

# **Quinze années d'oscillations de baryons**

Éric Aubourg

APC/Université Paris Diderot et CEA Saclay

# Le phénomène des oscillations de baryons

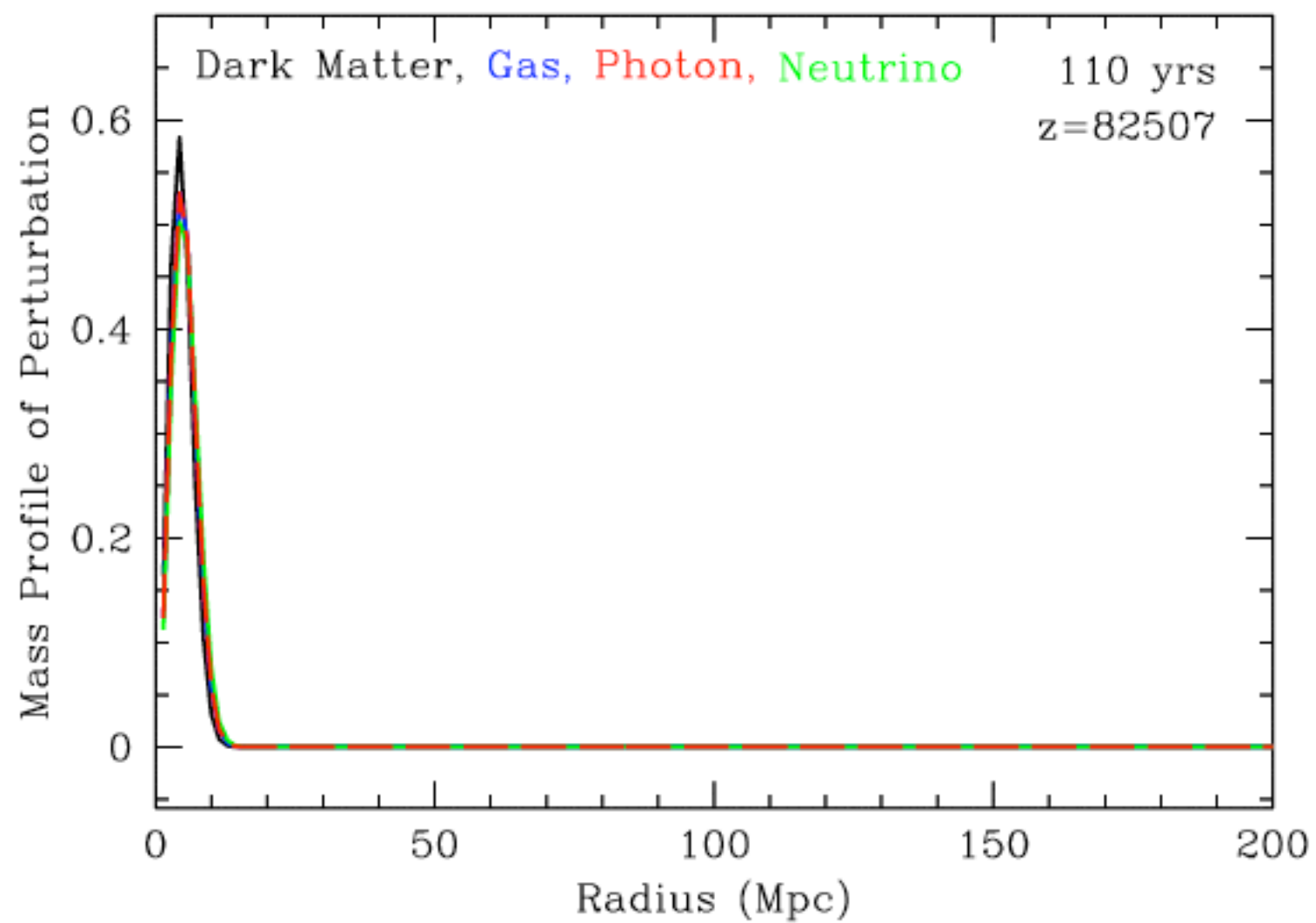
Les oscillations acoustiques de baryons (BAO, baryon acoustic oscillations) sont devenues ces dernières années une des méthodes d'étude de l'énergie noire.

Elles ont la même origine que les fluctuations du fond diffus cosmologique, mais laissent une empreinte dans la matière, au lieu du rayonnement électromagnétique.

# Le phénomène des oscillations de baryons

Suivons l'évolution d'une surdensité adiabatique (identique pour toutes les espèces considérées, neutrinos, baryons, photons, matière noire — CDM) dans le plasma primordial.

# État initial

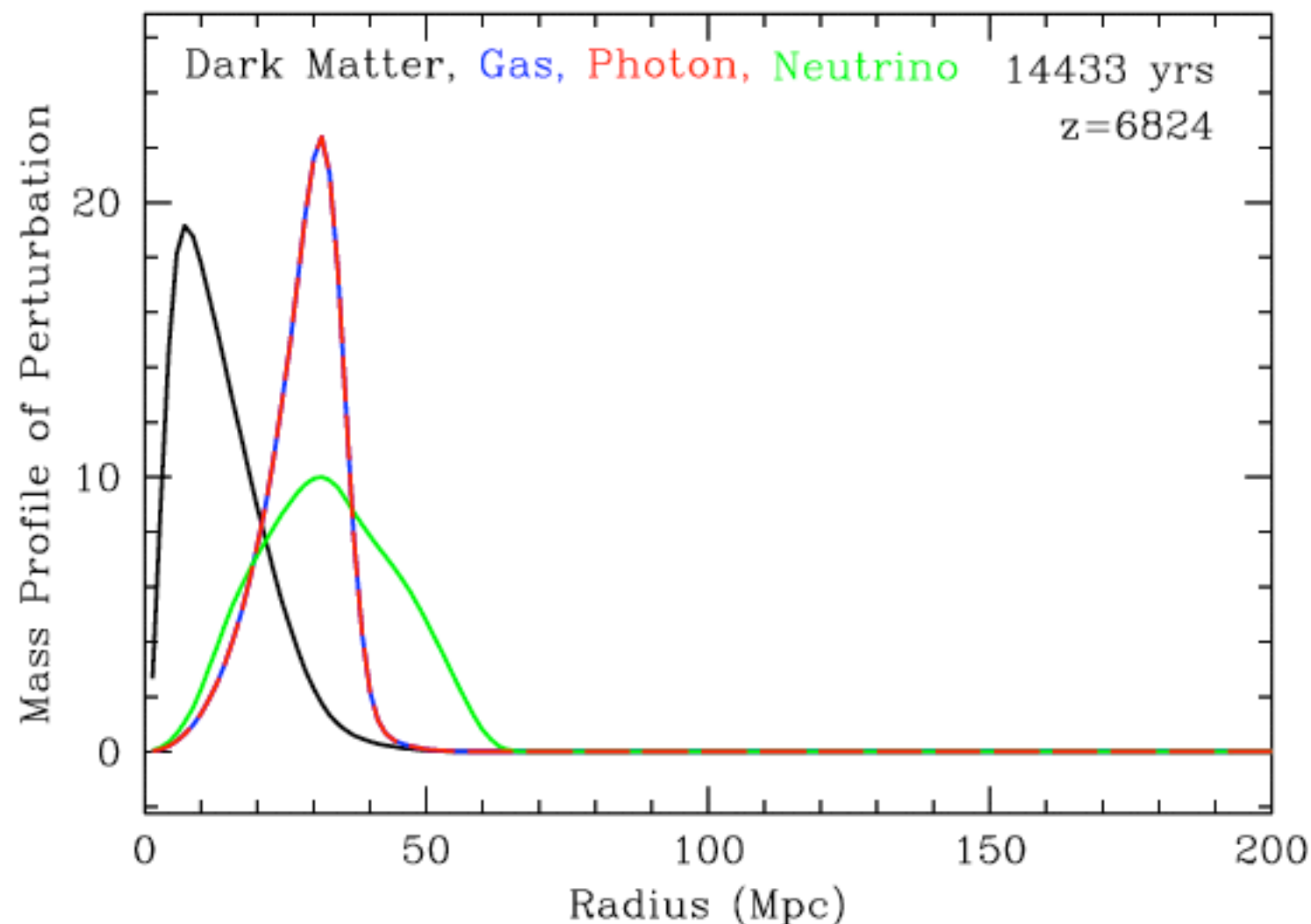


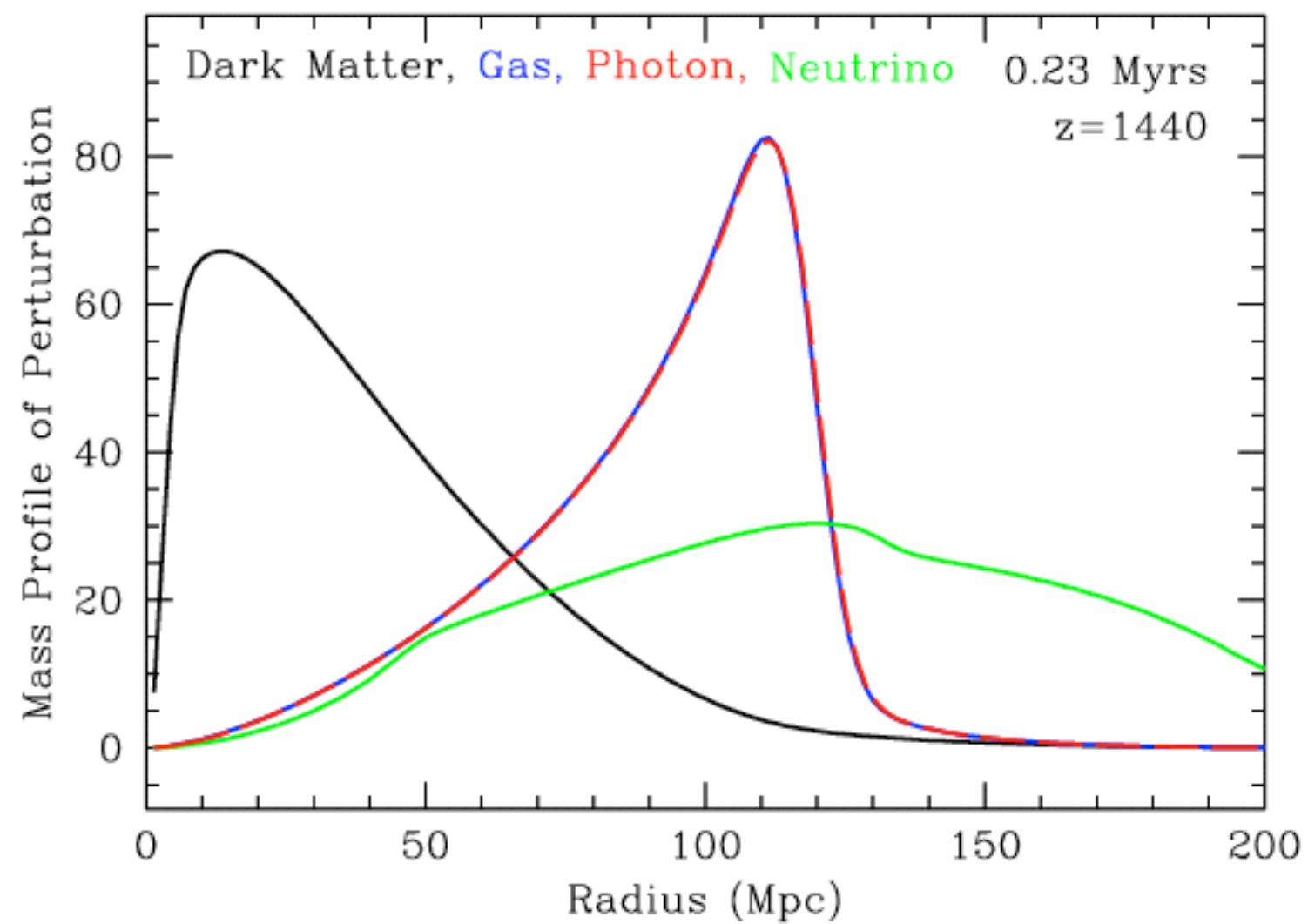


Les neutrinos s'échappent.

La matière noire attire la matière via la gravitation : le pic s'élargit.

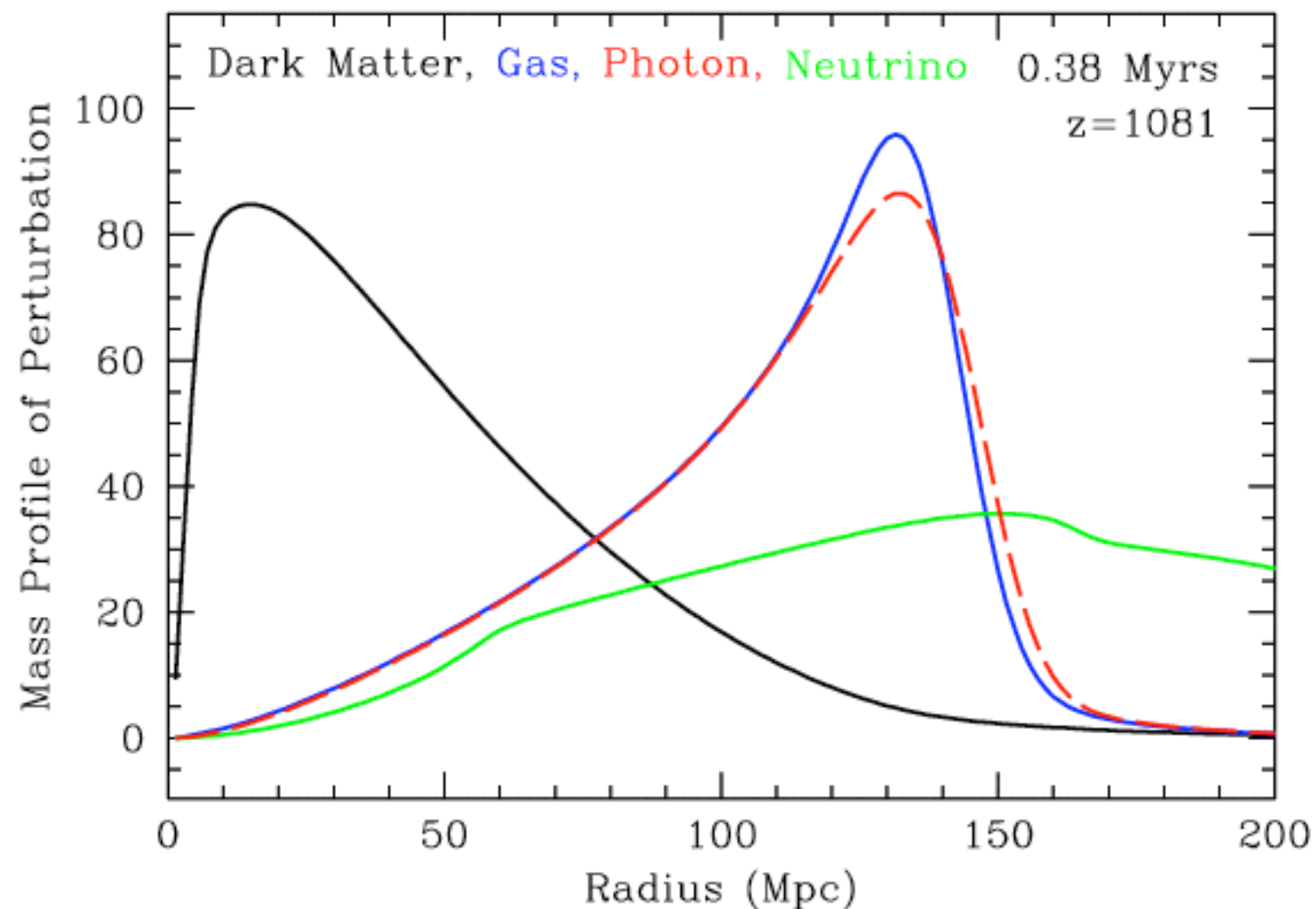
Le fluide baryons+photons est collisionnel et soumis à la pression : onde sonore sphérique  $\sim 0.57 c$





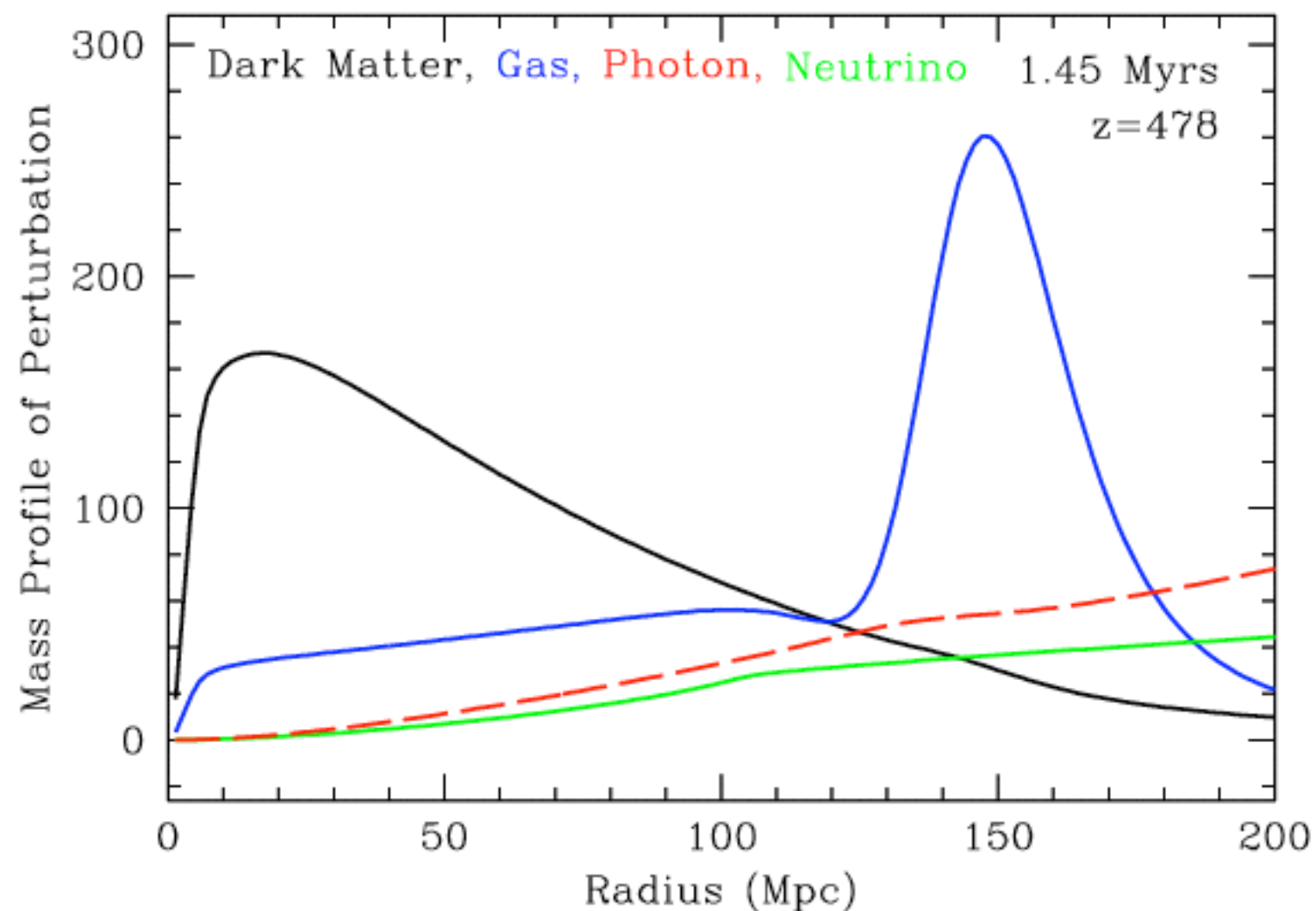
# Découplage: les photons s'échappent

## La vitesse du son diminue

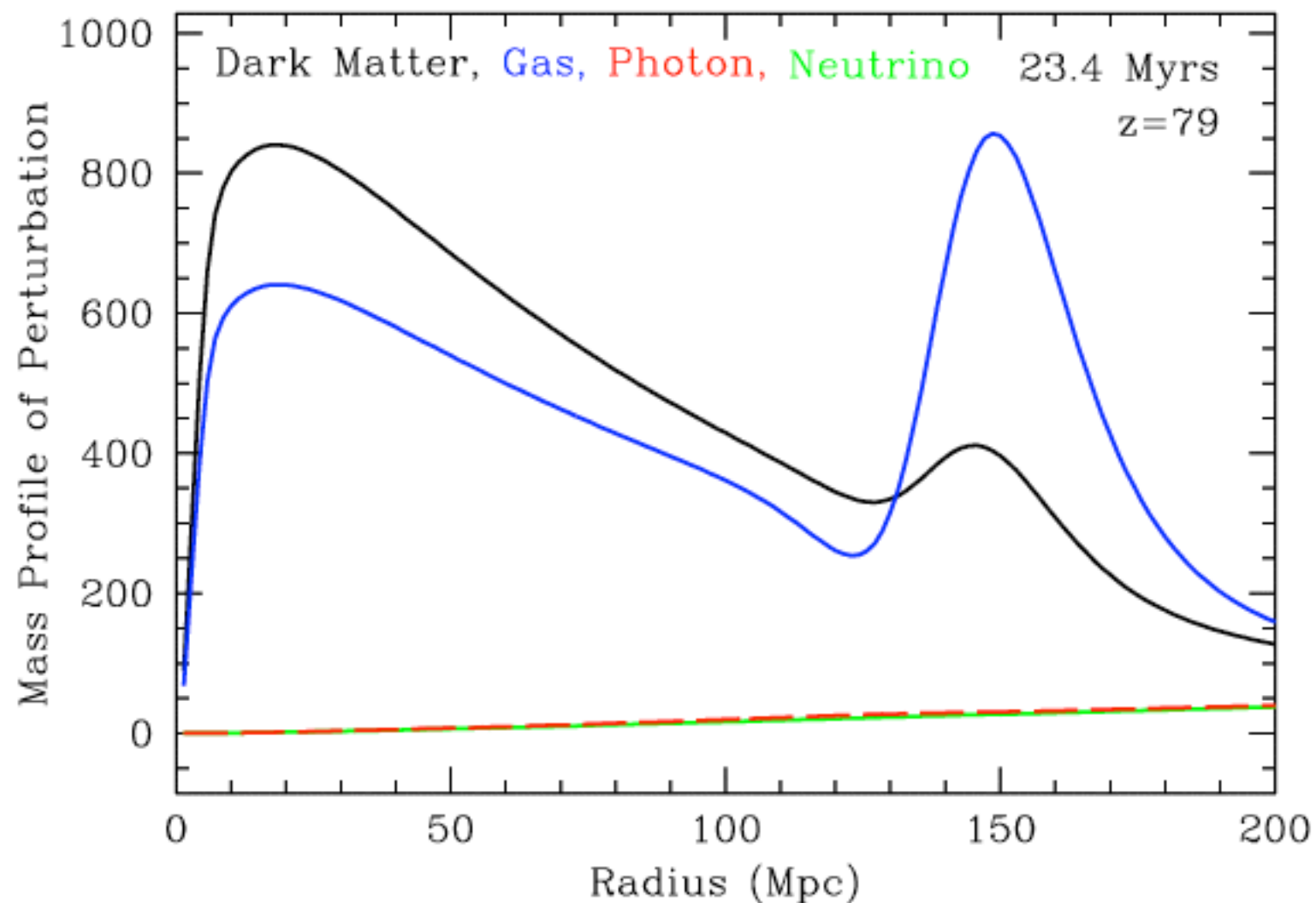


Les photons se sont échappés

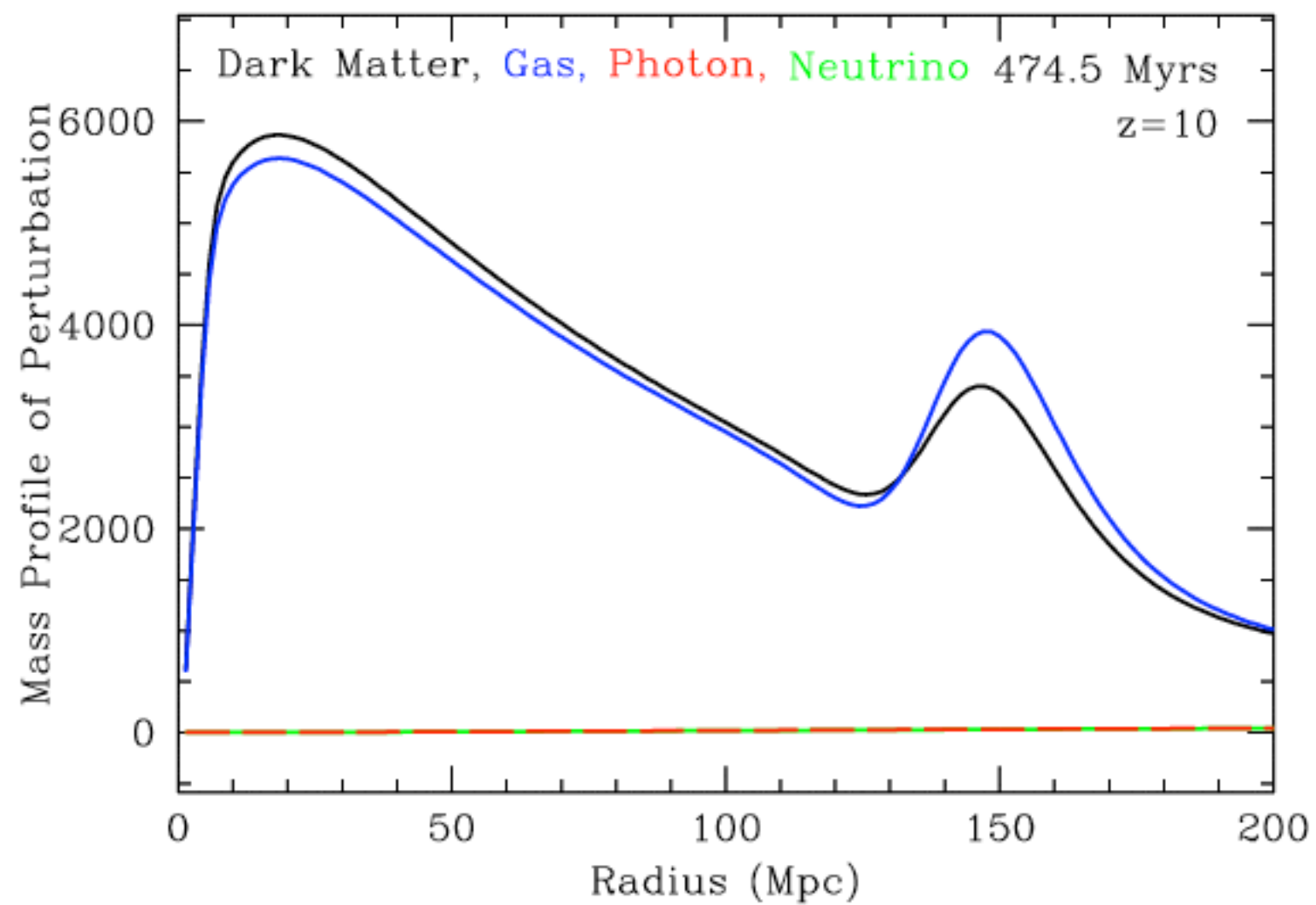
La vitesse du son est nulle : le pic de baryons, parvenu à 150 Mpc de la fluctuation originale, est gelé.

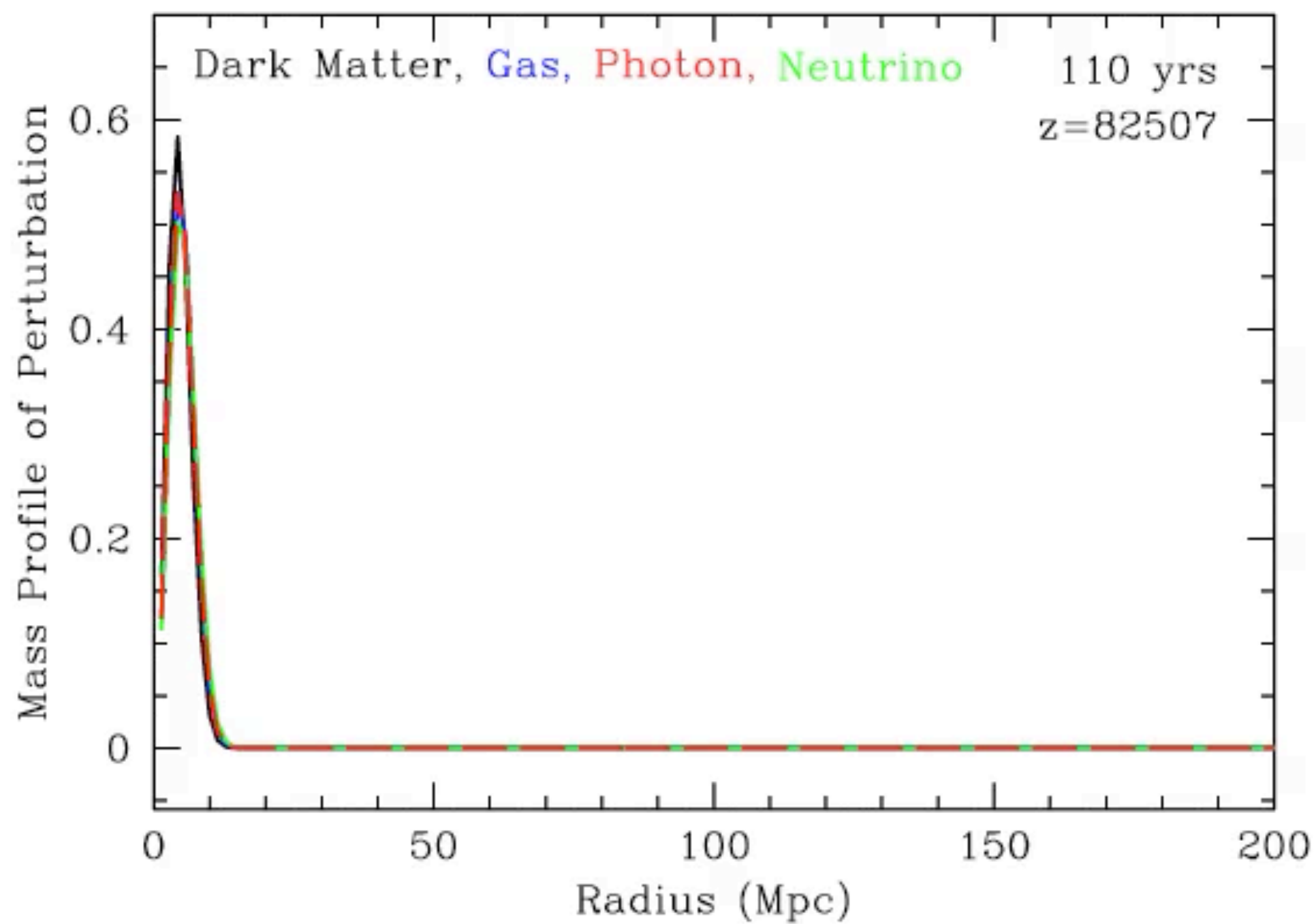


# Matière noire et baryons s'attirent via la gravité



# Maintenant





Pour chaque pic de densité des fluctuations primordiales :

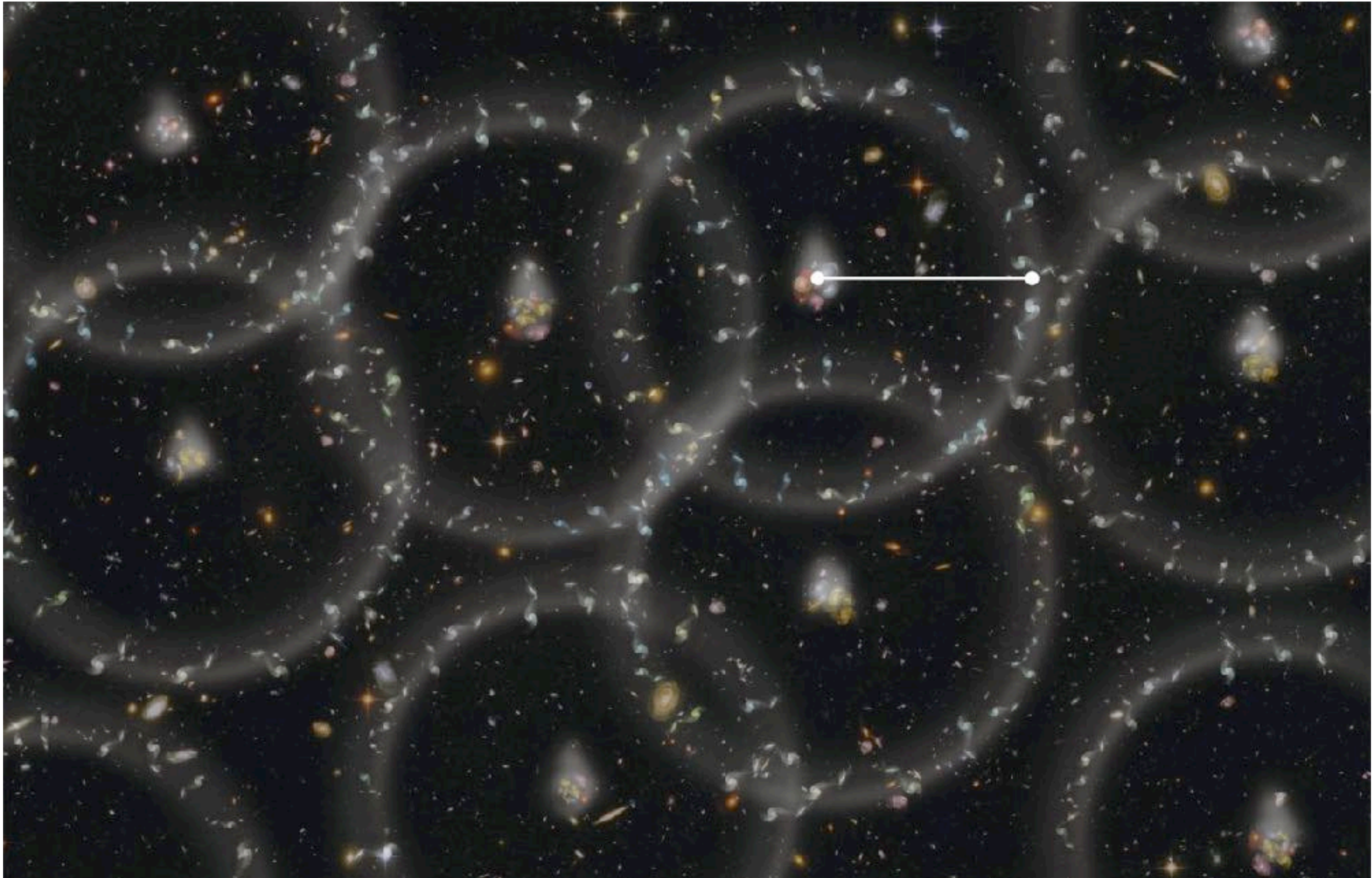
— le pic original est préservé (grâce à la matière noire !)

— on retrouve une surdensité de matière sur une coquille située à  $\sim 150$  Mpc (mesuré par CMB).

Dans l'univers plus récent, on devrait donc observer un pic dans la fonction de corrélation des fluctuations de matière, à une séparation de 150 Mpc.

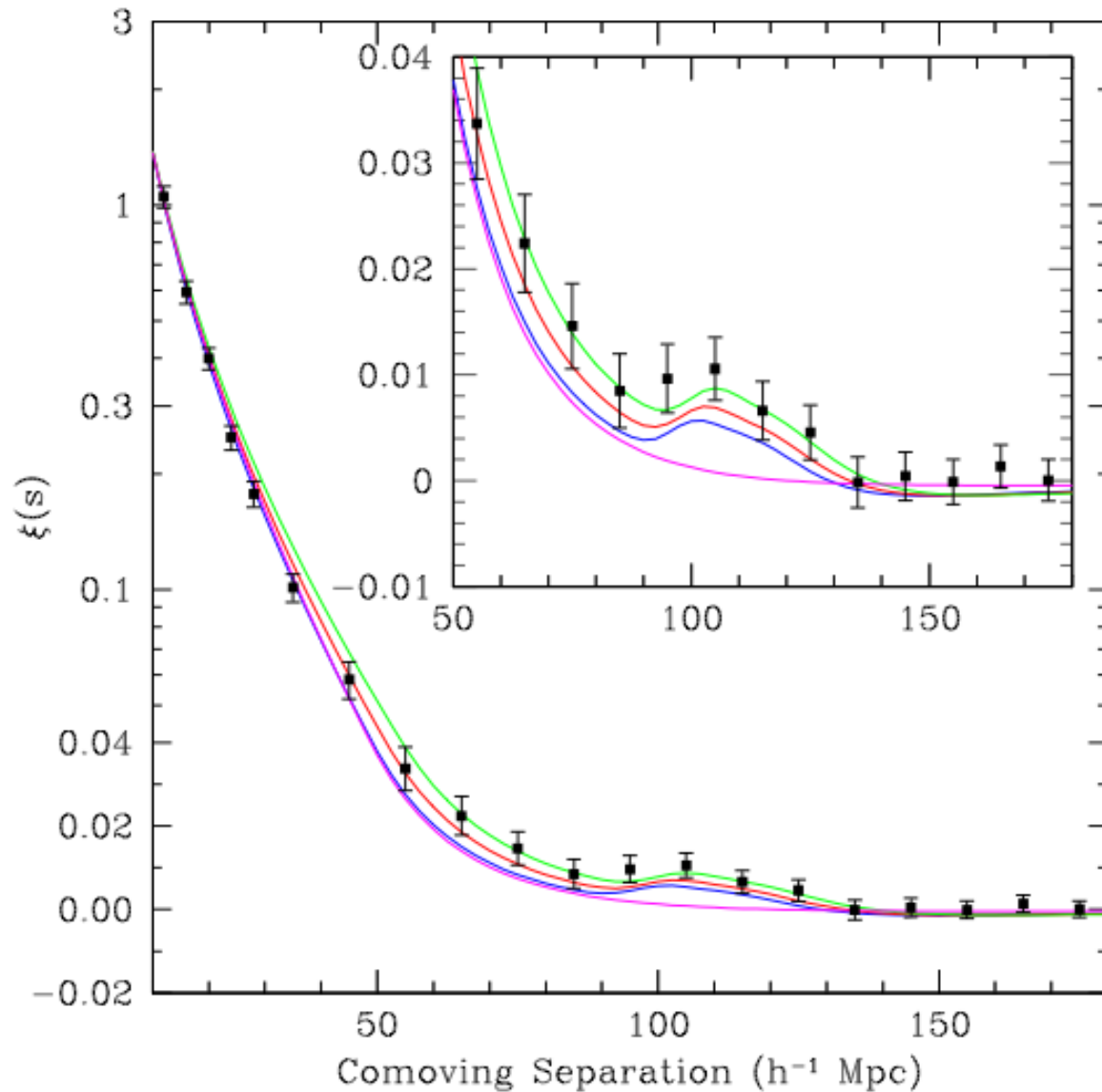


Contraste très exagéré !



Le phénomène des oscillations de baryons fournit un étalon de distance de  $\sim 150$  Mpc, grâce auquel on va pouvoir mesurer l'histoire de l'expansion de l'Univers.

# Premières détections : 2005



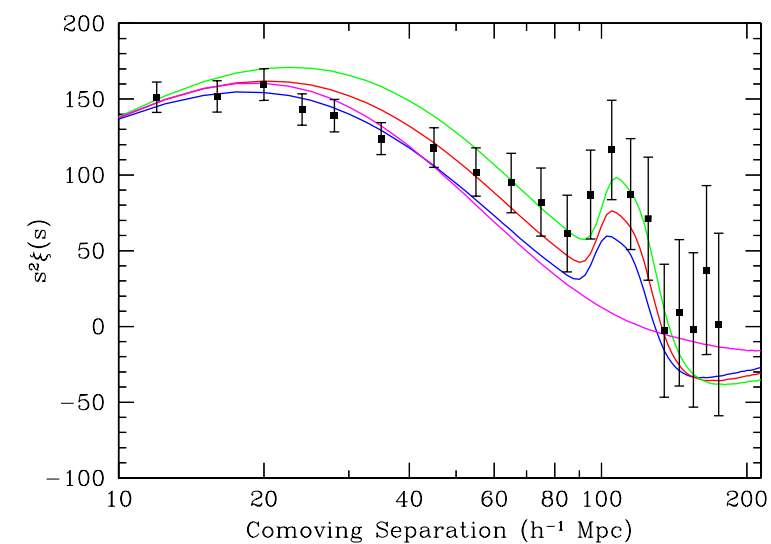
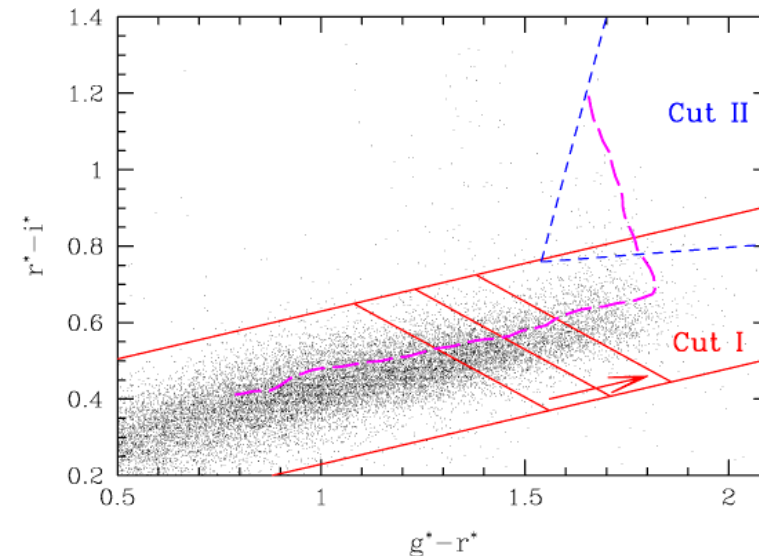
SDSS: Eisenstein et al. 2005  
2dF: Cole et al. 2005

FIG. 2.— The large-scale redshift-space correlation function of the SDSS LRG sample. The error bars are from the diagonal elements of the mock-catalog covariance matrix; however, the points are correlated. Note that the vertical axis mixes logarithmic and linear scalings. The inset shows an expanded view with a linear vertical axis. The models are  $\Omega_m h^2 = 0.12$  (top, green),  $0.13$  (red), and  $0.14$  (bottom with peak, blue), all with  $\Omega_b h^2 = 0.024$  and  $n = 0.98$  and with a mild non-linear prescription folded in. The magenta line shows a pure CDM model ( $\Omega_m h^2 = 0.105$ ), which lacks the acoustic peak. It is interesting to note that although the data ap-



# La détection des BAO dans SDSS

1. sélectionner des galaxies lumineuses rouges (LRG) dans le relevé photométrique SDSS par leur couleur.
2. prendre des spectres de  $\sim 45000$  LRG avec le spectrographe de SDSS, pour mesurer leur décalage vers le rouge (redshift) donc leur distance.
3. Estimer la fonction de corrélation à deux points (en utilisant des catalogues simulés comme référence, et l'estimateur de Landy-Szalay  $(DD-2DR+RR)/RR$ ).



# BAO photométriques : se passer de spectrographe

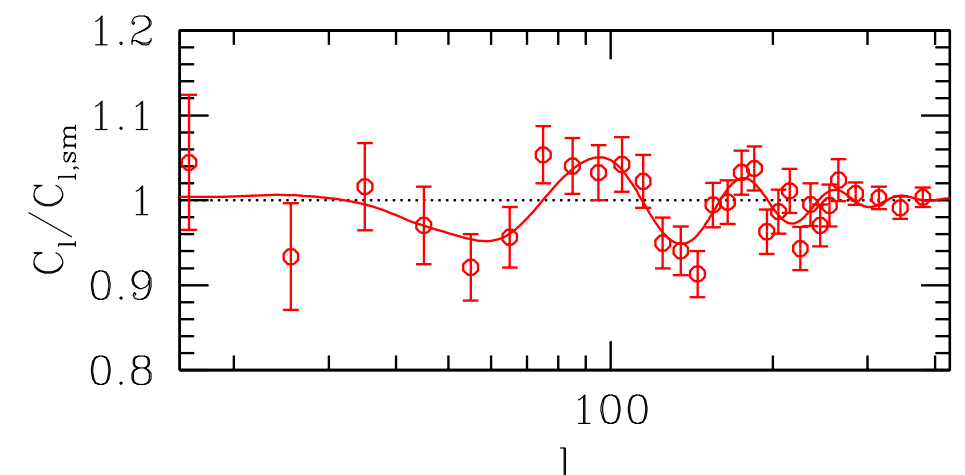
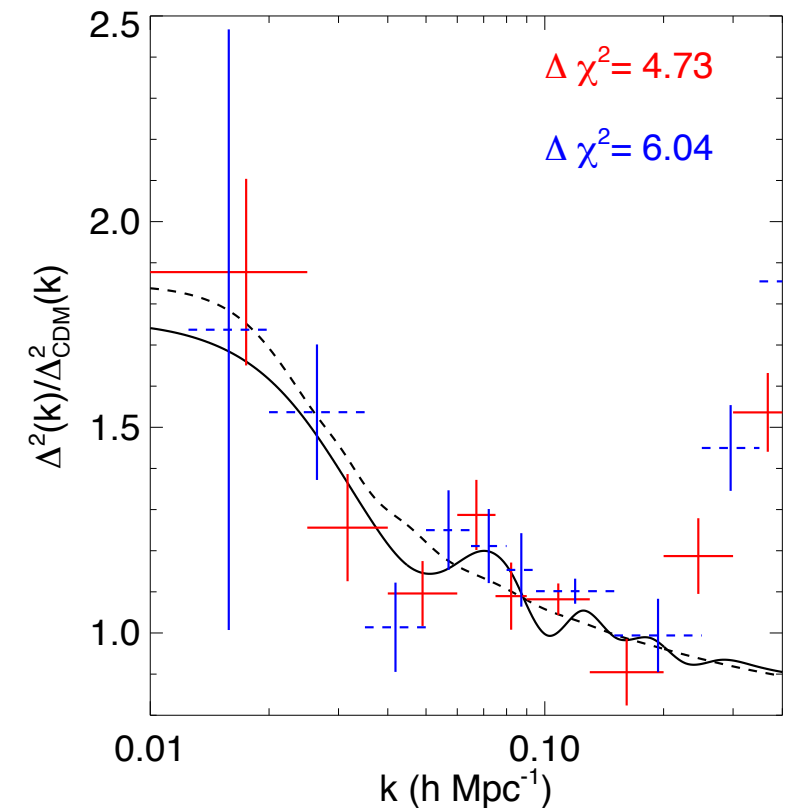
Les BAO peuvent être trouvées dans des catalogues utilisant des redshifts photométriques (photo-z), moins précis, mais plus économes en temps de télescope.

La précision  $\sim 0.05(1+z)$  dilue l'effet le long de la ligne de visée : la mesure est 2-D, dans des coquilles successives.

Padmanabhan et al. 2006 : 600k LRG

Ho et al. 2011 : 900k LRG

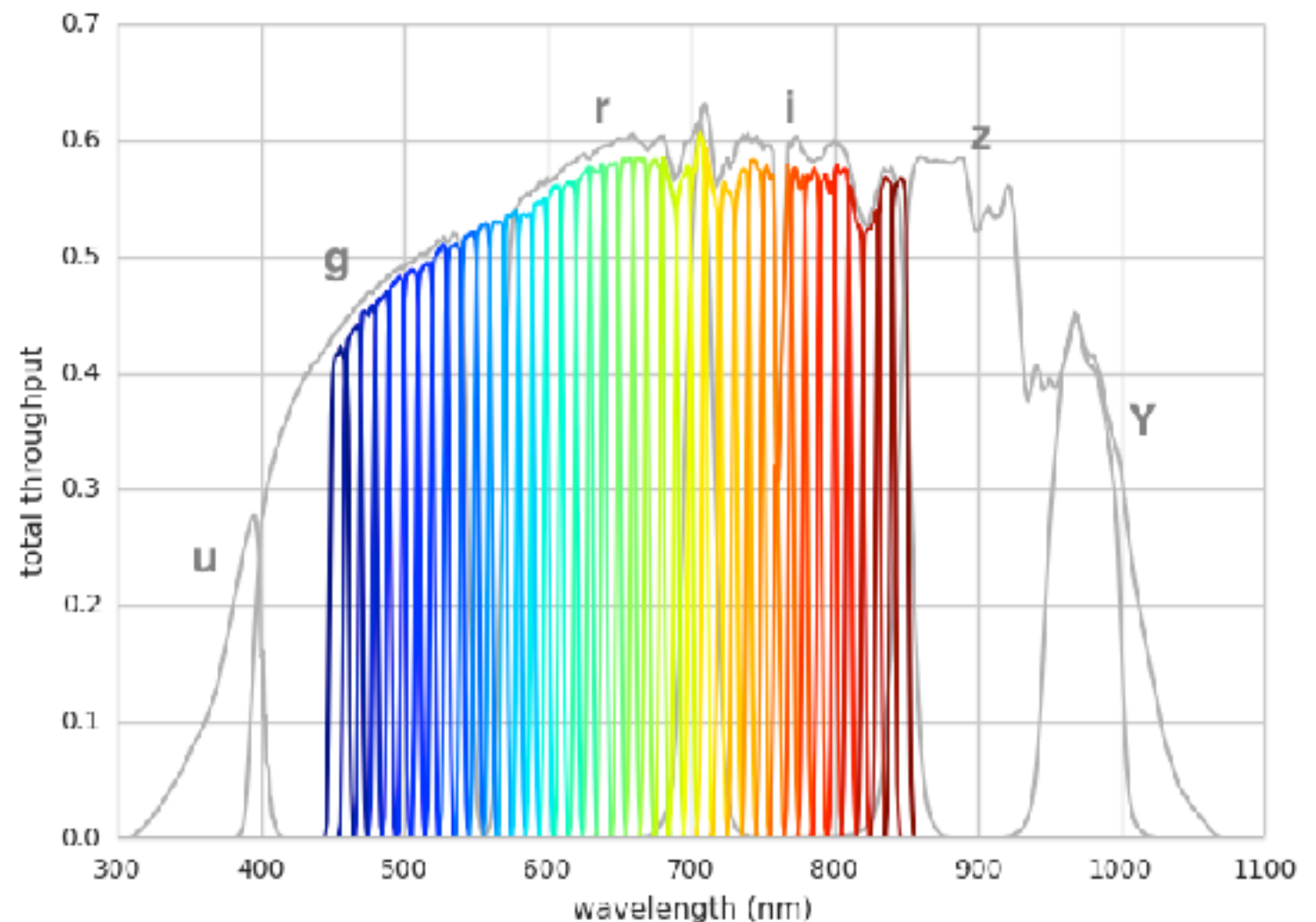
cf. DES (en cours), LSST



# BAO photométries

Il est possible de faire une mesure 3D si la précision des photo-z est meilleure que  $\sigma_z \sim 0.003(1+z)$ .

Certains projets (PAU) tentent d'obtenir cette résolution en utilisant de nombreux ( $\sim 40$ ) filtres très étroits ( $\sim 10$  nm).



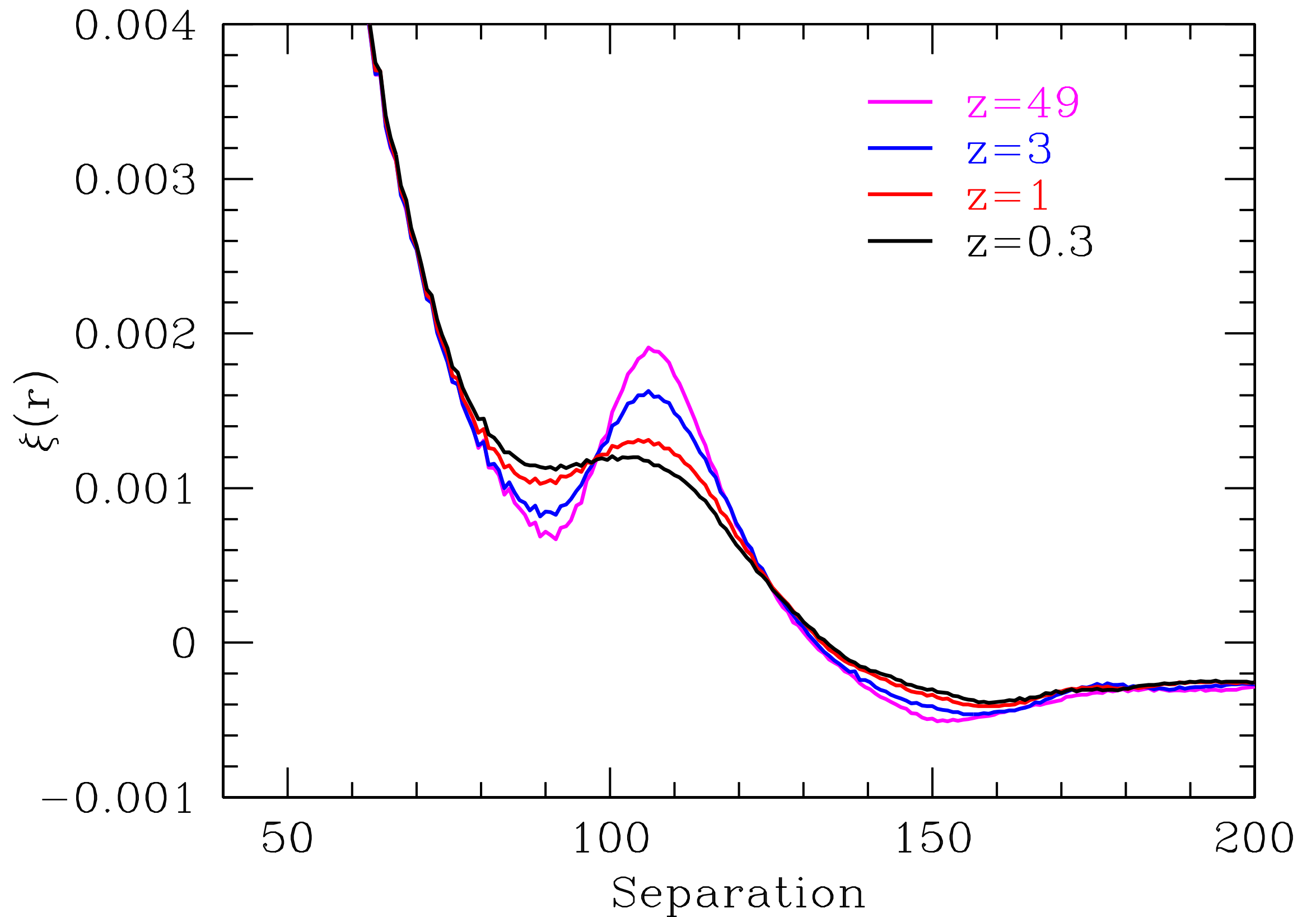
# Reconstruction du régime linéaire

À bas  $z$ , les effets non linéaires deviennent importants.

Ils estompent le pic, ce qui diminue la précision de mesure.

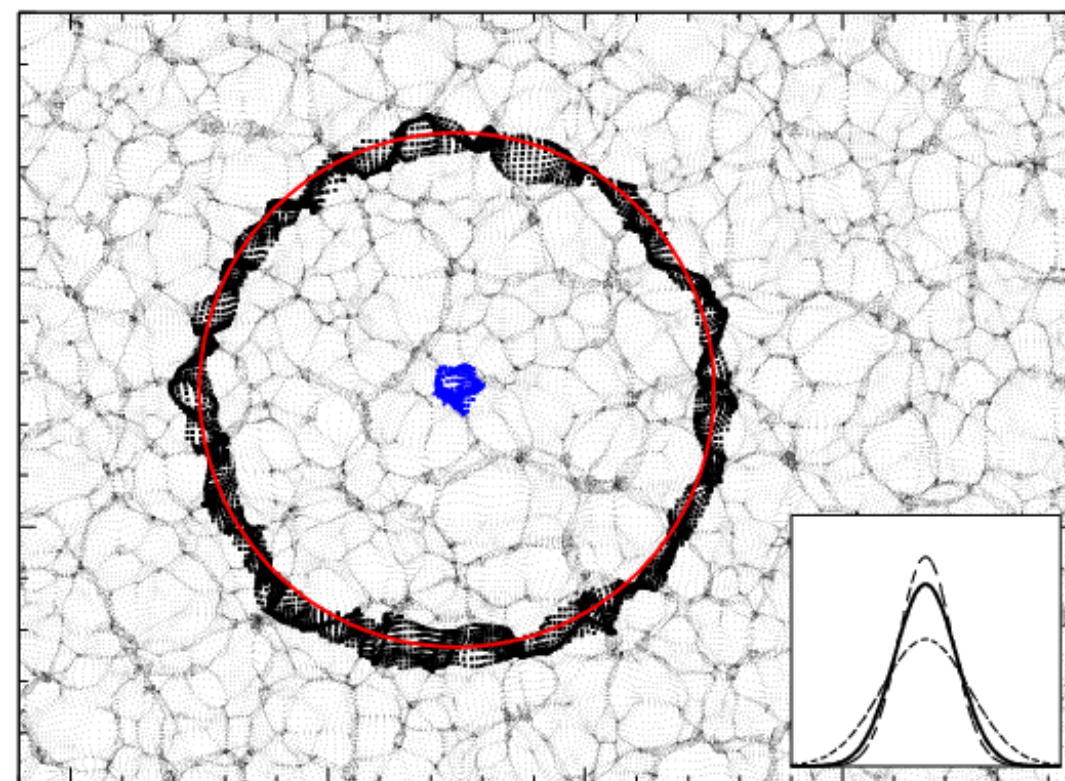
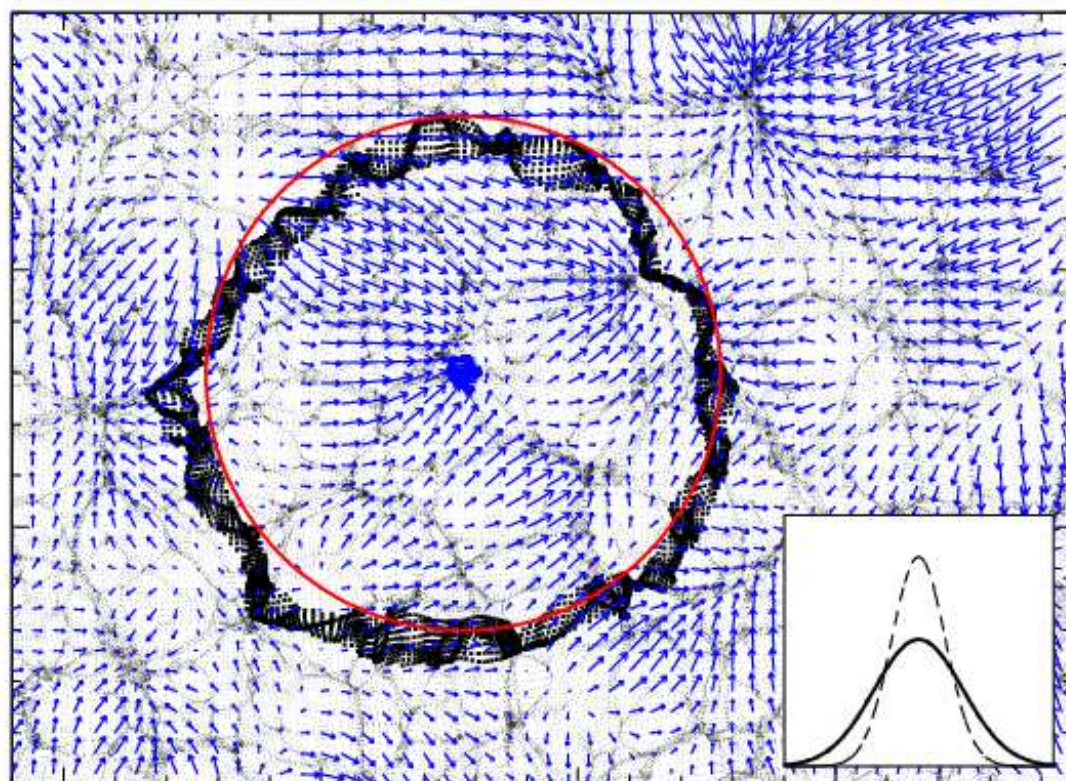
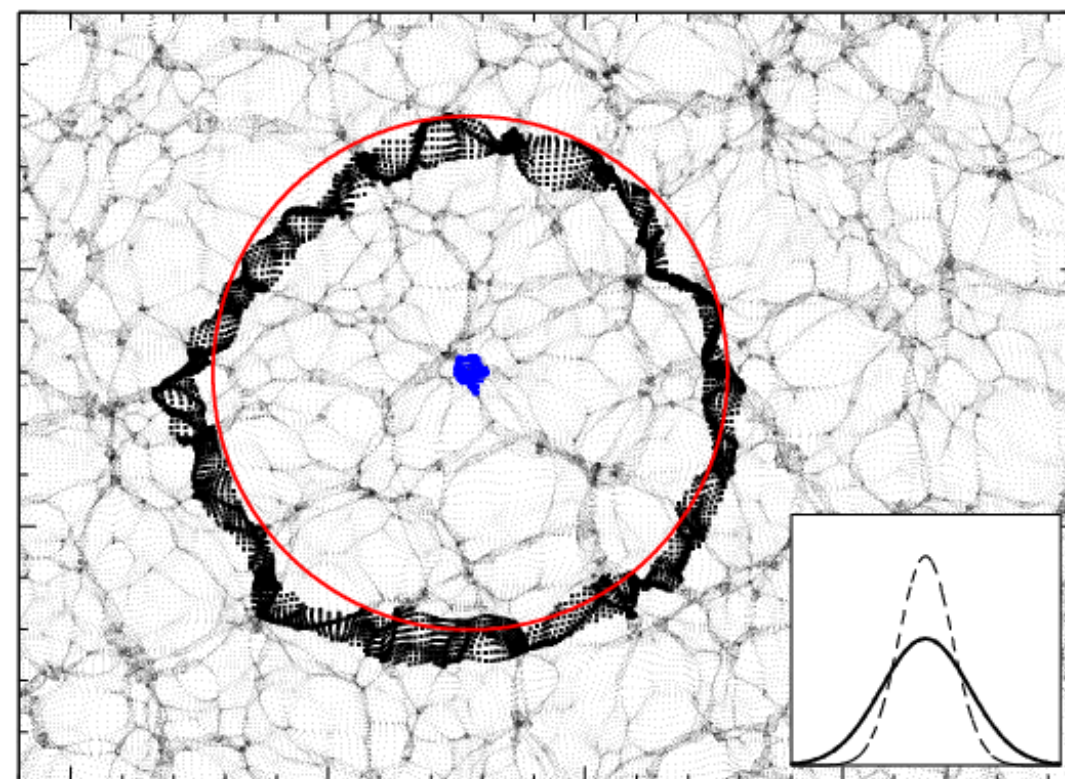
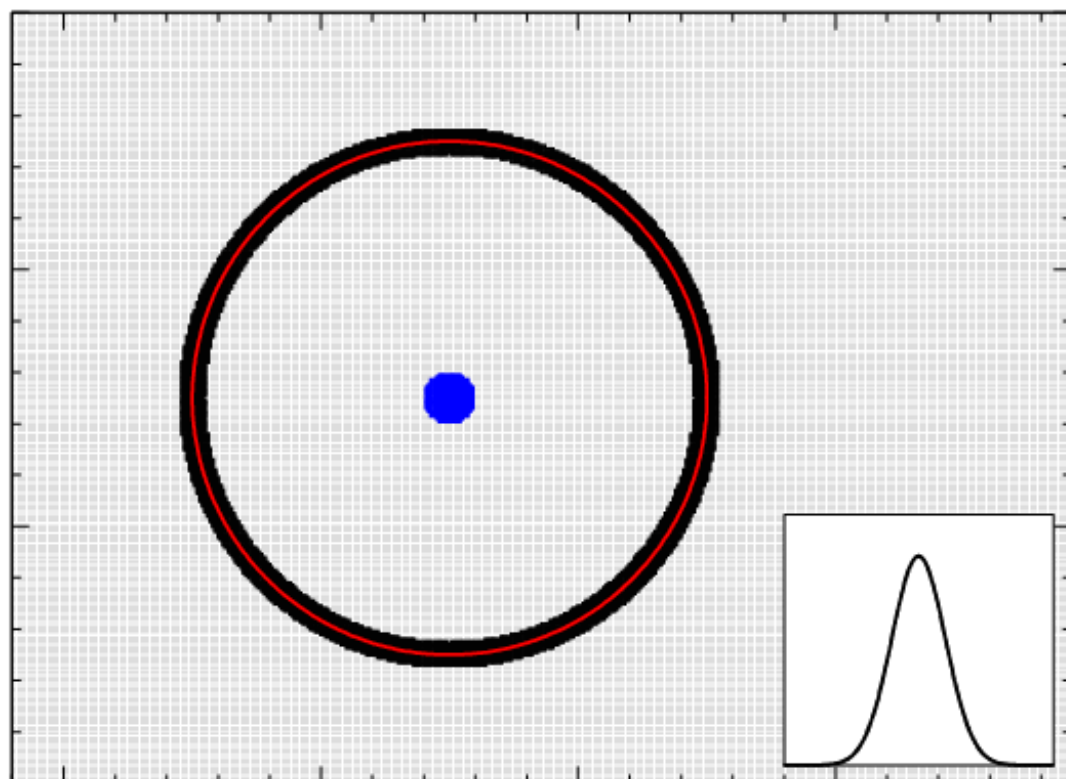
Il est possible d'annuler une partie de ces effets via une « reconstruction » du régime linéaire.

Il faut reconstruire le champ de vitesse (dans le régime linéaire) à partir de la carte des fluctuations de matière, puis « remonter le temps » en modifiant la position des galaxies mesurées.



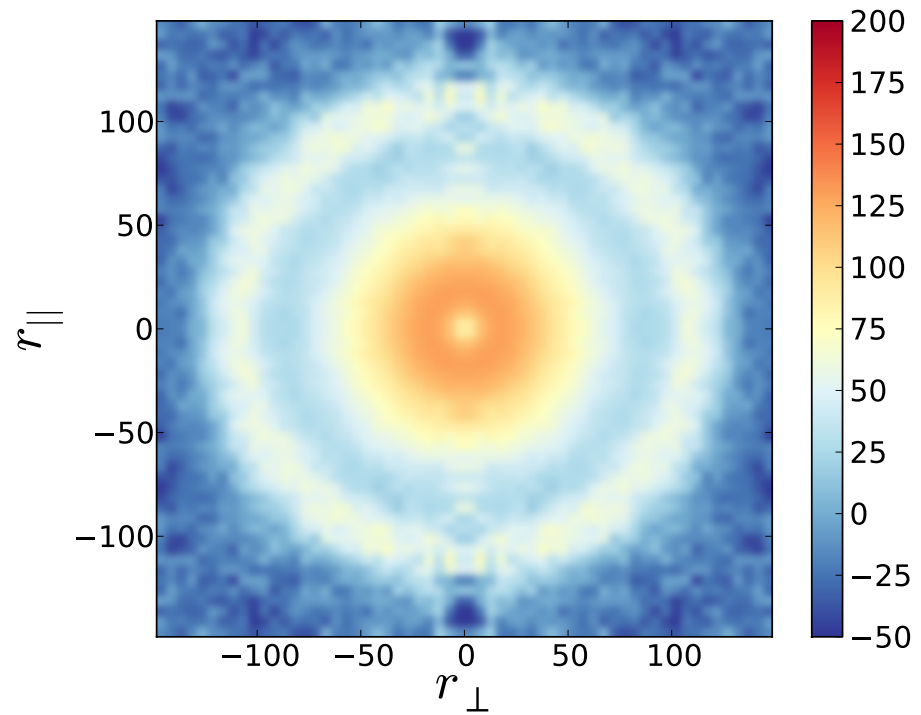
Effect of non-linear clustering, from Weinberg et al. 2012



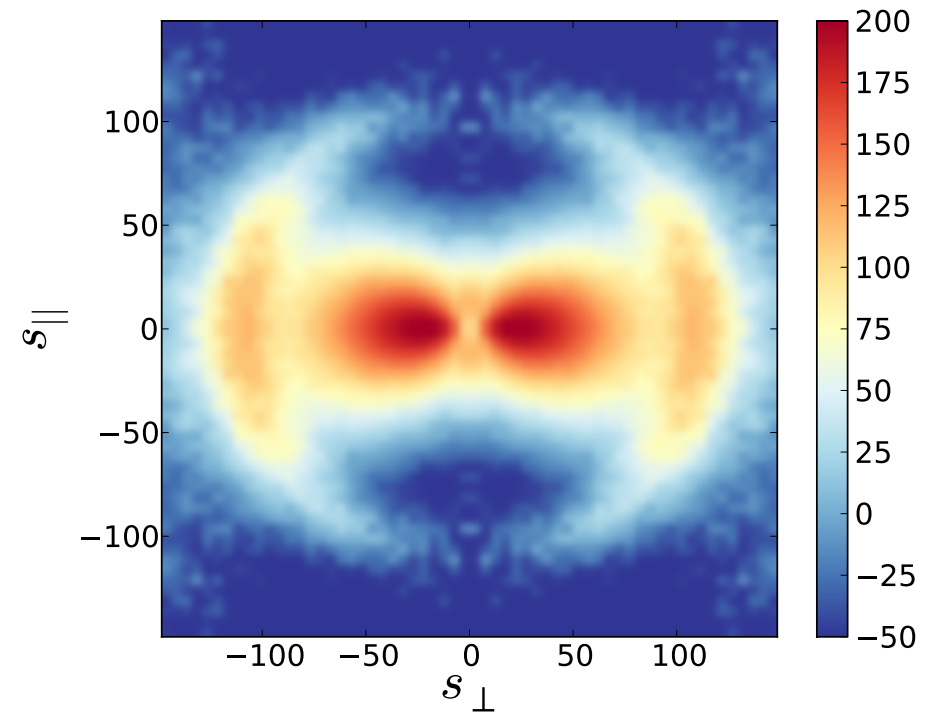




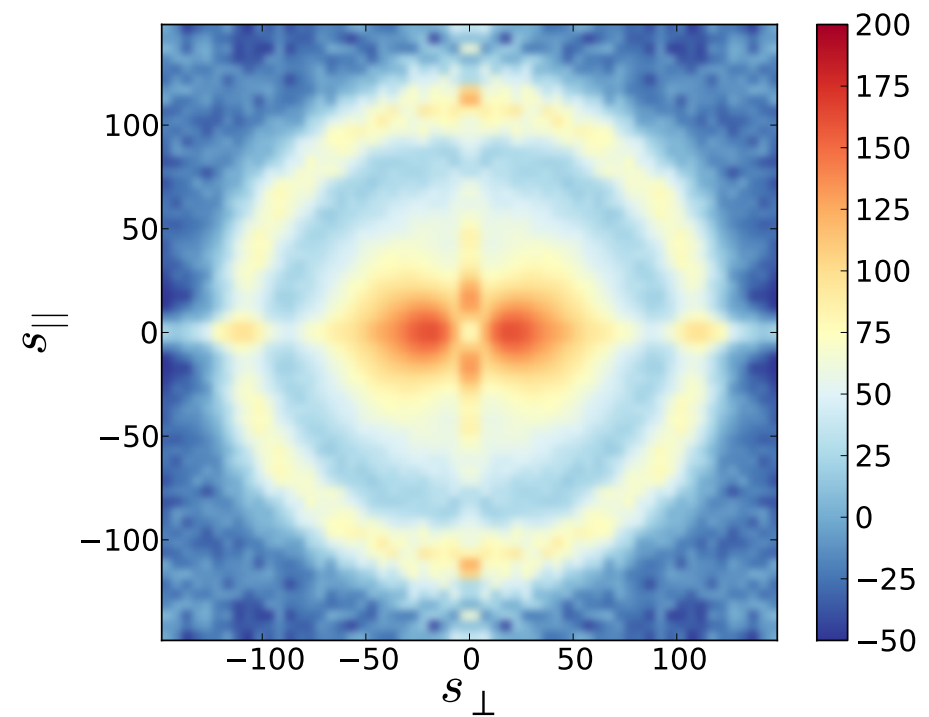
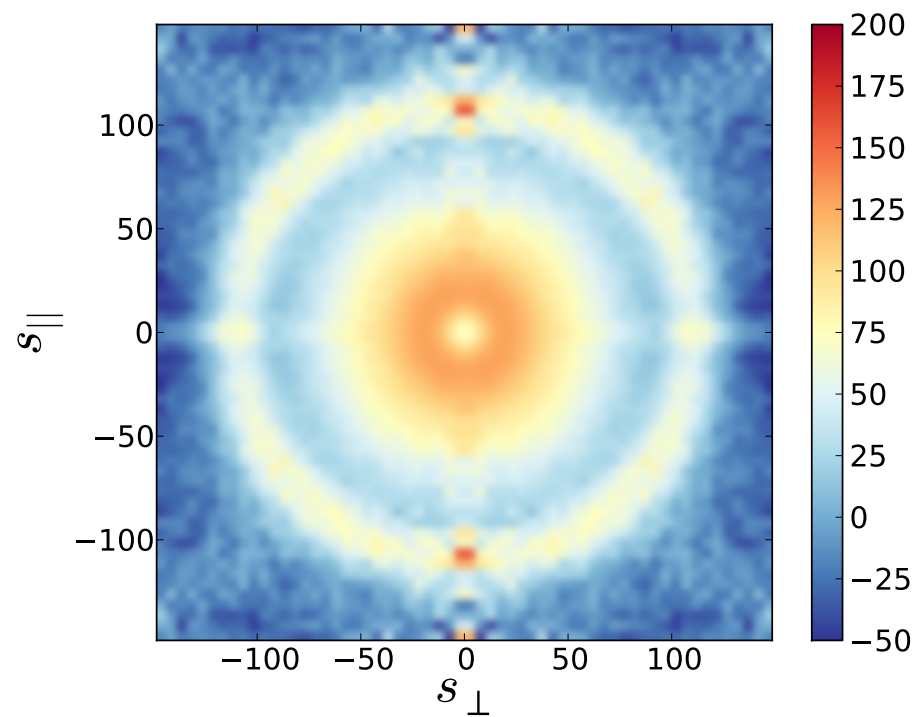
real space

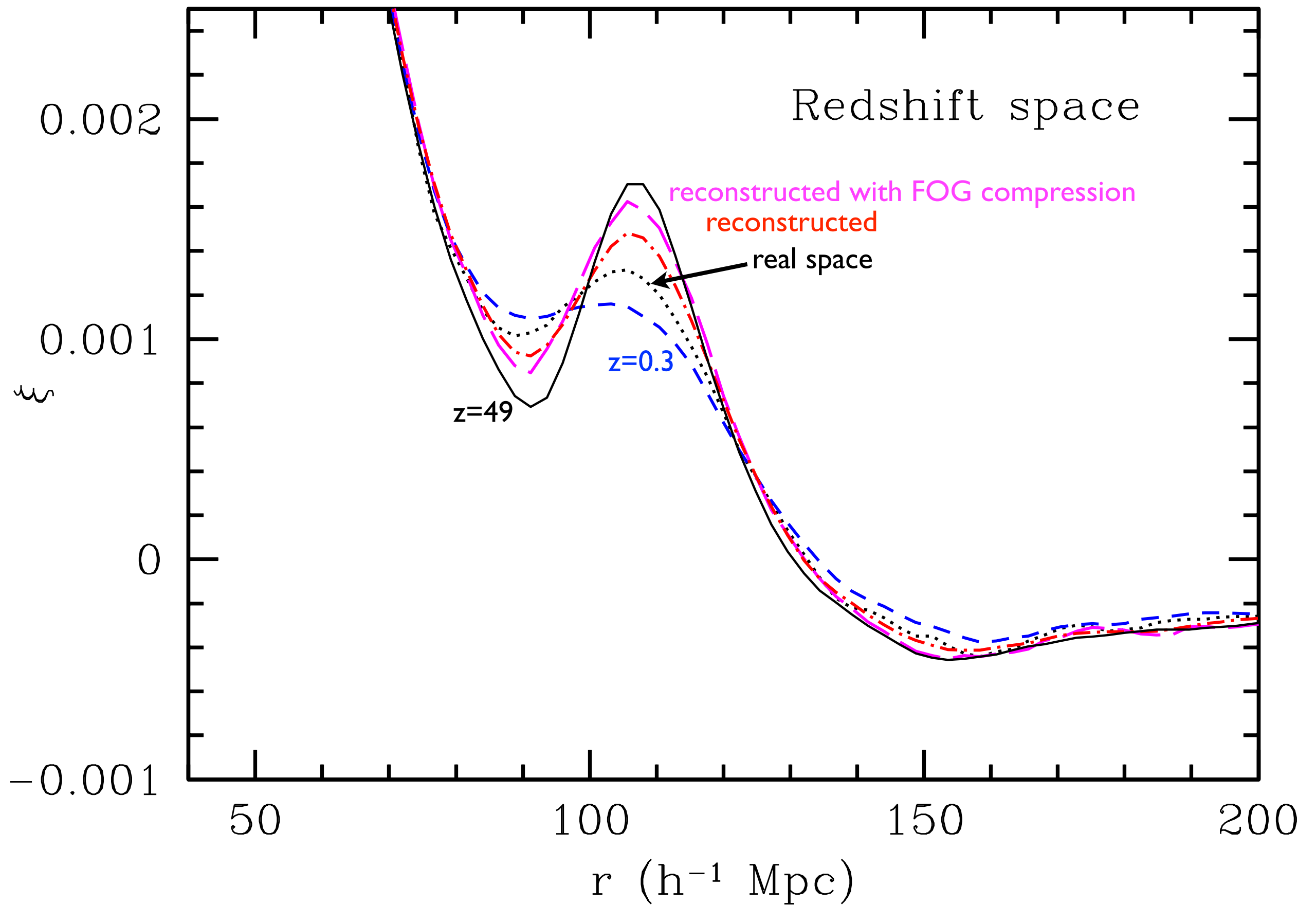


redshift space



after  
reco





# Analyses anisotropes

Le pic BAO se manifeste à la fois le long de la ligne de visée (lié à  $H(z)$ ), et transversalement (ce qui mesure  $D_A(z)$ ).

Une analyse isotrope mesure  $D_V(z) \equiv [cz(1+z)^2 D_A(z)^2 H^{-1}(z)]^{1/3}$

Une analyse 3D compare par nature  $H(z)$  et  $D_A(z)$ , et inclut donc un test d'Alcock-Paczinsky.

Il est nécessaire de prendre en compte l'effet Kaiser (distorsions de redshift, RSD).

Les RSD fournissent également de l'information sur la croissance des structures.

# Limitations intrinsèques : nombre de modes

Les BAO mesurent une échelle de 150 Mpc.

Dans la coquille observable dans une gamme de redshifts données, il y a un nombre fini de modes mesurables.

Les BAO sont limitées par la statistique disponible, une fois données une combinaison de traceurs et de gamme de redshift.

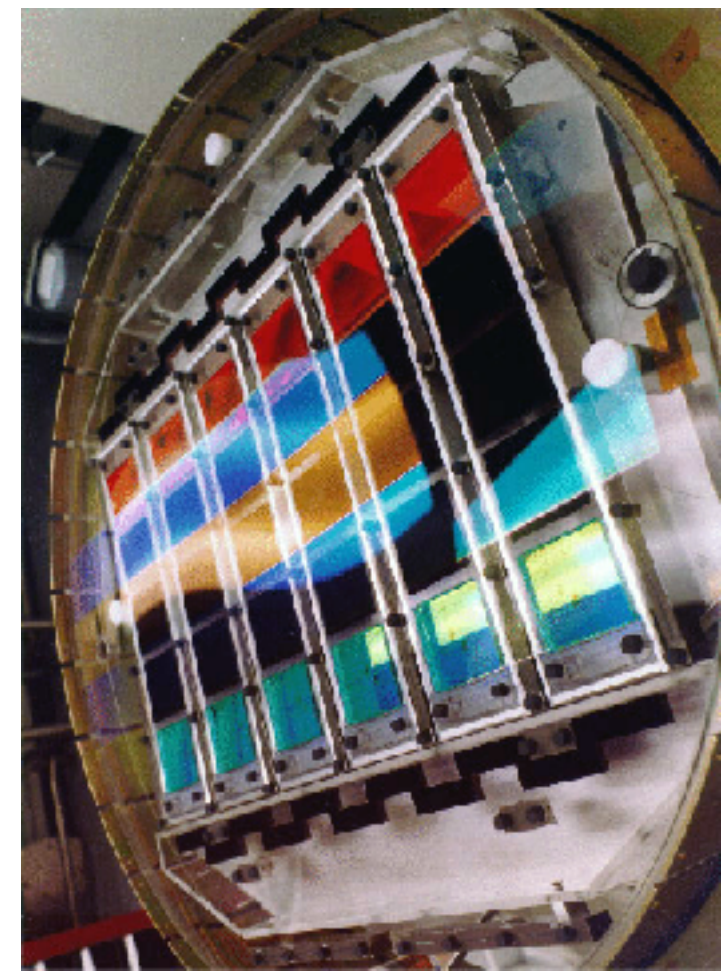
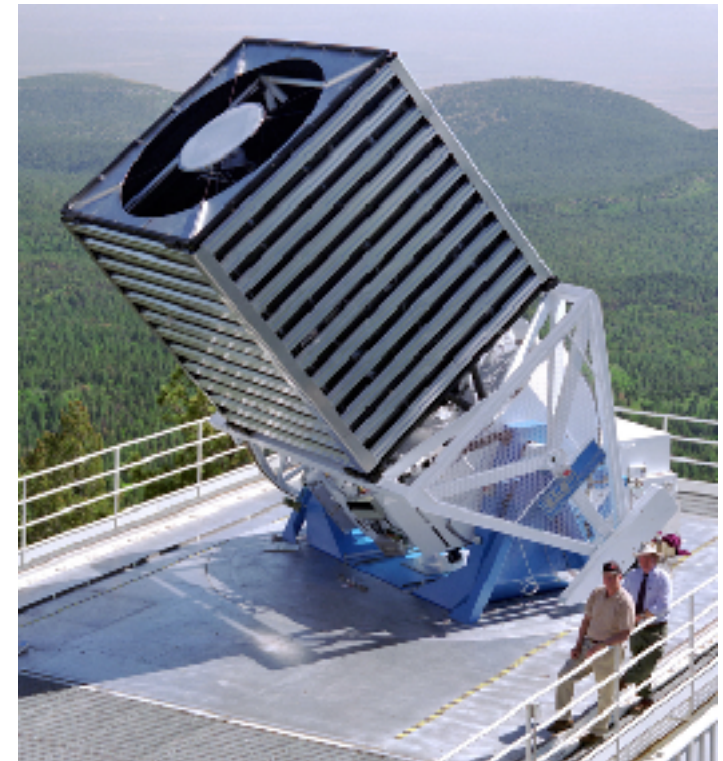


# SDSS

Sloan Digital Sky Survey  
(I, II, III, IV en cours)

Télescope grand champ, diamètre  
2.5-m à Apache Point  
Observatory, NM

Caméra d'imagerie (ugriz) de SDSS-I  
(2000-2005, 8000 sq deg) et SDSS-II  
(2006-2008, 10000 sq deg)



# Spectroscopie SDSS

SDSS-I et II: spectrographe avec 840 fibres

SDSS-I: 675 000 galaxies, 90 000 quasars.

Première détection des BAO dans 50 000 LRG

SDSS-II: 860 000 galaxies, 105 000 quasars

BAO avec des photo-z, 600 000 galaxies à  $z \sim 0.5$

# SDSS-III (BOSS), SDSS-IV (eBOSS)

Mise à niveau du spectrographe : 1000 fibres, couverture spectrale étendue, transmission optique améliorée.

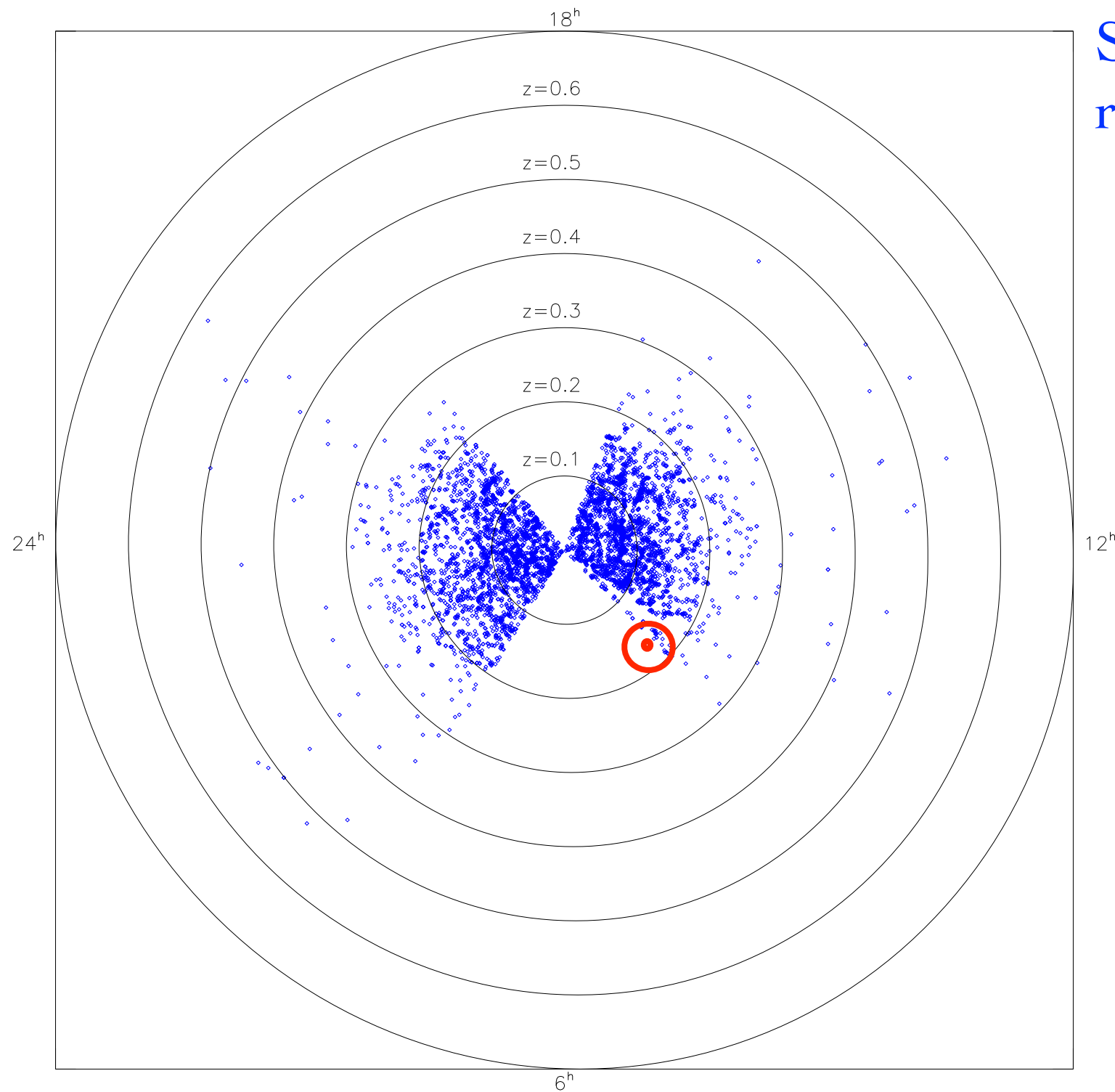
BOSS (baryon oscillations spectroscopy survey) est un relevé dédié à l'étude des BAO

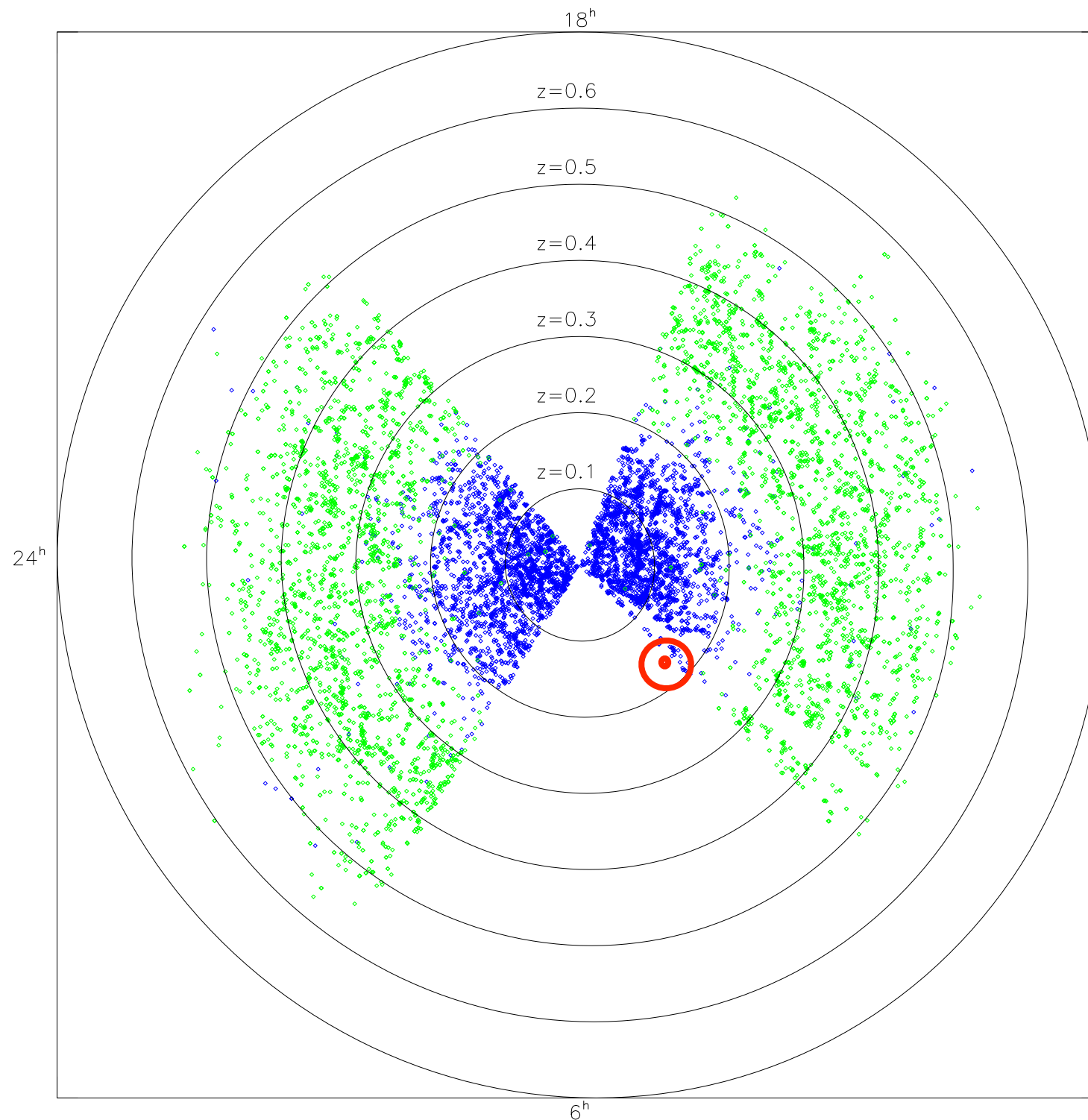
- dans un échantillon plus vaste de galaxies
- dans la forêt Lyman alpha des quasars

eBOSS étend le relevé, et y ajoute des galaxies à raie d'émission et des quasars.

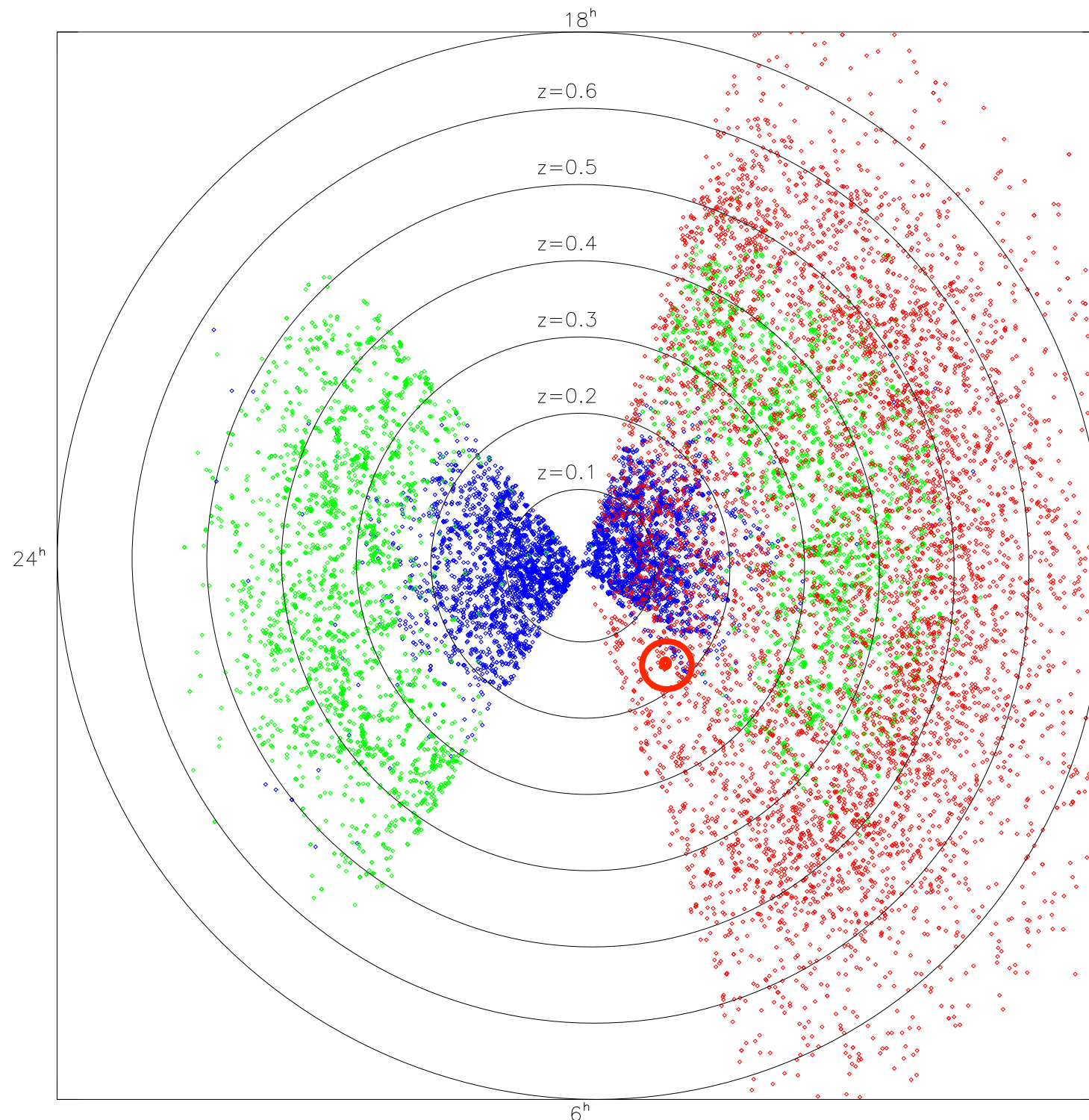


SDSS,  
relevé principal





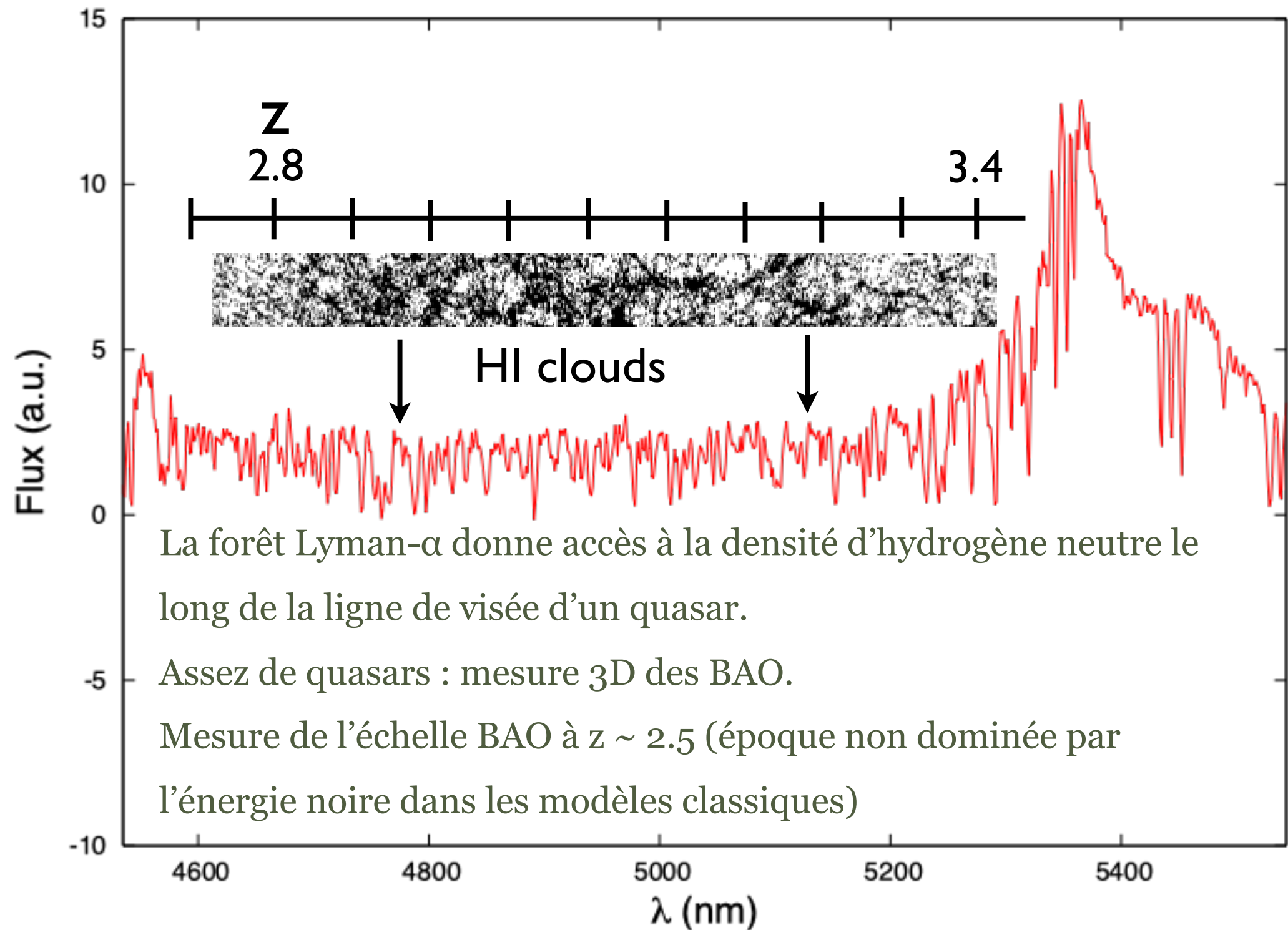
SDSS,  
relevé principal  
SDSS-I + SDSS-II  
LRG, 8000  $\text{deg}^2$   
(fin en 2008)  
 $10^{-4}$  galaxies/ $\text{Mpc}^3$

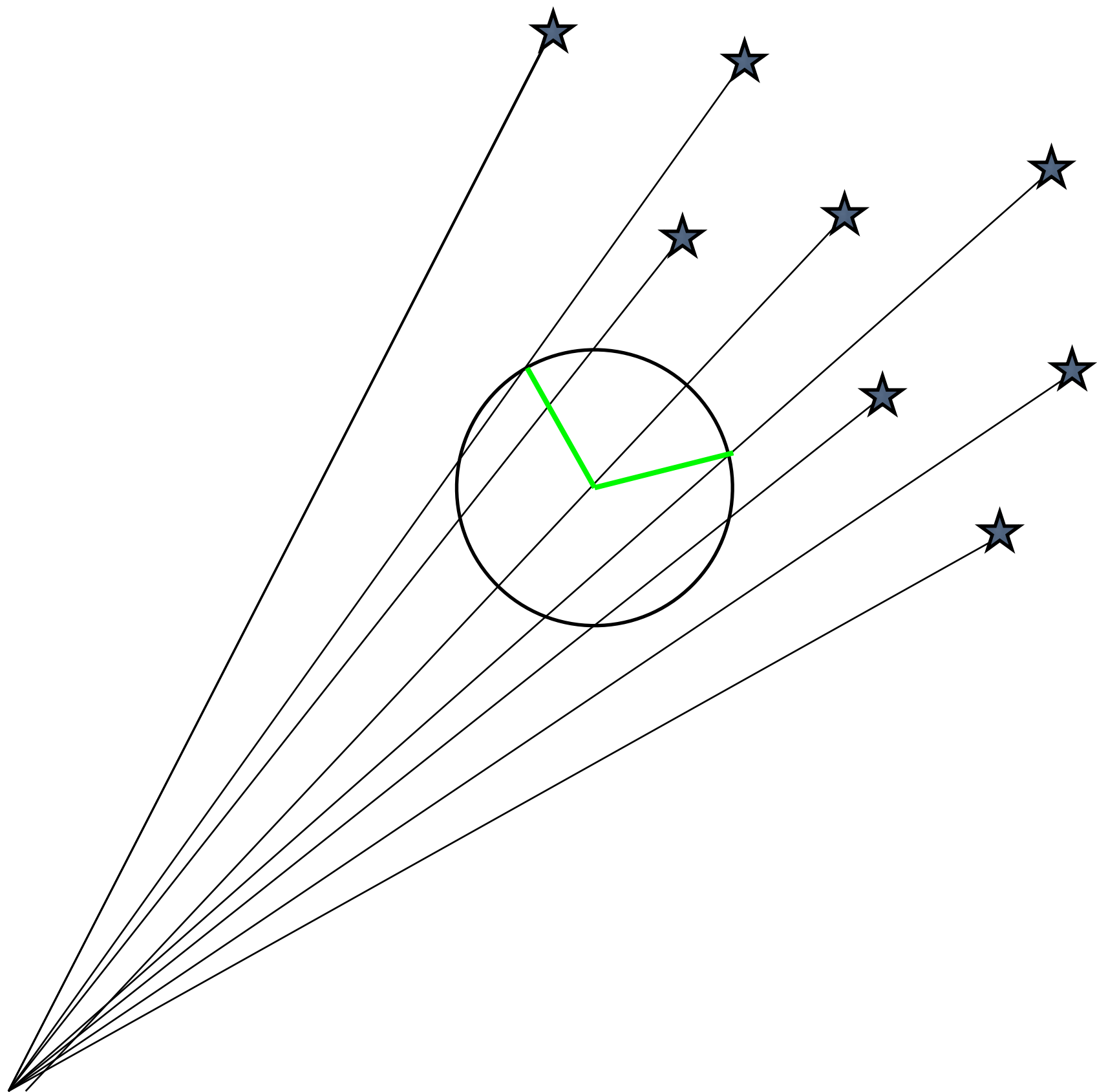


SDSS,  
relevé principal  
SDSS-I + SDSS-II  
LRG, 8000 deg<sup>2</sup>  
(fin en 2008)  
 $10^{-4}$  galaxies/Mpc<sup>3</sup>

SDSS-III LRG  
10,000 deg<sup>2</sup>  
5x densité  
2x volume

# BAO dans la forêt Lyman alpha





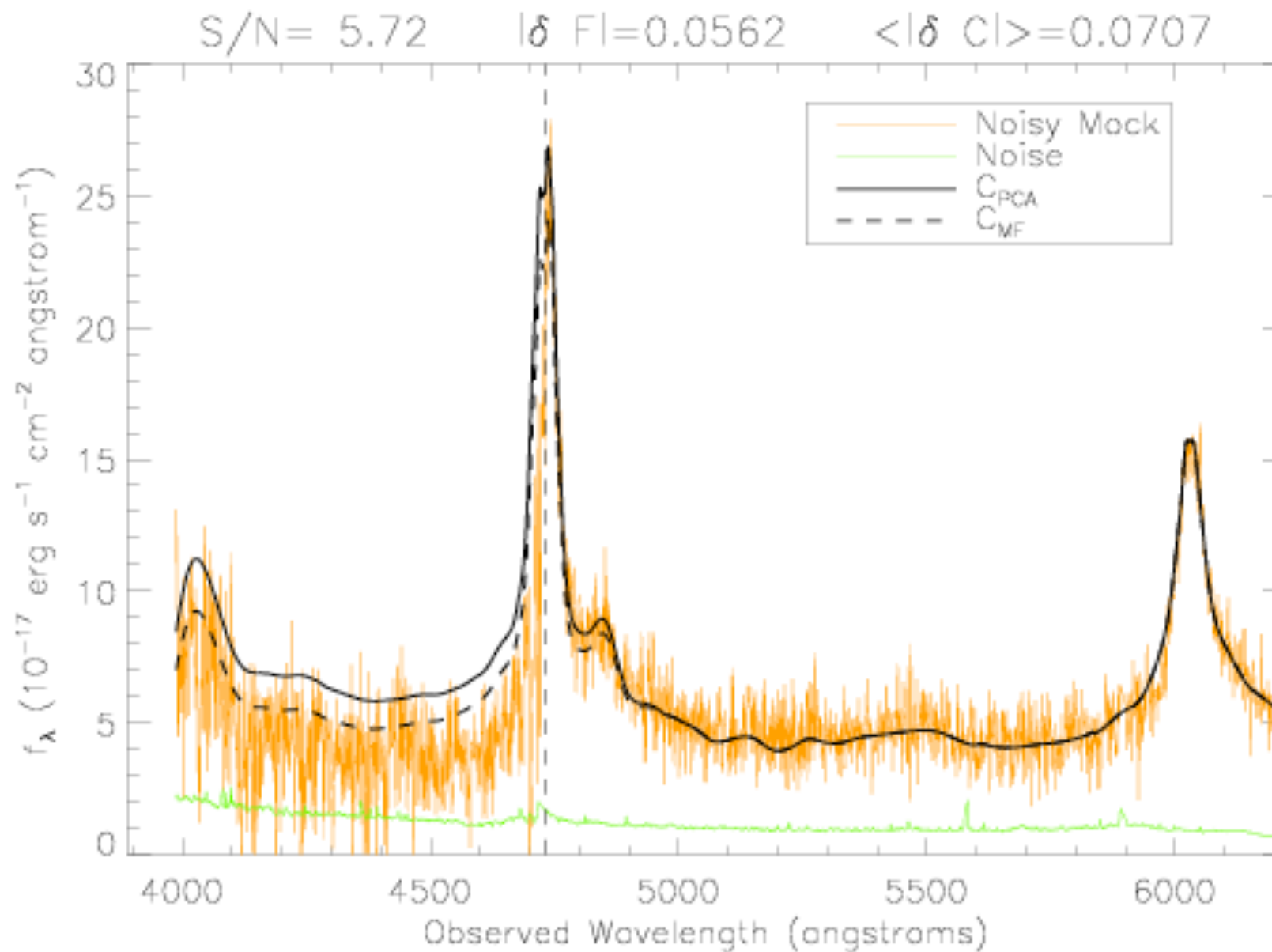
# BAO dans la forêt Lyman alpha

Les candidats quasars sont sélectionnés à partir de leurs couleurs (dans SDSS ou d'autres relevés), ou de leur variabilité.

La sélection a une faible efficacité (mêmes couleurs que les étoiles A et F) : 30 à 50% sont vraiment des quasars.

Ensuite : spectroscopie des cibles, sélection automatique et inspection visuelle pour sélectionner les quasars et déterminer leur redshift, et identifier BAL et DLA.

# Ajustement du continuum Ly- $\alpha$



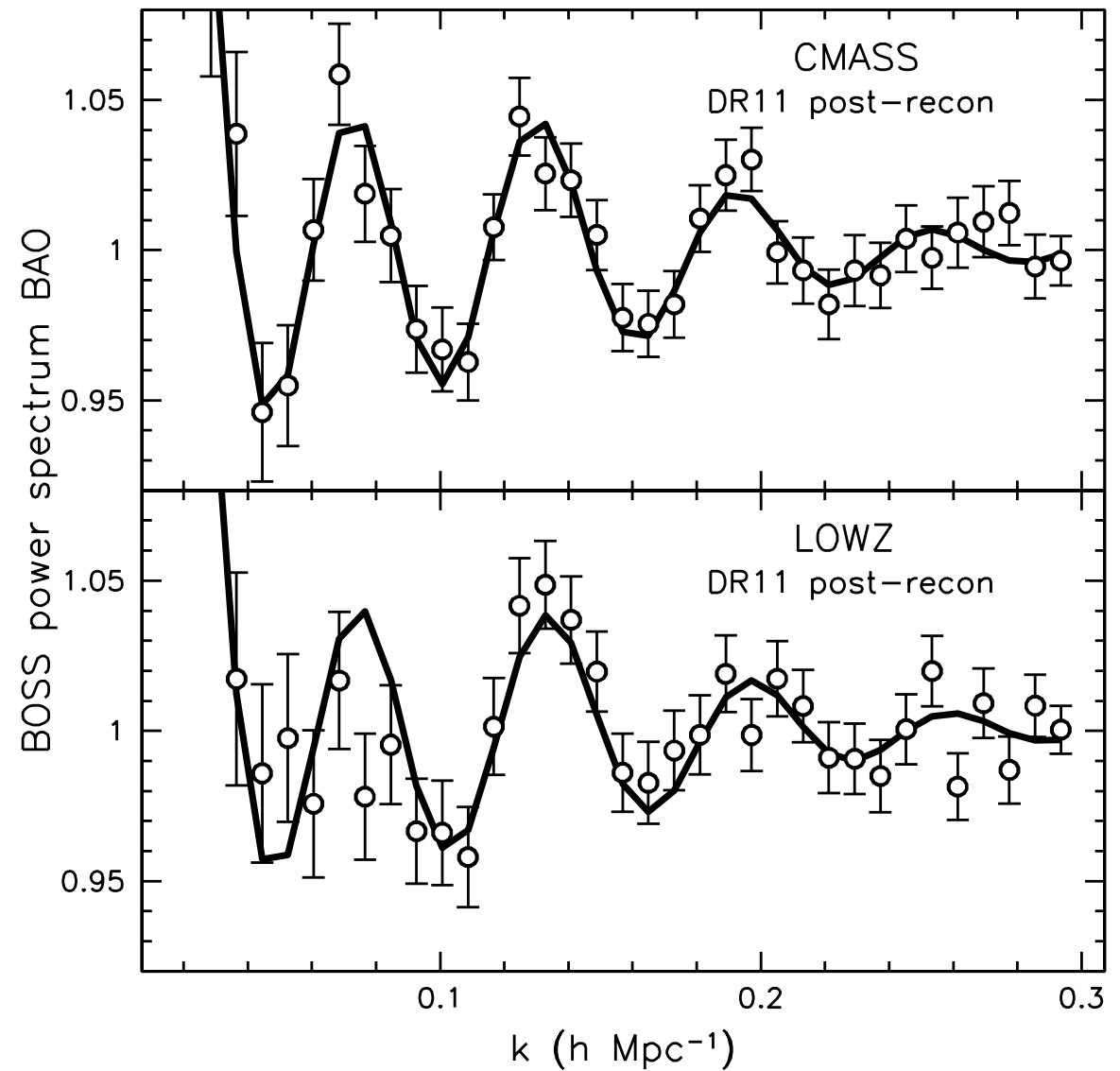
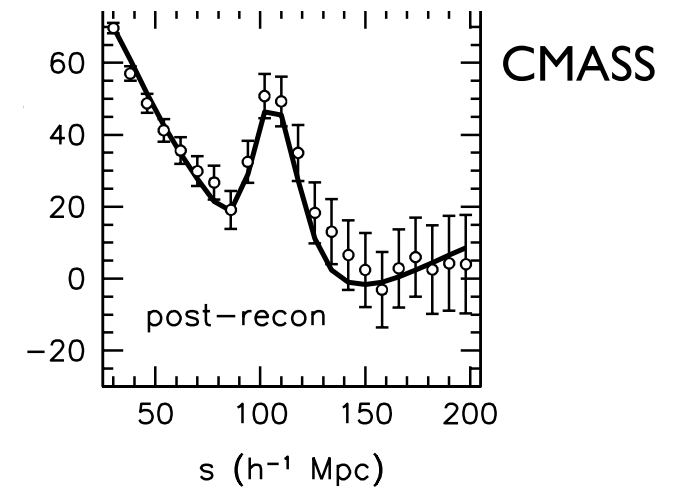
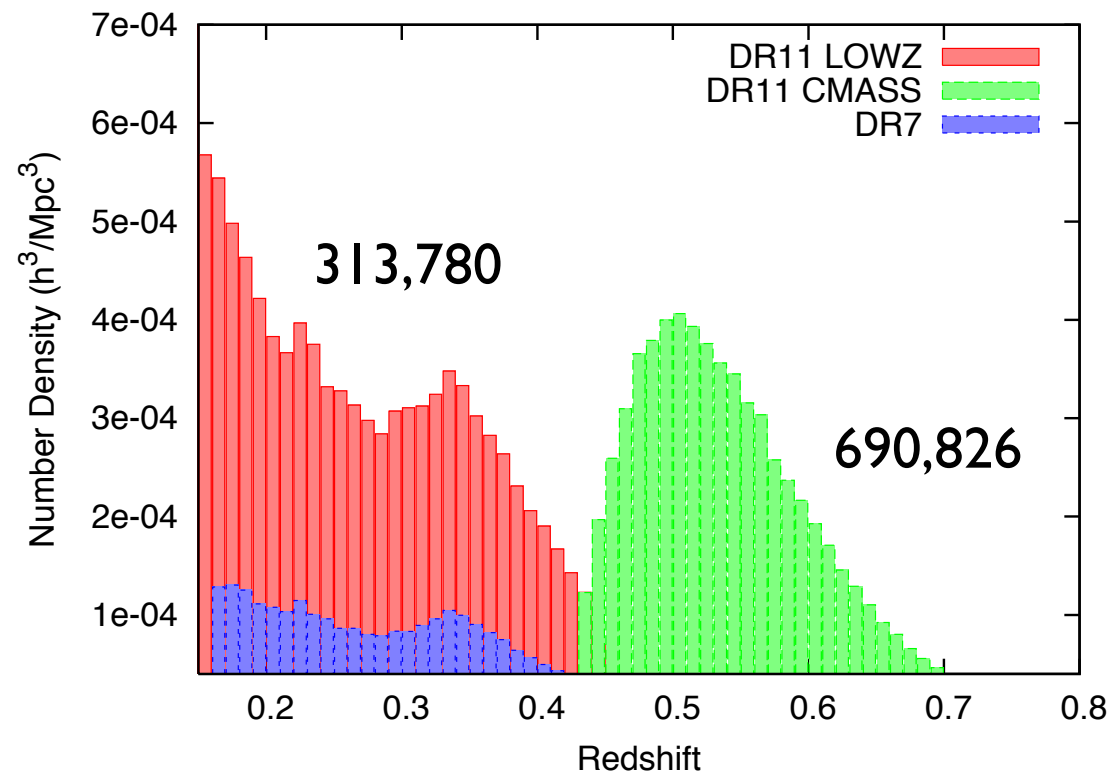
Lee et al. 2012

Source de distorsions dans la fonction de corrélation.  
Pris en compte dans l'analyse.

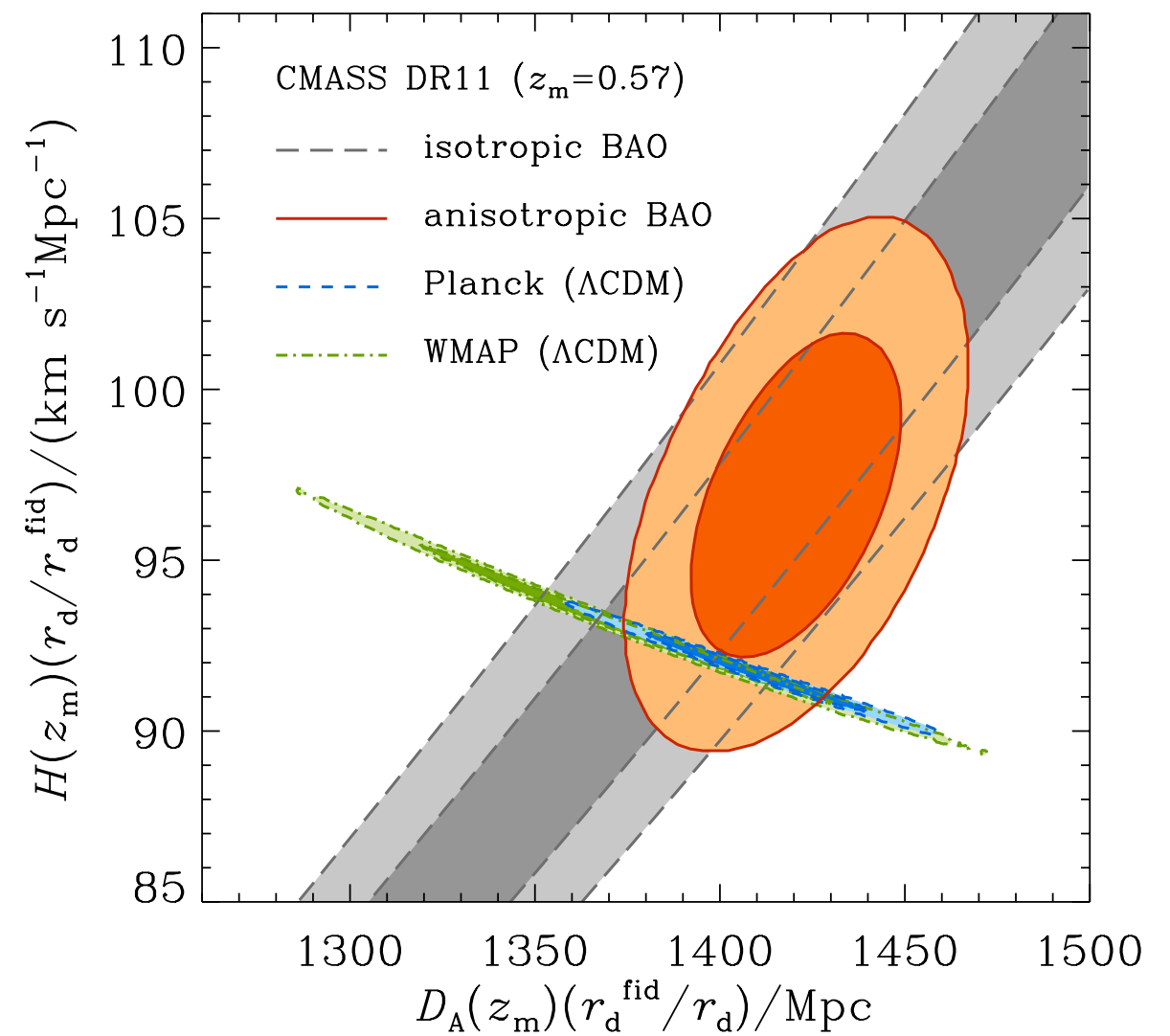
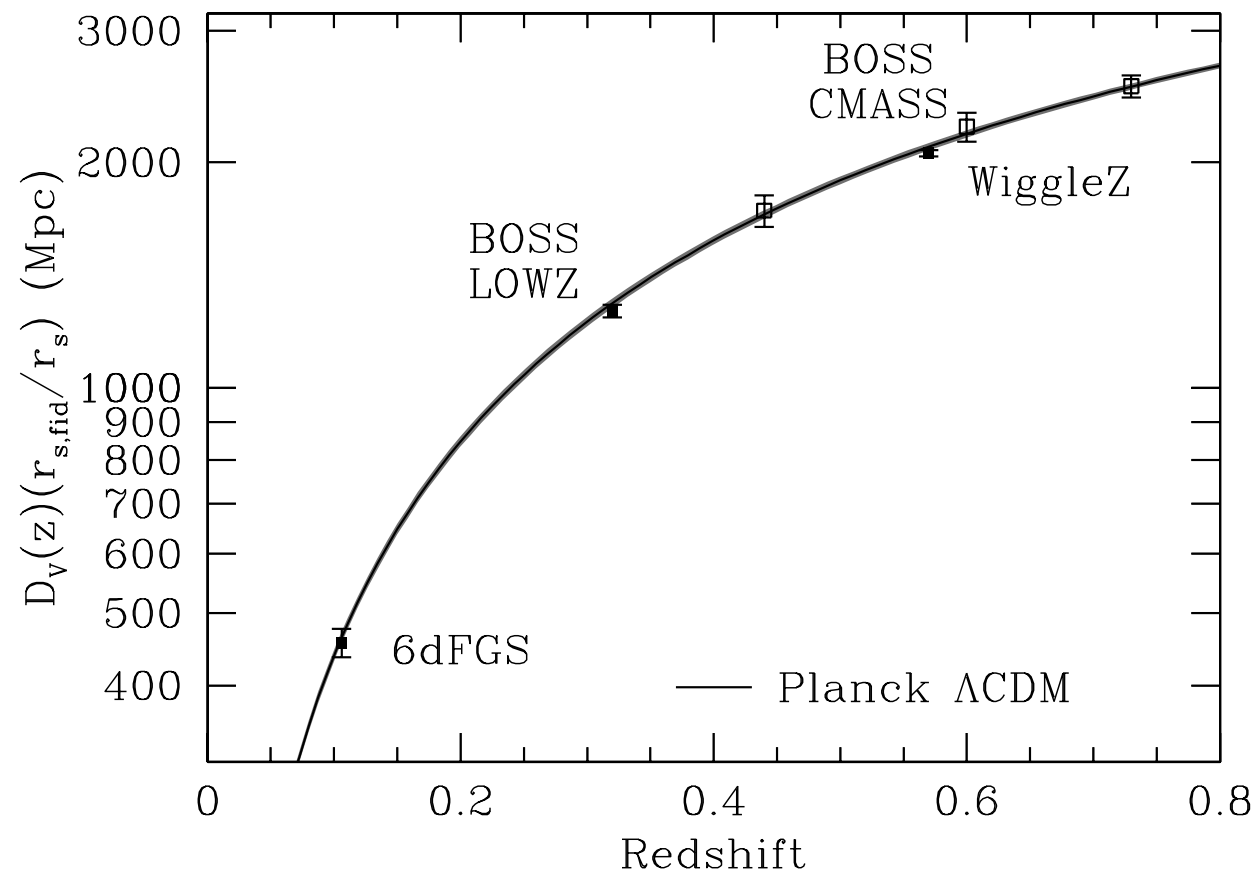
Phase	Années	MGS	LRG	Ly- $\alpha$	Ly- $\alpha$ -QSO	ELG	QSO	ELG x LRG	Photo-z BAO	Recons- truction	Anisotrop	RSD	Fourier space
z		0.07 - 0.2	0.2-1.0	>2.1	>1.77	0.6-1.1	0.8-2.2	0.6-1.0					
SDSS	2000-2005 DR1-DR4		✓										
SDSS-II	2005-2008 DR5-DR7		✓						✓	✓			✓
SDSS-III	2008-2014 DR8-DR12	(✓)	✓	✓	✓				(✓)	✓	✓	✓	✓
SDSS-IV	2014-2021 DR13-DR16 (DR17 2021)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓



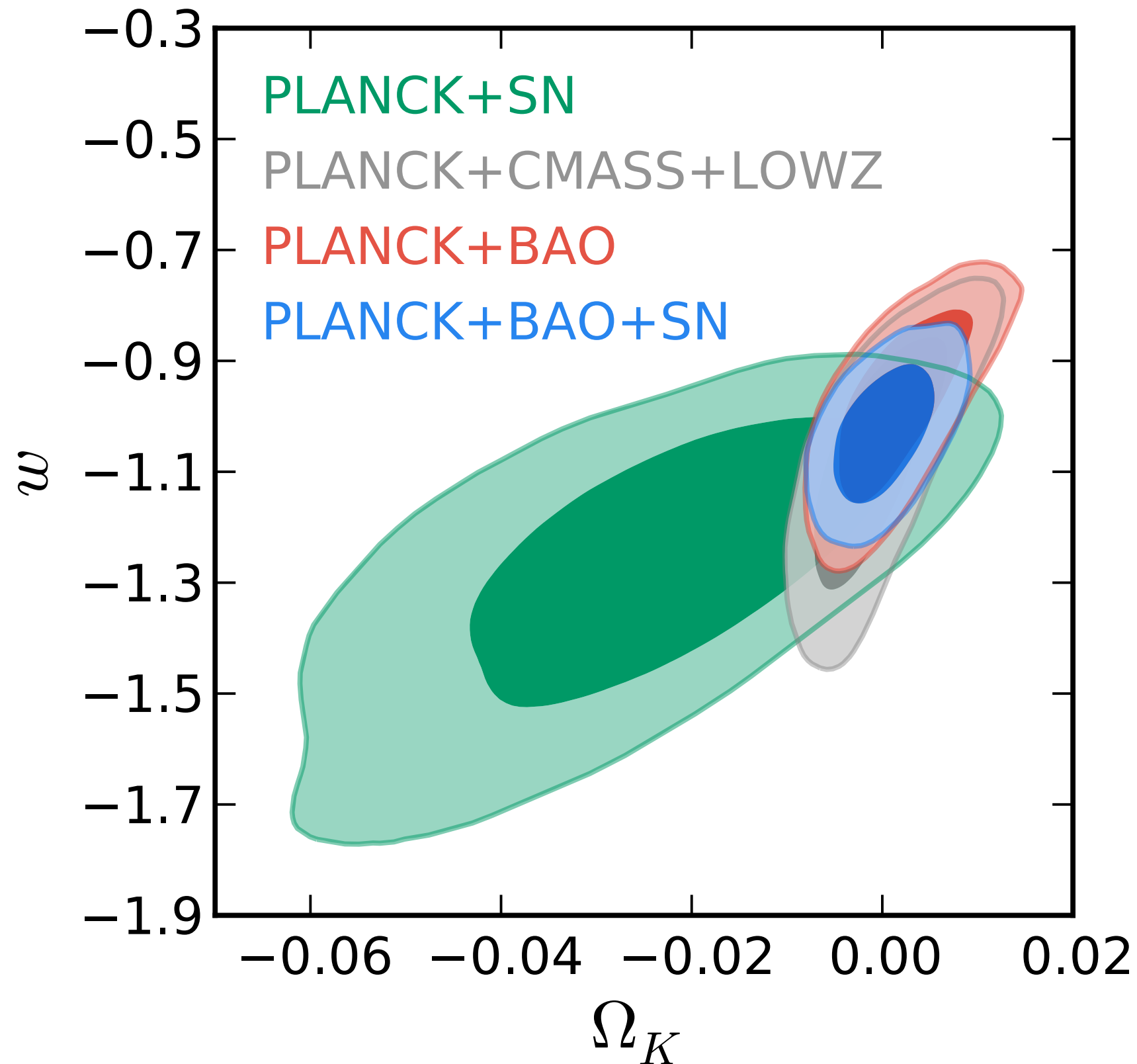
# SDSS-III sur les galaxies



# SDSS-III sur les galaxies



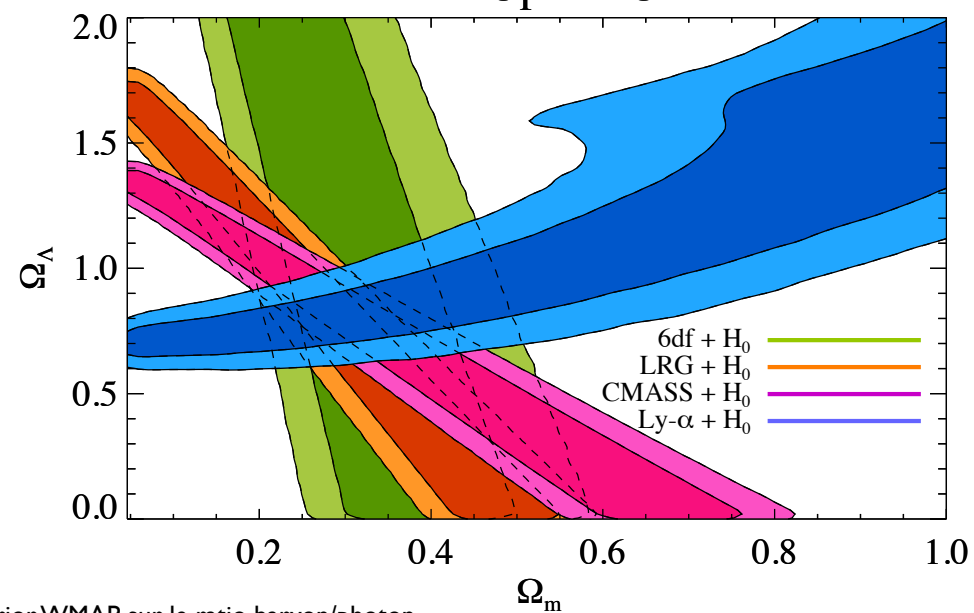
# SDSS-III sur les galaxies



# SDSS-III sur la forêt Lyman- $\alpha$

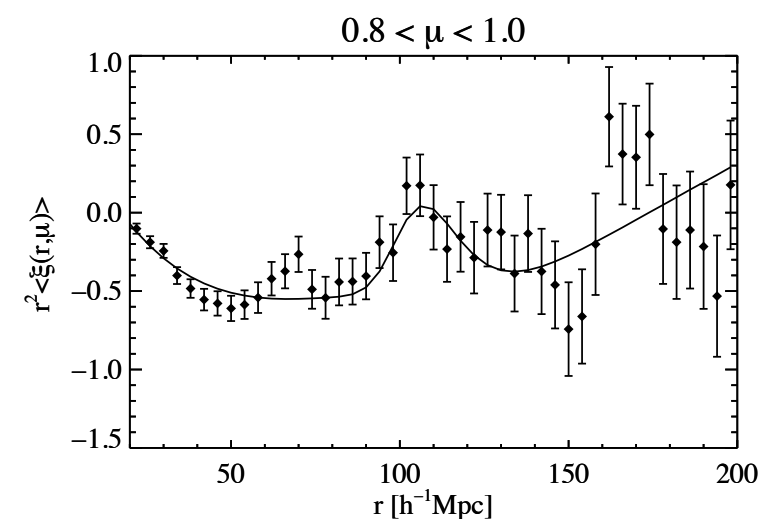
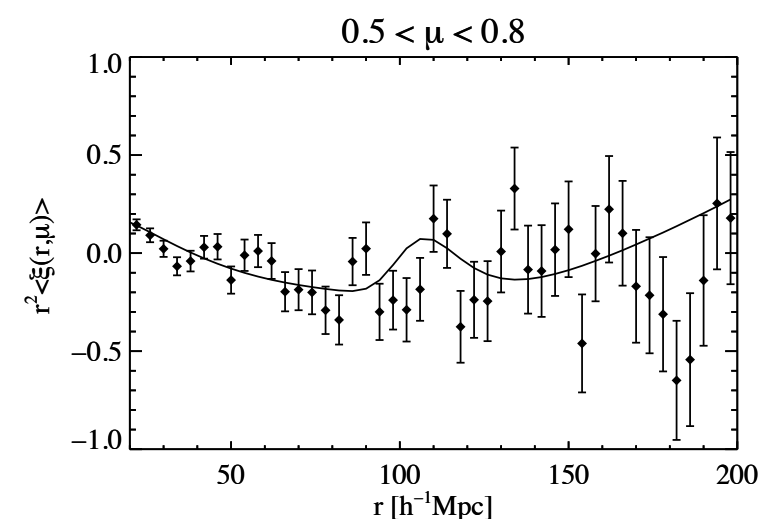
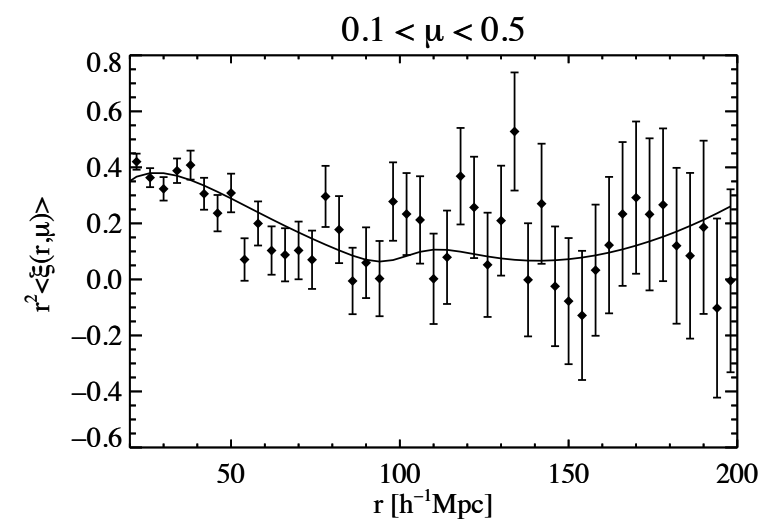
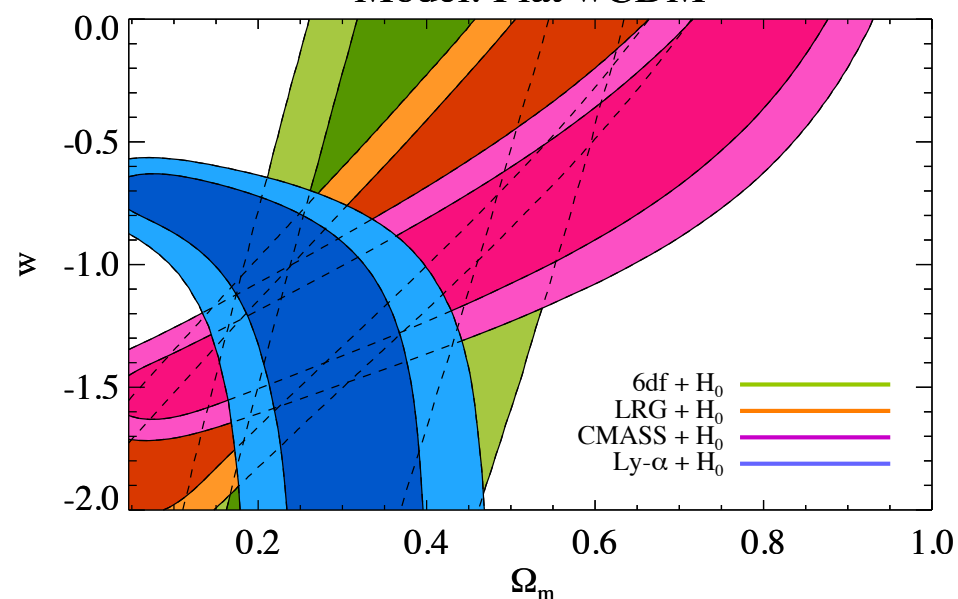
Première détection : Busca et al. 2013  
48,640 QSO  $2.1 < z < 3.5$

Model: Open  $\Lambda$ CDM

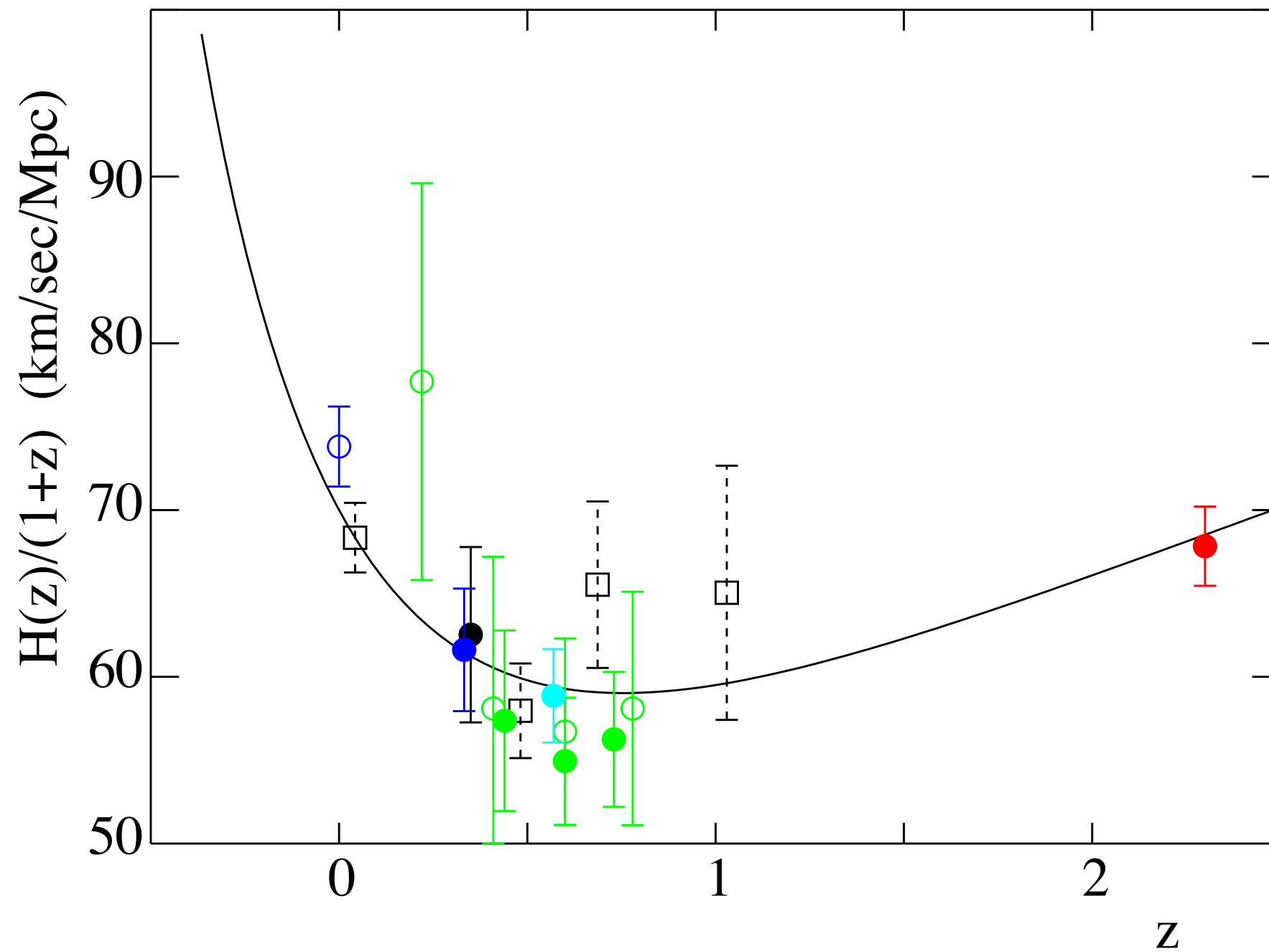


Prior WMAP sur le ratio baryon/photon

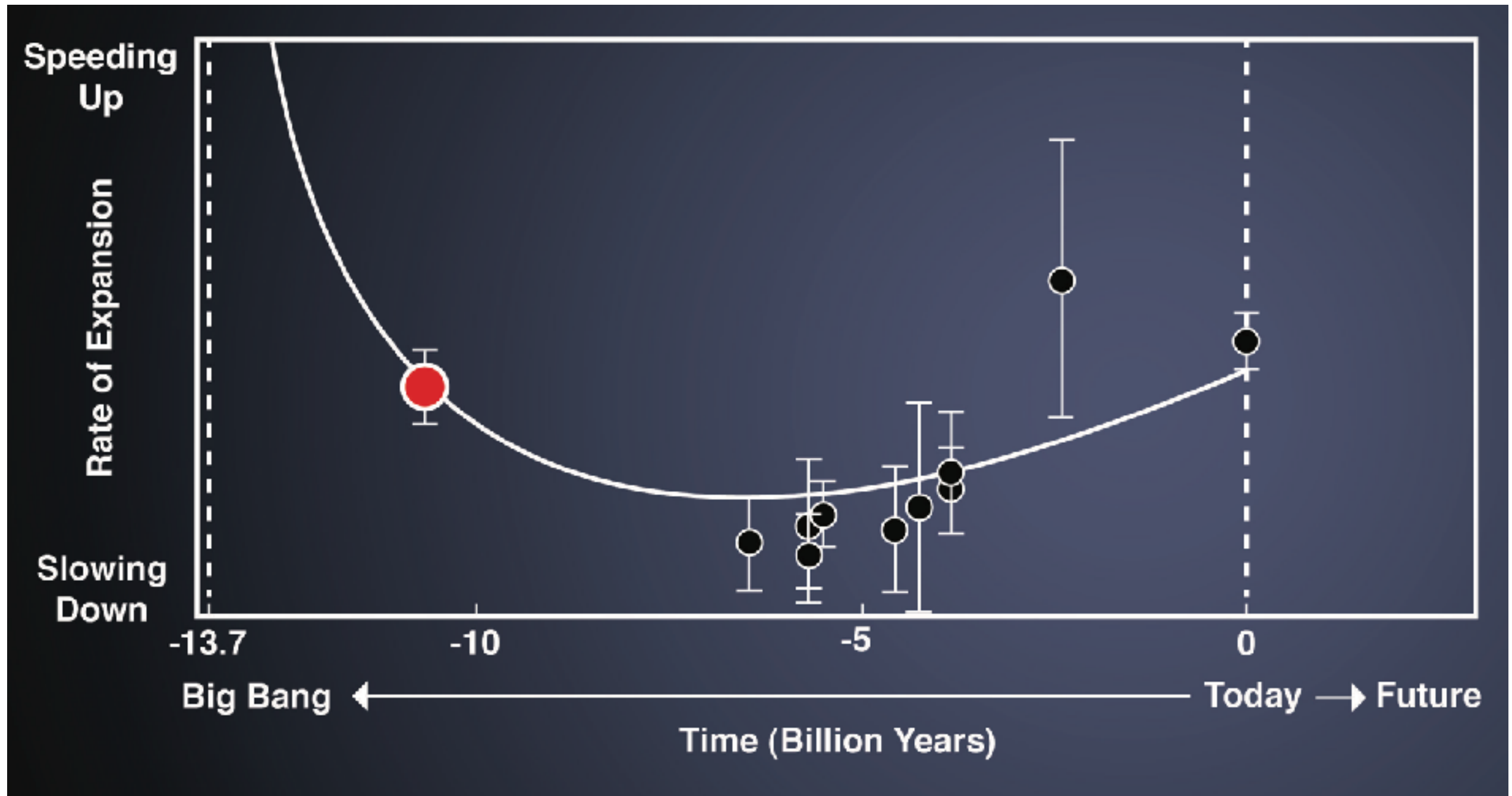
Model: Flat wCDM



# SDSS-III sur la forêt Lyman- $\alpha$

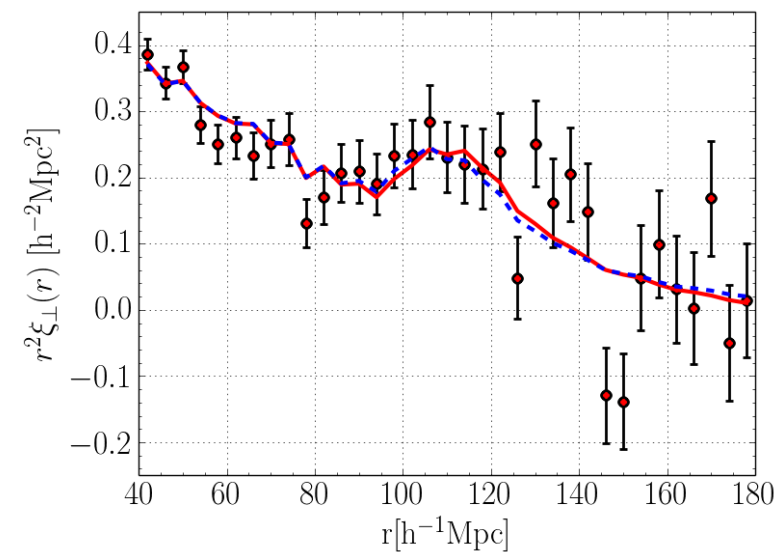
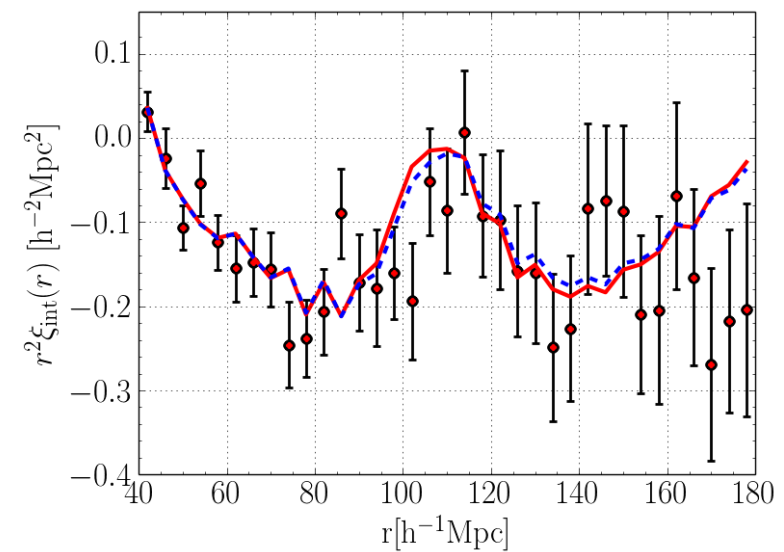
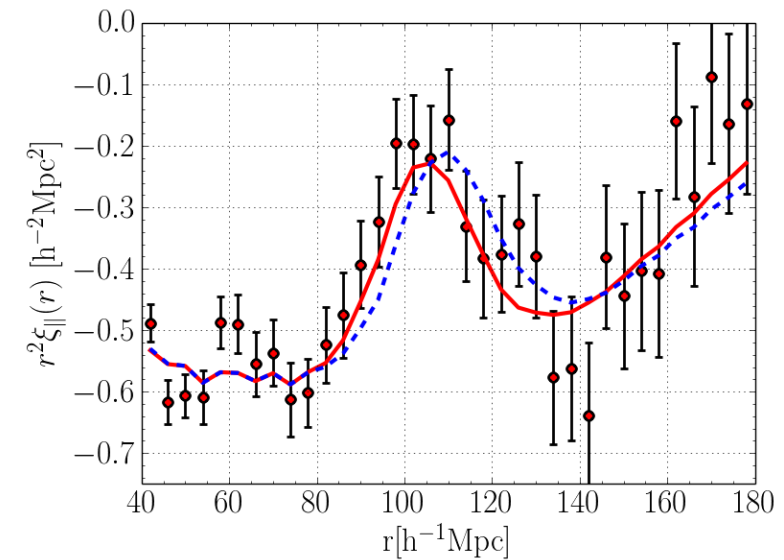
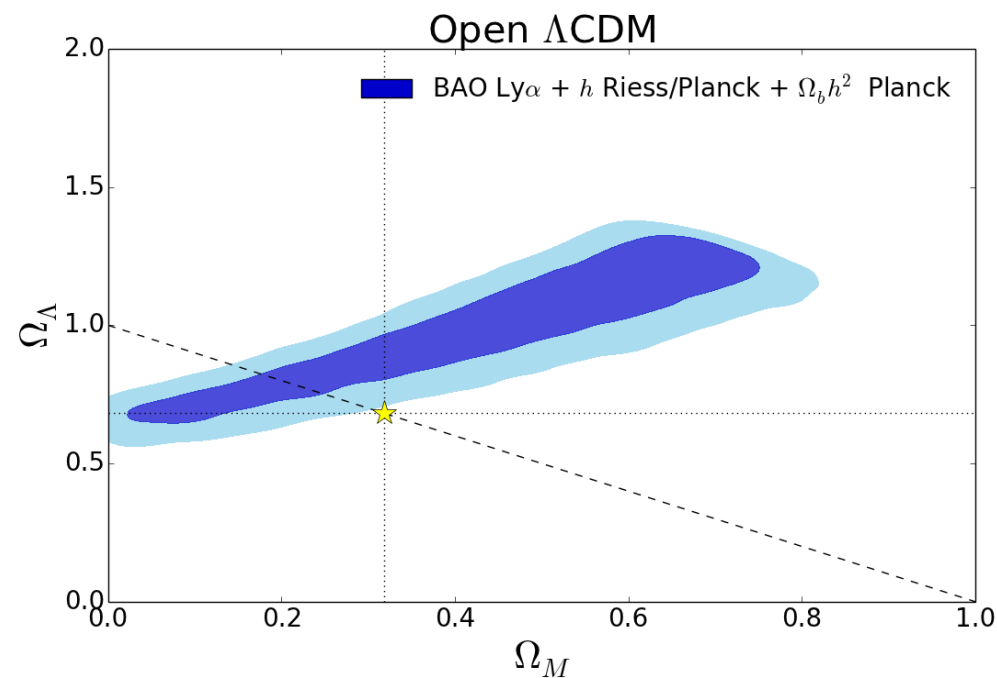
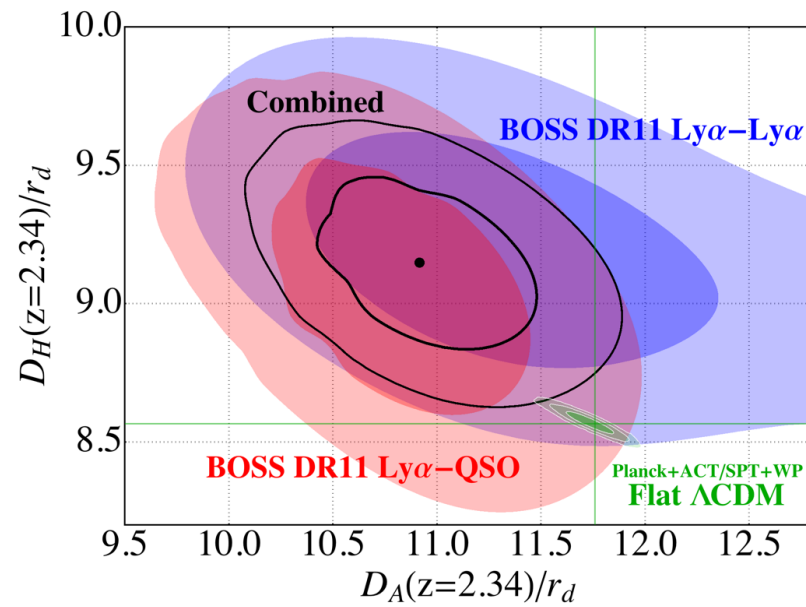


# SDSS-III sur la forêt Lyman- $\alpha$



# SDSS-III sur la forêt Lyman- $\alpha$

DR11: Delubac et al. 2014  
158,401 QSO  $2.1 < z < 3.5$



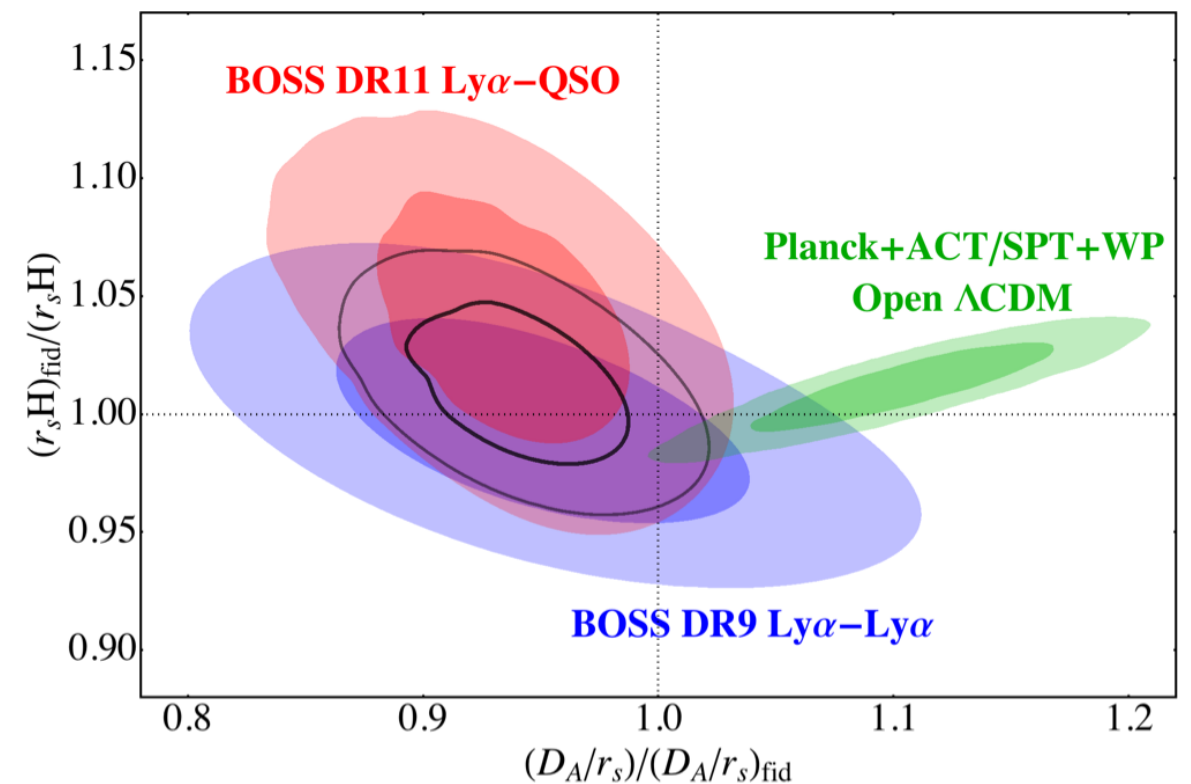
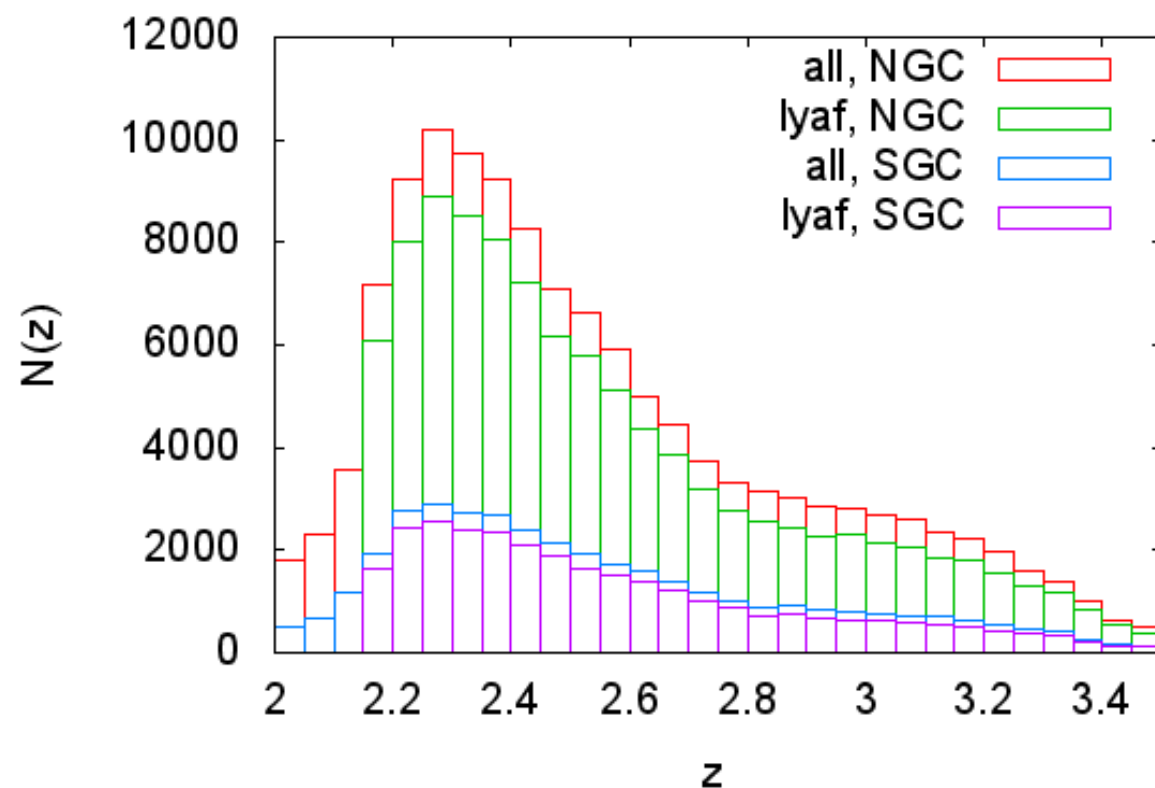
# SDSS-III sur QSO x Lyman- $\alpha$

Cross-corrélation entre QSO et forêt Lyman- $\alpha$

Font-Ribeira et al. 2014

164 017 QSO comme traceurs, 130 820 pour Lyman- $\alpha$ .

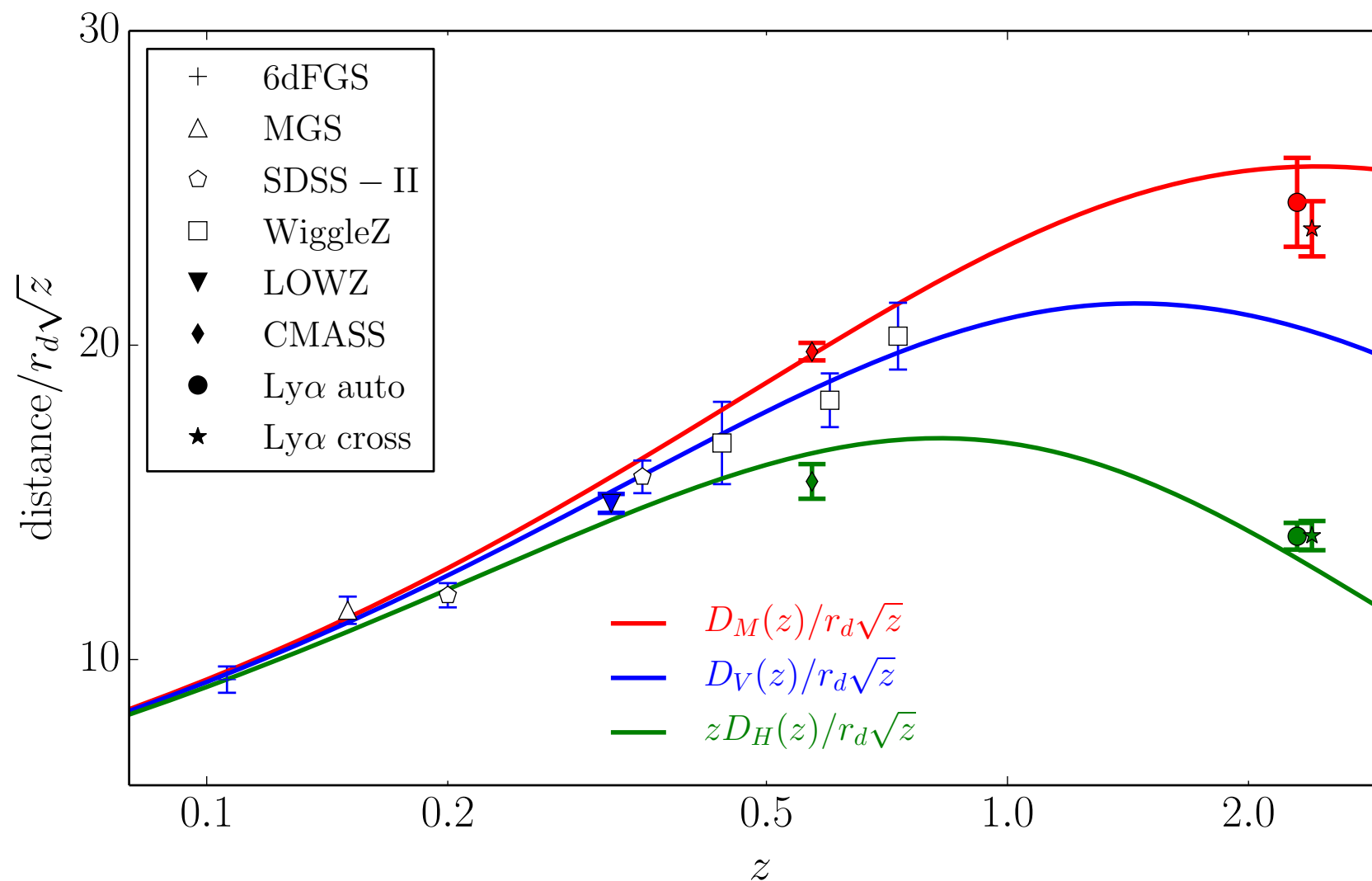
Plus de corrélations parasites dues au continuum.





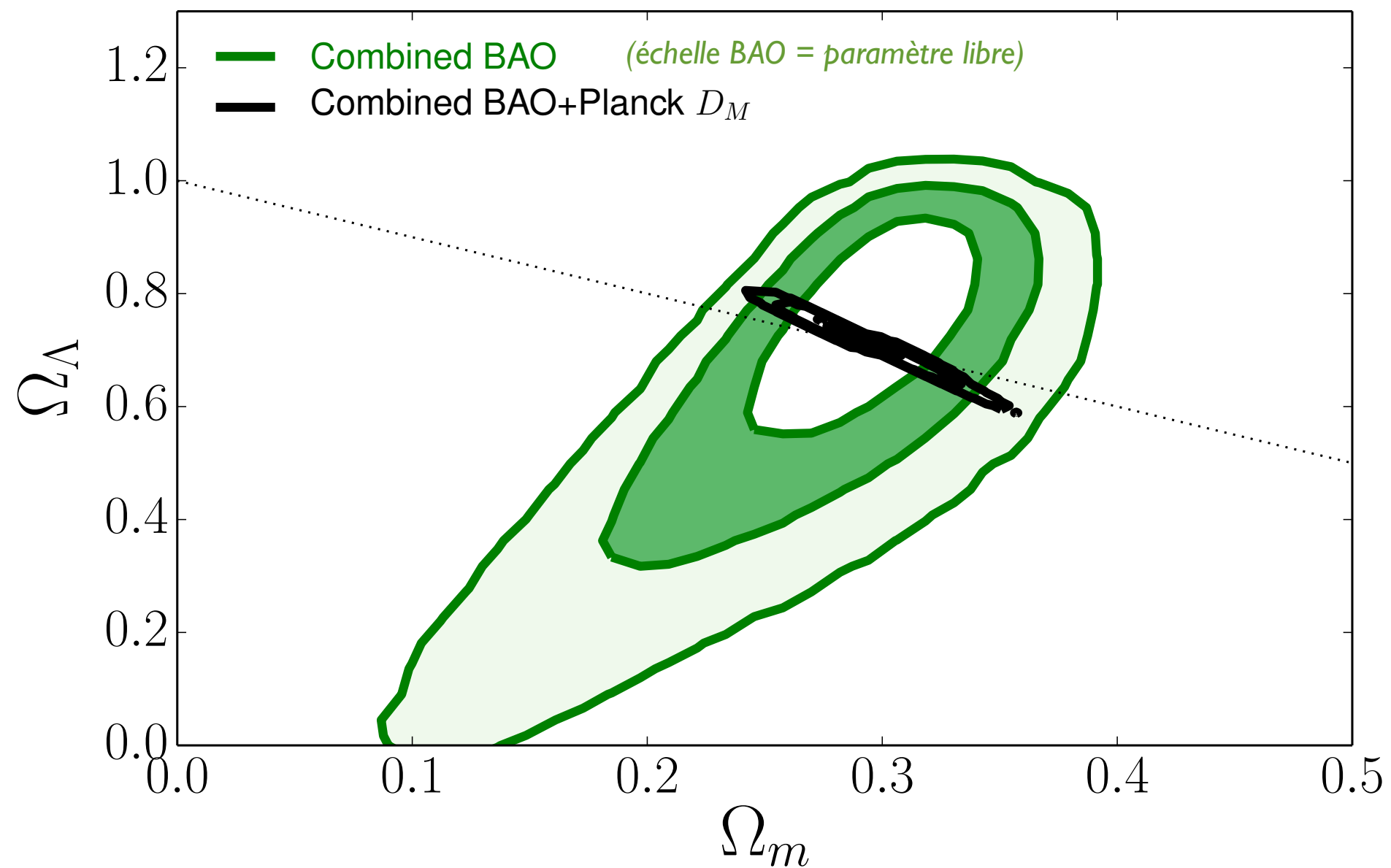
# SDSS-III : combinaison

Combinaison des galaxies, Ly- $\alpha$  auto et cross-corrélation

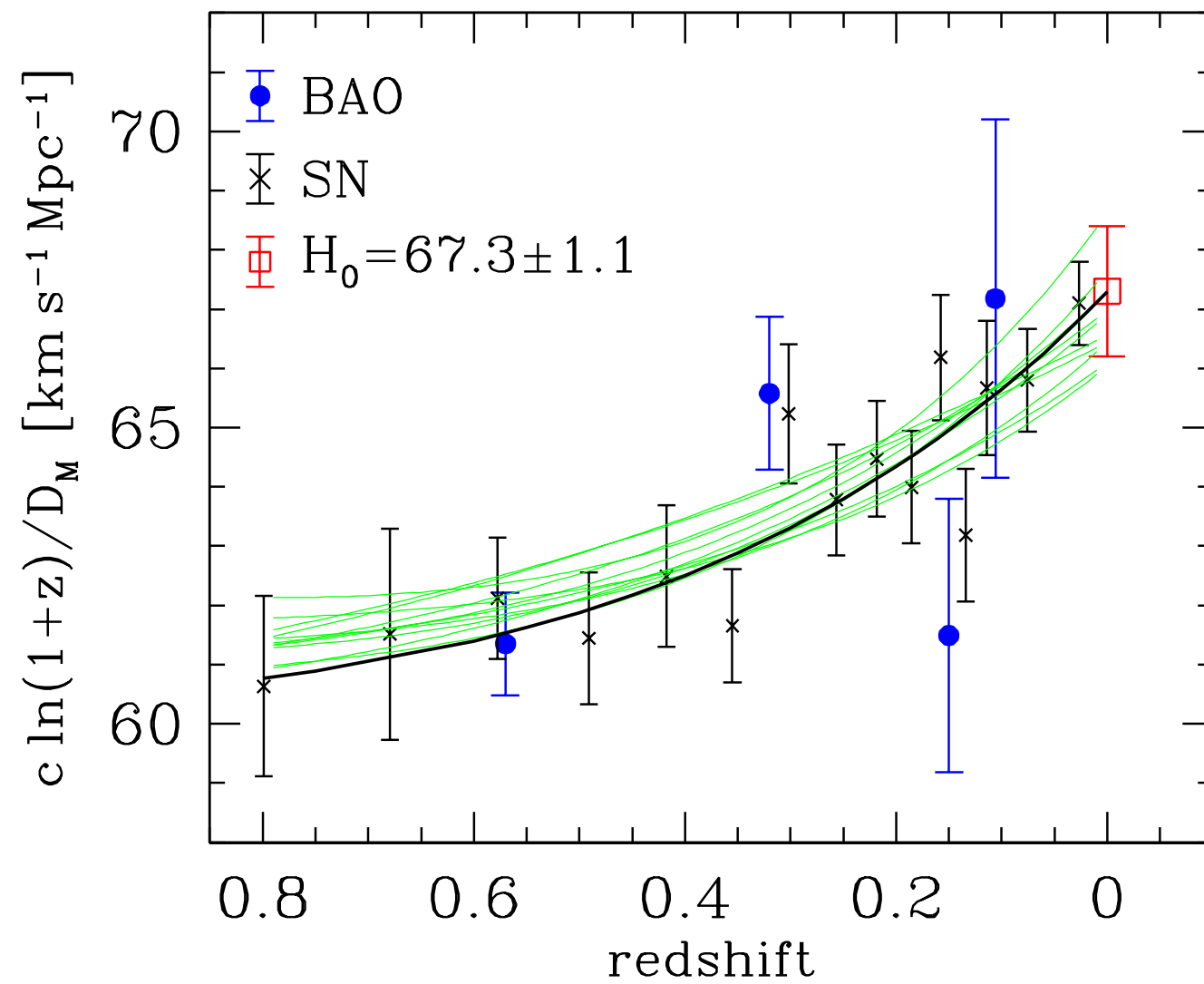


# SDSS-III : cosmologie

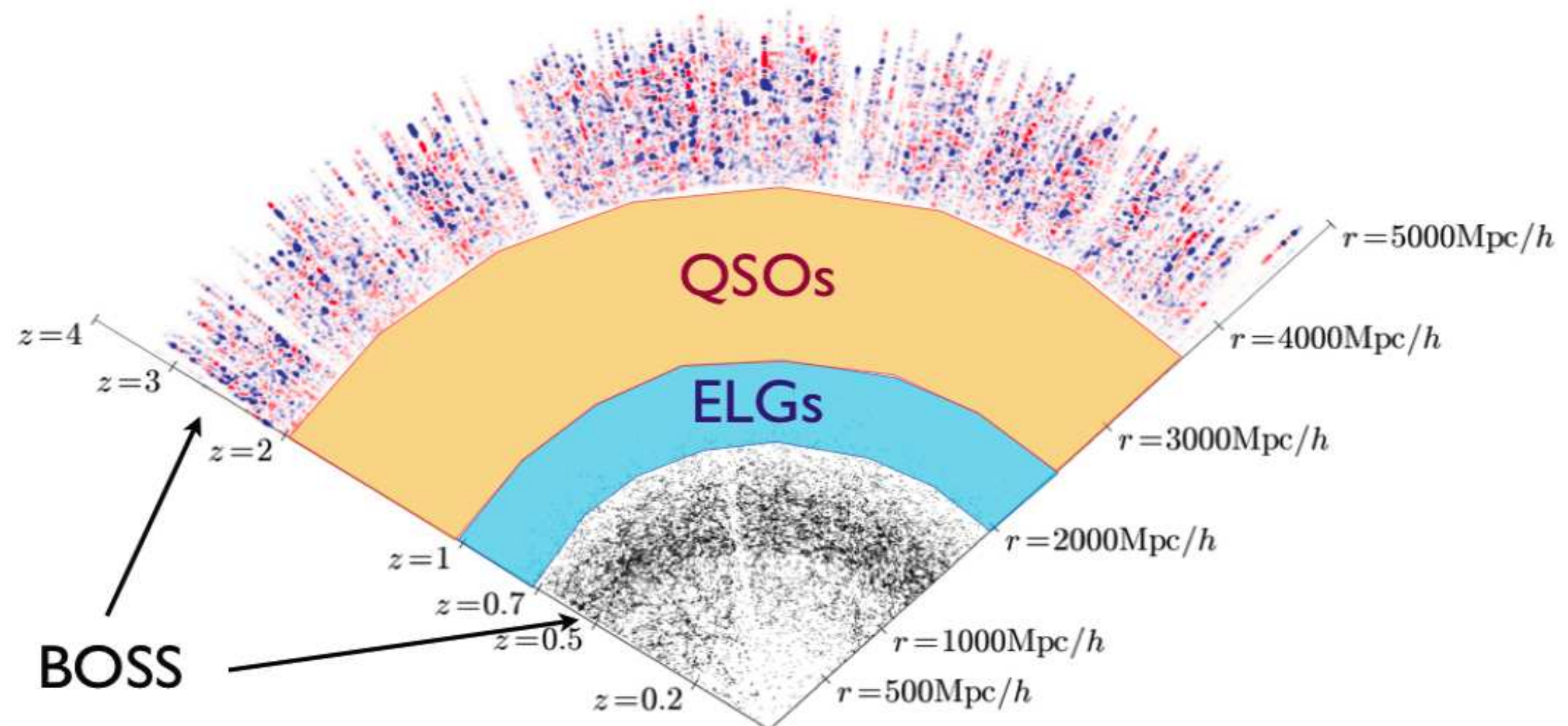
Les BAO seuls prouvent l'existence de l'énergie noire



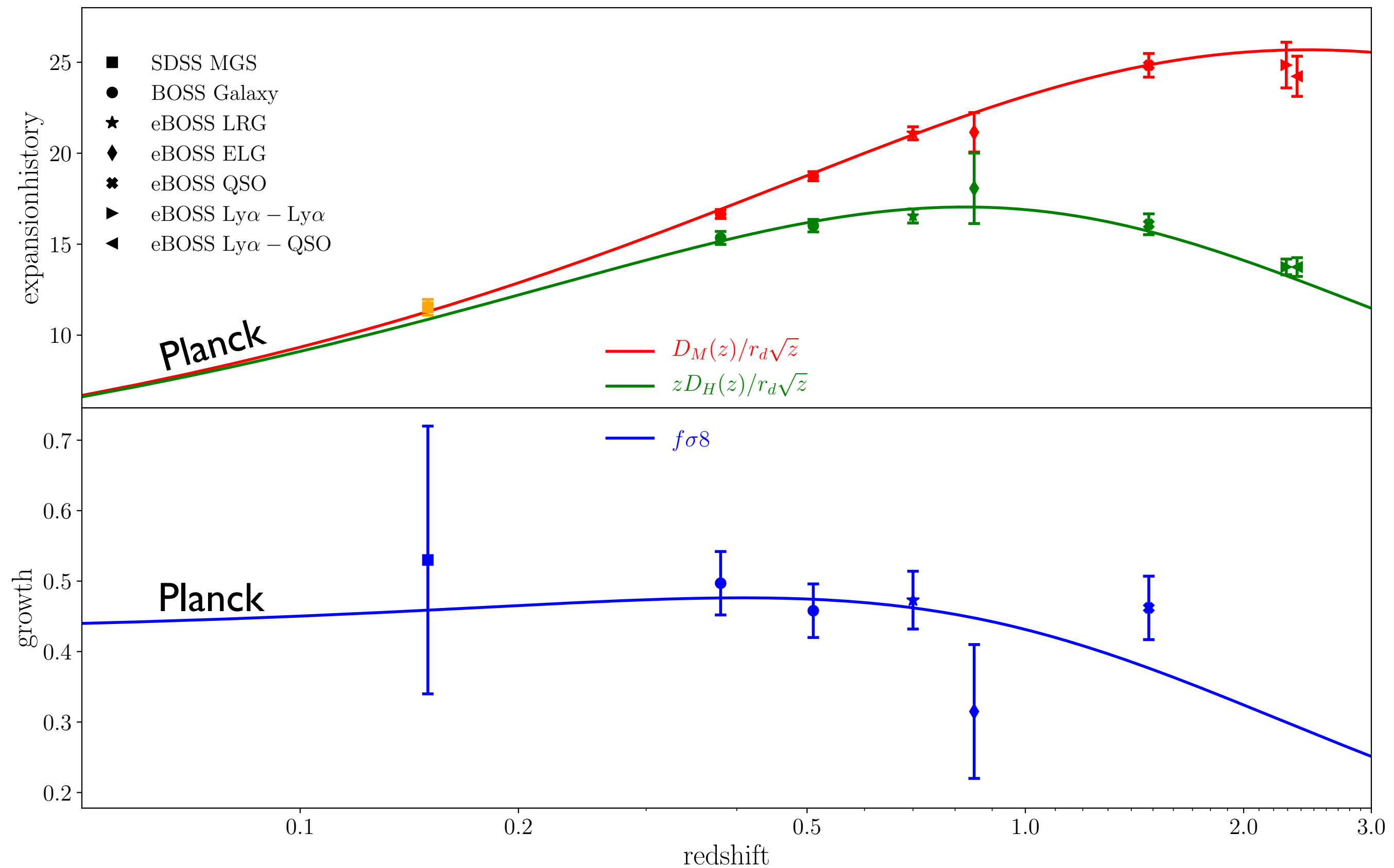
# SDSS-III H0, inverse distance ladder

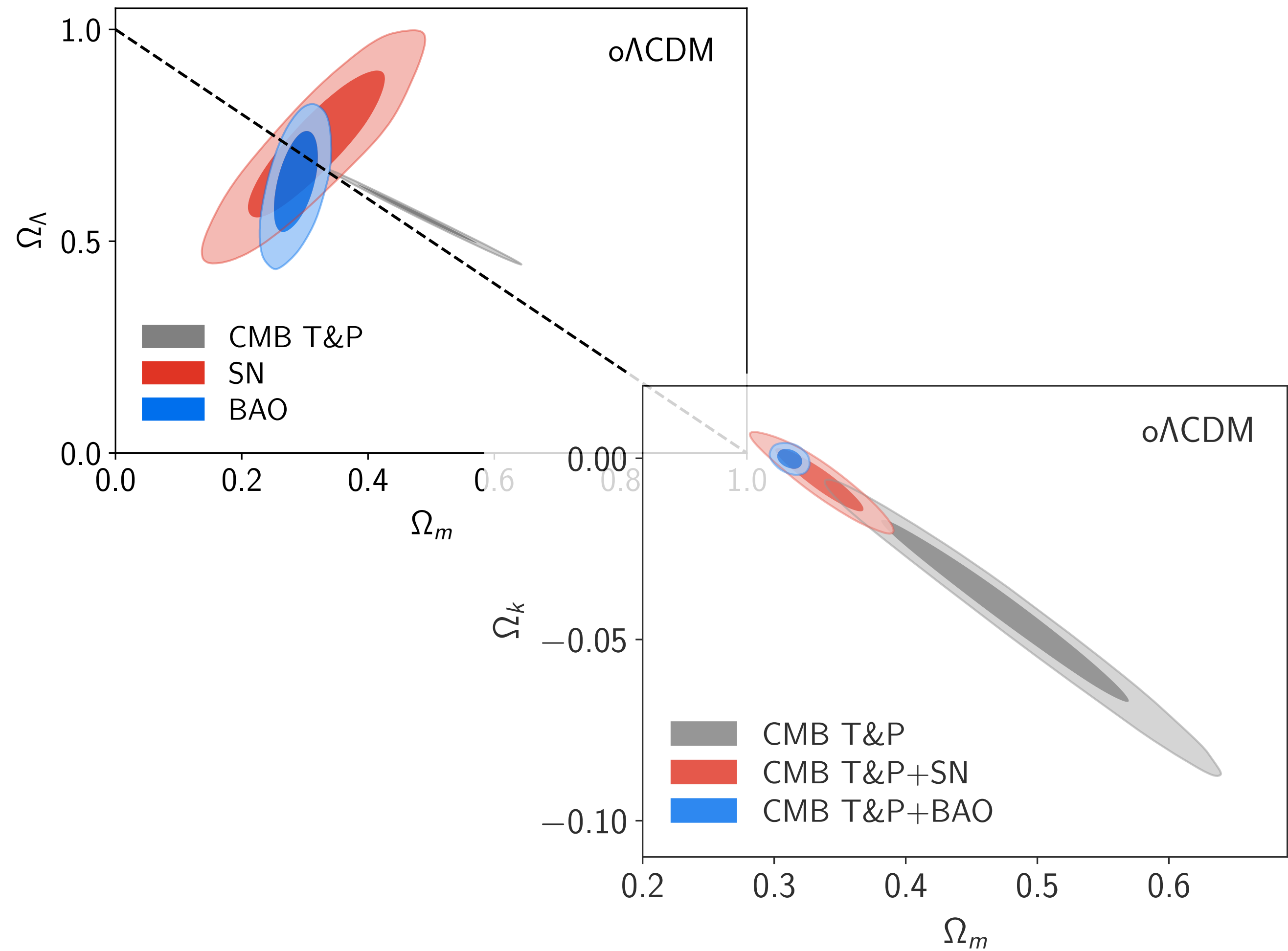


# SDSS-IV & eBOSS

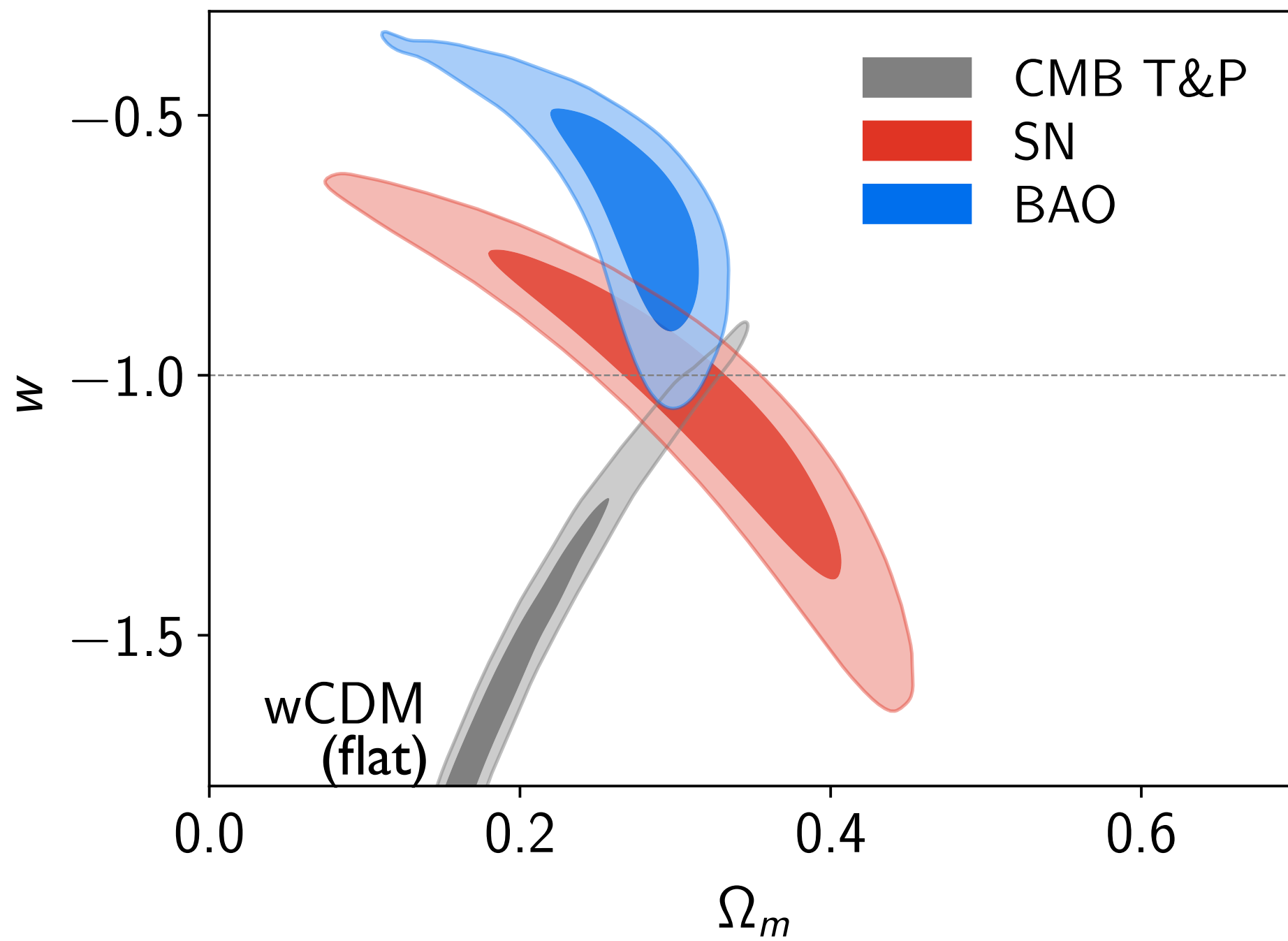


Résultat publiés été 2020

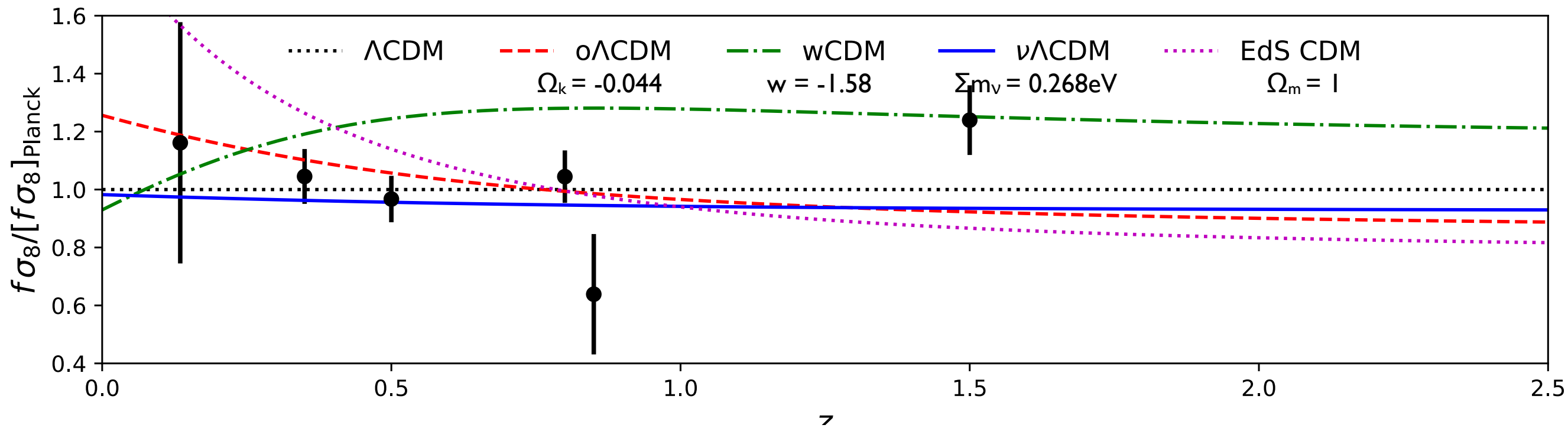








# RSD : redshift space distortions



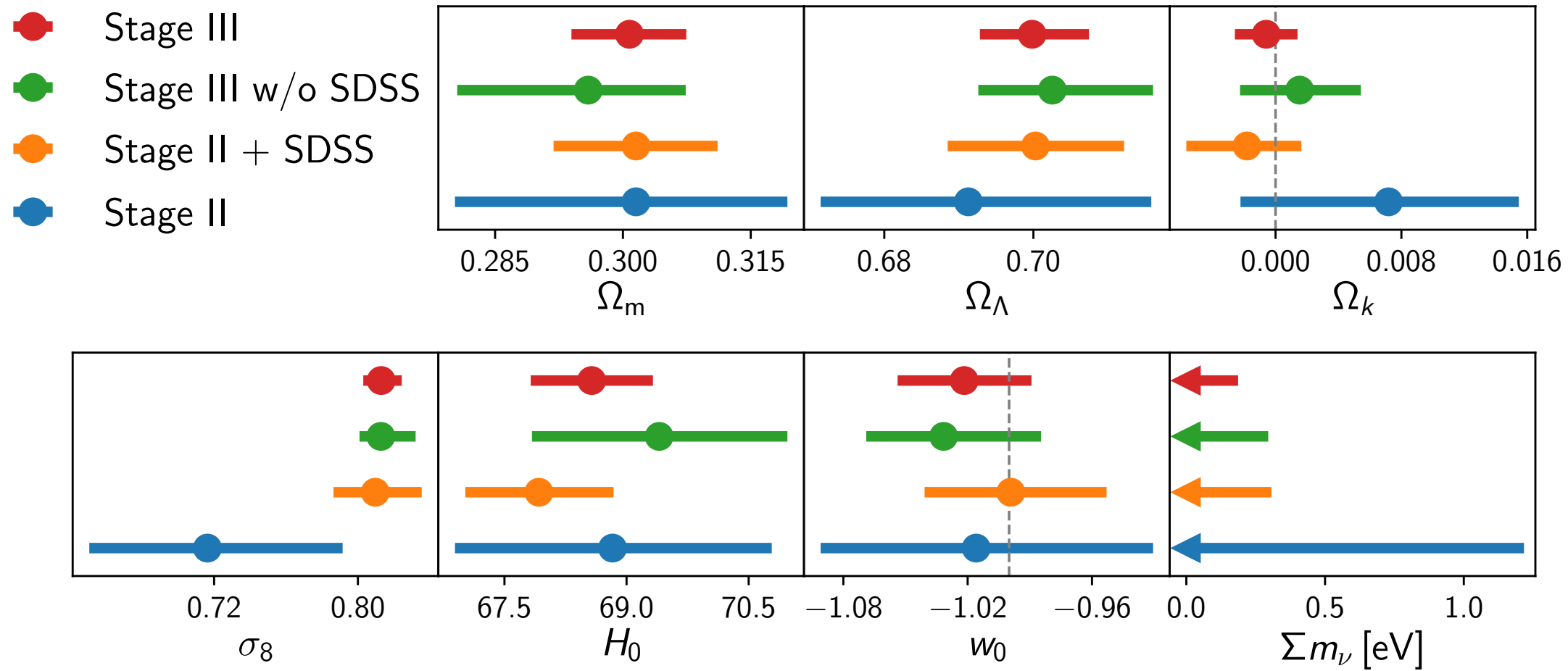
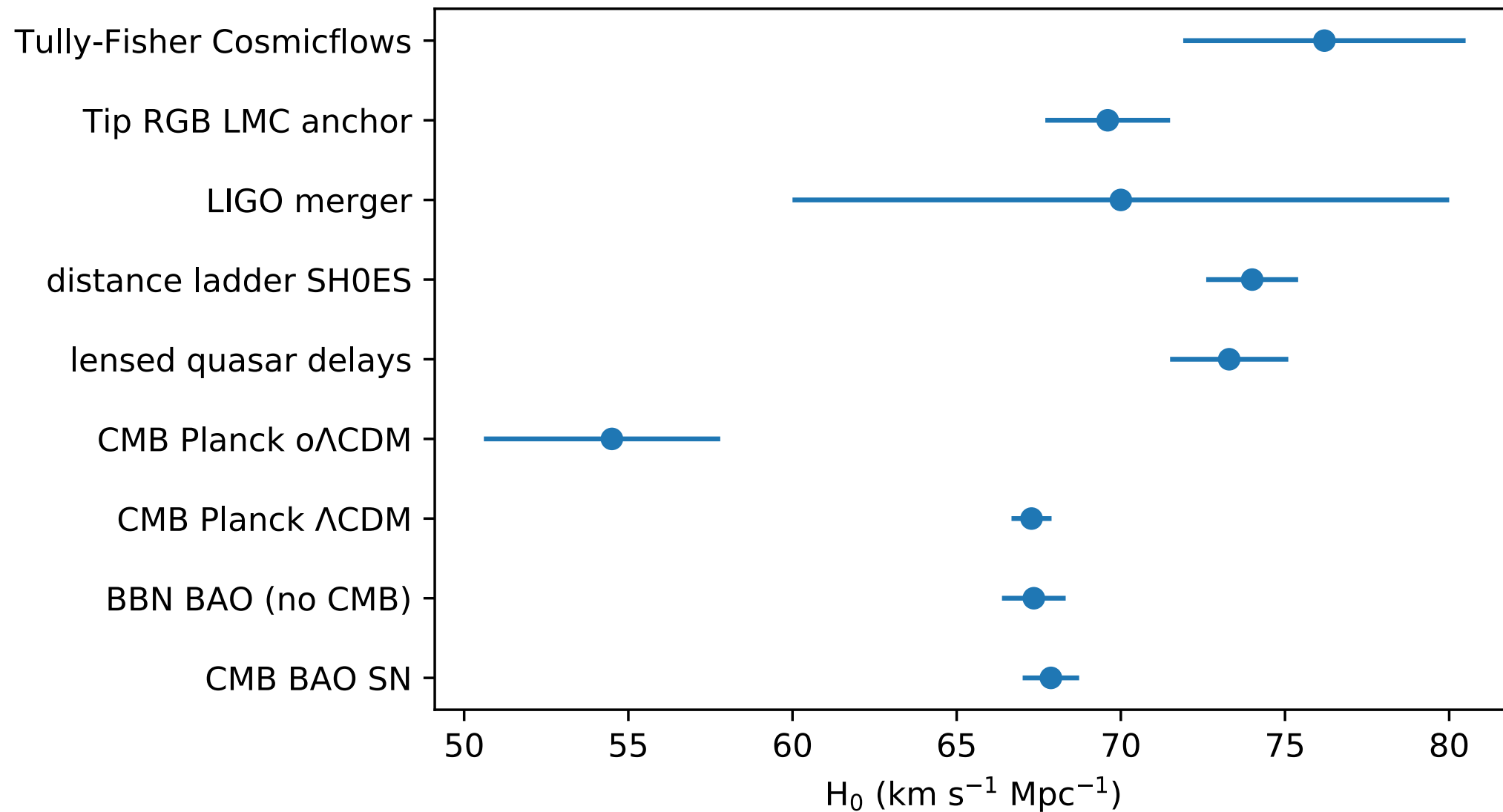
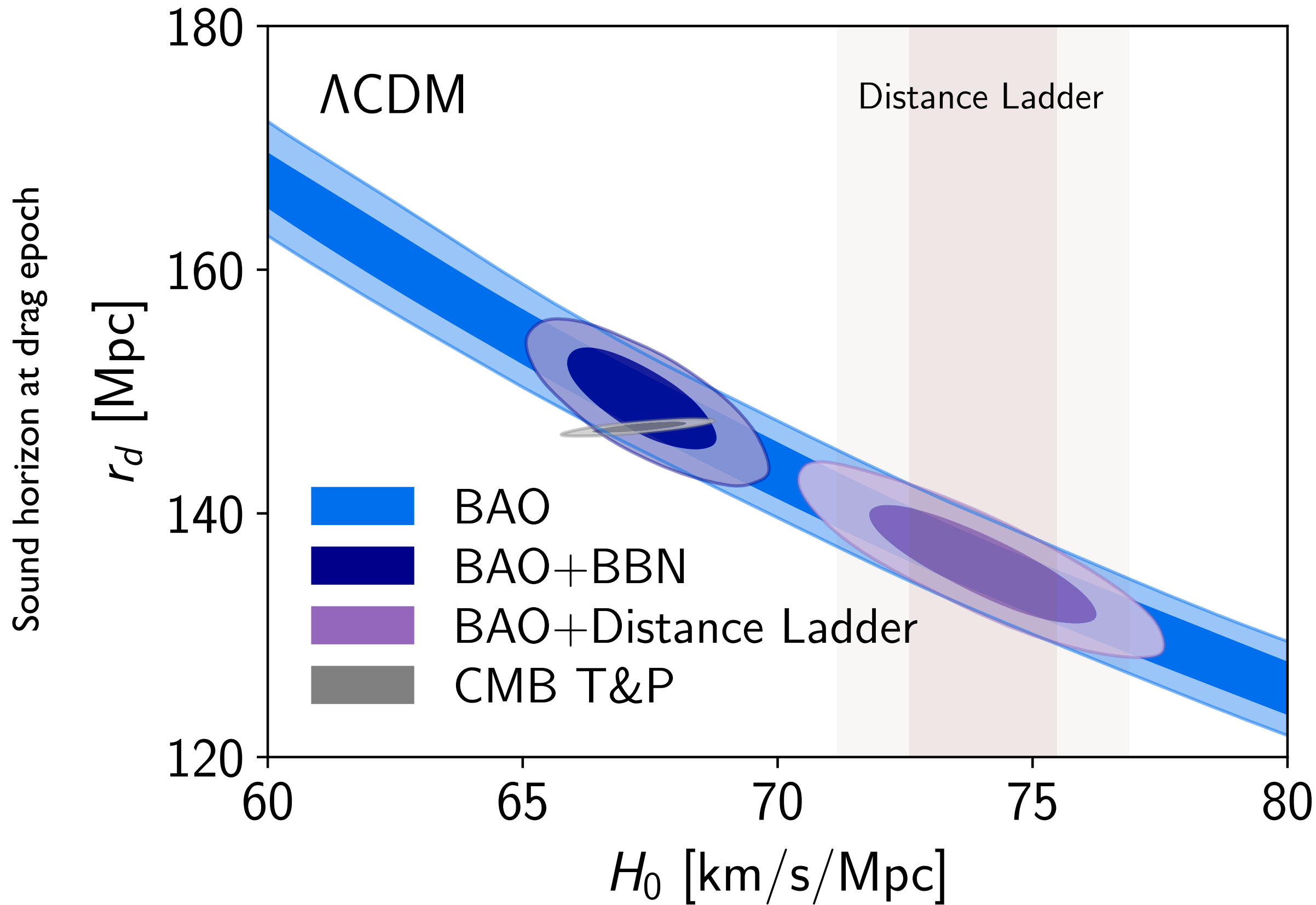


TABLE 5  
Hubble parameter constraints.

Dataset	Cosmological model	$H_0$ (km s <sup>-1</sup> Mpc <sup>-1</sup> )	Comments
CMB T&P+BAO+SN	$ow_0w_a$ CDM	$67.87 \pm 0.86$	Inverse distance ladder
BBN+BAO	$\Lambda$ CDM	$67.35 \pm 0.97$	No CMB anisotropies
CMB T&P	$\Lambda$ CDM	$67.28 \pm 0.61$	<i>Planck</i> 2018 (a)
CMB T&P	$o\Lambda$ CDM	$54.5^{+3.3}_{-3.9}$	<i>Planck</i> 2018 (a)
Lensing time delays	$\Lambda$ CDM	$73.3 \pm 1.8$	H0LiCOW (b)
Distance ladder	-	$74.0 \pm 1.4$	SH0ES (c)
GW sirens	-	$70 \pm 10$	LIGO (d)
TRGB	-	$69.6 \pm 1.9$	LMC anchor (e)
TFR	-	$76.2 \pm 4.3$	Cosmicflows (f)





# The Hubble Hunter's Guide<sup>\*</sup>

L. Knox<sup>†</sup> and M. Millea<sup>‡</sup>  
(Dated: September 18, 2019)

Measurements of the Hubble constant, and more generally measurements of the expansion rate and distances over the interval  $0 < z < 1$ , appear to be inconsistent with the predictions of the standard cosmological model ( $\Lambda$ CDM) given observations of cosmic microwave background temperature and polarization anisotropies. Here we consider a variety of types of departures from  $\Lambda$ CDM that could, in principle, restore concordance among these datasets, and we explain why we find almost all of them unlikely to be successful. We single out the set of solutions that increase the expansion rate in the decade of scale factor expansion just prior to recombination as the least unlikely. These solutions are themselves tightly constrained by their impact on photon diffusion and on the gravitational driving of acoustic oscillations of the modes that begin oscillating during this epoch – modes that project on to angular scales that are very well measured. We point out that a general feature of such solutions is a residual to fits to  $\Lambda$ CDM, like the one observed in Planck power spectra. This residual drives the modestly significant inferences of angular-scale dependence to the matter density and anomalously high lensing power, puzzling aspects of a data set that is otherwise extremely well fit by  $\Lambda$ CDM.



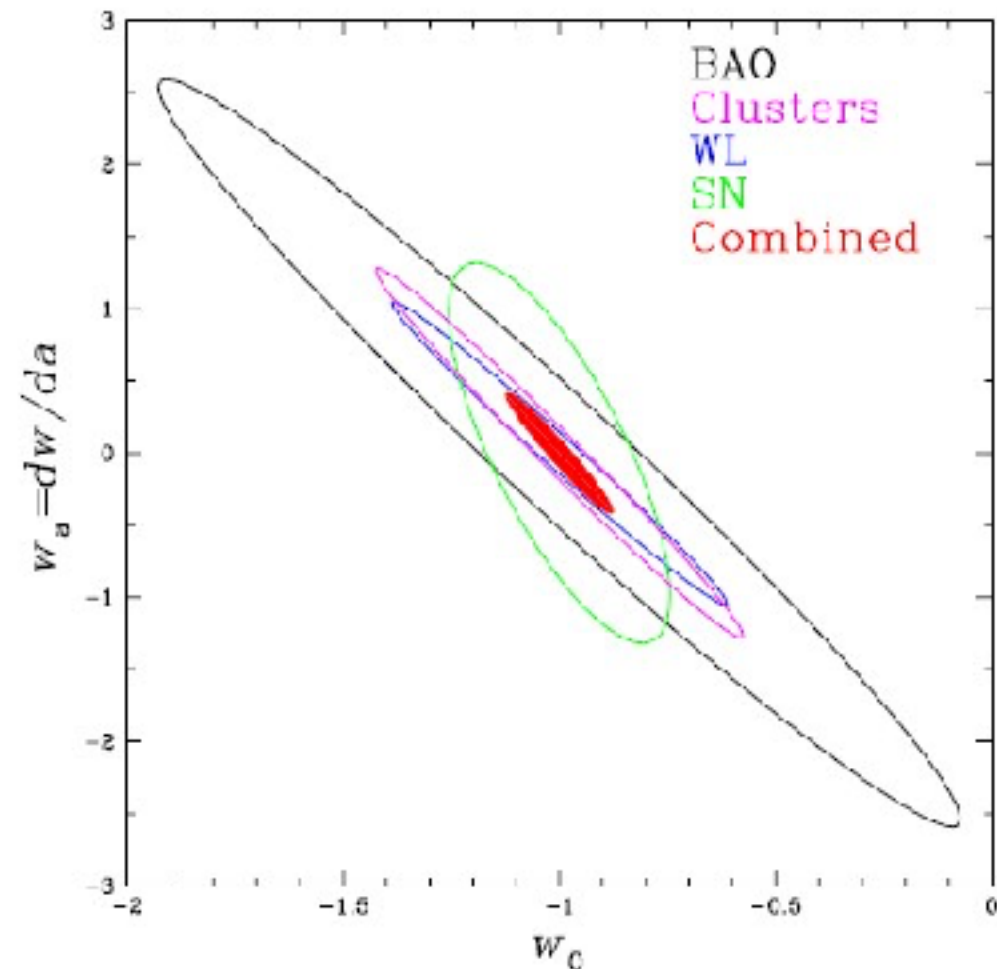
# Dark Energy Survey

Blanco Telescope (4 m) à Cerro Tololo au Chili

520 Mpix DECam camera

Relevé en cours depuis mi-2013

BAO avec photo-z ( $\Delta z \sim 0.08$ ), 300 M galaxies  $z < 1.4$ .



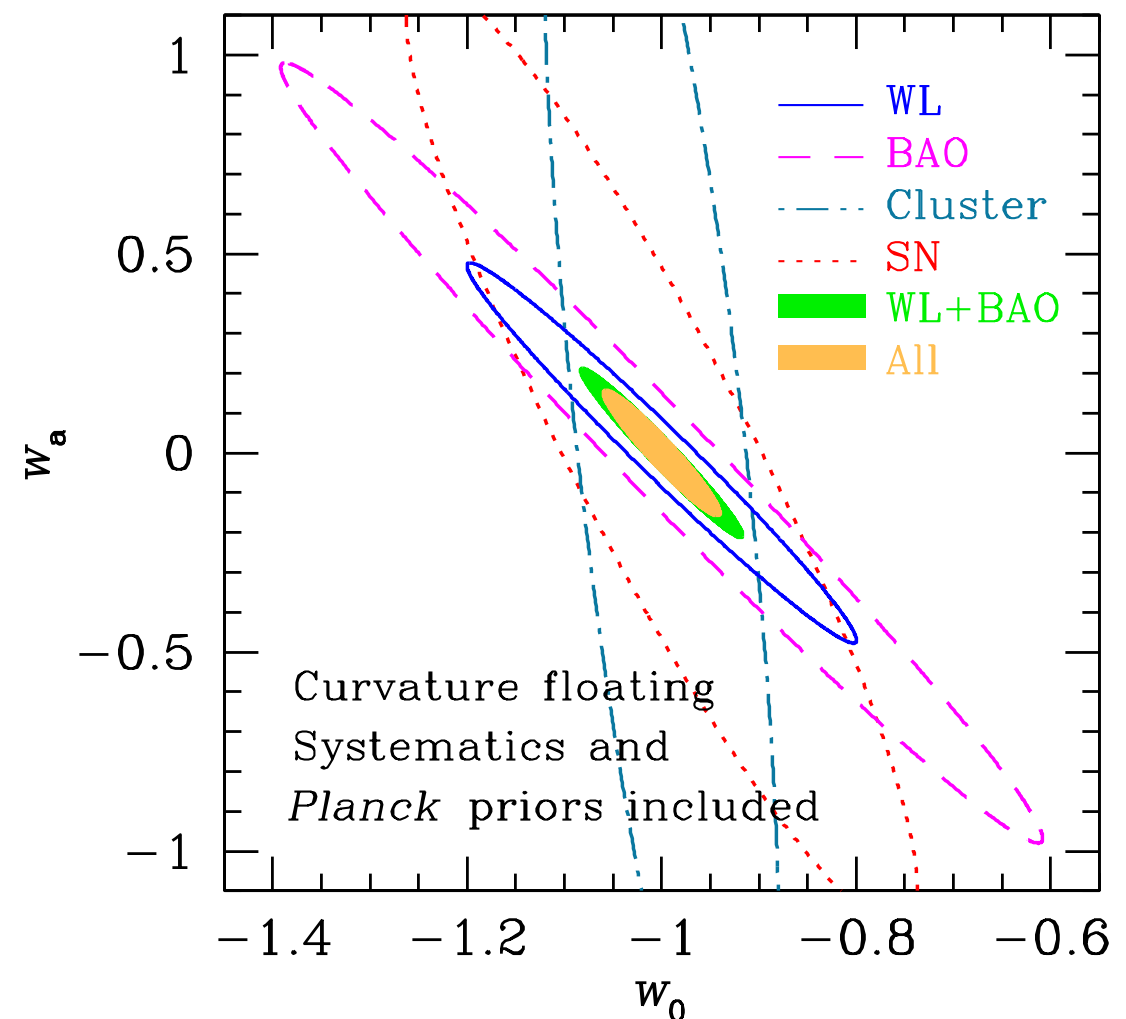
# LSST

Télescope de 8,4 m à Cerro Pachon au Chili

Caméra de 3 milliards de pixels

Photo-z BAO

Début du relevé en 2022 (?)

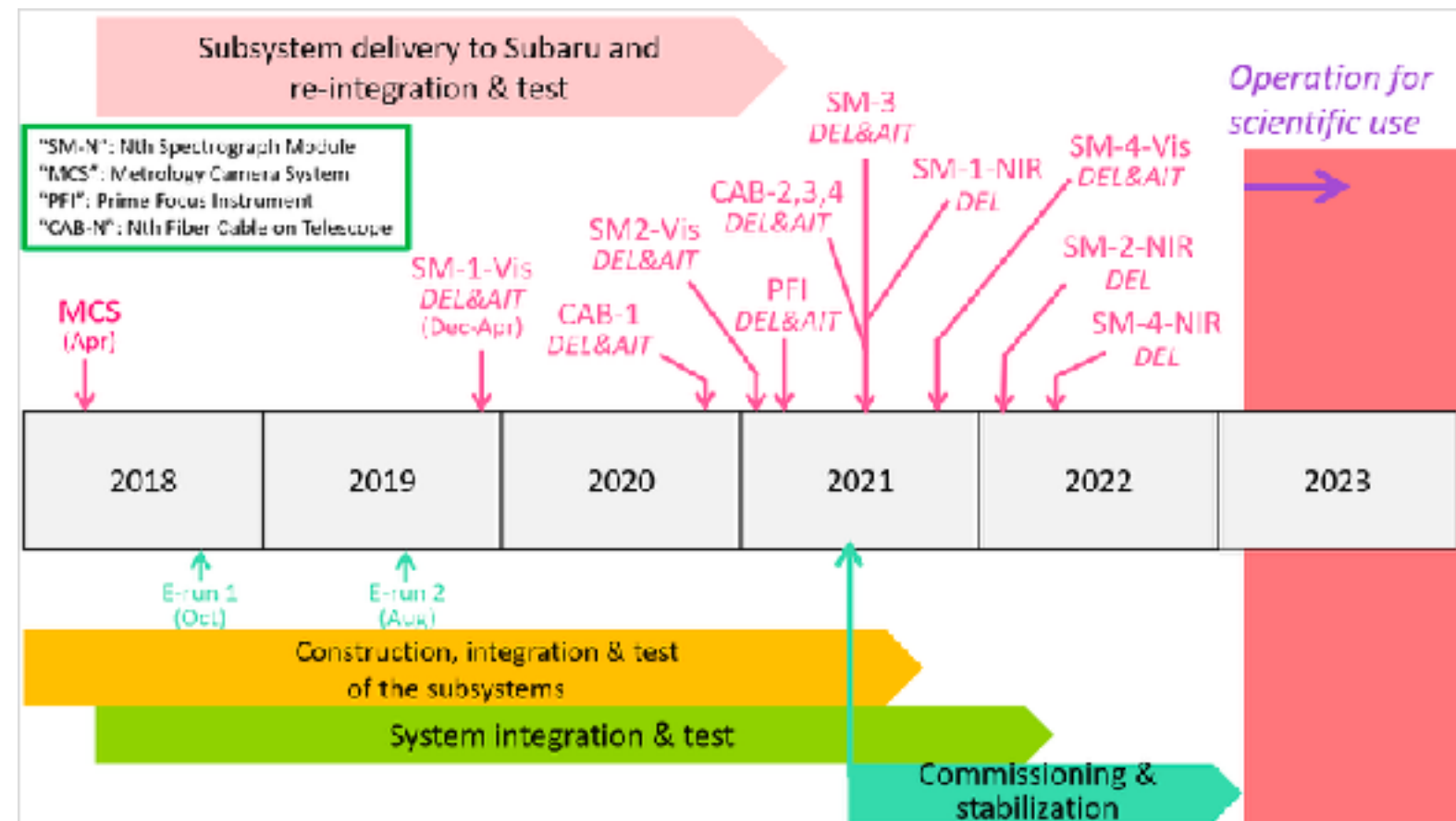


# PFS (Sumire) at Subaru

Prime Focus Spectrograph (PFS) : spectrographe à 2400 fibres, au foyer du Subaru, télescope grand champ de 8,2 m à Hawaïi.

BAO spectroscopiques, sur 1400 degrés carrés, 4 M galaxies,  $0.8 < z < 2.4$ .

Synergie prévue avec HSC (HyperSuprime Camera), camera d'imagerie actuellement au Subaru.



# DESI

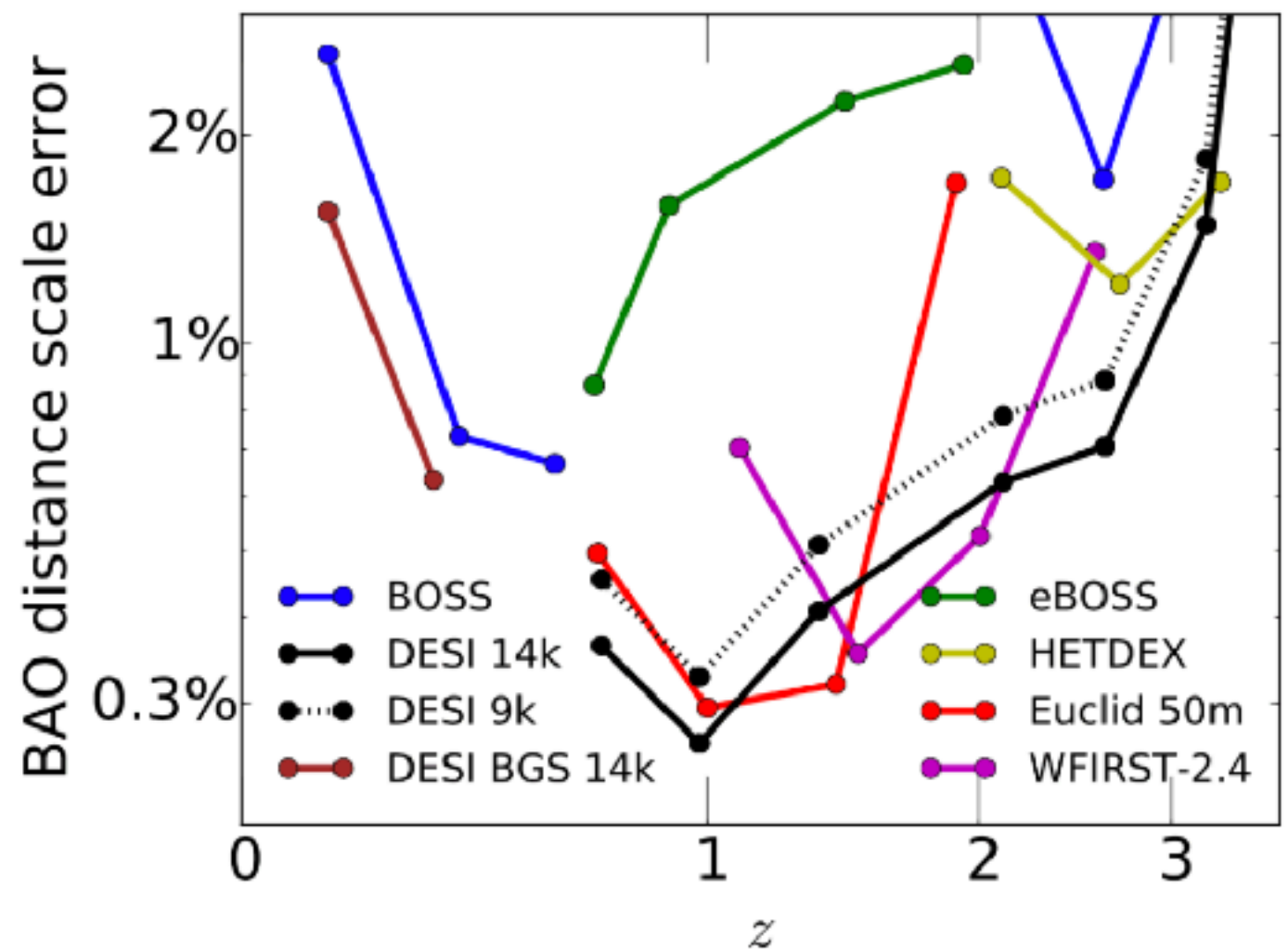
Dark Energy Spectroscopic Instrument

Télescope de 4 m NOAO Mayall (Kitt Peak, AZ)

30M gal (bright, LRG, ELG) +qso, 700k Ly- $\alpha$ , 14000  
degrés carrés

Commissioning

terminé



# Euclid

Télescope spatial de 1,2 m, au point de Lagrange Terre-Soleil L2. Champ de 0,5 degré carré.

Relevé en 2022.

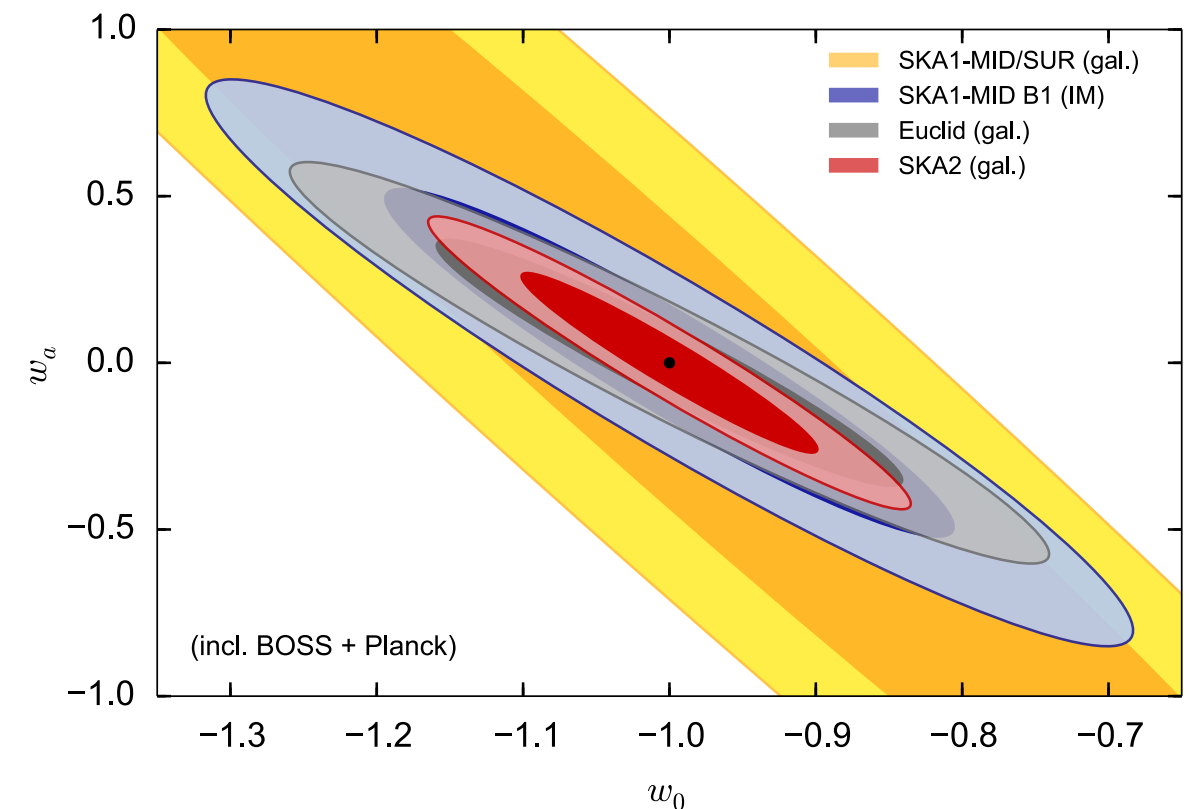
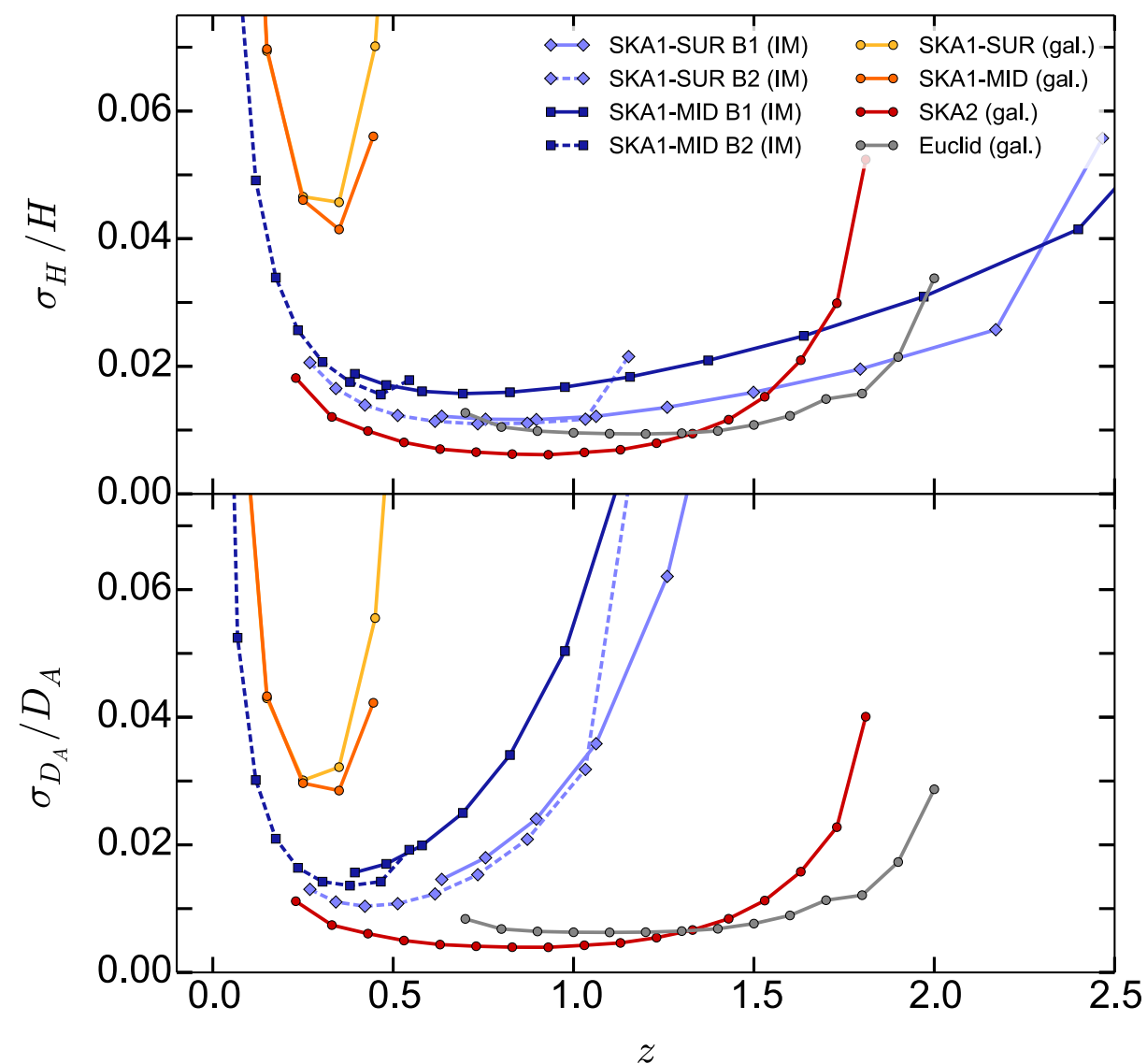
Imagerie visible (lentilles gravitationnelles), imagerie infrarouge (photo-z), spectrographie sans fente dans le proche infrarouge (BAO).

50 M gal ( $H\alpha$ ),  $0.7 < z < 2.1$

# SKA (Square kilometer array)

Relevé radio à 21 cm, 202x, Afrique du Sud et Australie.

BAO avec  $\sim 1$  milliard de galaxies, ou bien via la mesure de l'intensité de l'émission de l'hydrogène.





# Au-delà des BAO

La méthode des BAO atteint ses limites statistiques avec les relevés prévus (DESI, Euclid, SKA).

Les relevés de matière 3D permettent d'autres analyses :

- distorsions de redshift (RSD) : croissance des structures.
- champs de vitesse via reconstruction, corrélation avec effet SZ cinétique.
- corrélation avec effet de lentille sur objets d'arrière-plan et CMB.