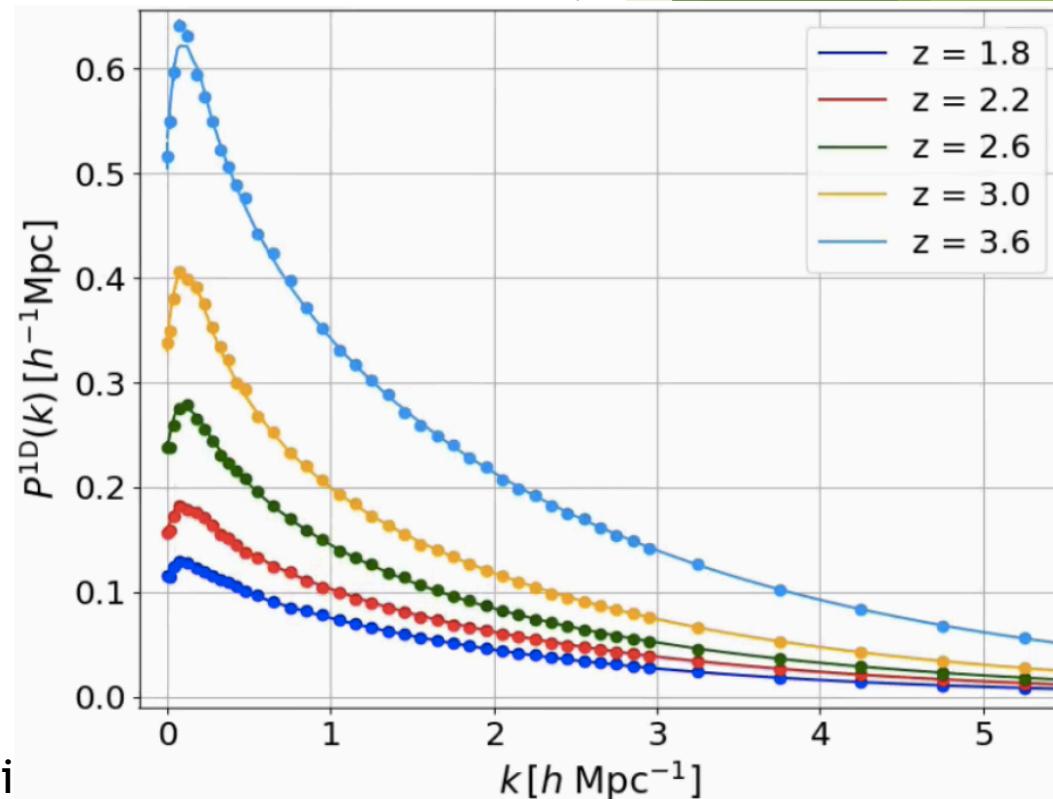
- Initialisation :

- $c(z) = \beta_{\text{Ly}\alpha}(z)$
- $a(z)$ et $b(z)$ déduits de $\langle F \rangle(z)$ et $\int P^{1D}(z)$
- $P_s(k)$ déterminé itérativement



- Itérations :

- calculer la prédition
- ajuster la prédition
- comparer $b_{\text{Ly}\alpha}$, $\beta_{\text{Ly}\alpha}(z)$ et $\langle F \rangle(z)$ aux données
- modifier légèrement $a(z)$, $b(z)$ et $c(z)$ et recommencer si nécessaire

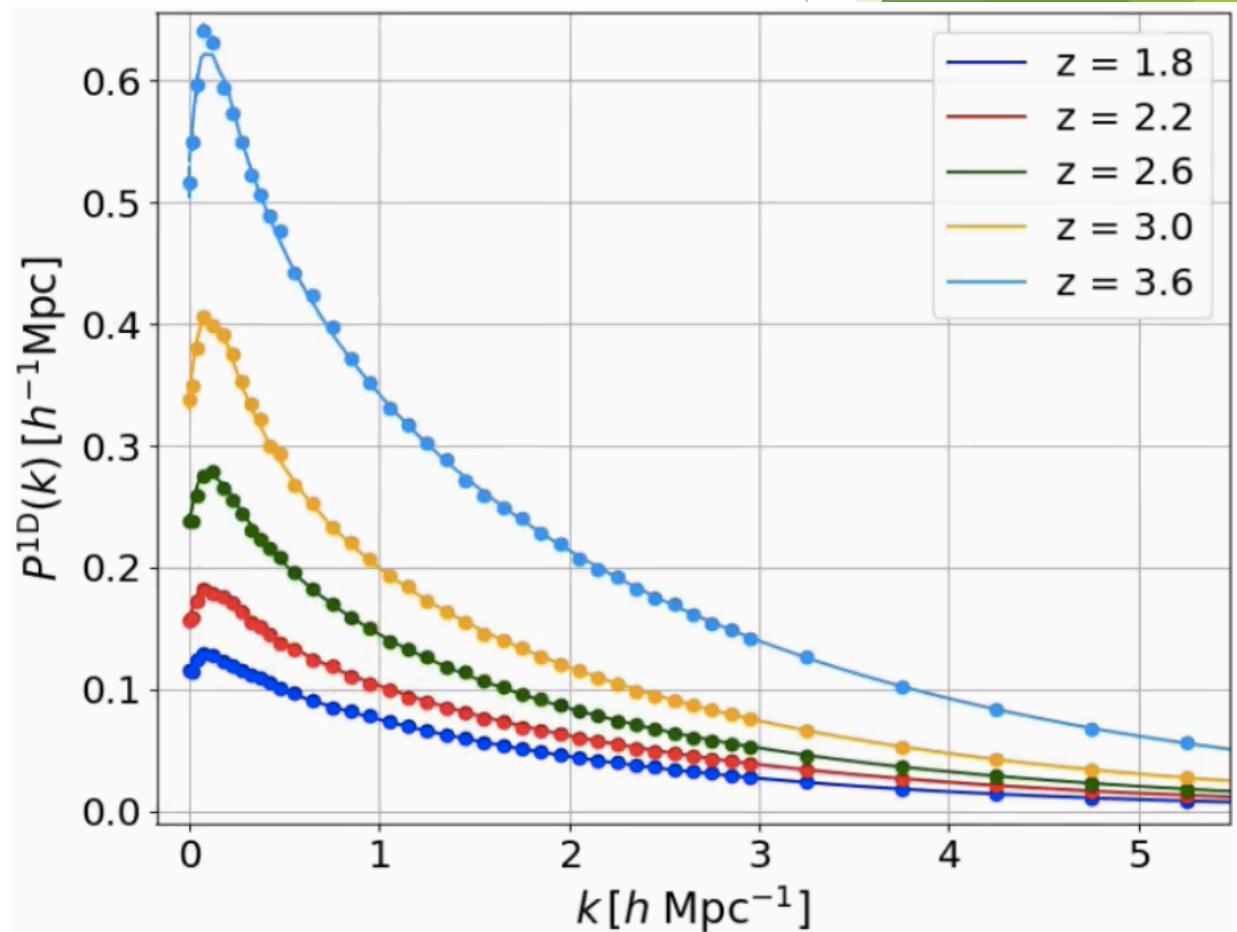


Ajustement des paramètres

- $P_s(k)$: procédure itérative

$$P_s^{n+1}(k) = P_s^n(k) \frac{P_{\text{modèle}}^{\text{1D}}(k)}{P_{\text{mock}}^{\text{1D}}(k)}$$

10 itérations suffisantes

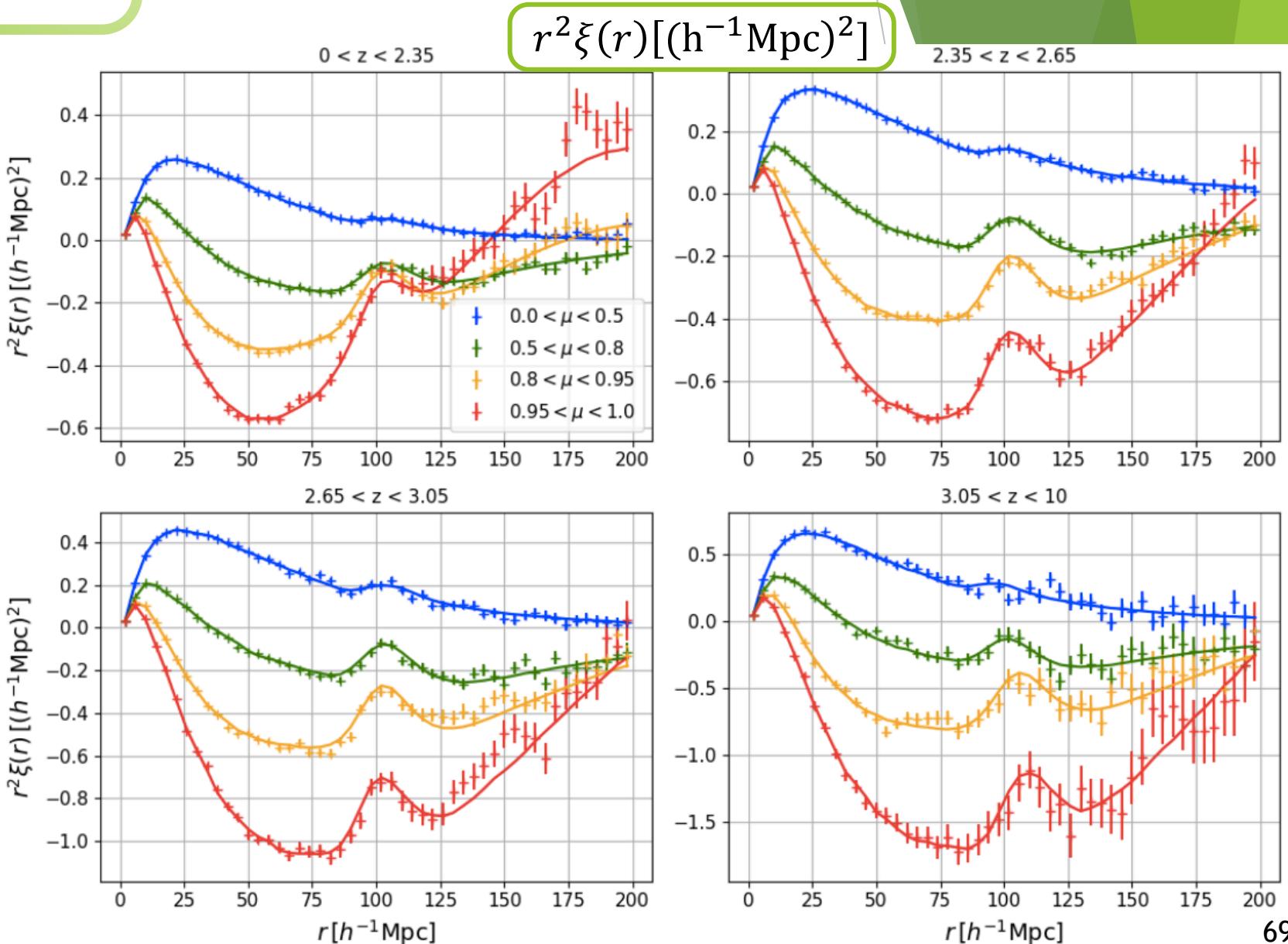


IV. Analyse des mocks

- Mocks continu+hcd :

30 auto-corrélations Ly α x Ly α

0 < μ < 0.5
 0.5 < μ < 0.8
 0.8 < μ < 0.95
 0.95 < μ < 1



IV. Analyse des mocks

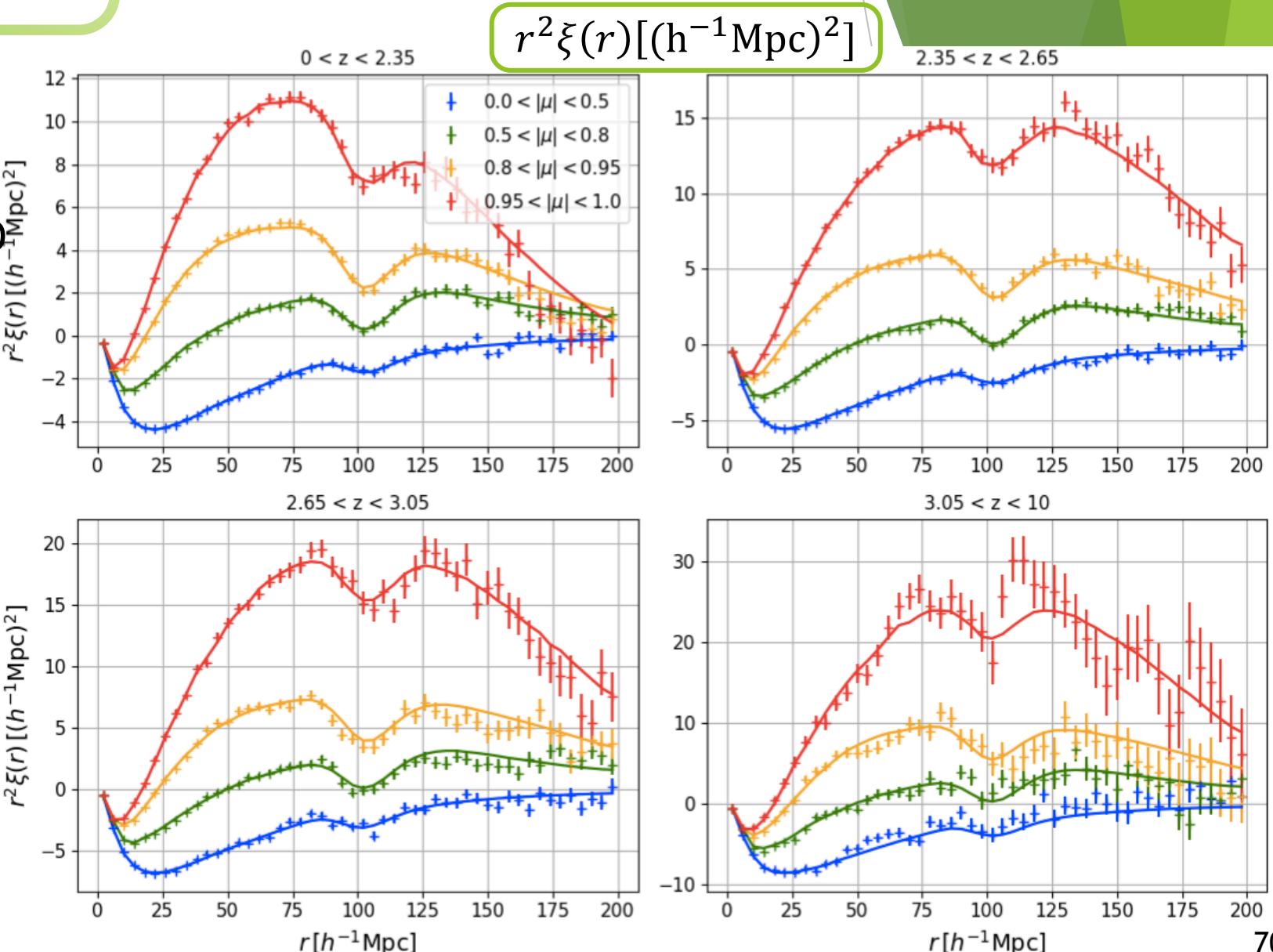
- Mocks continu+hcd:

30 corrélations croisées Ly α x QSO

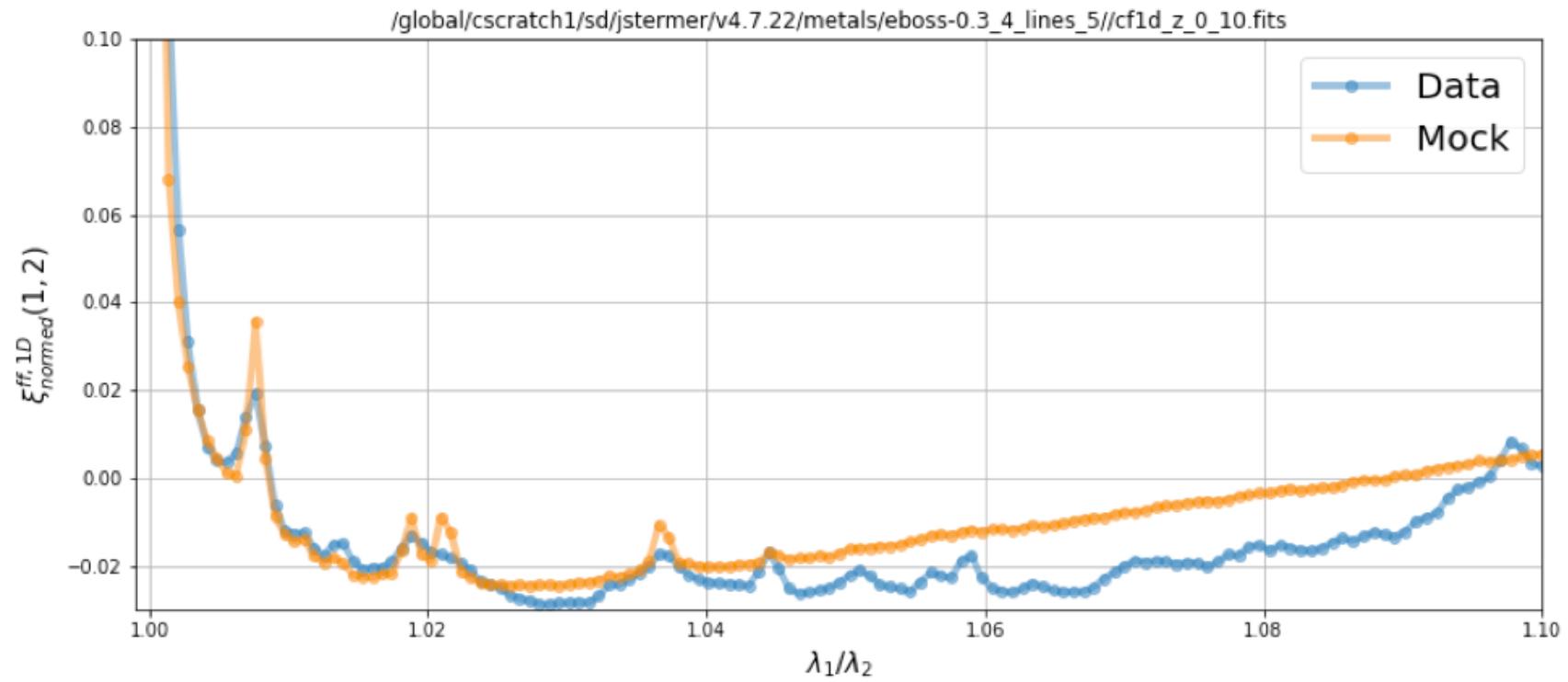
$$\begin{aligned} b_{\text{Ly}\alpha} &< 0 \\ b_{\text{QSO}} &> 0 \end{aligned}$$

\rightarrow corrélation < 0

0 < μ < 0.5
 0.5 < μ < 0.8
 0.8 < μ < 0.95
 0.95 < μ < 1



Corrélation à 1 dimension



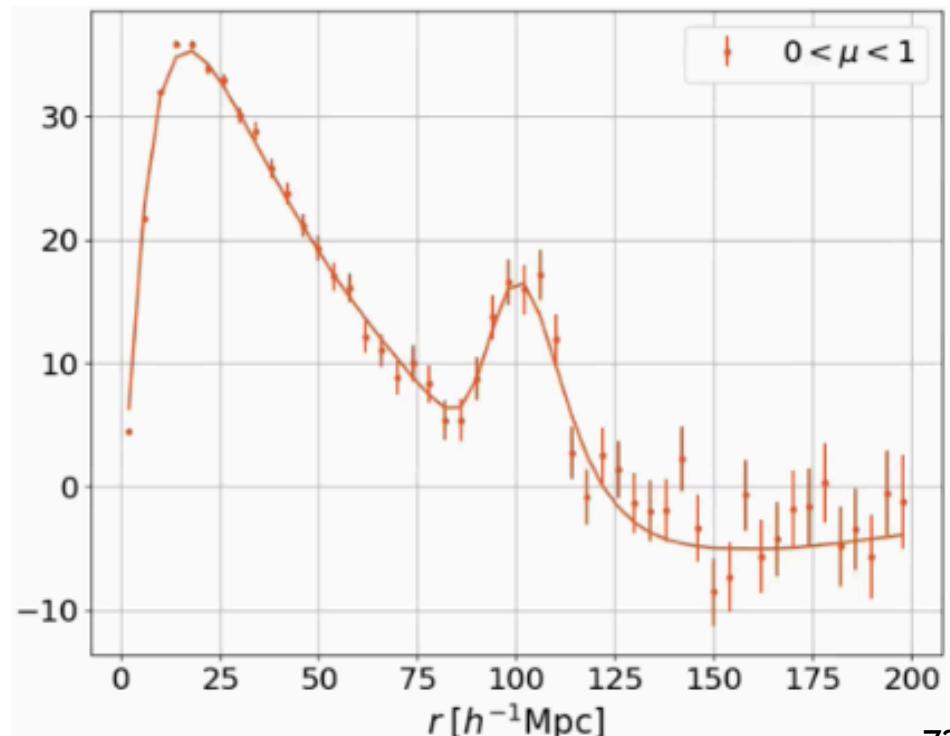
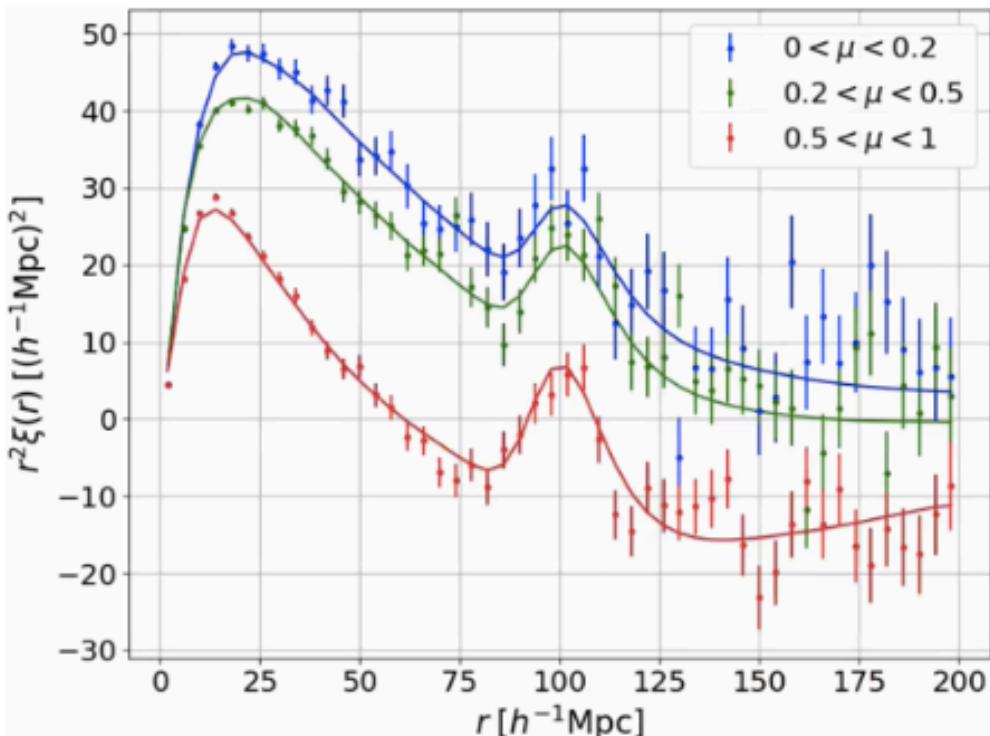
Corrélation des HCD

en spare

- Raw mocks :

auto-corrélation HCD x HCD

$$b_{HCD} = 2.045 \pm 0.016 \quad (b_{HCD} = 2 \text{ visé})$$

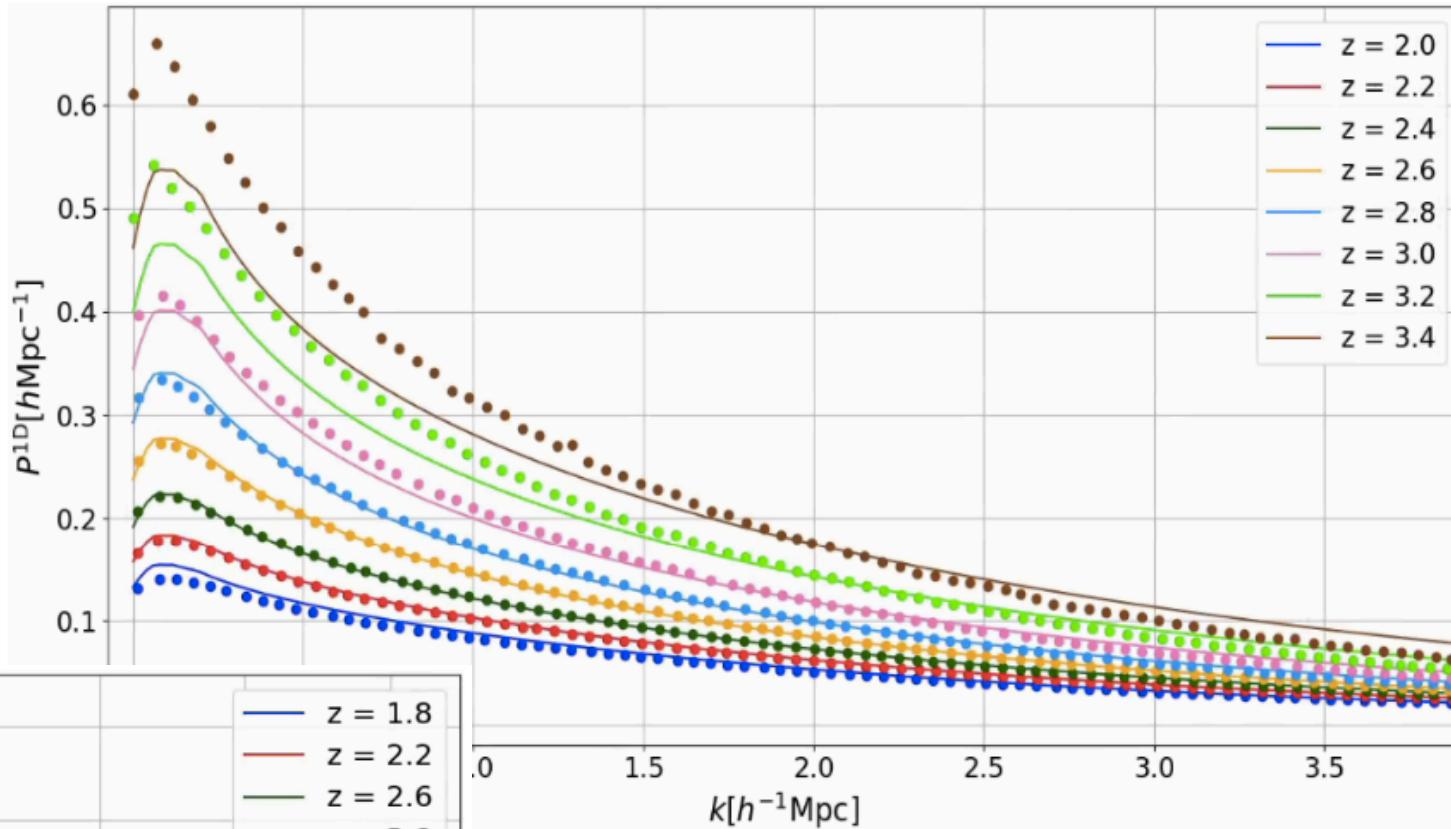
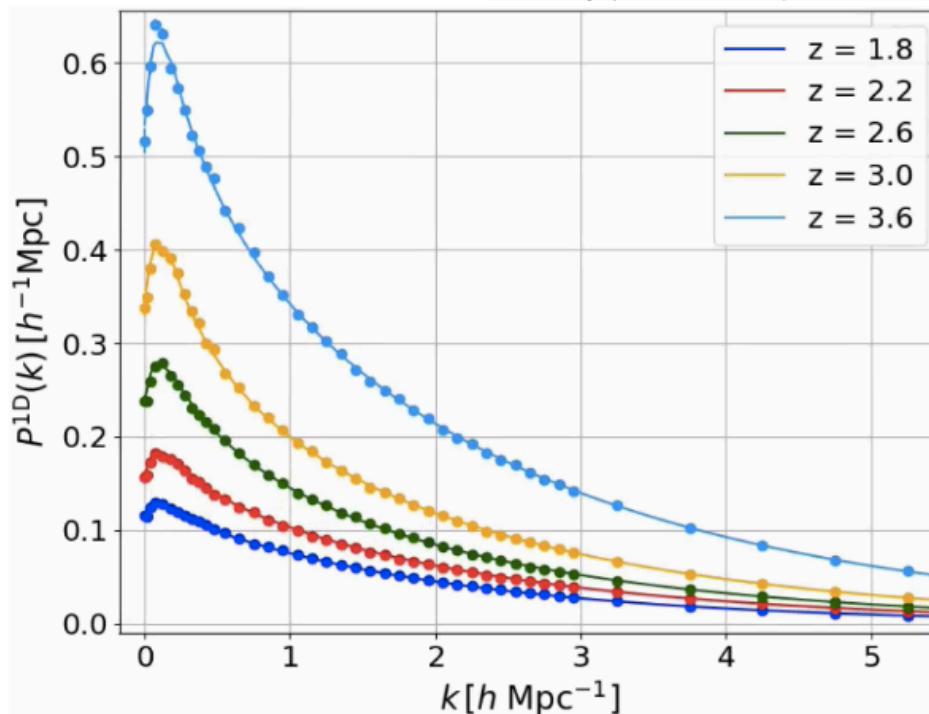


Problème P1D

- Raw mocks :

spectre de puissance 1D $P^{1D}(k)$

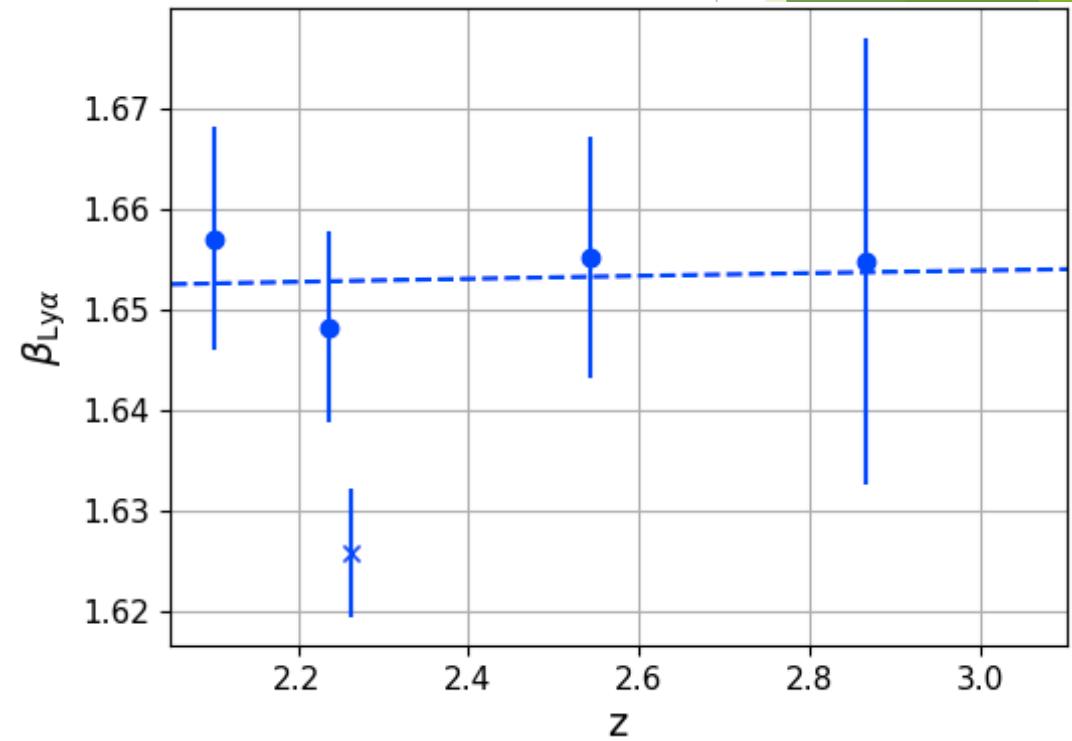
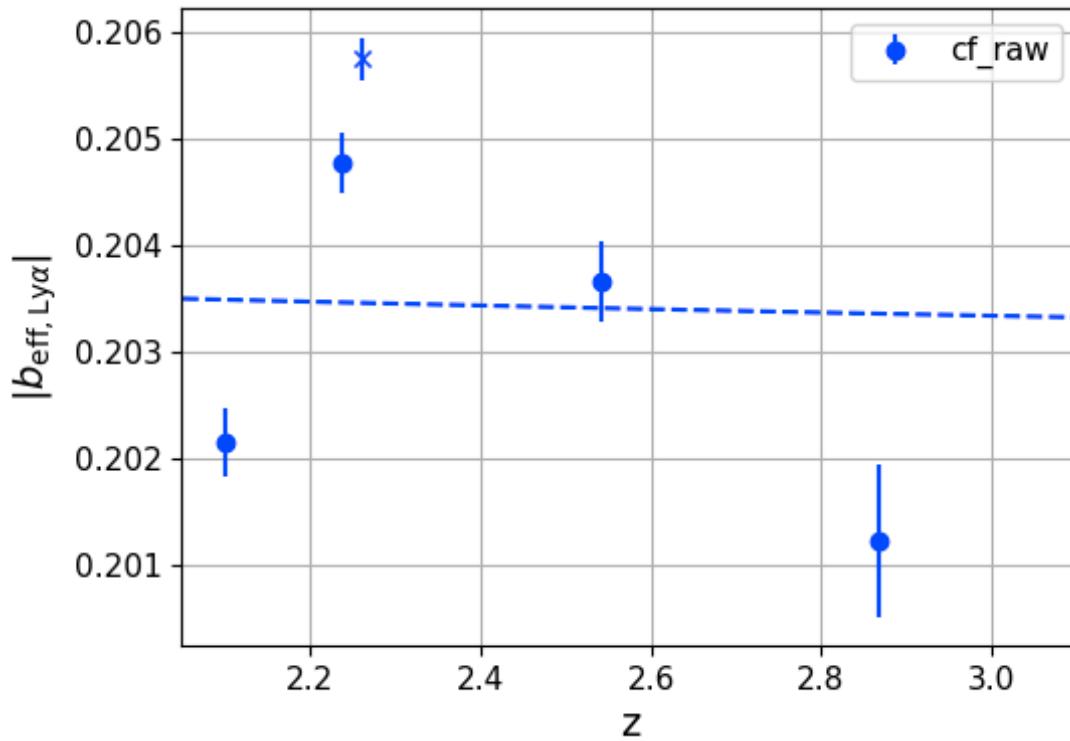
$P^{1D}(k)$ obtenus
avec la procédure
d'ajustement :



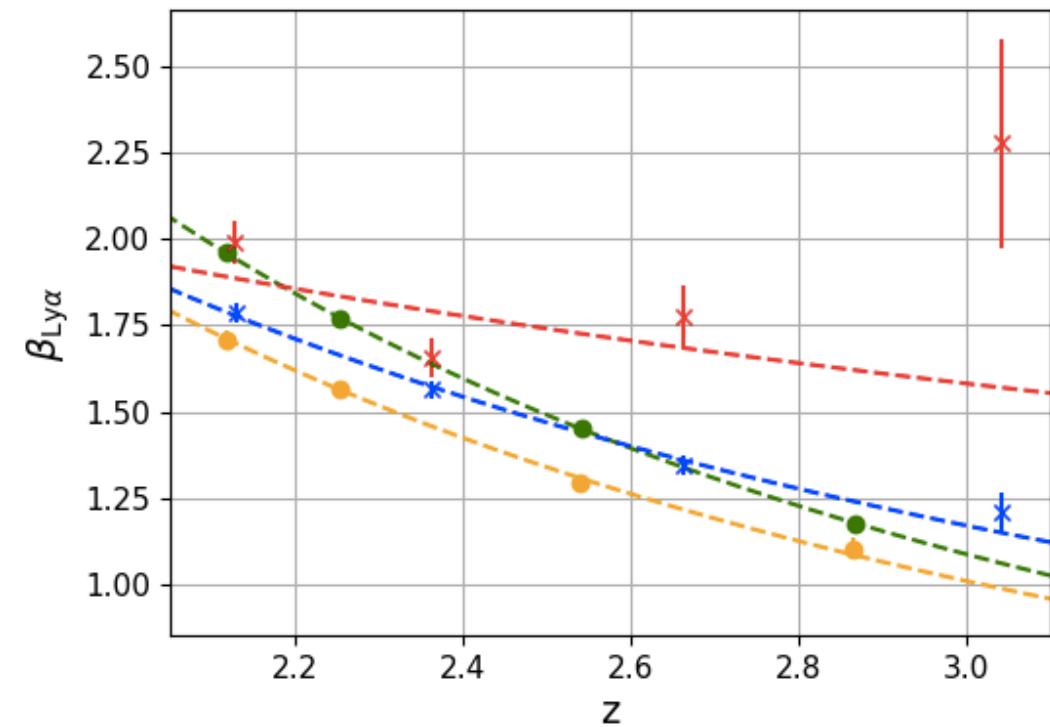
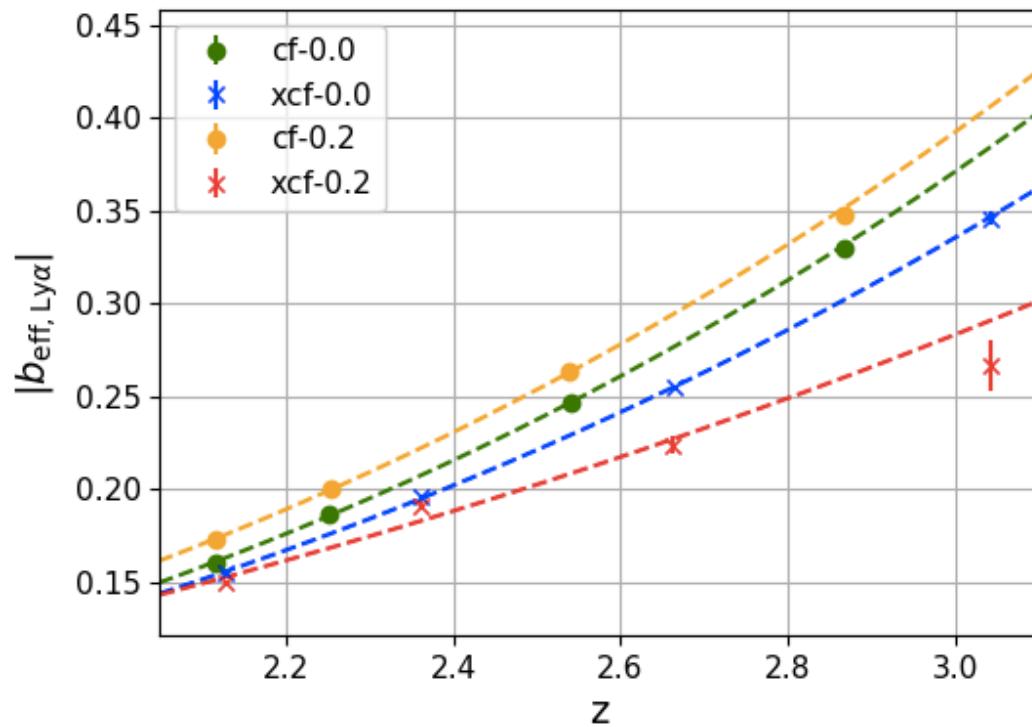
→ Bug introduit avec la
dépendance en z ?

spare tests P1D (z fixé par ex)

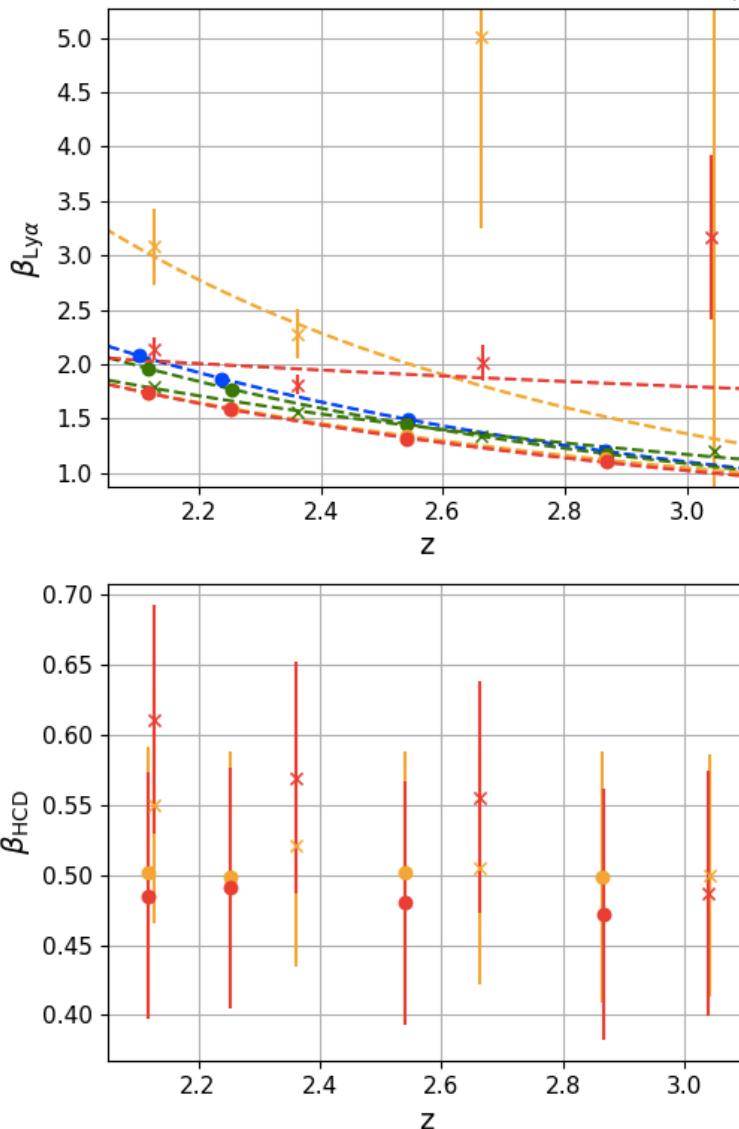
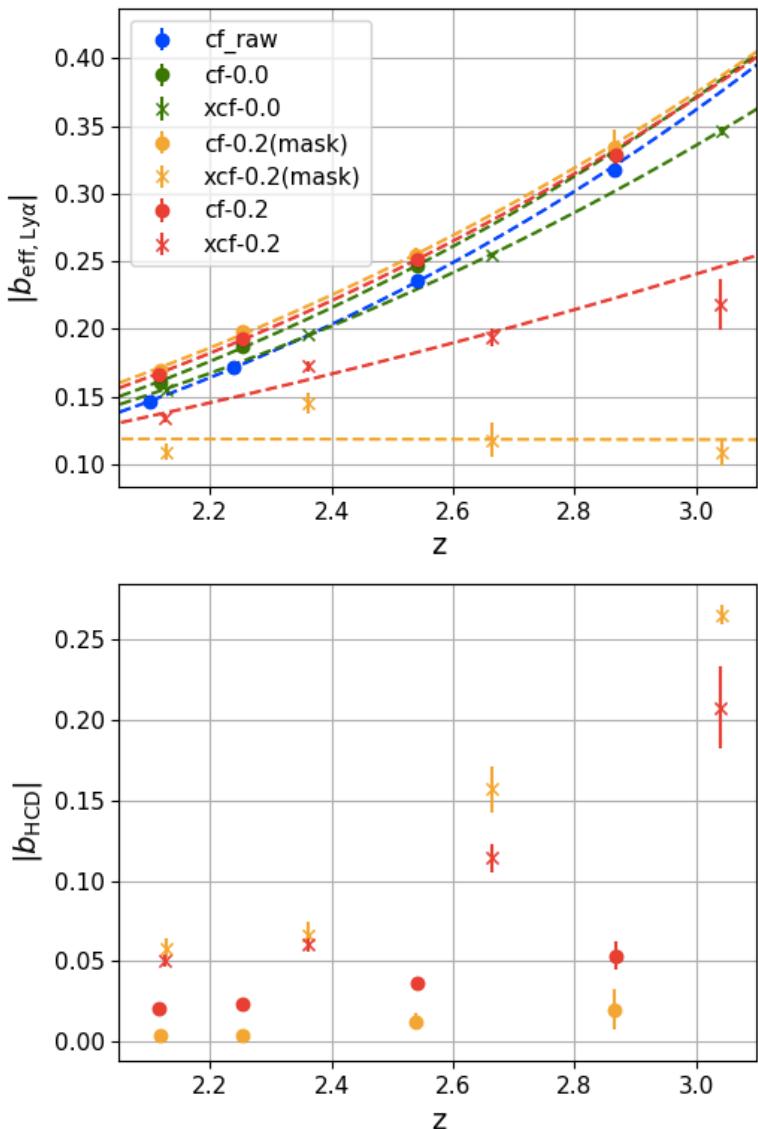
Problème mesure coadd



Problème mesure XCF



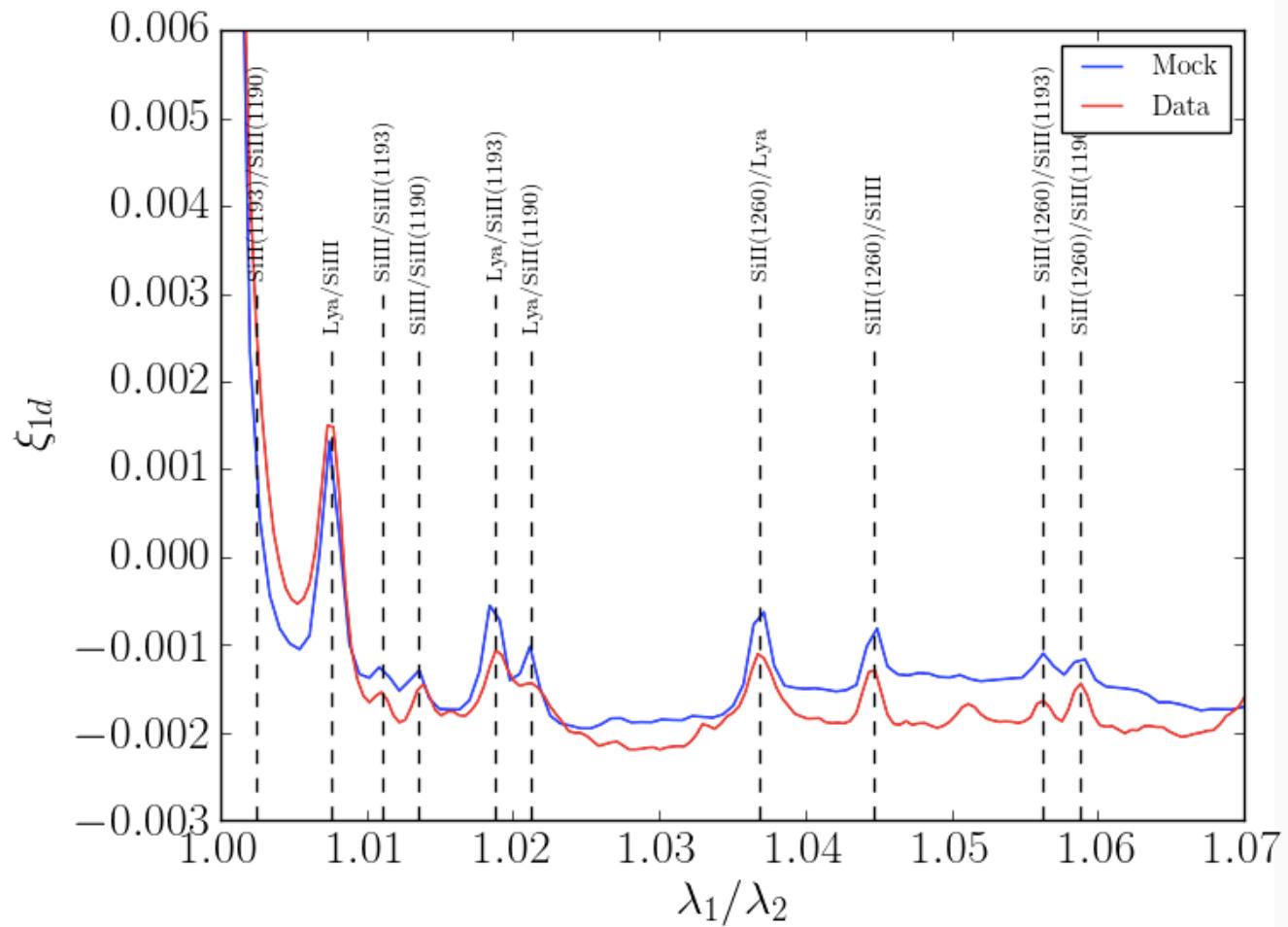
All measurements



Métaux dans les mocks

DR12 mocks :

$$\tau_{met} \propto \tau_{Ly\alpha}, \tau_{Ly\alpha}^2$$



Saclay mocks + quickquasars :

$$\tau_{met} \propto \tau_{Ly\alpha}$$

→ Corrélations (met x met) moins importantes

Analyse RSD Ly α

- Mesure et modélisation des corrélation :

$$(\text{Ly}\alpha \times \text{Ly}\alpha) + (\text{Ly}\alpha \times \text{QSO})$$

$$b_{\text{Ly}\alpha}, \beta_{\text{Ly}\alpha}$$

$$b_{\text{Ly}\alpha}, \beta_{\text{Ly}\alpha}$$

$b_{\text{QSO}}, \beta_{\text{QSO}} \rightarrow$ taux de croissance des structures :

$$f = b_{\text{QSO}} \times \beta_{\text{QSO}}$$