

# 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.

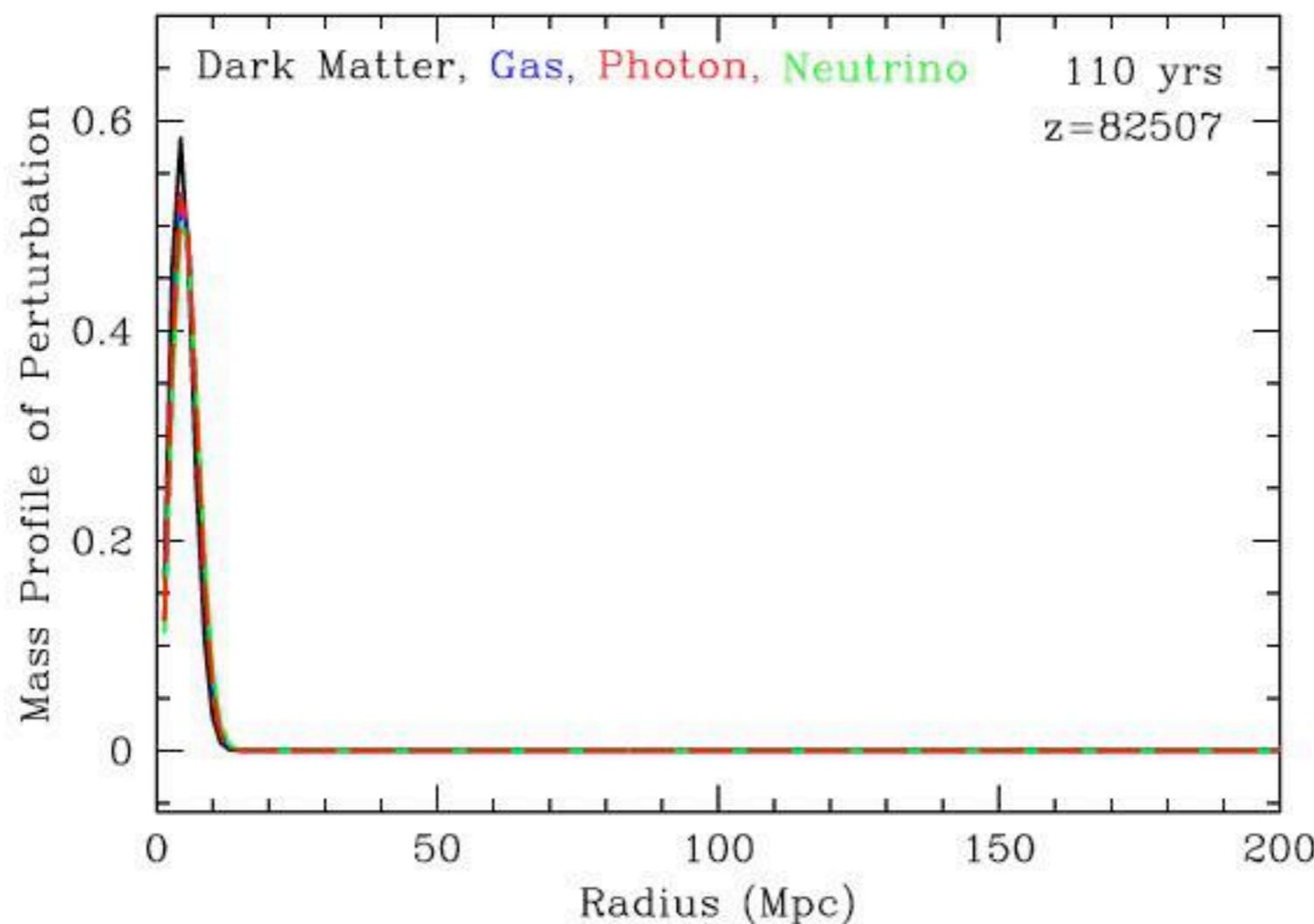
Elles ont la même origine que les fluctuations du fond diffus cosmologique, mais laissent une empreinte dans la matière, au lieu du rayonnement électromagnétique.

# Le phénomène des oscillations de baryons

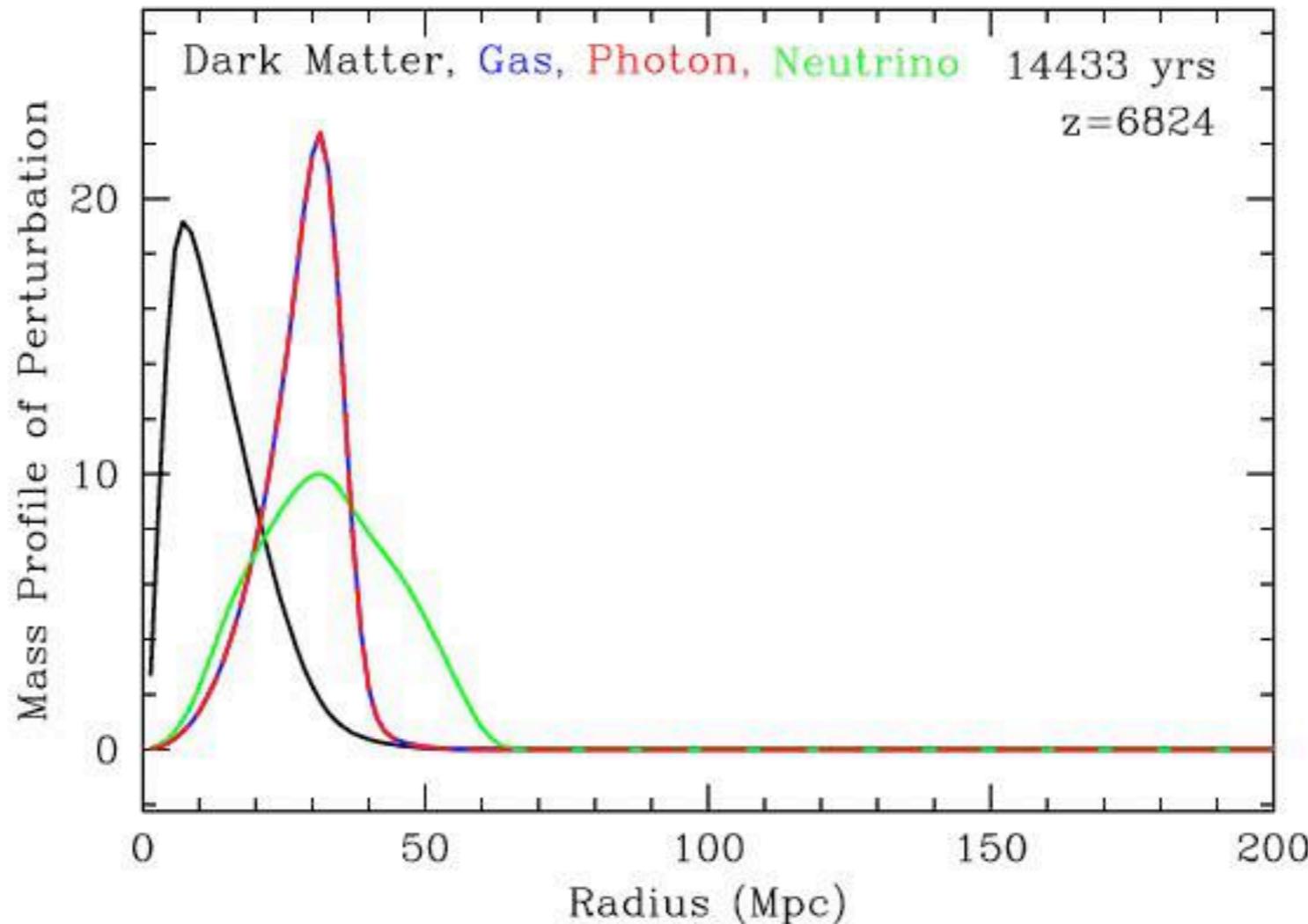
---

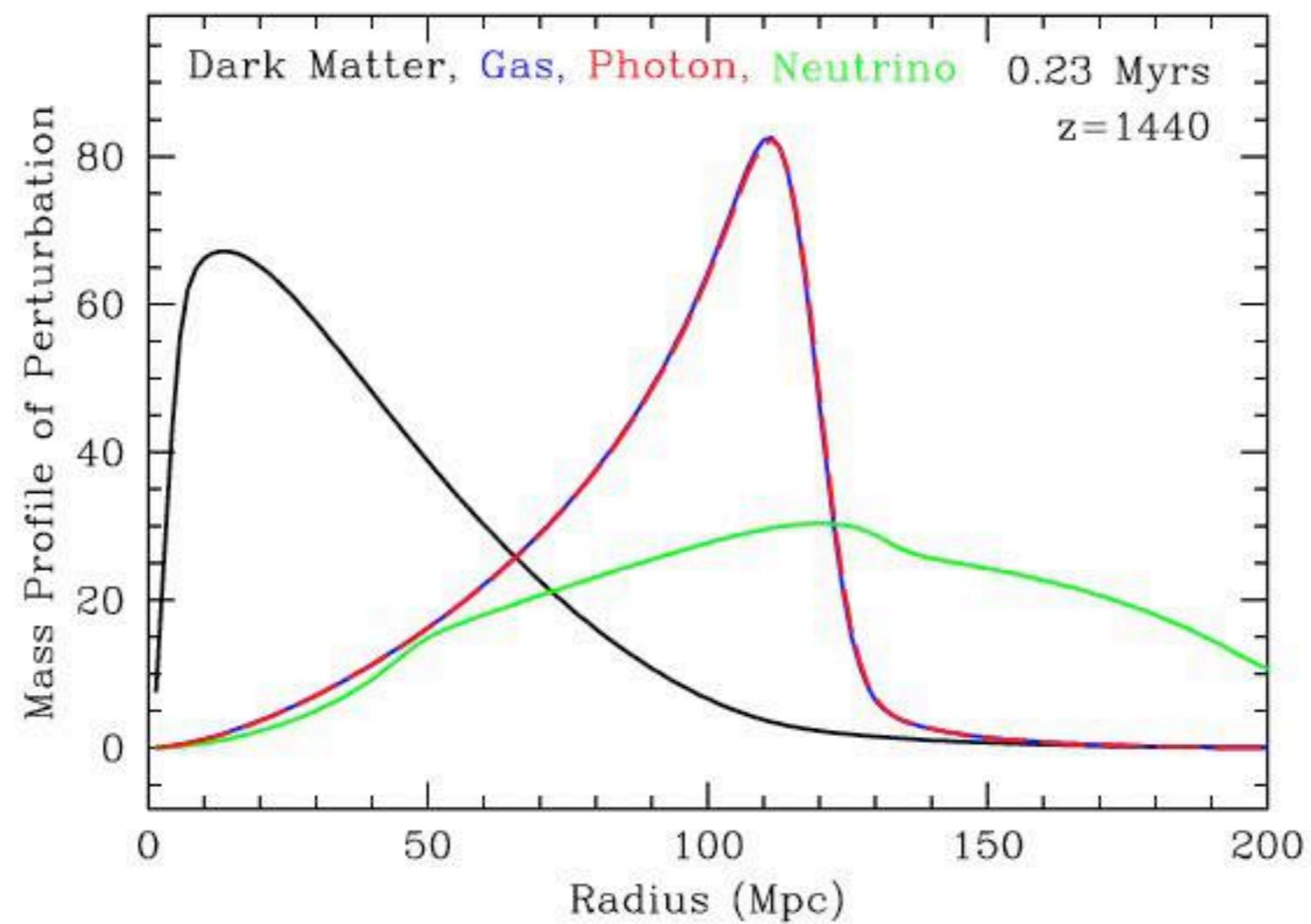
Suivons l'évolution d'une surdensité adiabatique (identique pour toutes les espèces considérées, neutrinos, baryons, photons, matière noire — CDM) dans le plasma primordial.

# État initial

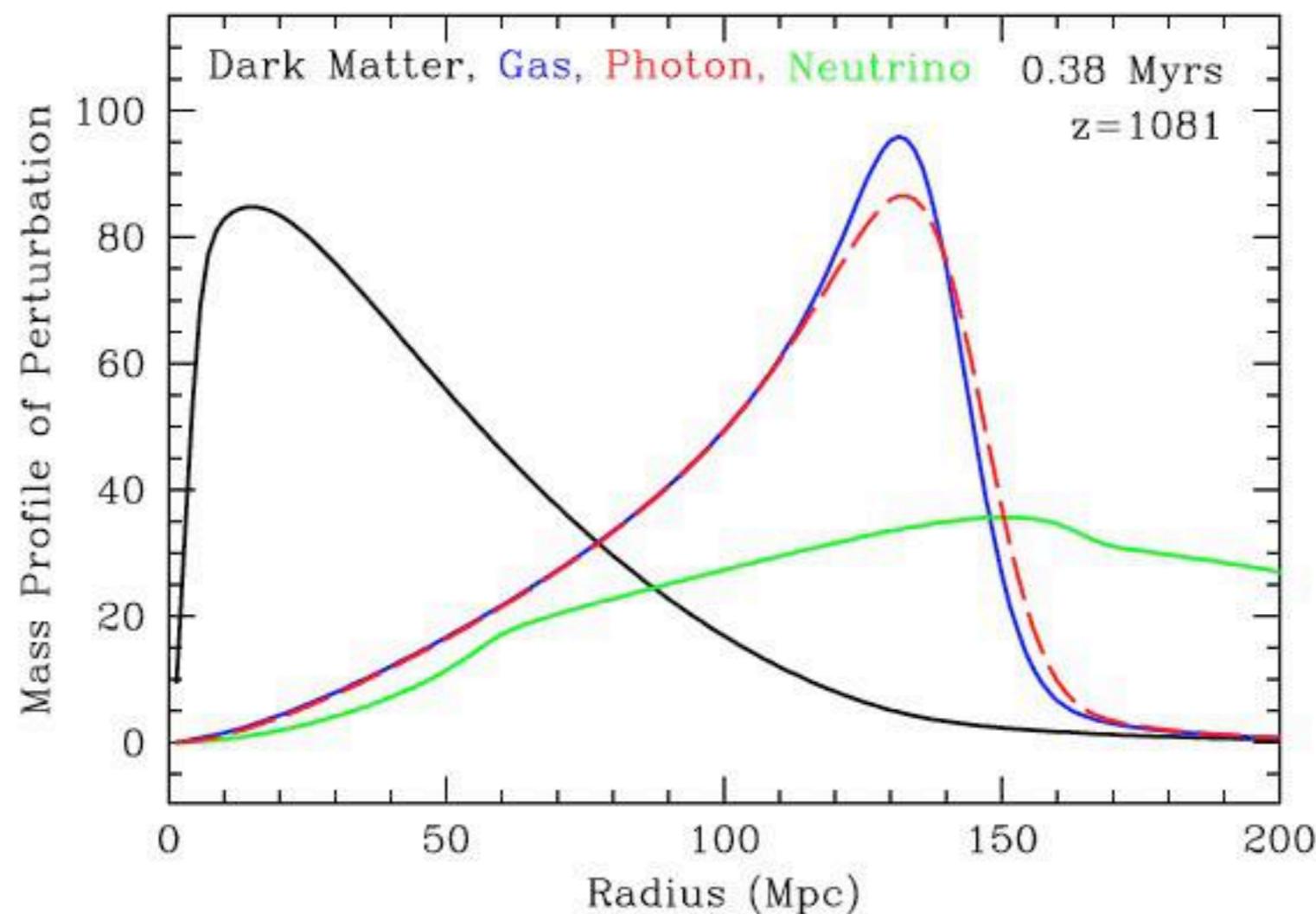


Les neutrinos s'échappent.  
La matière noire attire la matière via  
la gravitation : le pic s'élargit.  
Le fluide baryons+photons est  
collisionnel et soumis à la pression :  
onde sonore sphérique  $\sim 0.57 c$

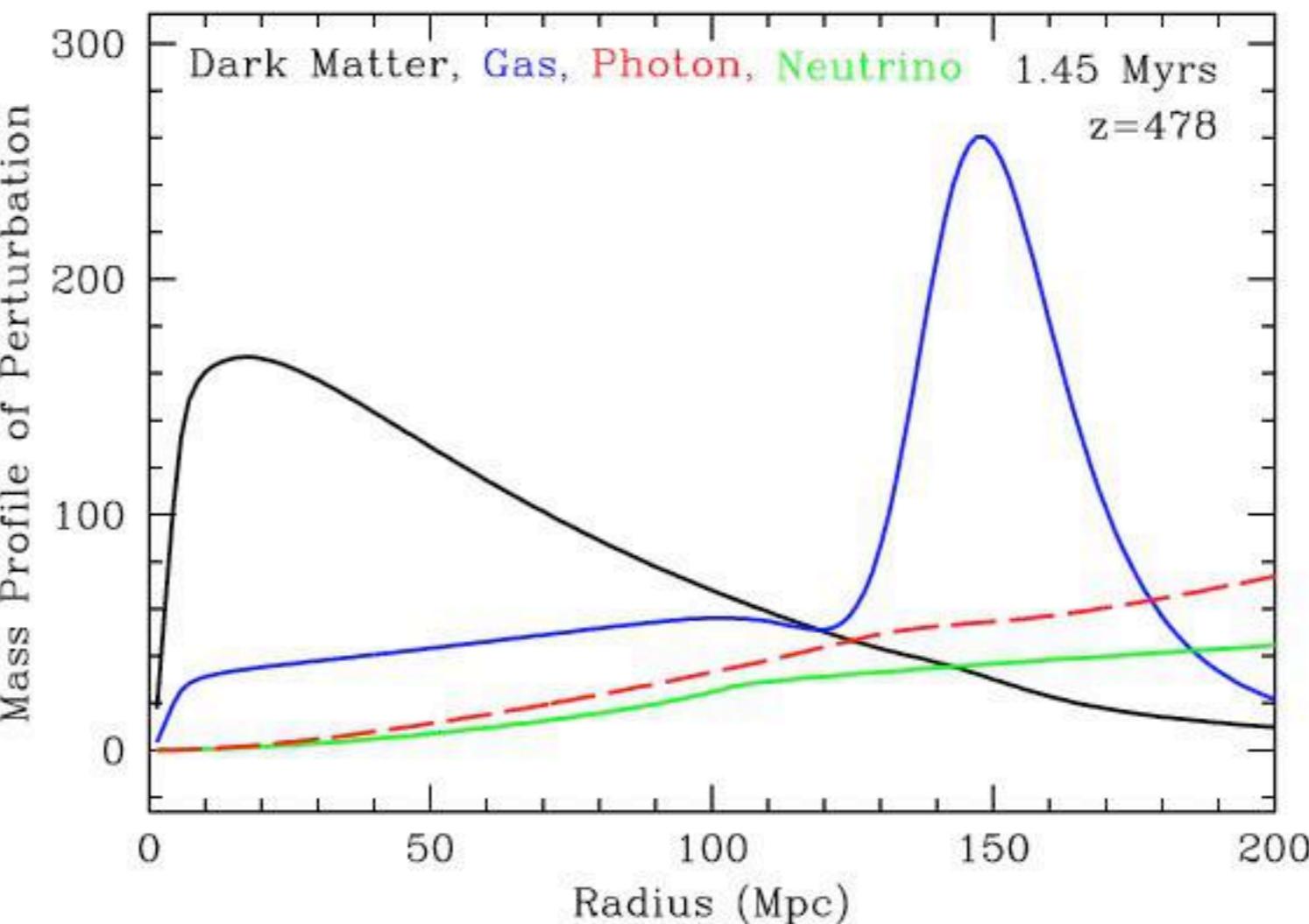




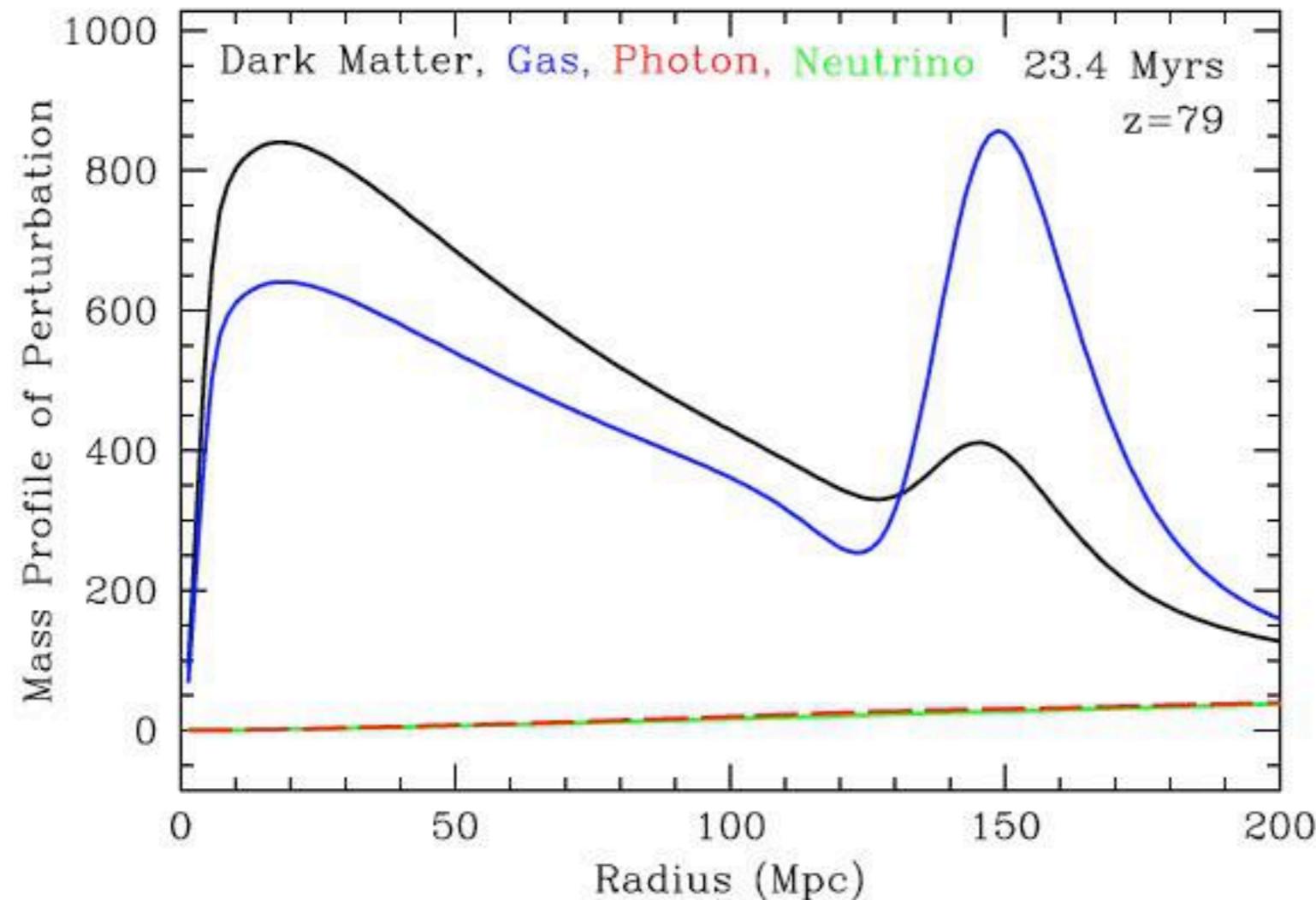
Recombinaison: les photons s'échappent ( $\Rightarrow$   
Silk damping)  
La vitesse du son diminue



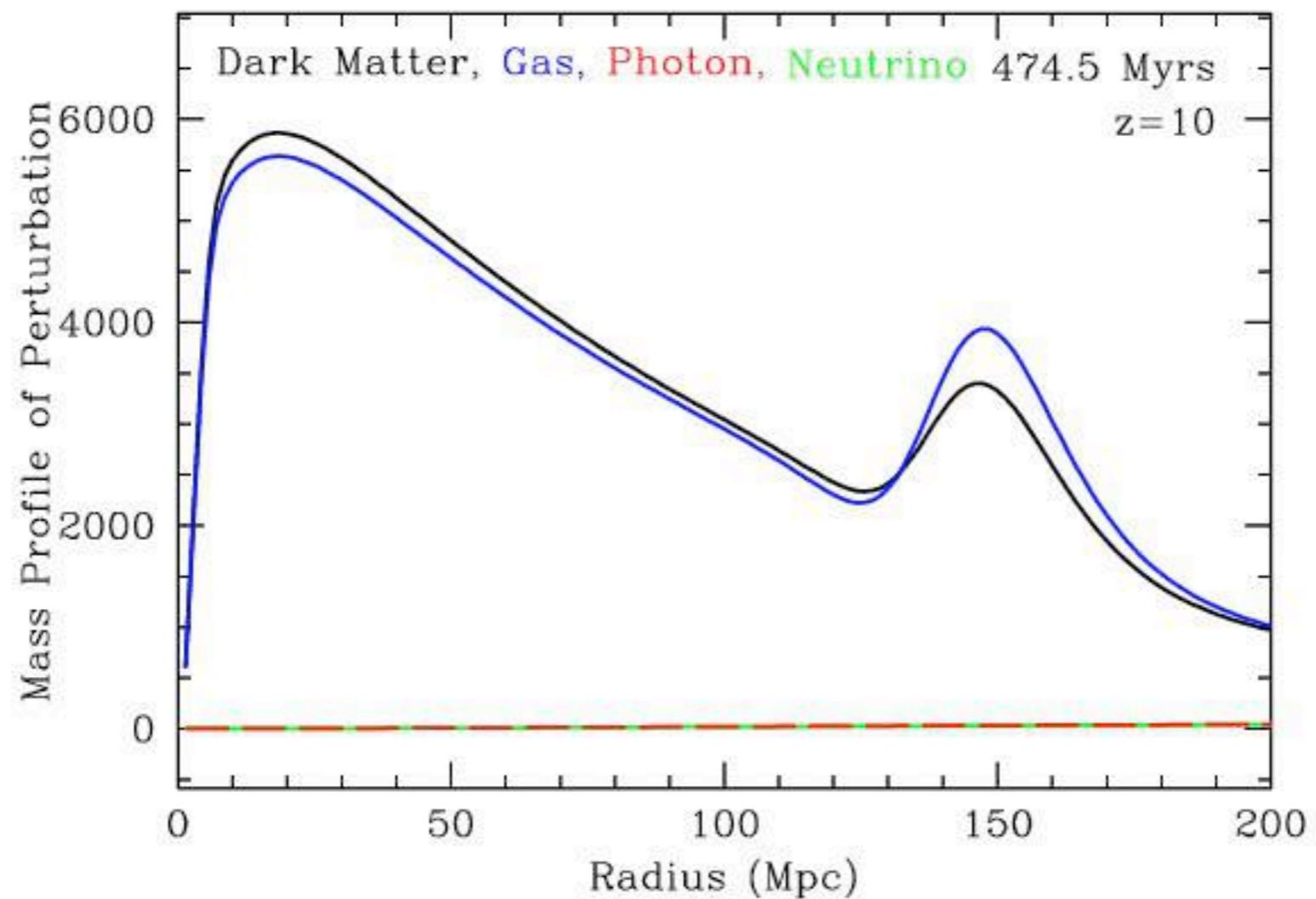
Les photons se sont échappés  
La vitesse du son est nulle : le pic de  
baryons, parvenu à 150 Mpc de la fluctuation  
originale, est gelé.

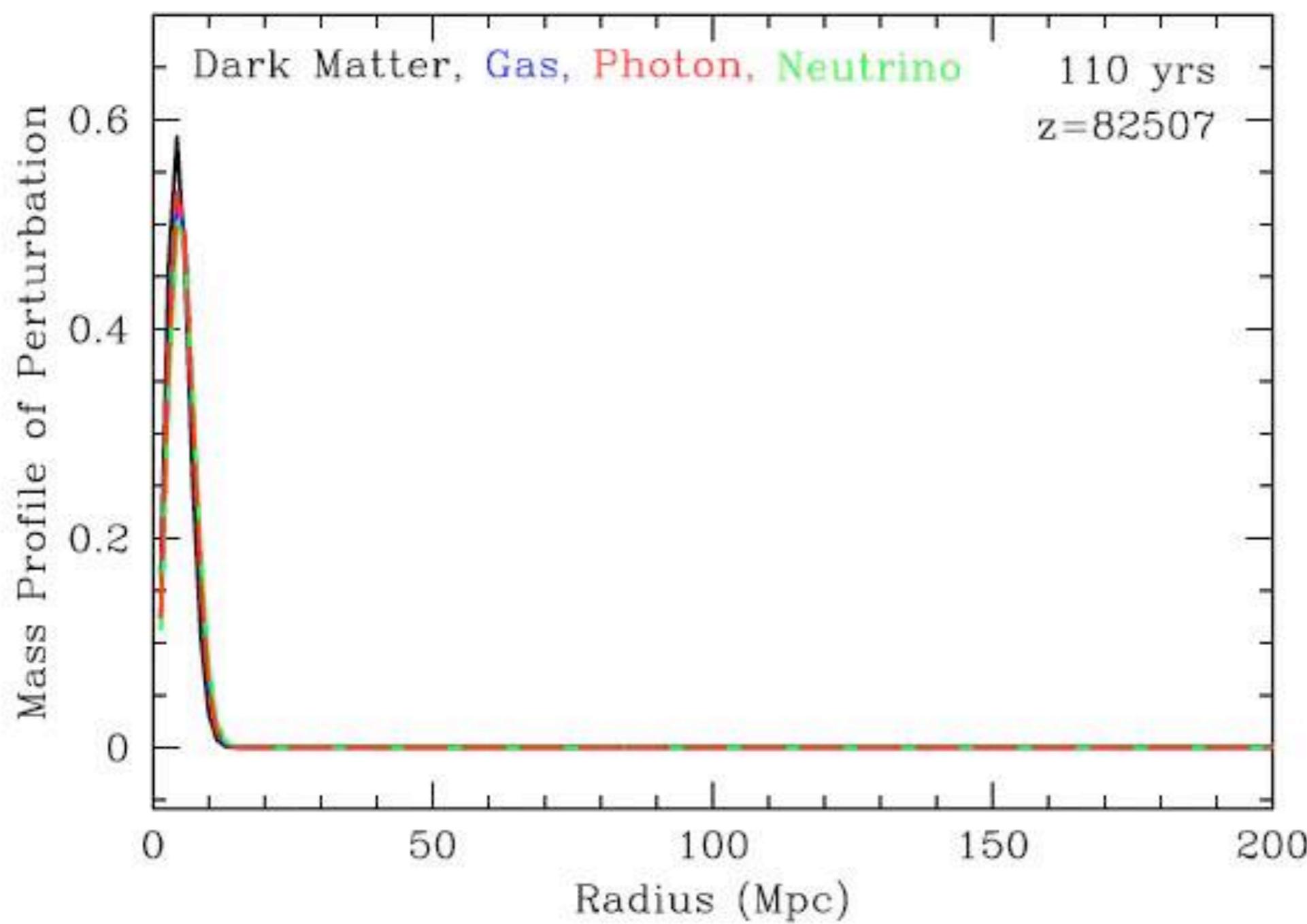


# Matière noire et baryons s'attirent via la gravité



# Maintenant



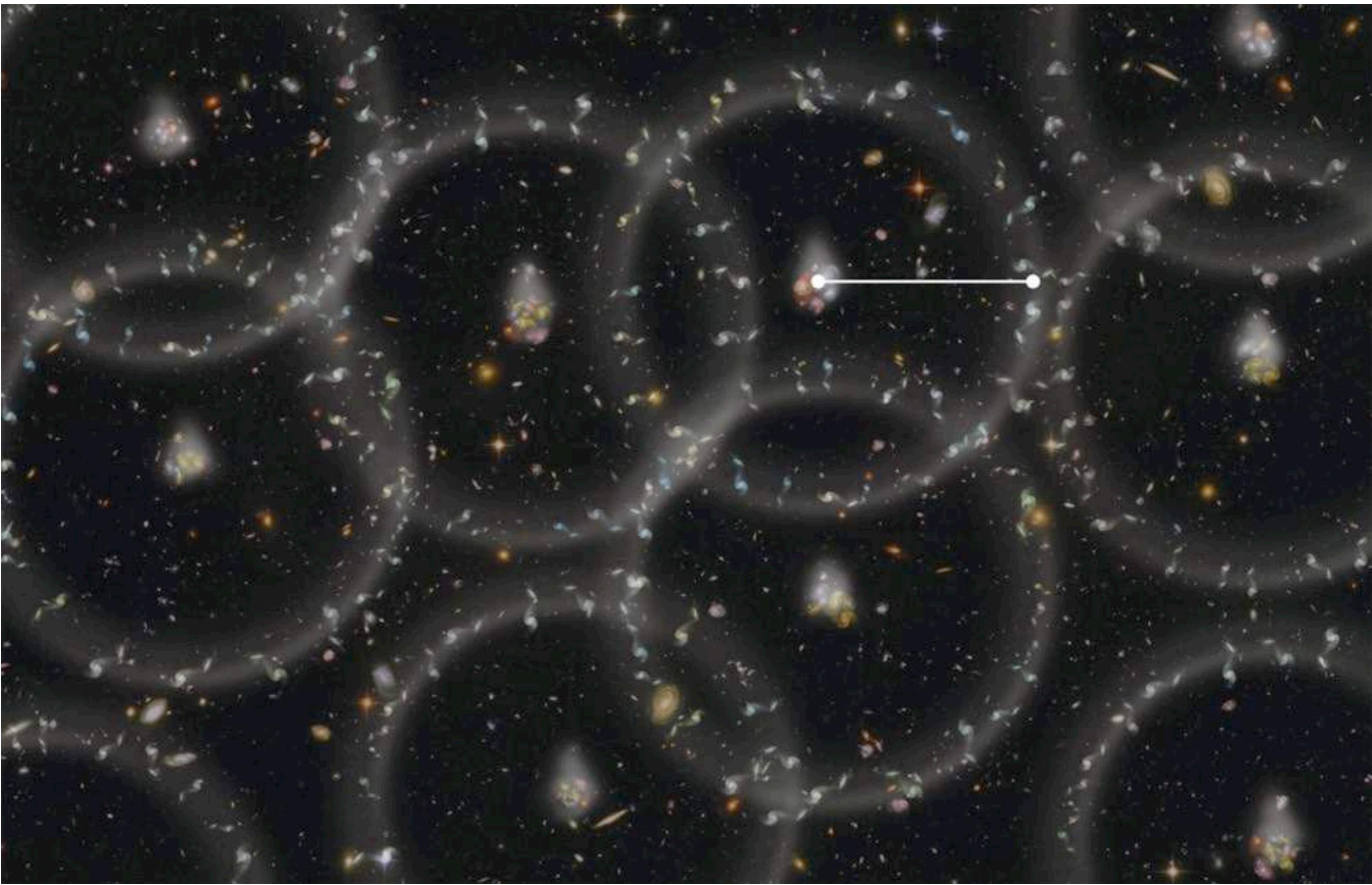


Pour chaque pic de densité des fluctuations primordiales :

- 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).

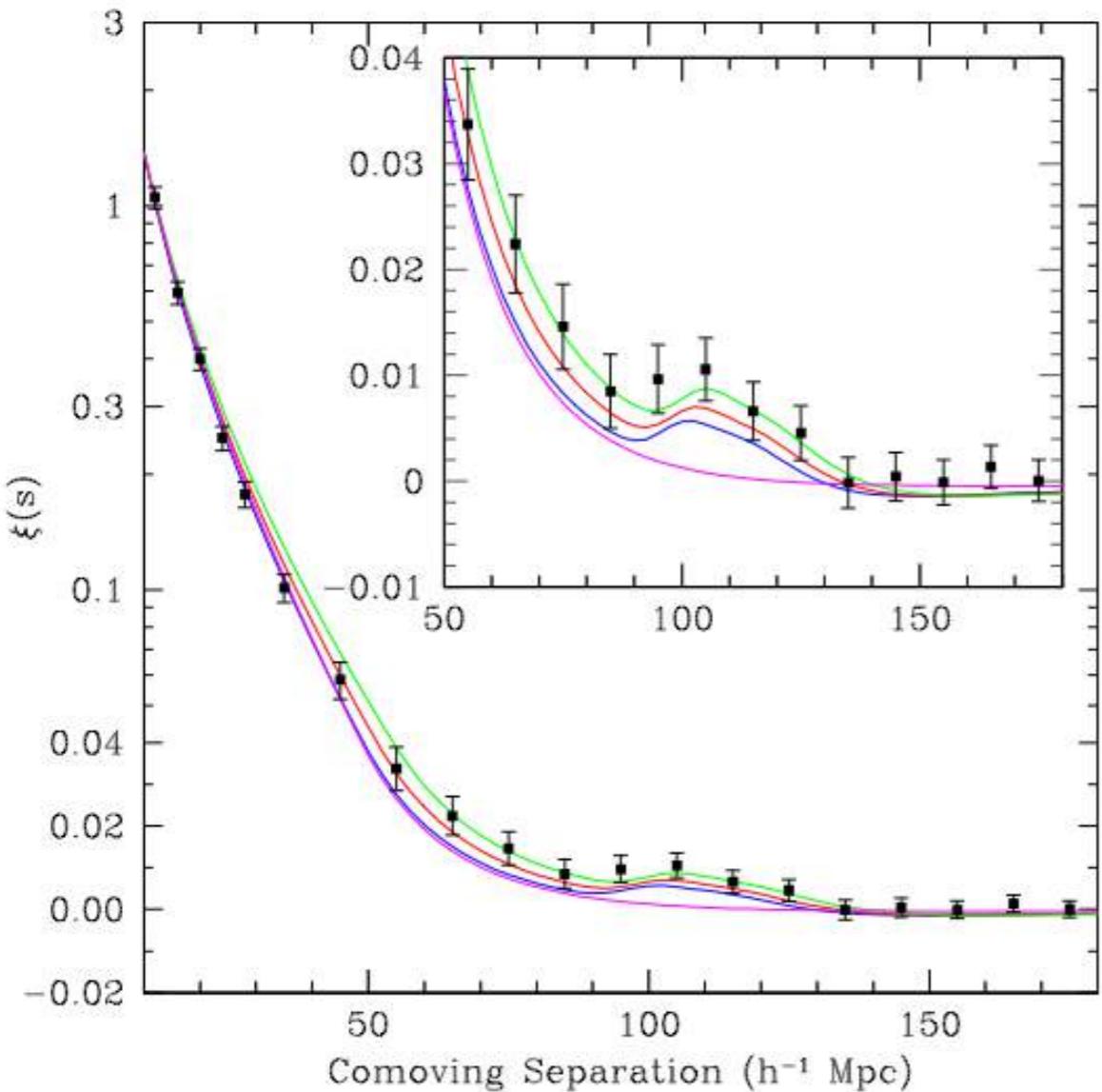
Dans l'univers plus récent, on devrait donc observer un pic dans la fonction de corrélation des fluctuations de matière, à une séparation de 150 Mpc.

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

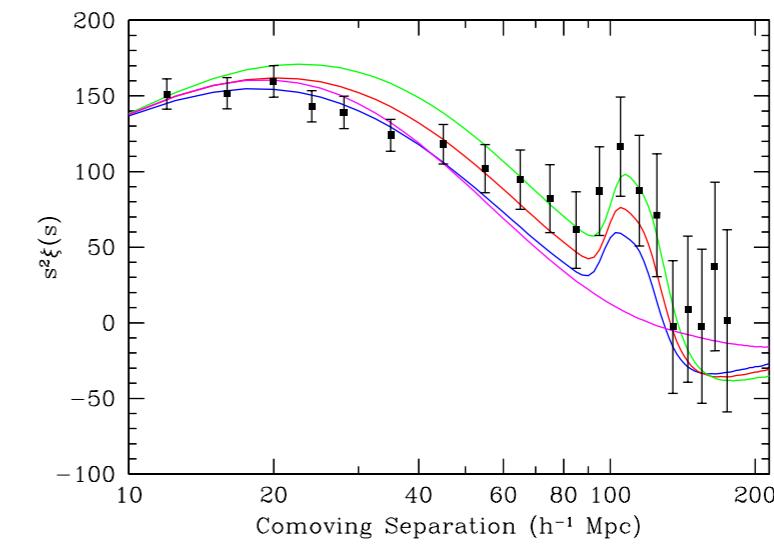
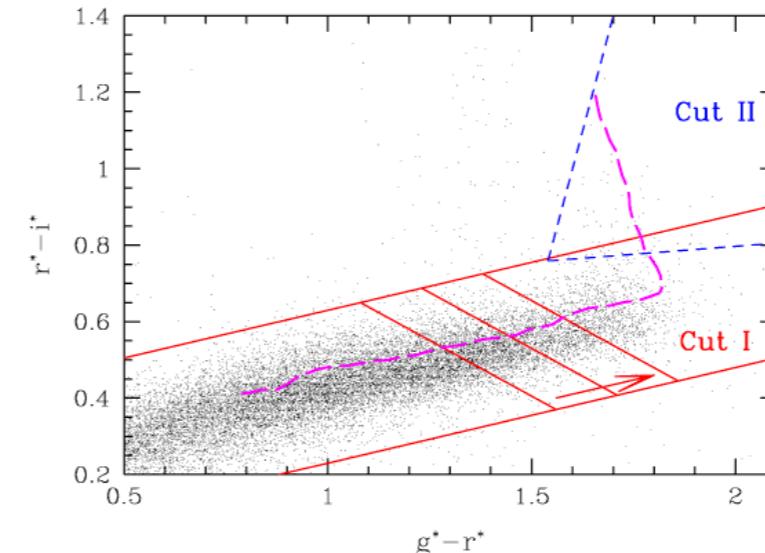
FIG. 2.— The large-scale redshift-space correlation function of the SDSS LRG sample. The error bars are from the diagonal elements of the mock-catalog covariance matrix; however, the points are correlated. Note that the vertical axis mixes logarithmic and linear scalings. The inset shows an expanded 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

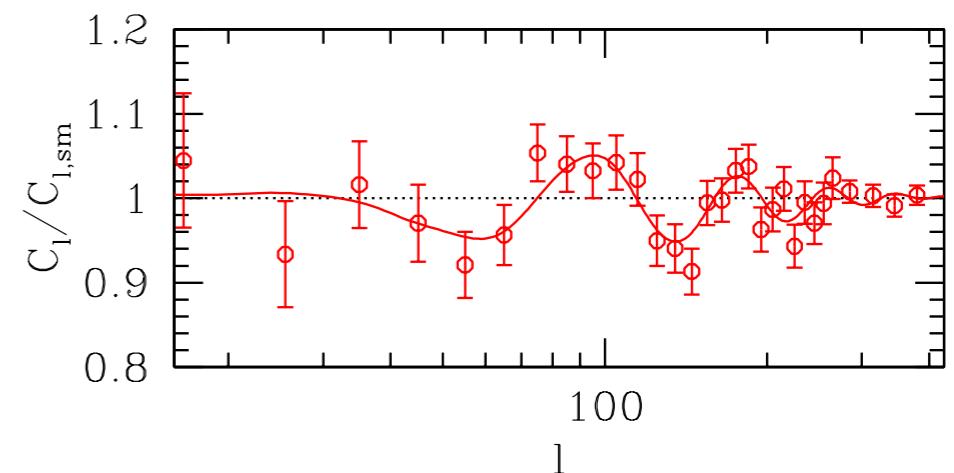
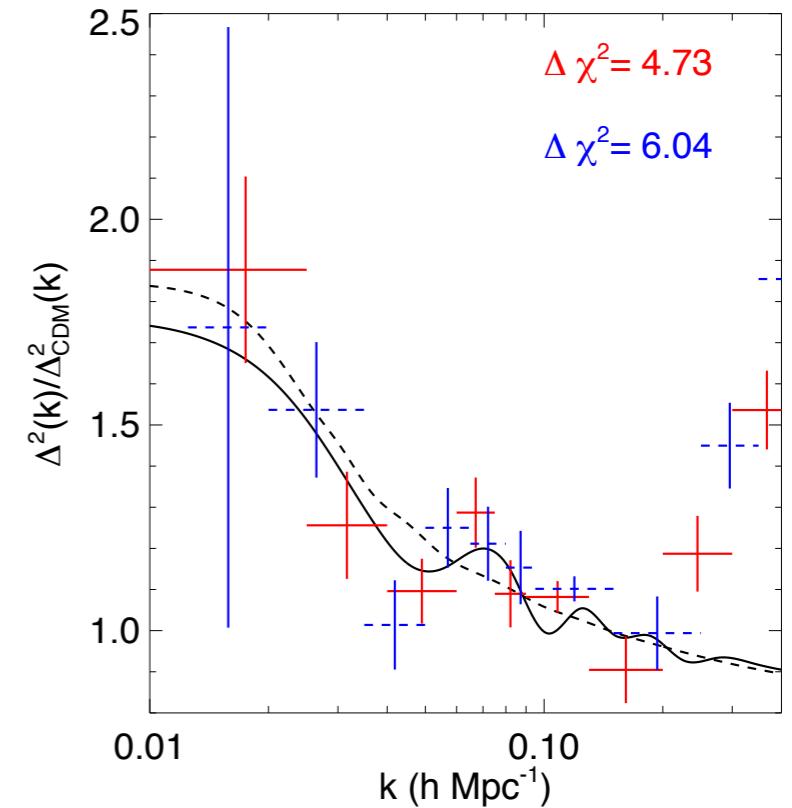
Les BAO peuvent être trouvées dans des catalogues utilisant des redshifts photométriques (photo-z), moins précis, mais plus économes en temps de télescope.

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

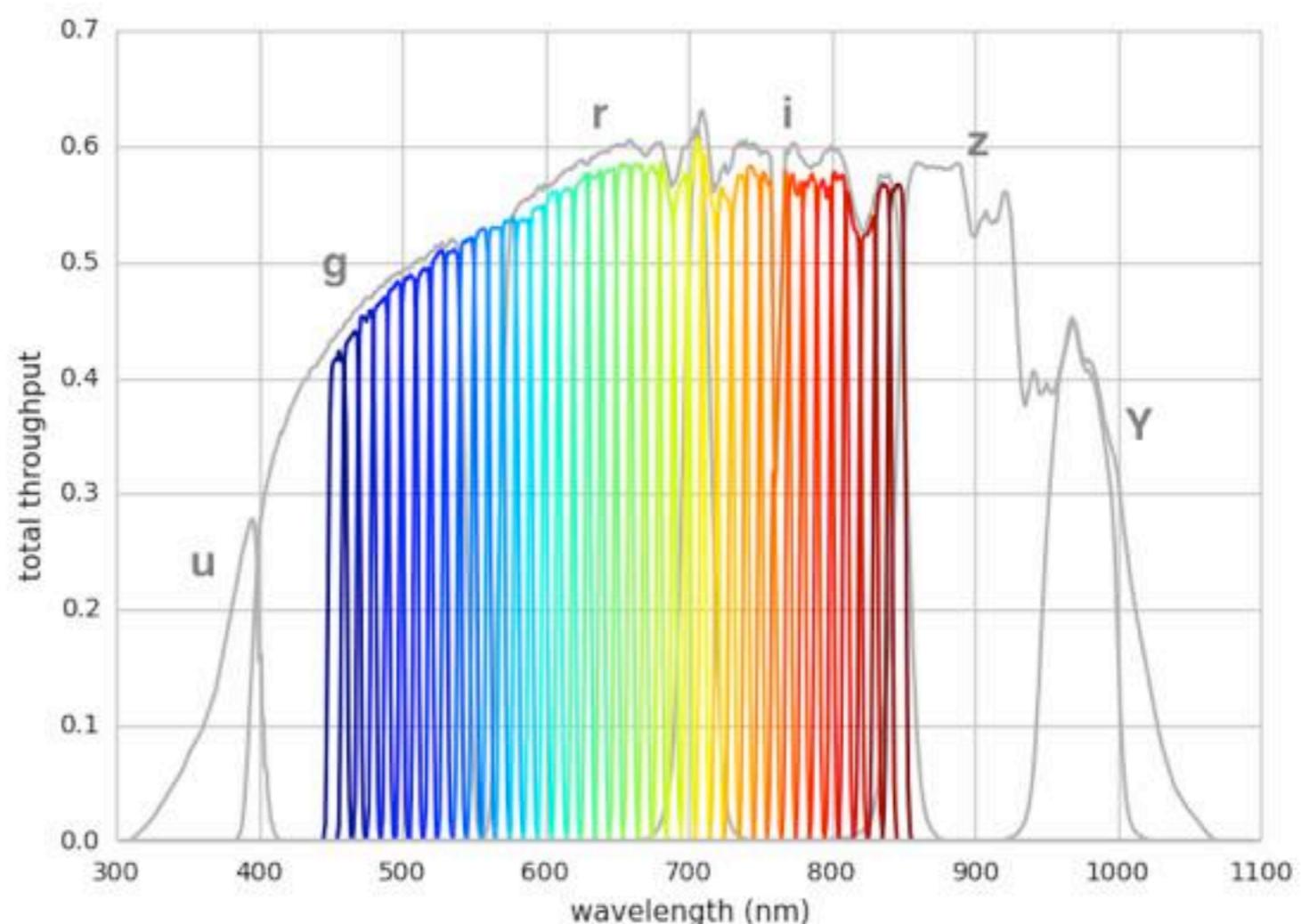
cf. DES (en cours), LSST



# BAO photométriques

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

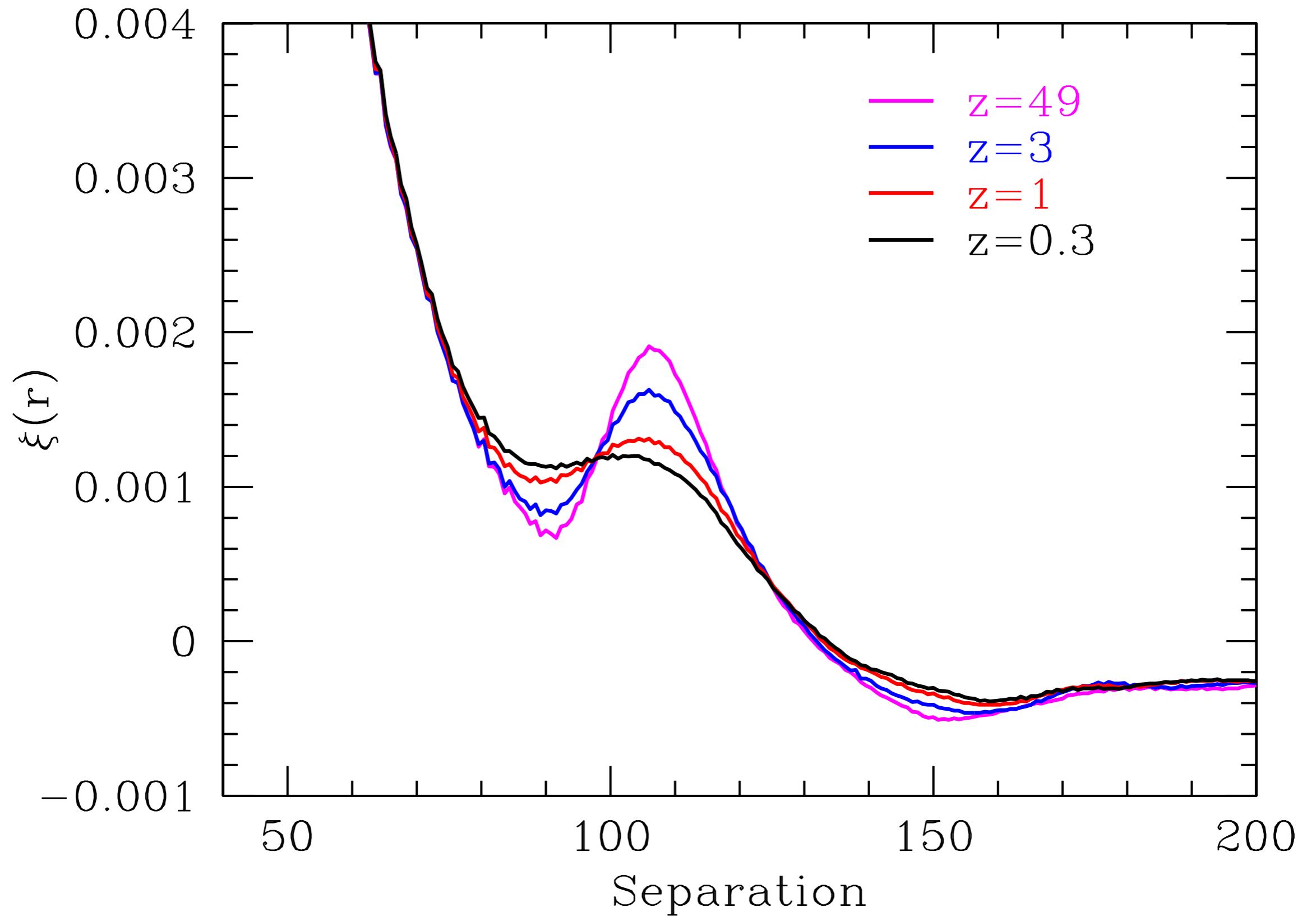
---

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

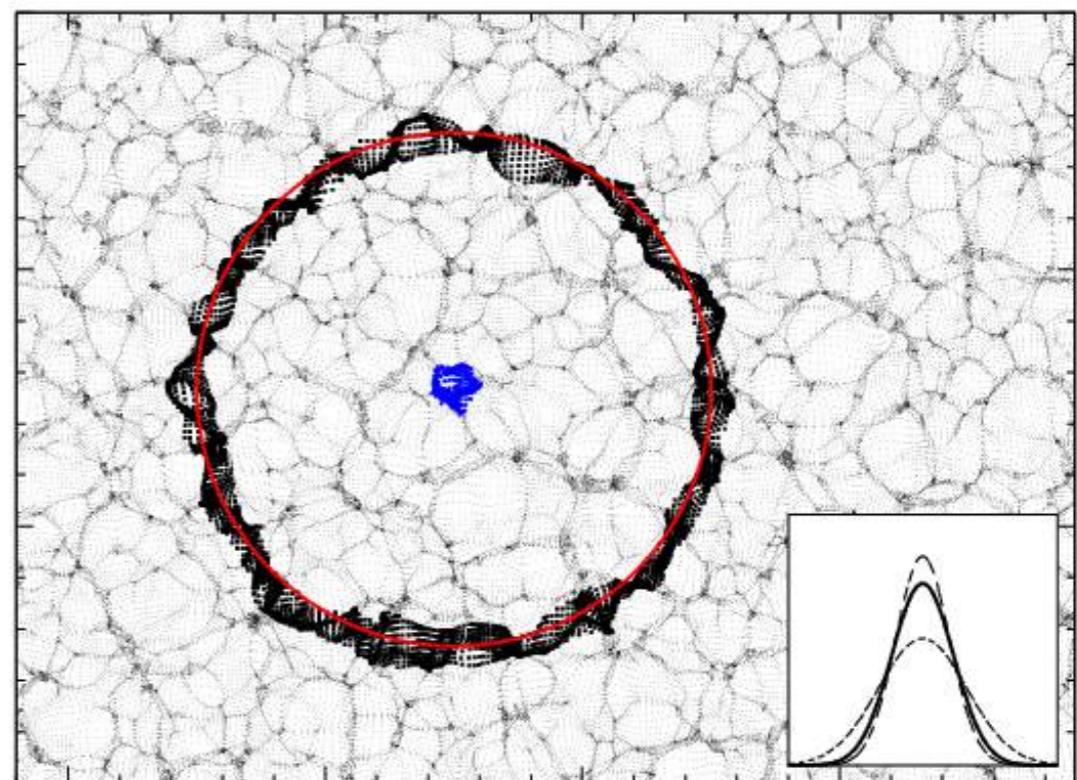
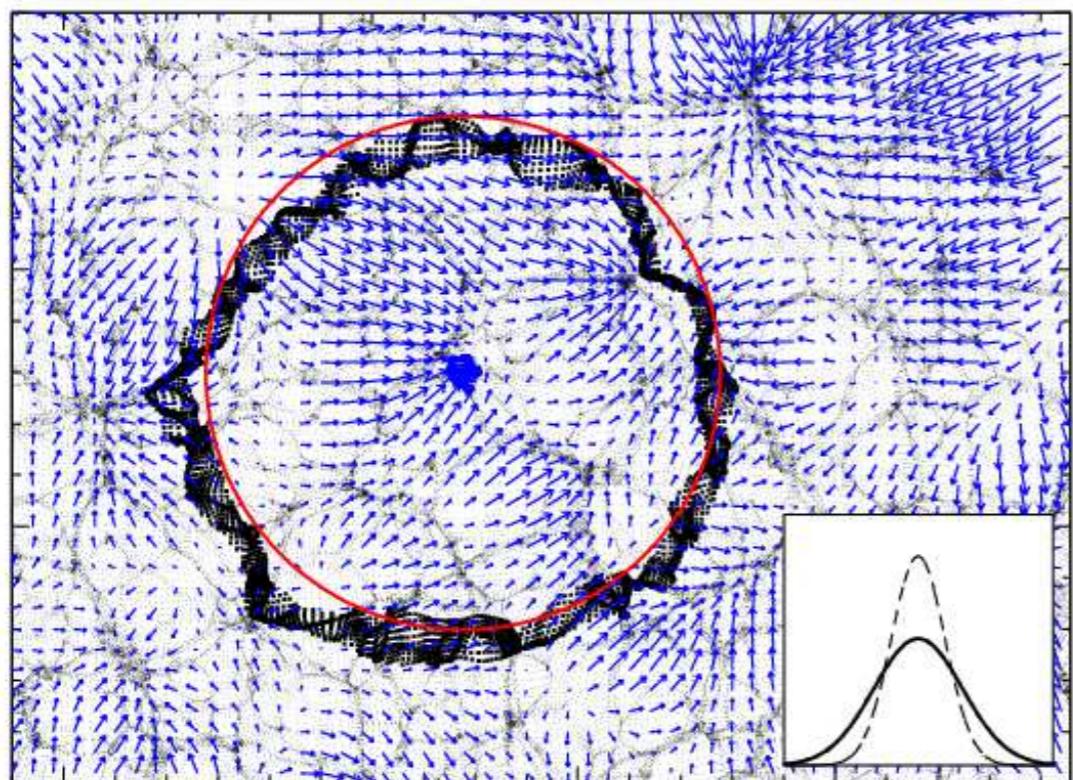
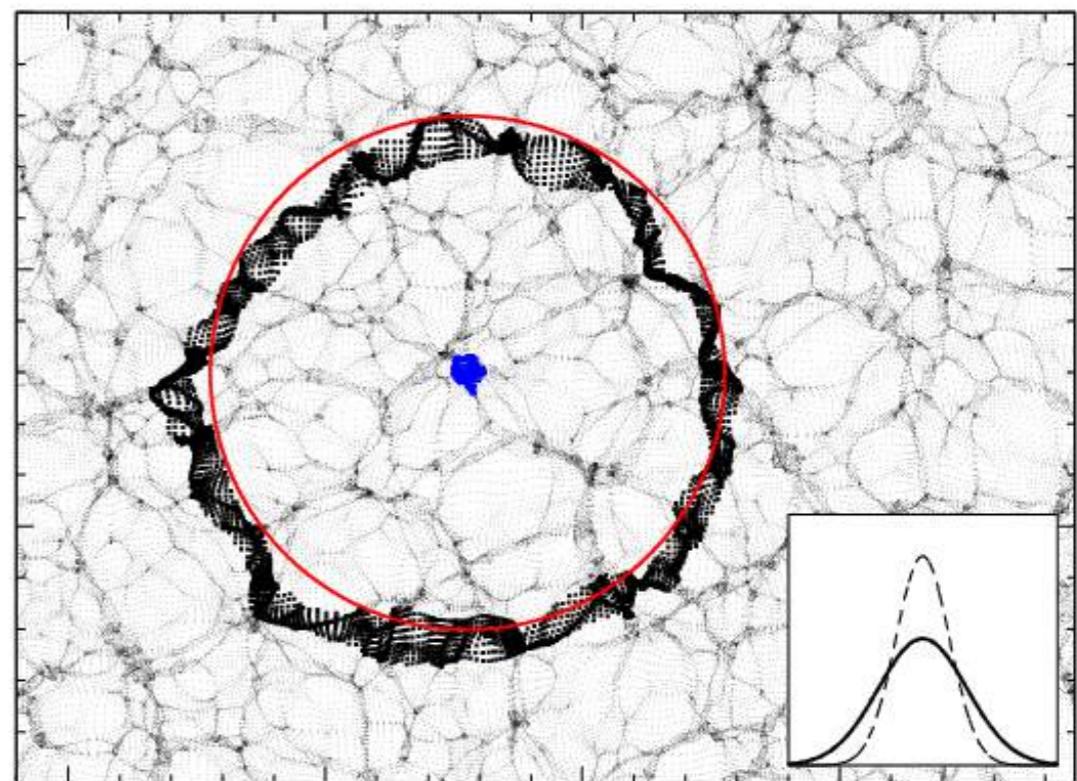
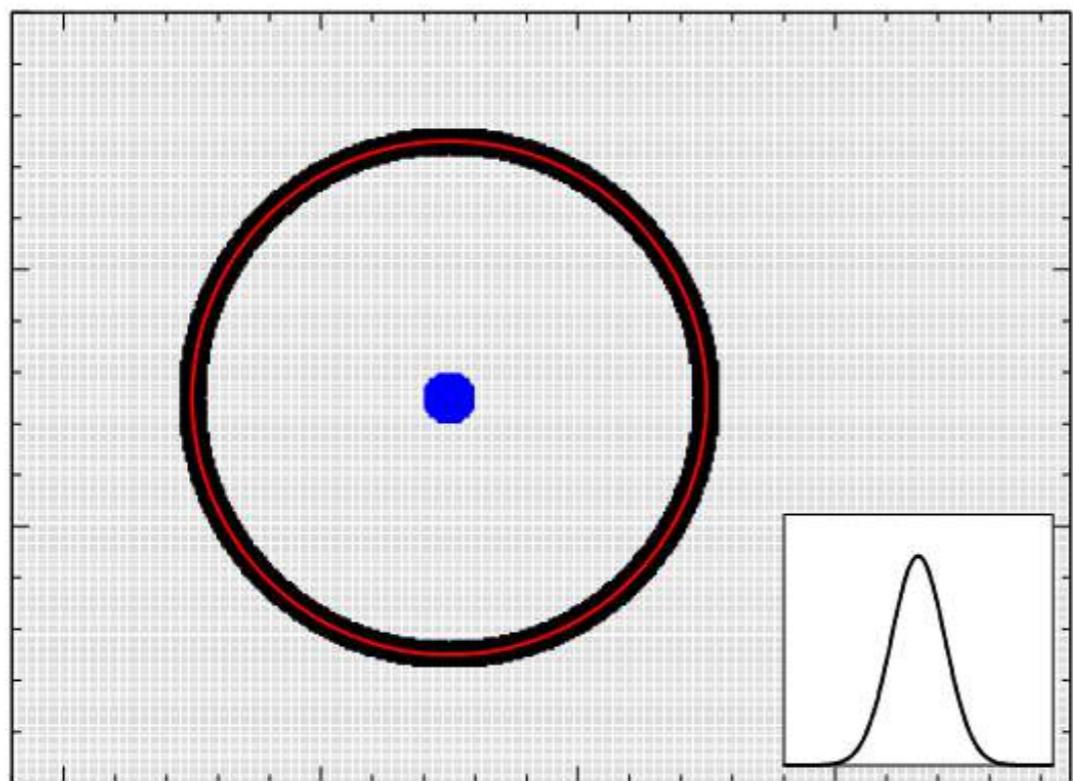
Ils estompent le pic, ce qui diminue la précision de mesure.

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

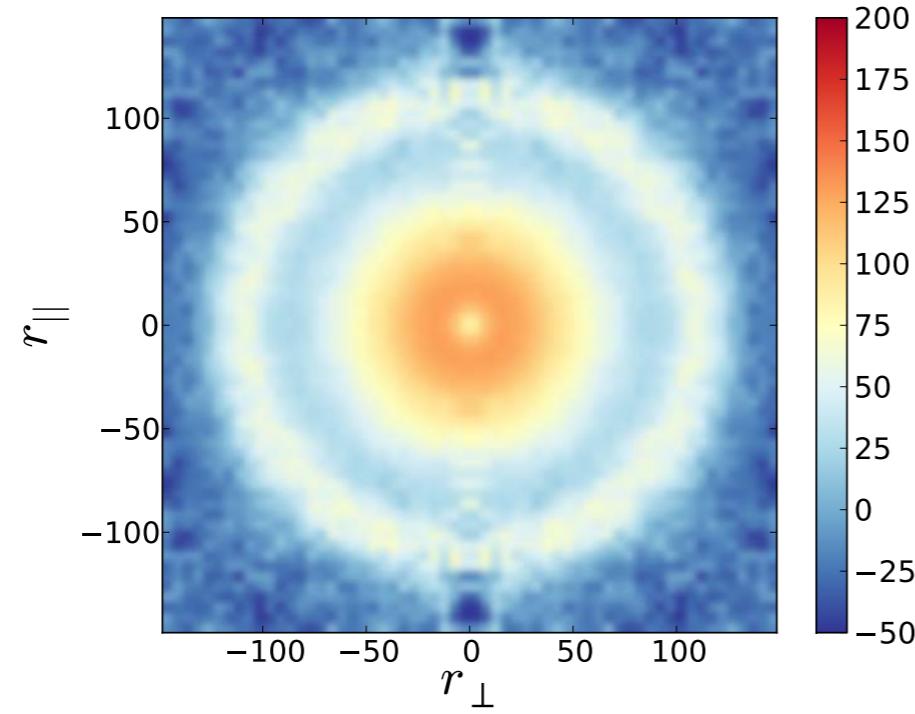
Il faut reconstruire le champ de vitesse (dans le régime linéaire) à partir de la carte des fluctuations de matière, puis « remonter le temps » en modifiant la position des galaxies mesurées.



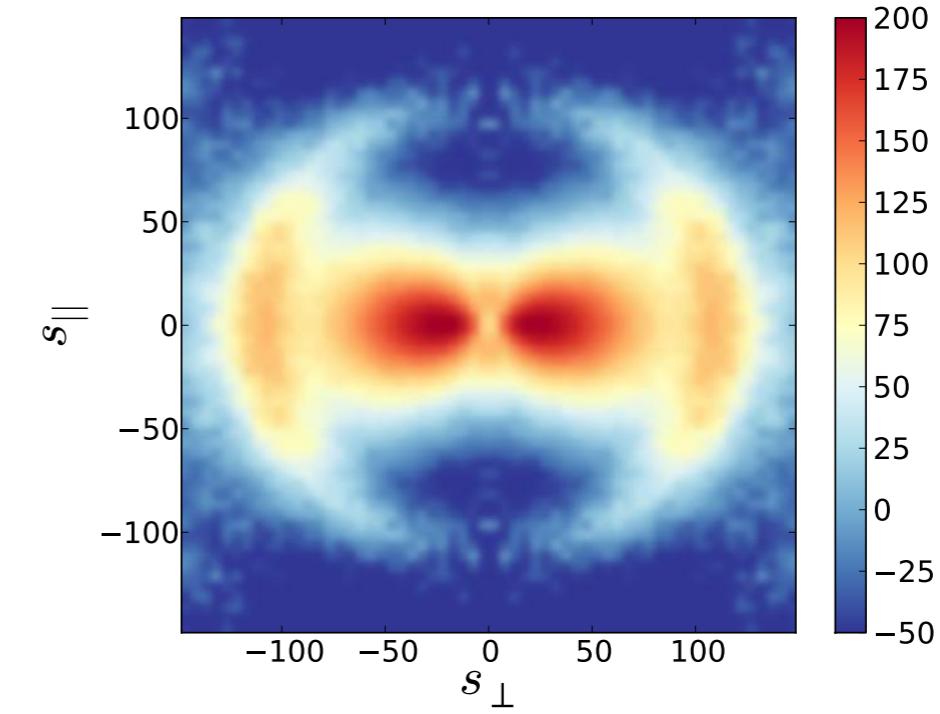
Effect of non-linear clustering, from Weinberg et al. 2012



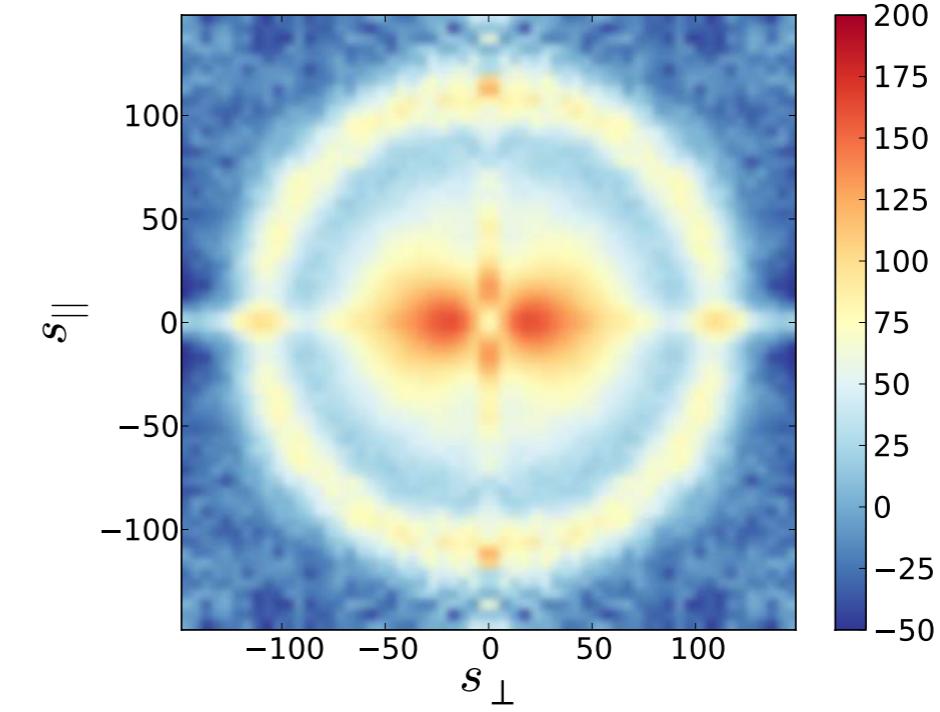
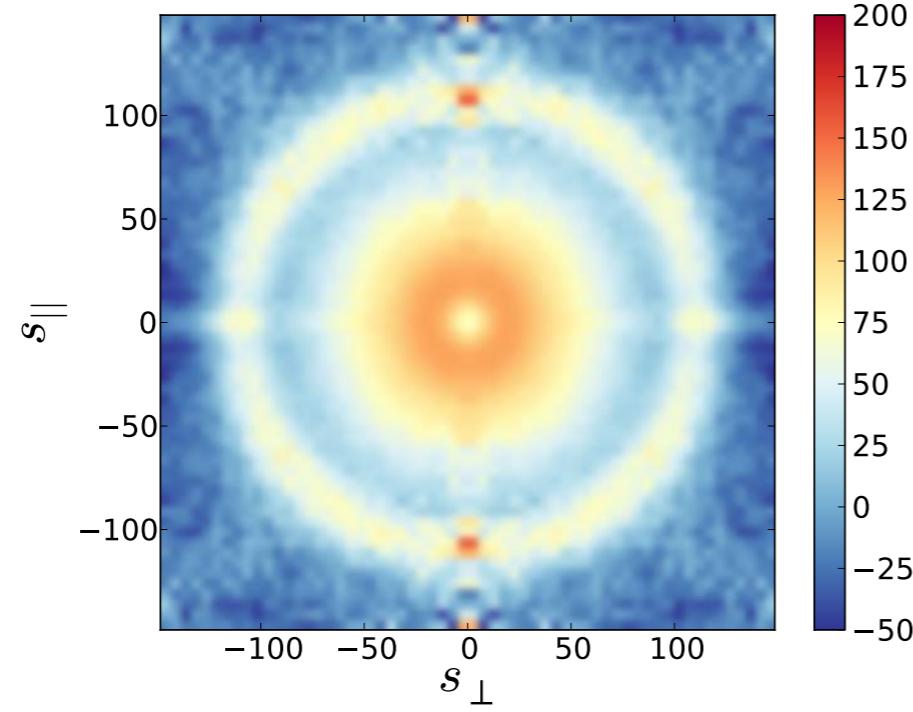
**real space**

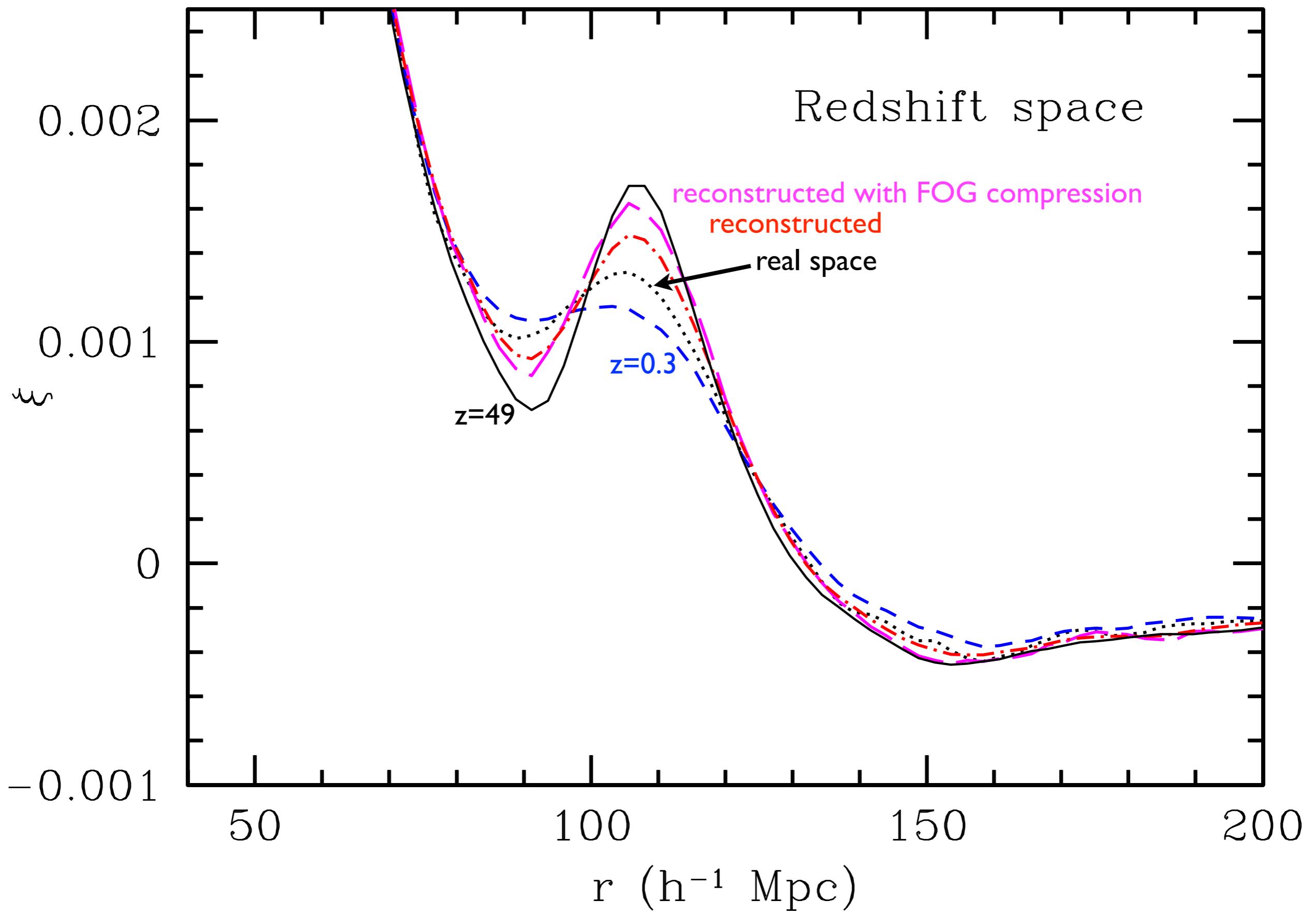


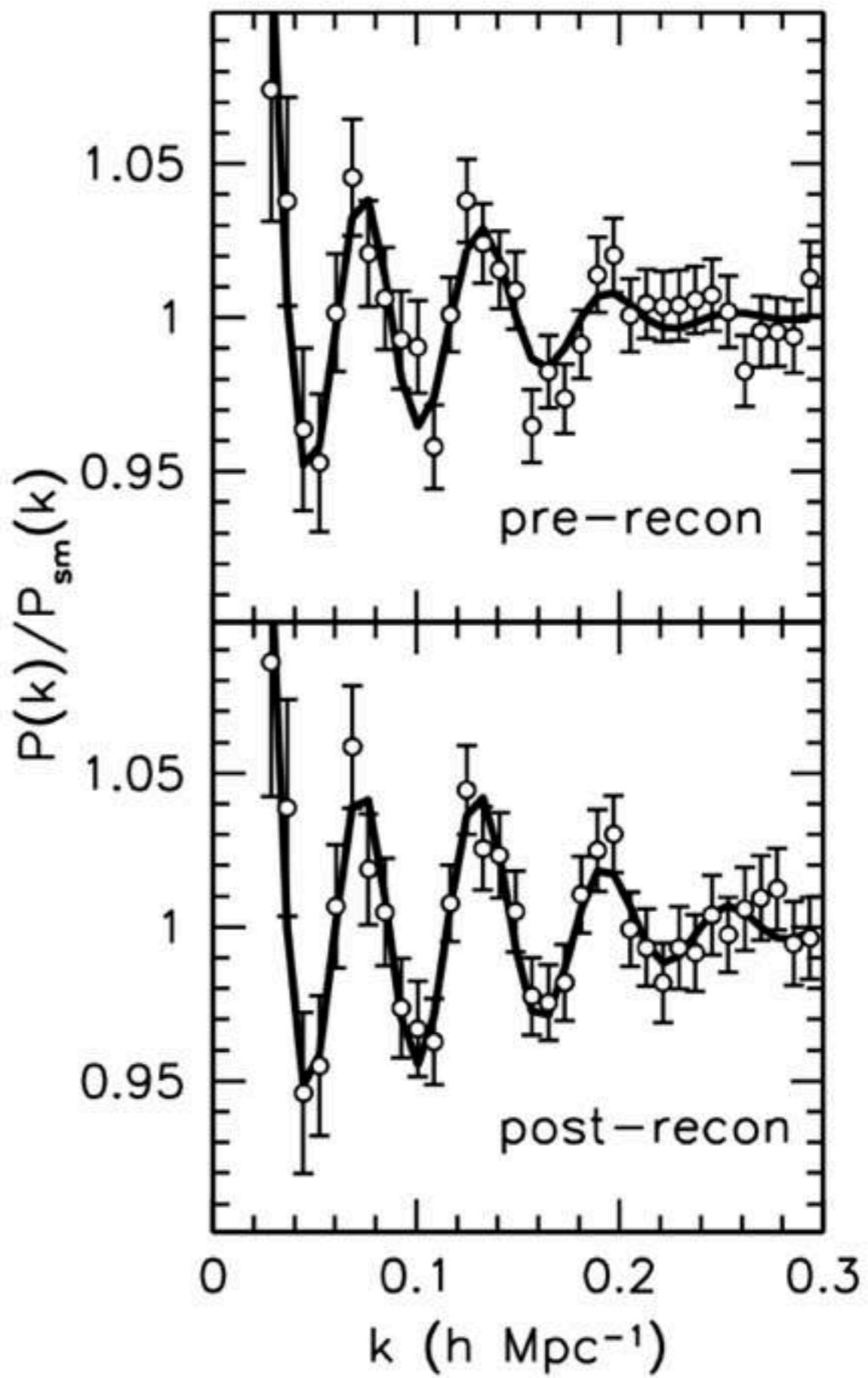
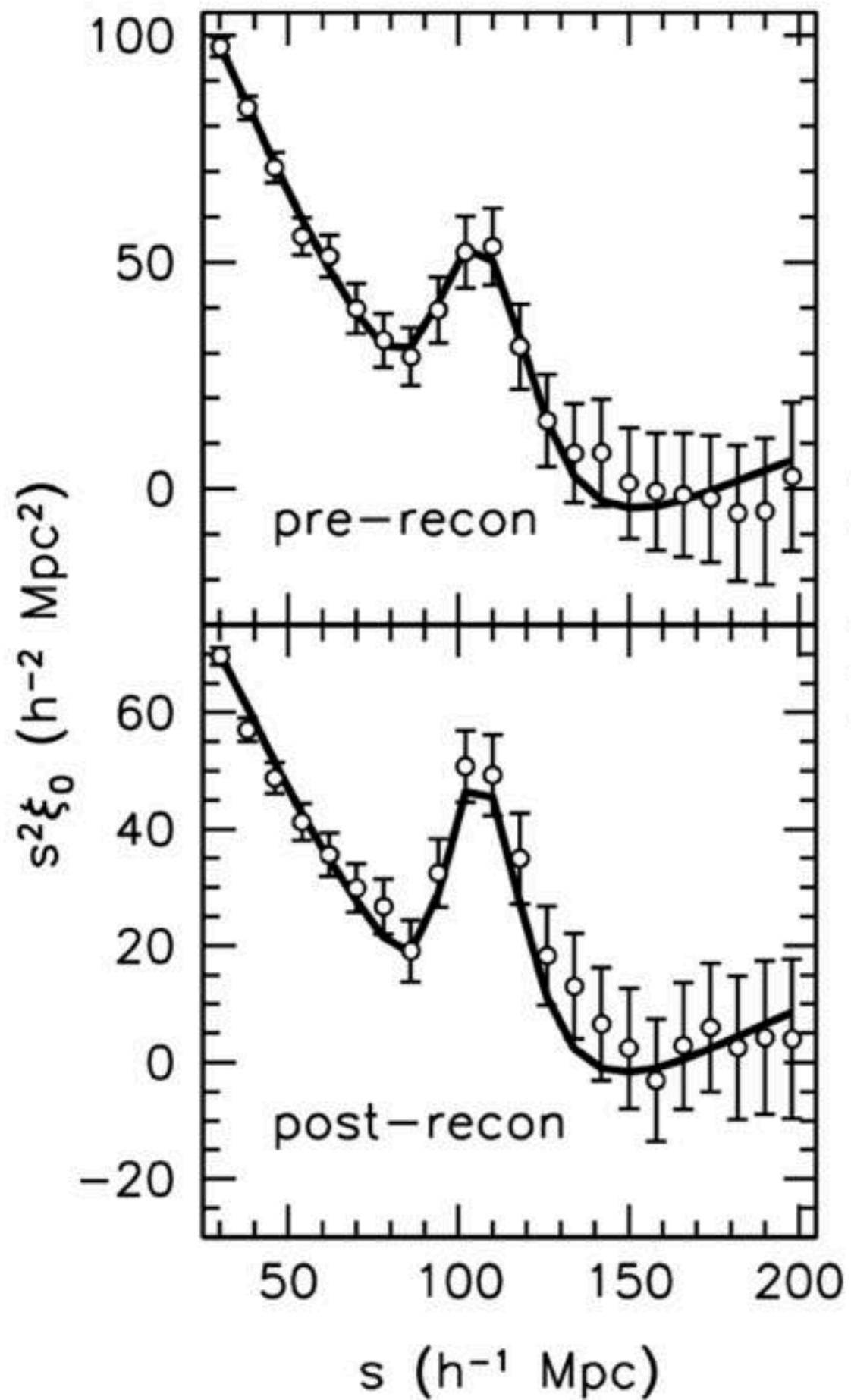
**redshift space**



**after  
reco**







# Analyses anisotropes

Le pic BAO se manifeste à la fois le long de la ligne de visée (rélié 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.

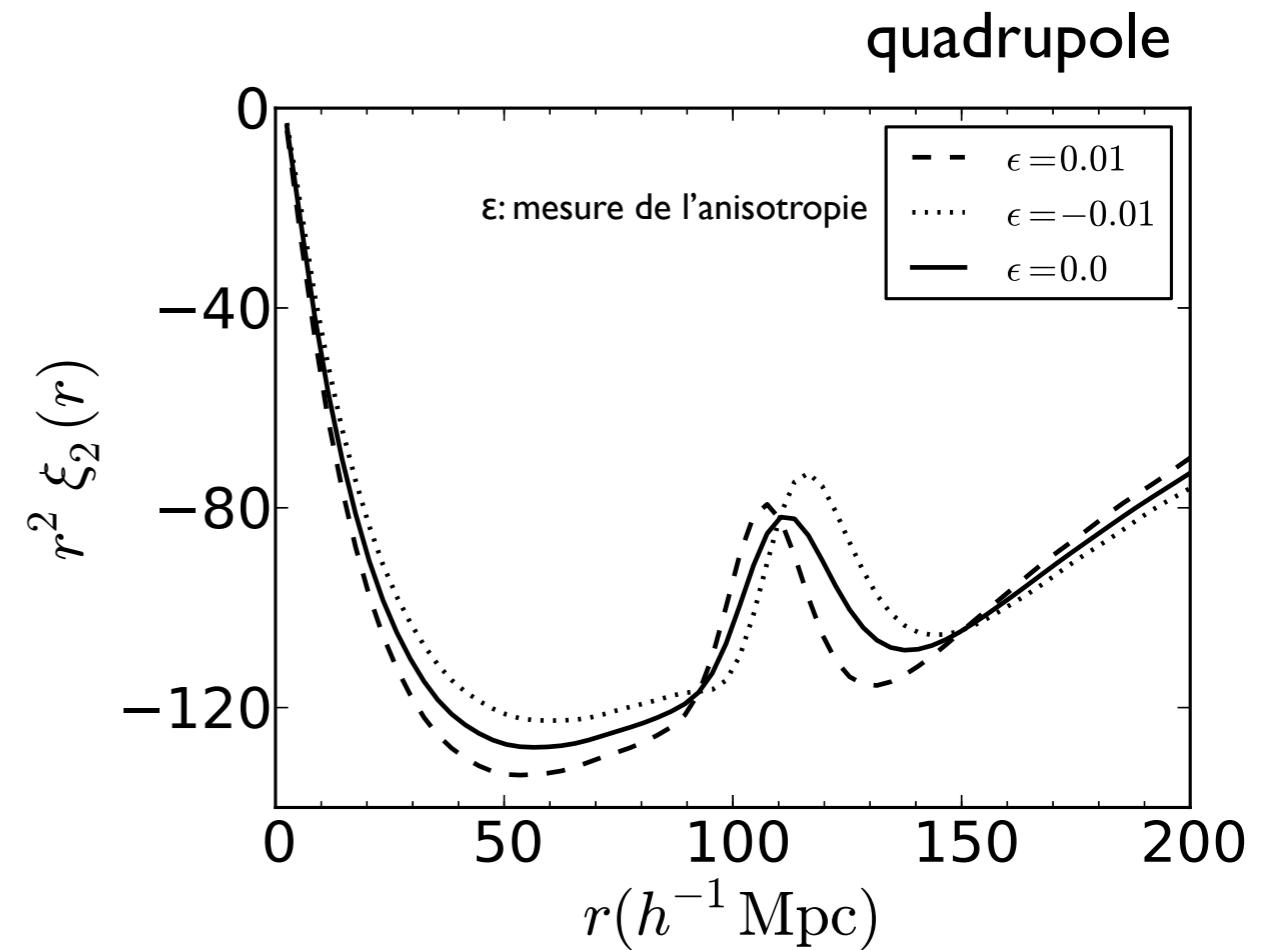
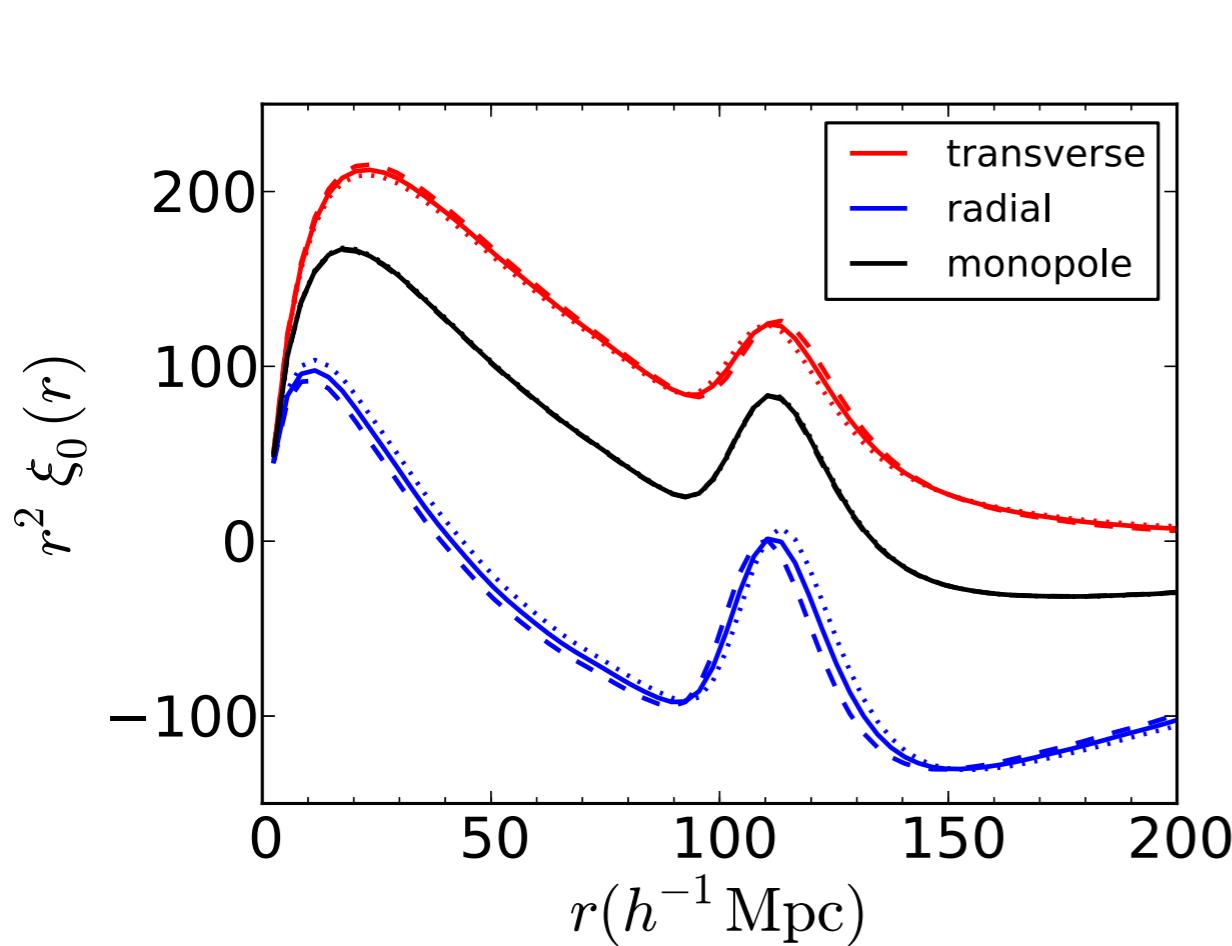
Il est nécessaire de prendre en compte l'effet Kaiser (distortions de redshift, RSD).

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

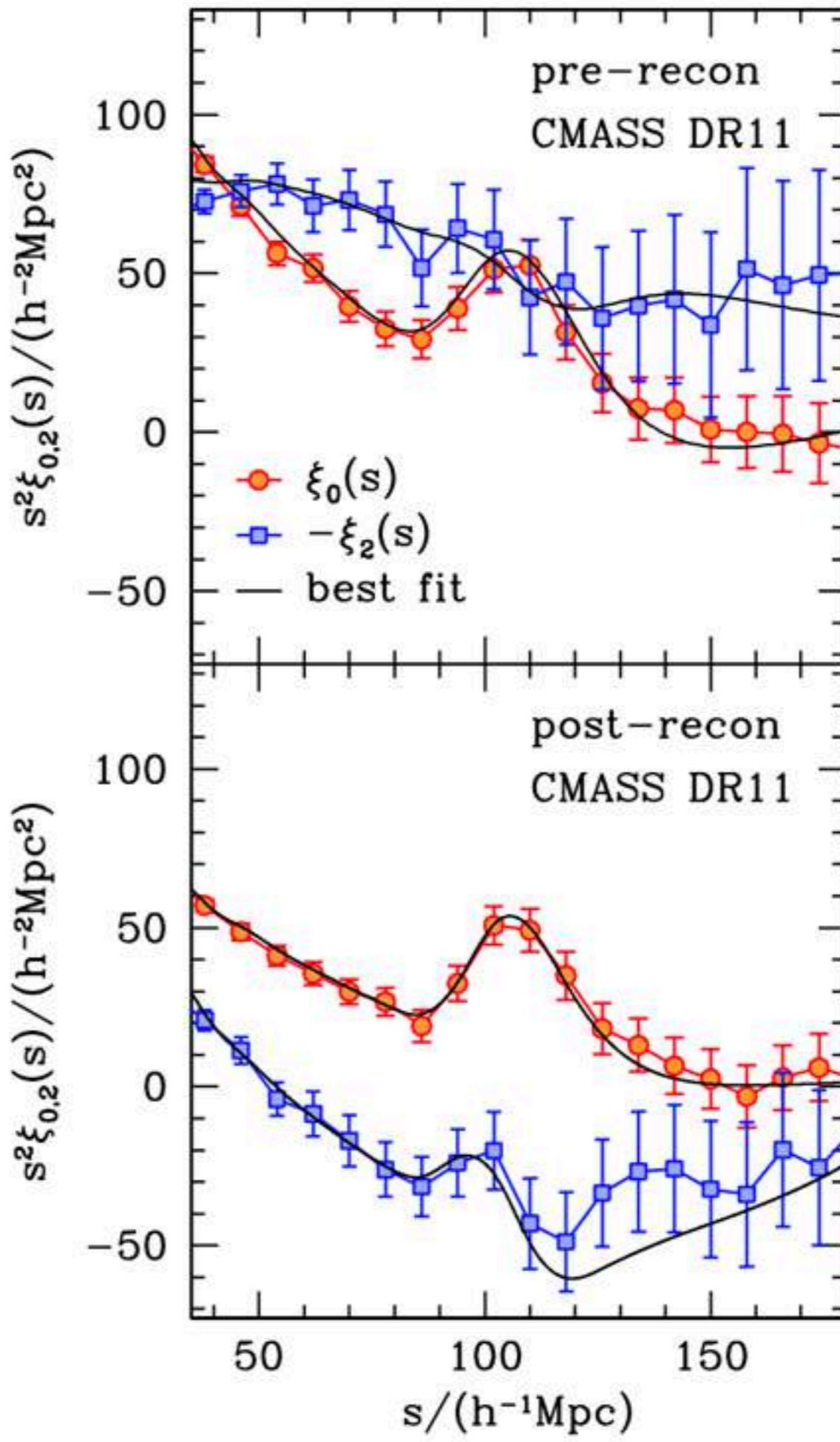
On peut décomposer le signal en multipoles.

Symétrie : ordres impairs sont nuls.

Deux premiers termes : monopole et quadrupole.



Monopole et  
quadrupole,  
Andersen et al. 2014



# Effets systématiques

---

Erreurs d'étalonnage photométrique : peut agir sur la fonction de sélection et biaiser la fonction de corrélation. Problème bien identifié, sous contrôle, et qui agirait surtout sur de plus grandes échelles.

Distorsions de redshift : effets bien connus, comme l'effet Kaiser, les “fingers of God”;

Effets non linéaires : pris en compte par la reconstruction.

Le signal BAO est très propre, sans effets systématiques non maîtrisés.

# 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.

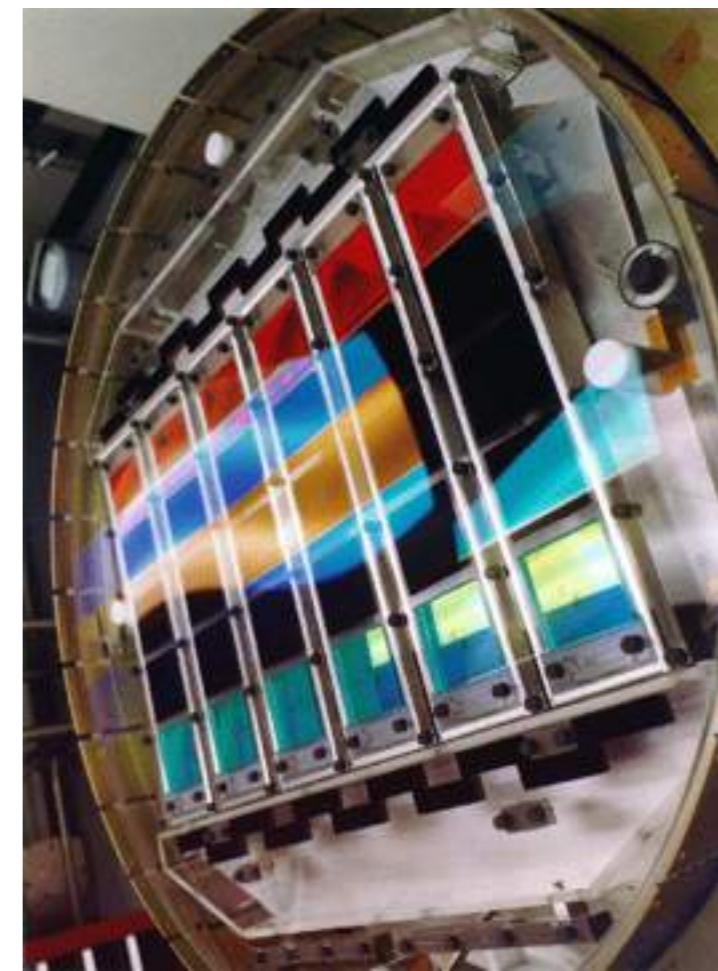
Les BAO sont limitées par la statistique disponible, une fois données une combinaison de traceurs et de gamme de redshift.

# 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

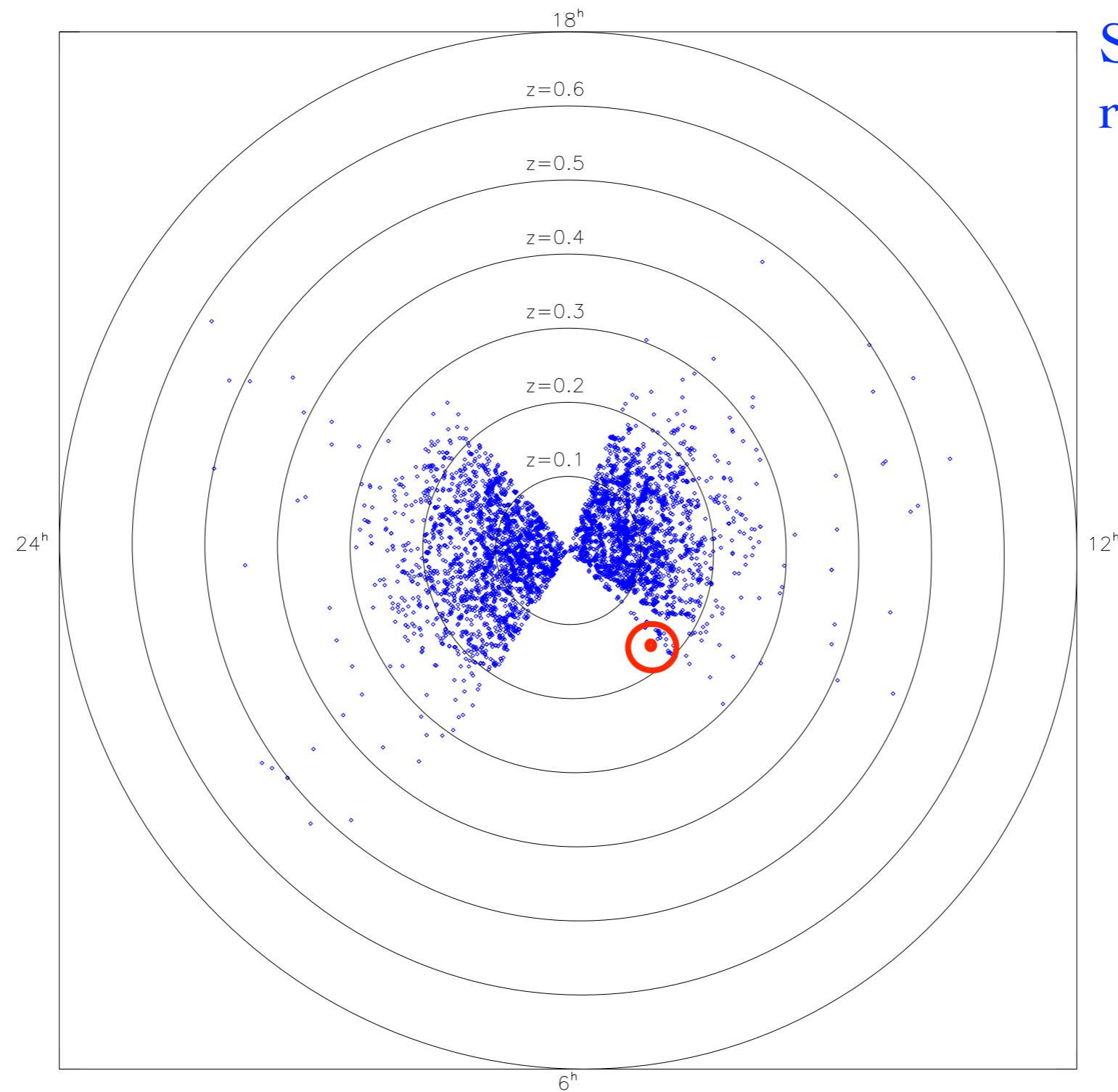
---

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

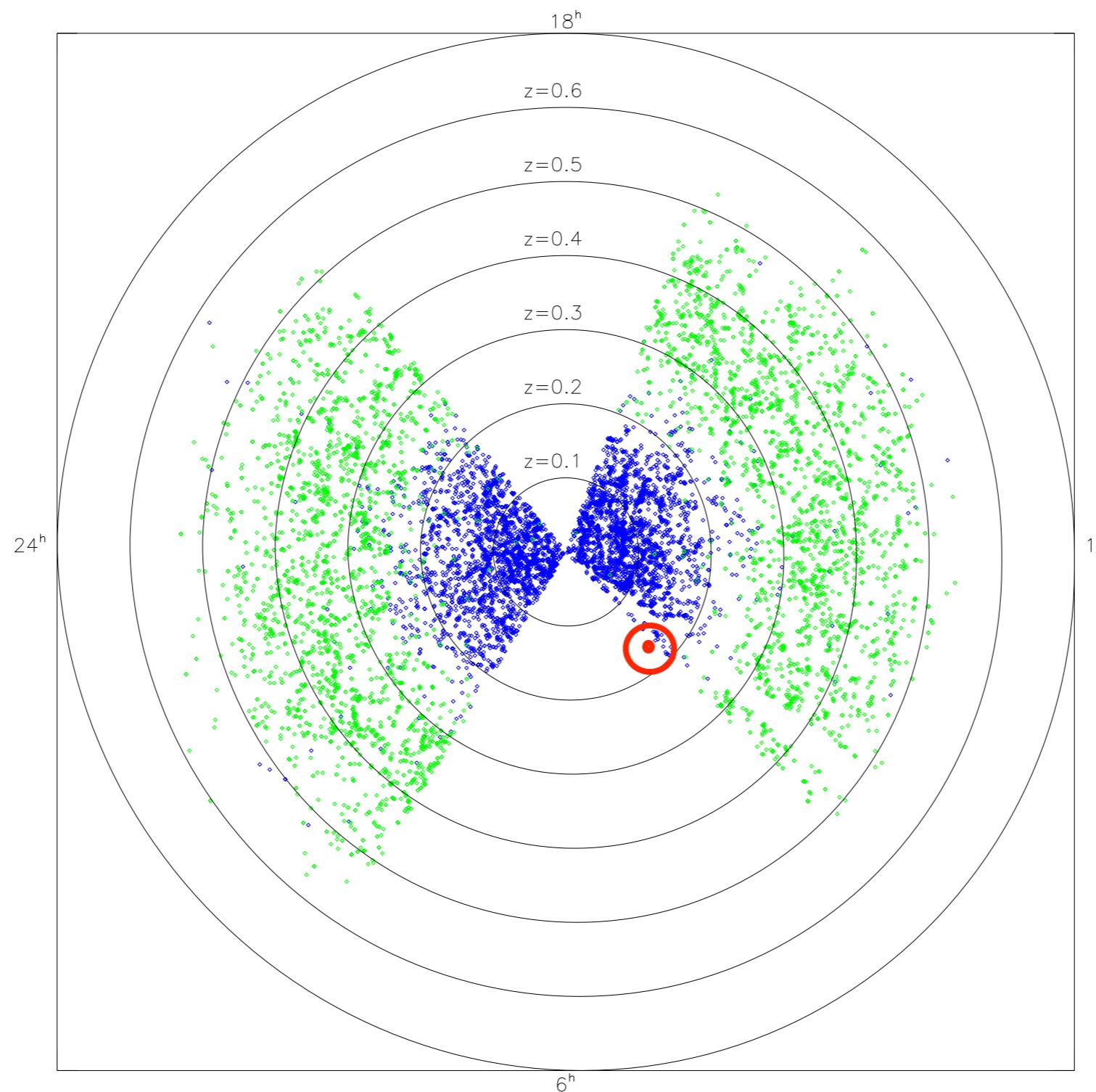
BOSS (baryon oscillations spectroscopy survey) est un  
relevé dédié à l'étude des BAO

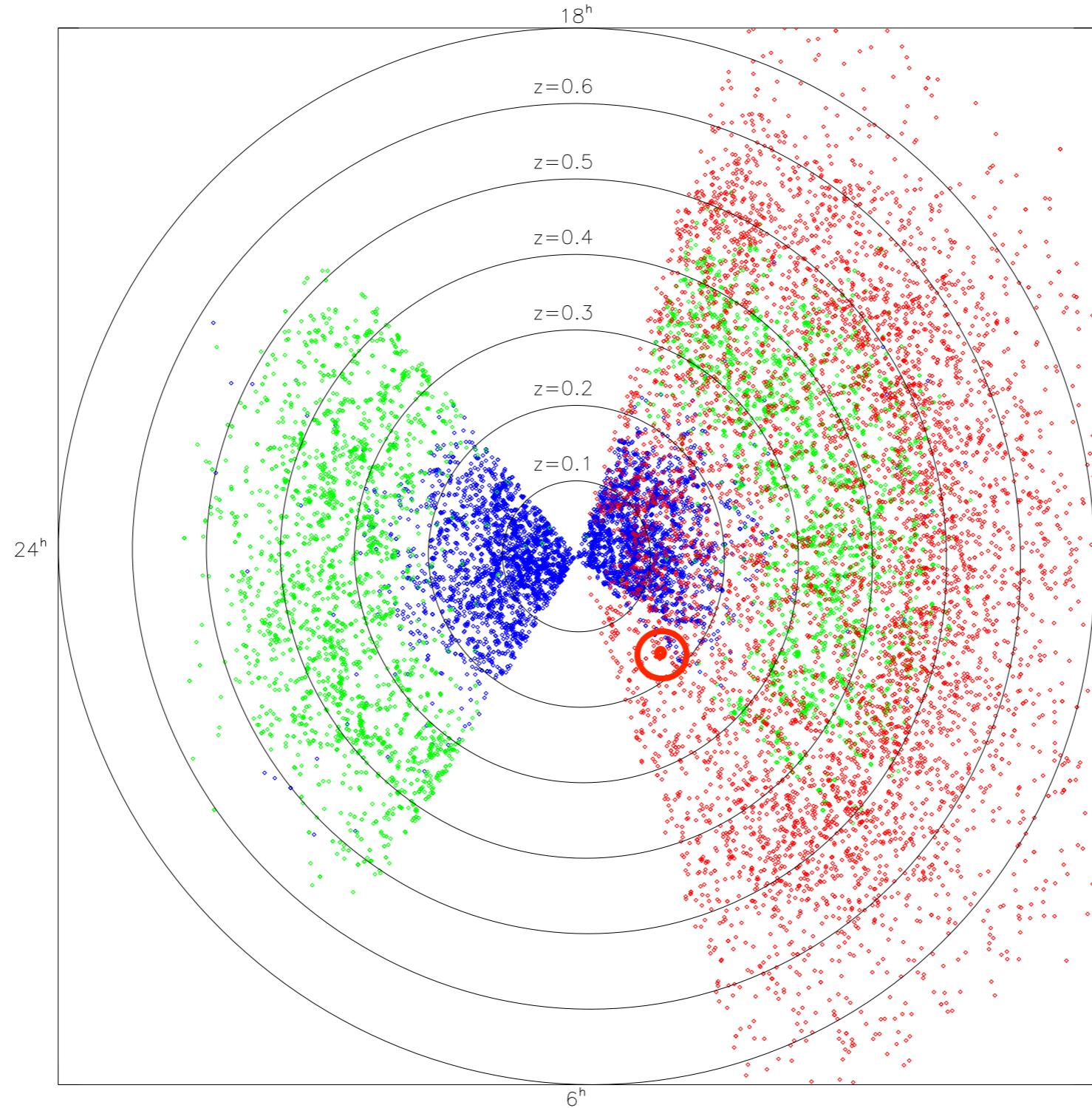
- dans un échantillon plus vaste de galaxies
- dans la forêt Lyman alpha des quasars

SDSS,  
relevé principal



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

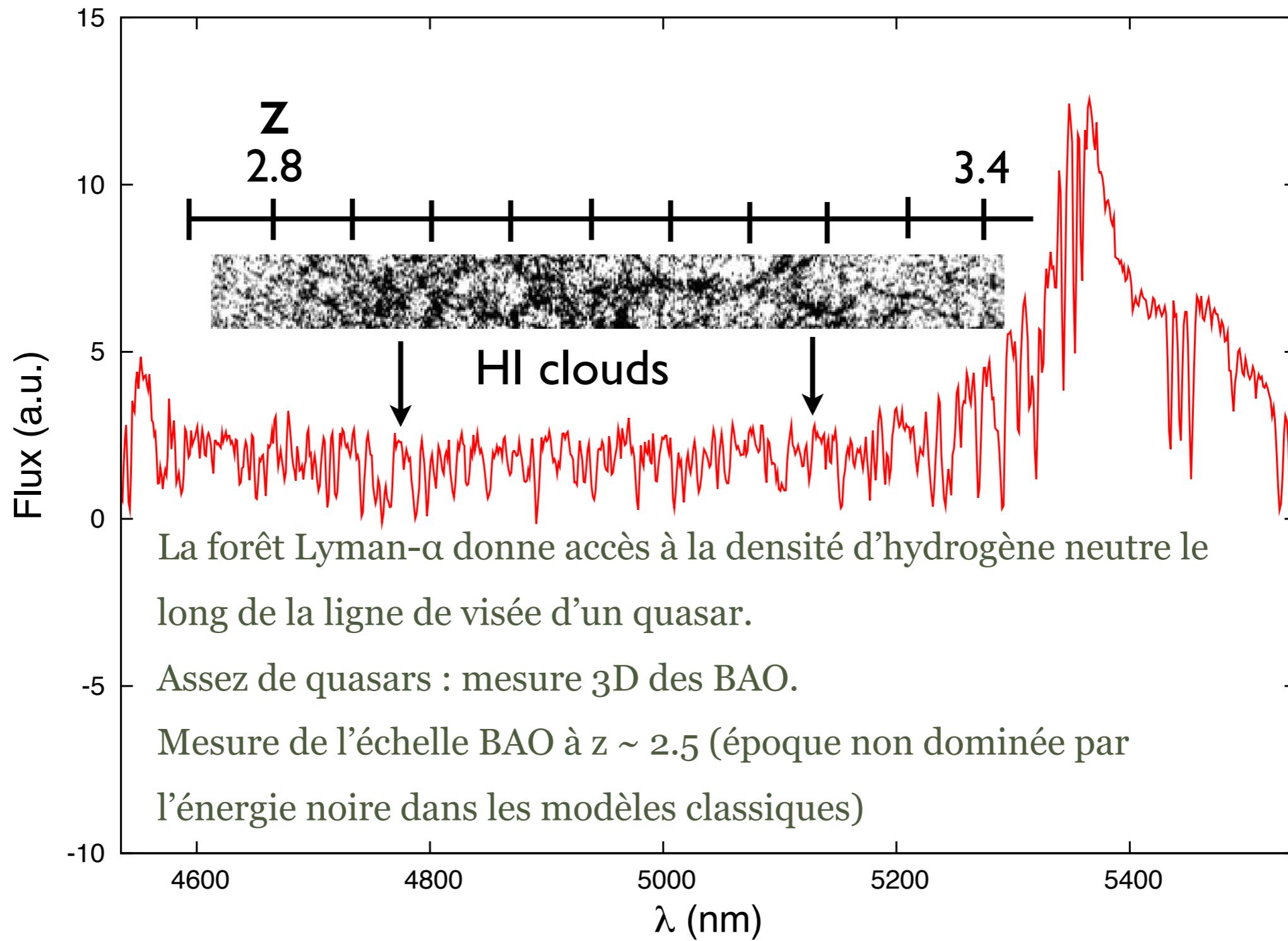


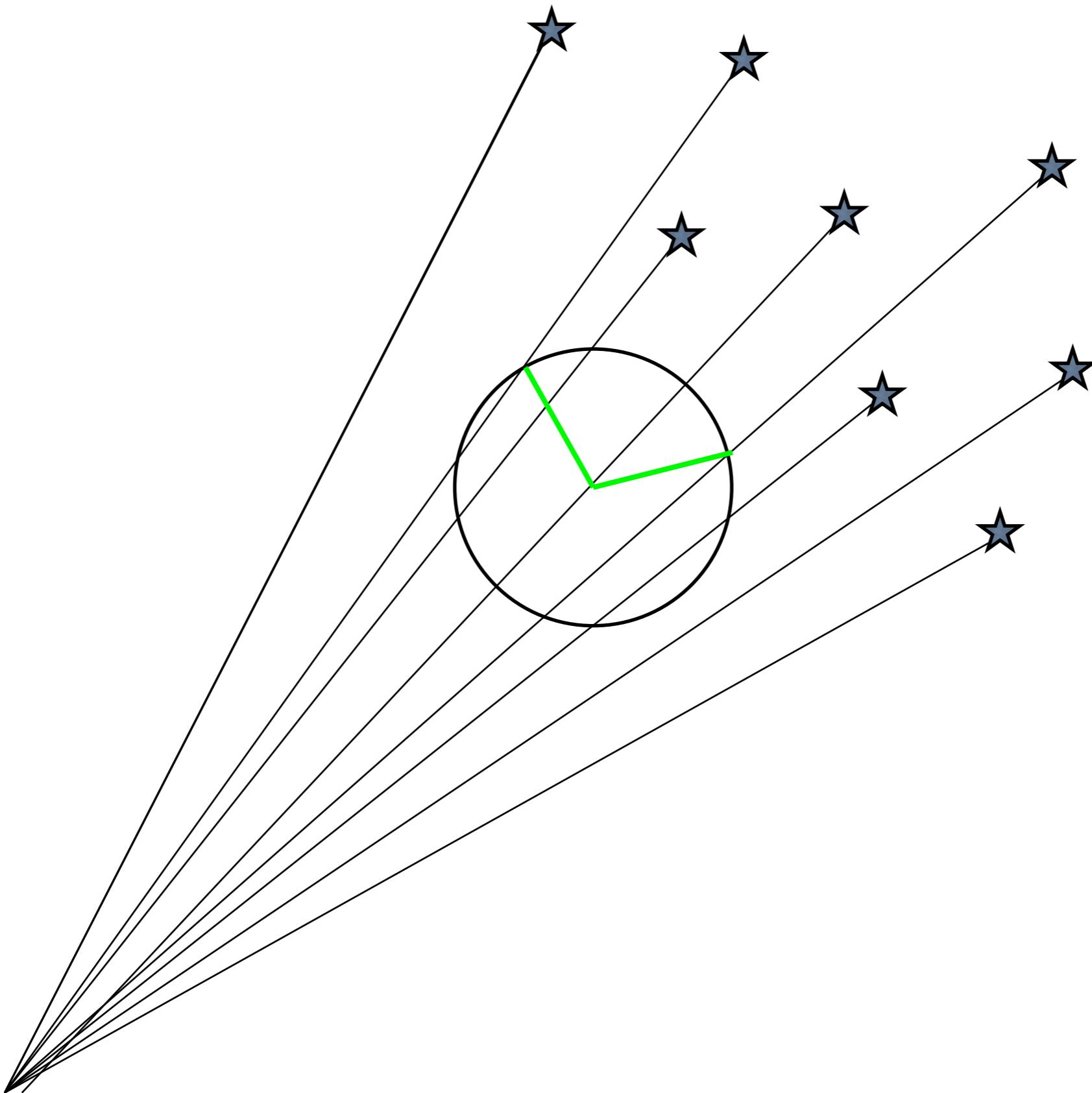


SDSS,  
relevé principal  
SDSS-I + SDSS-II  
LRG,  $8000 \text{ deg}^2$   
(fin en 2008)  
 $10^{-4} \text{ galaxies/Mpc}^3$

SDSS-III LRG  
 $10,000 \text{ deg}^2$   
5x densité  
2x volume

# BAO dans la forêt Lyman alpha





# BAO dans la forêt Lyman alpha

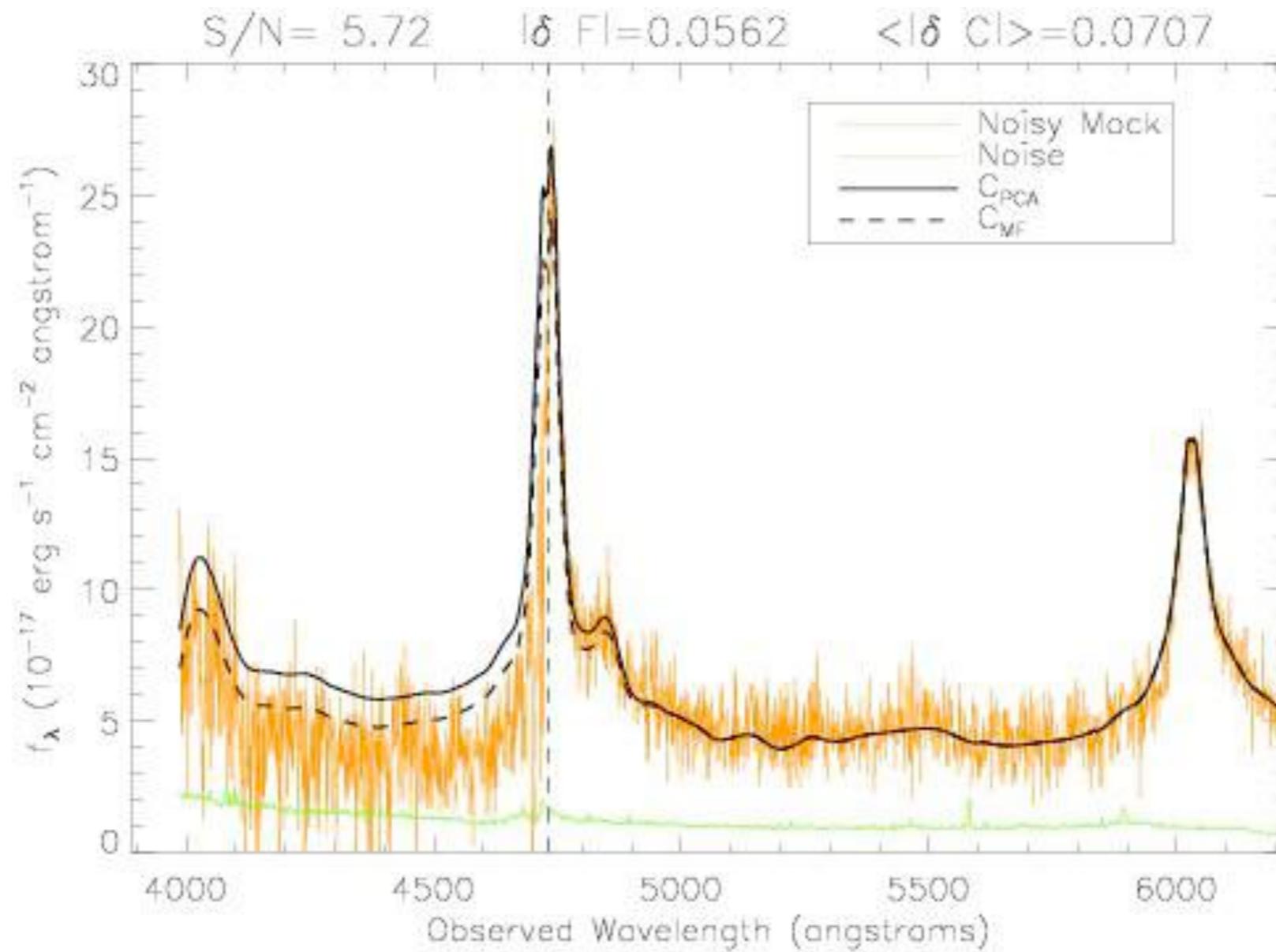
---

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 identifiants BAL et DLA.

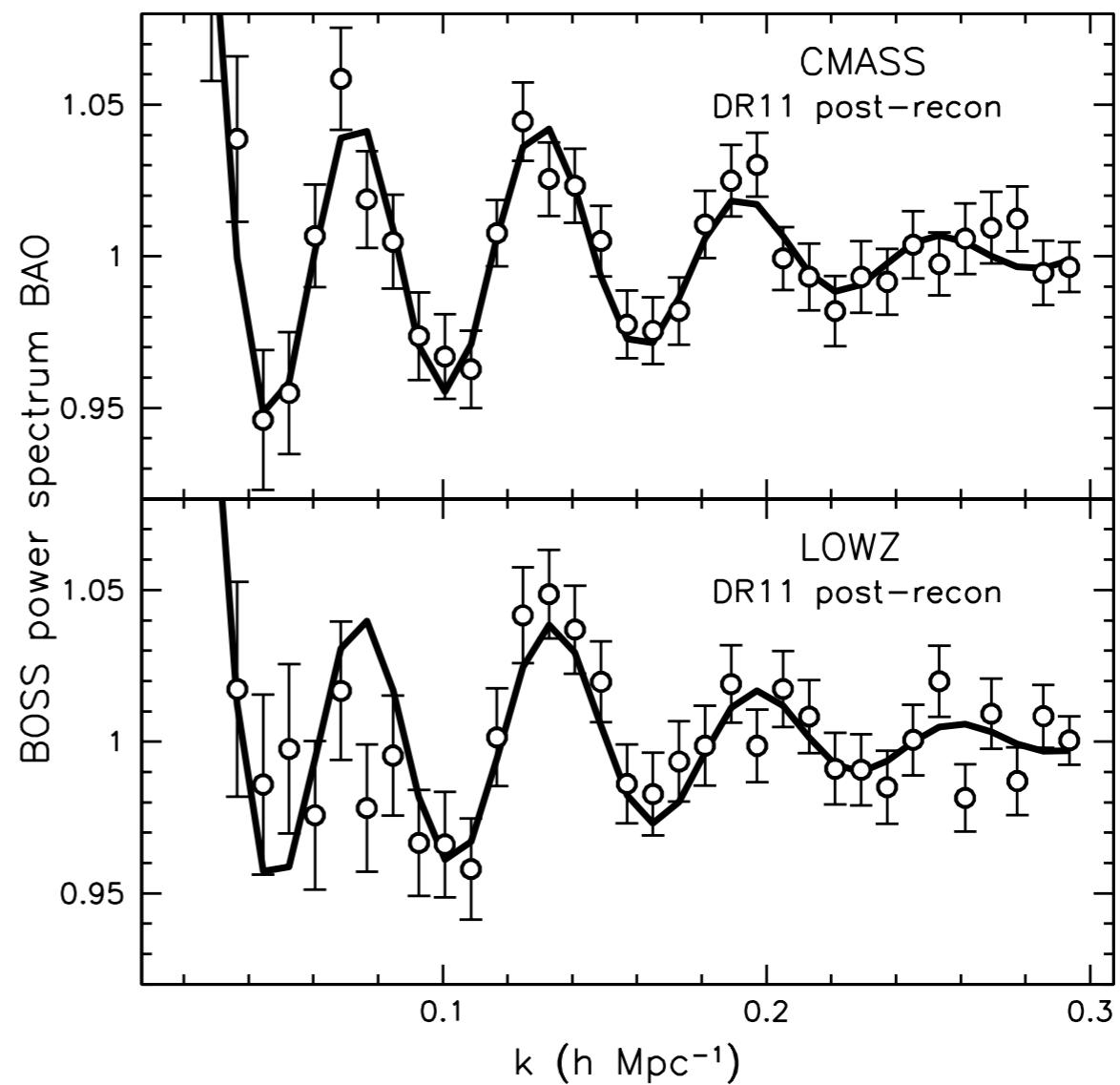
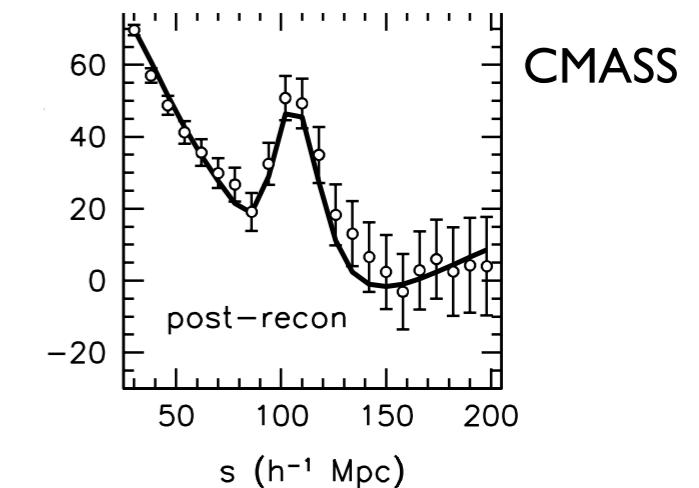
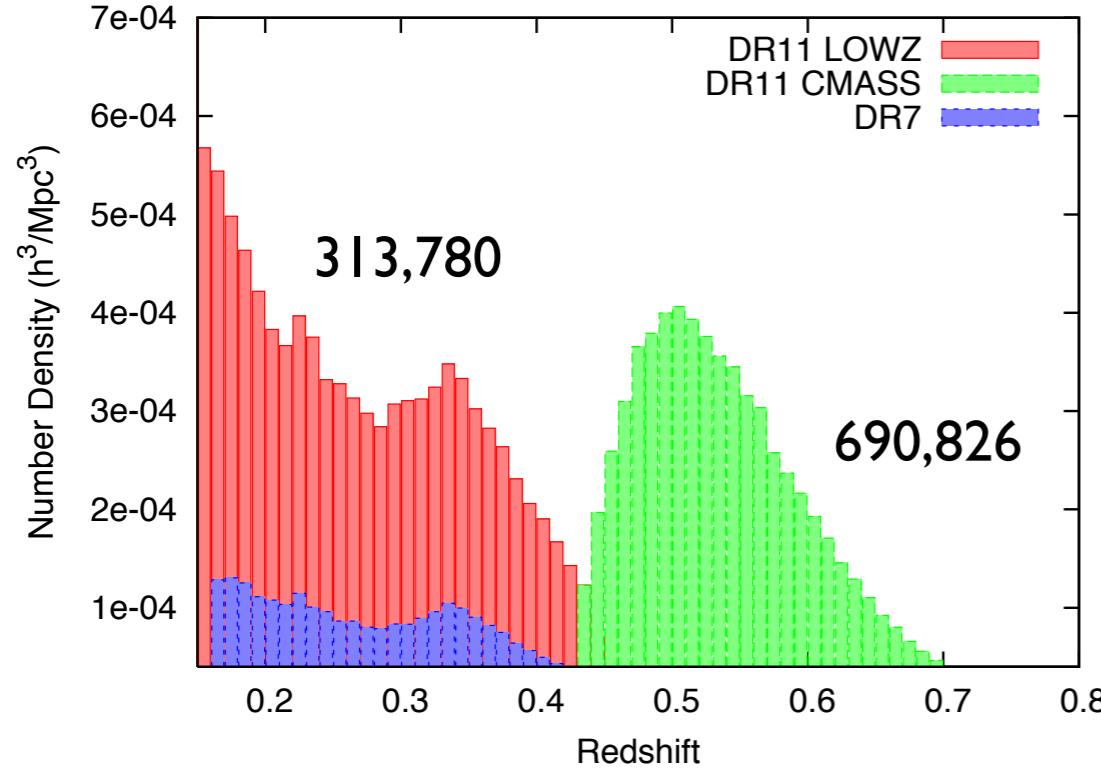
# Ajustement du continuum Ly- $\alpha$



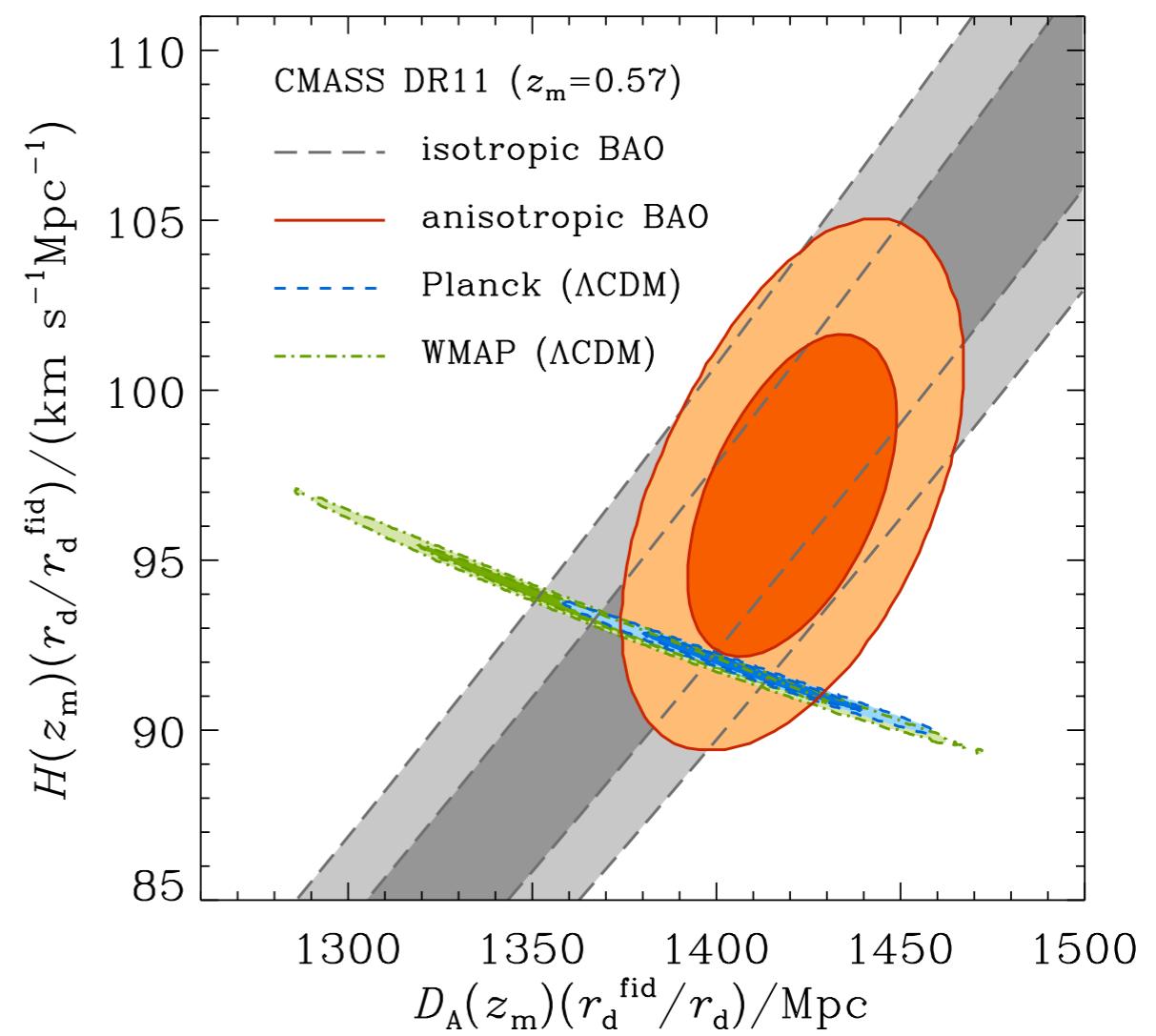
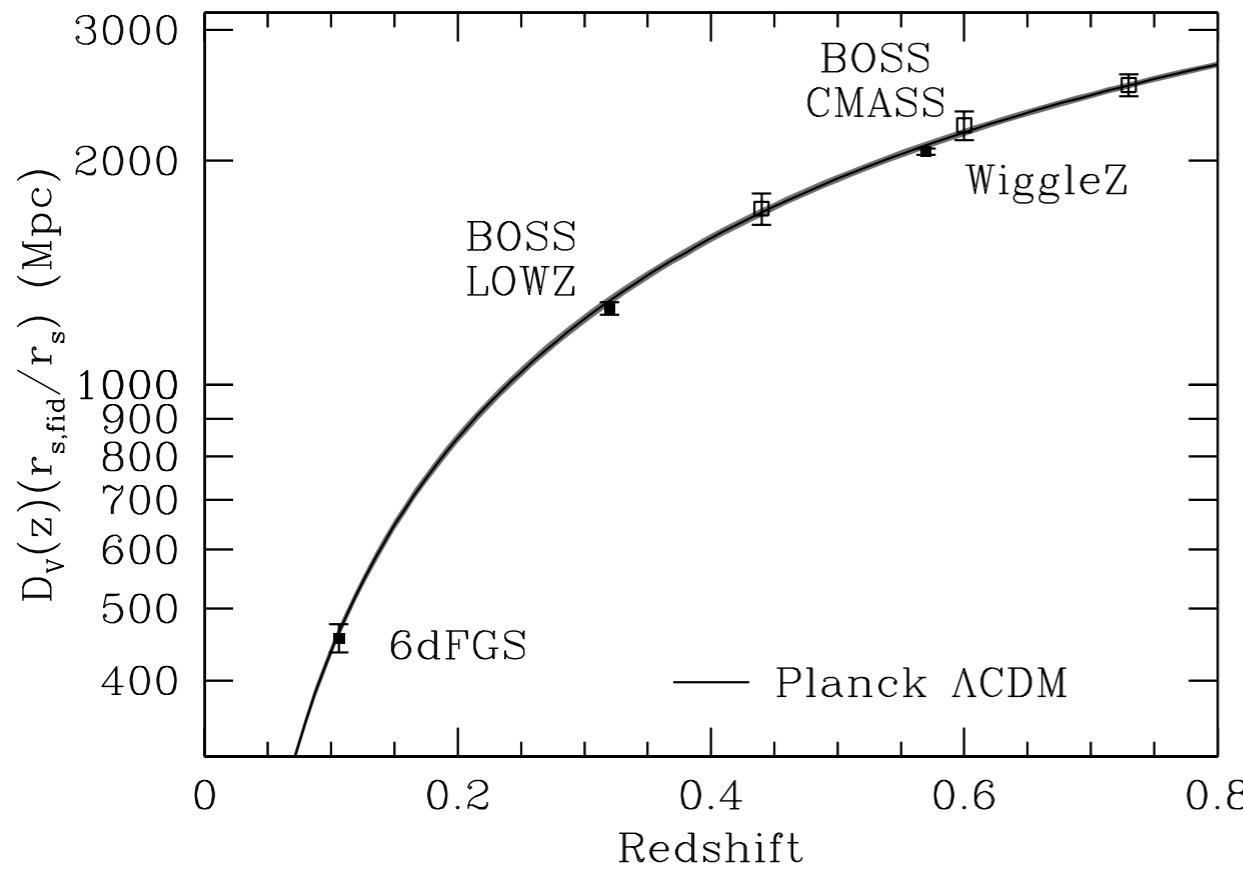
Lee et al. 2012

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

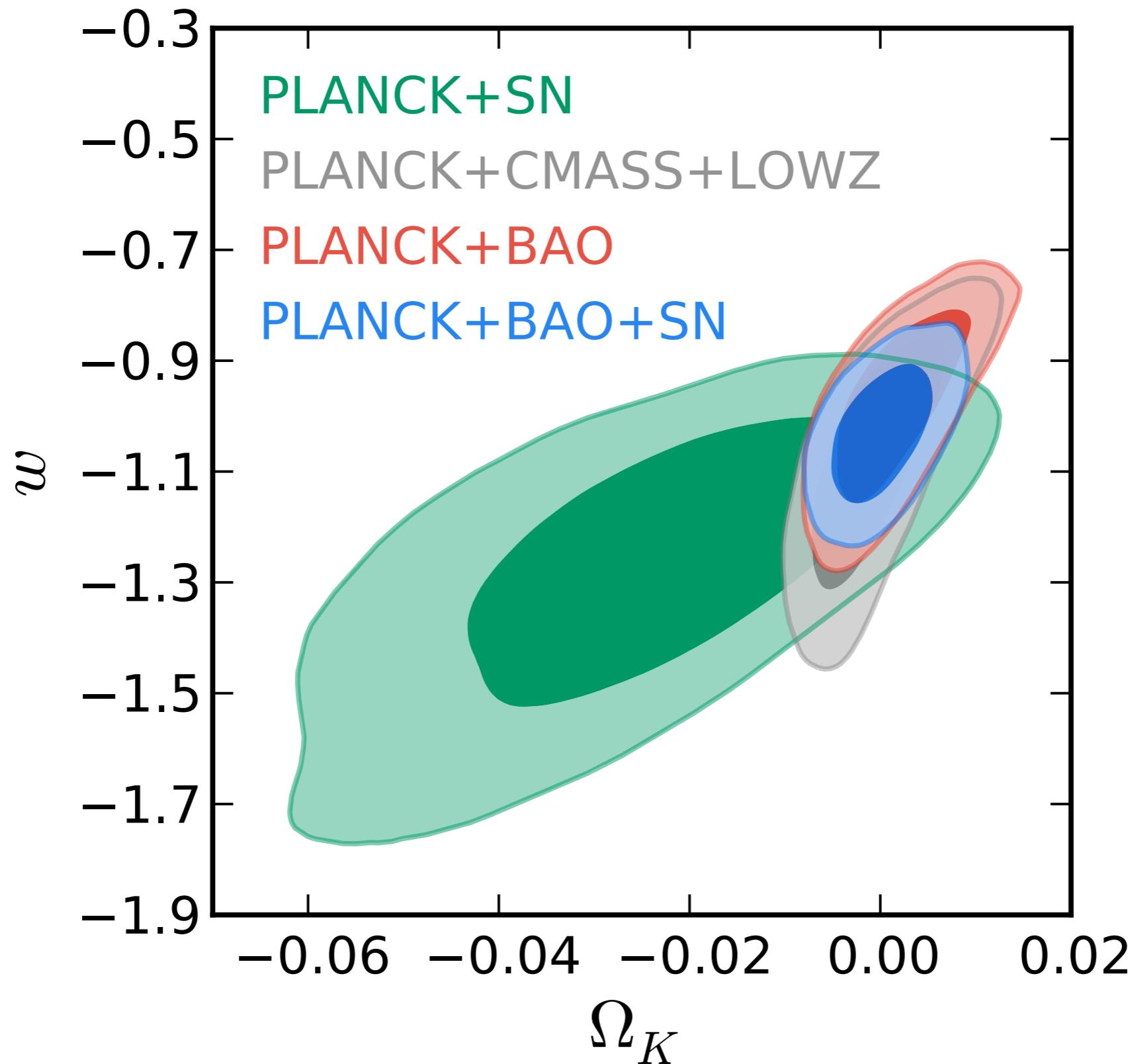
# SDSS-III sur les galaxies



# SDSS-III sur les galaxies

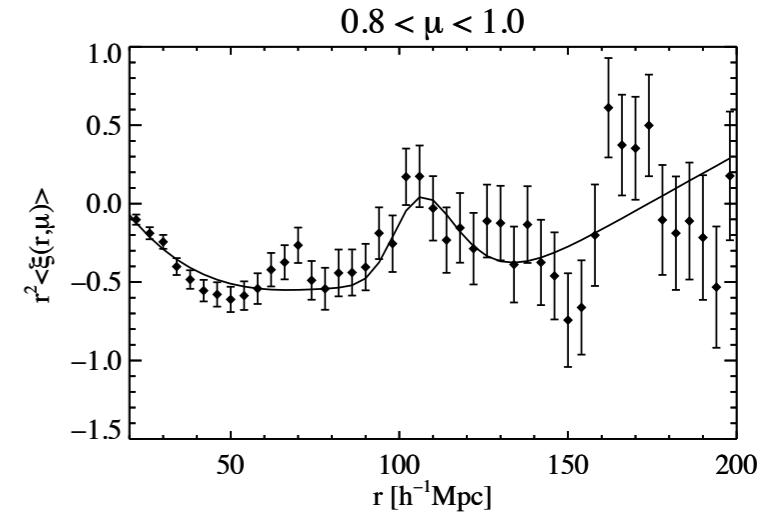
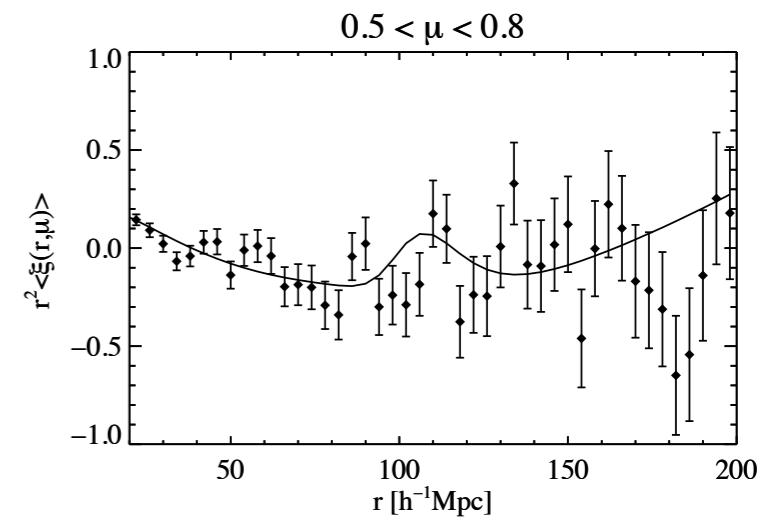
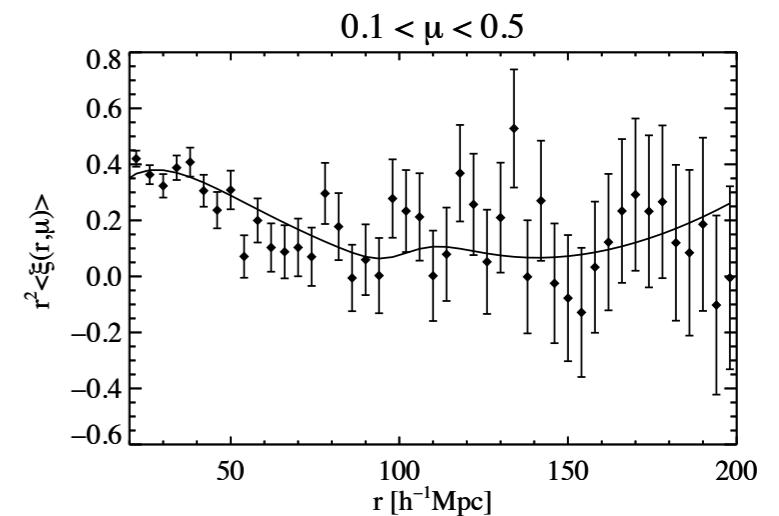
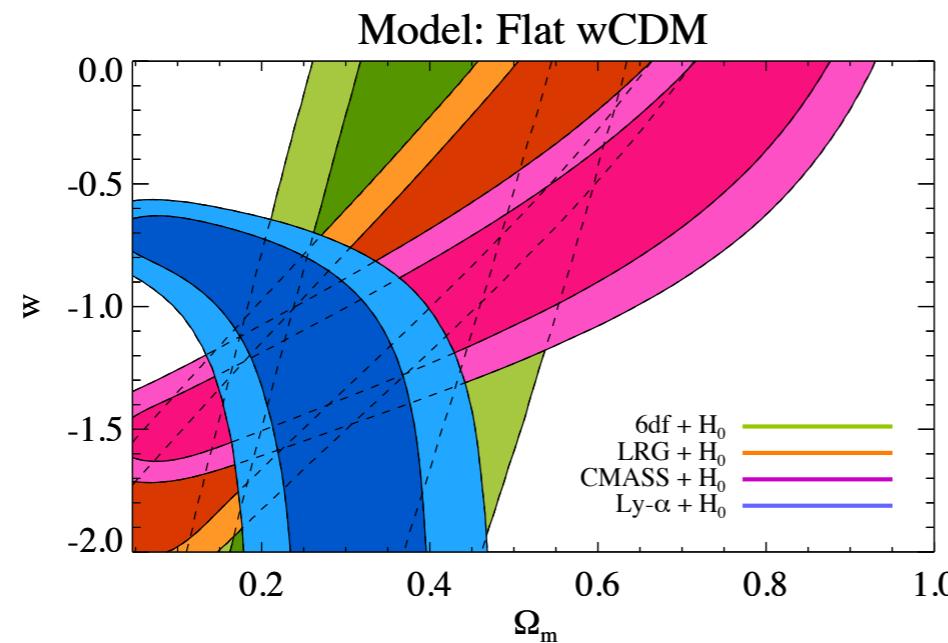
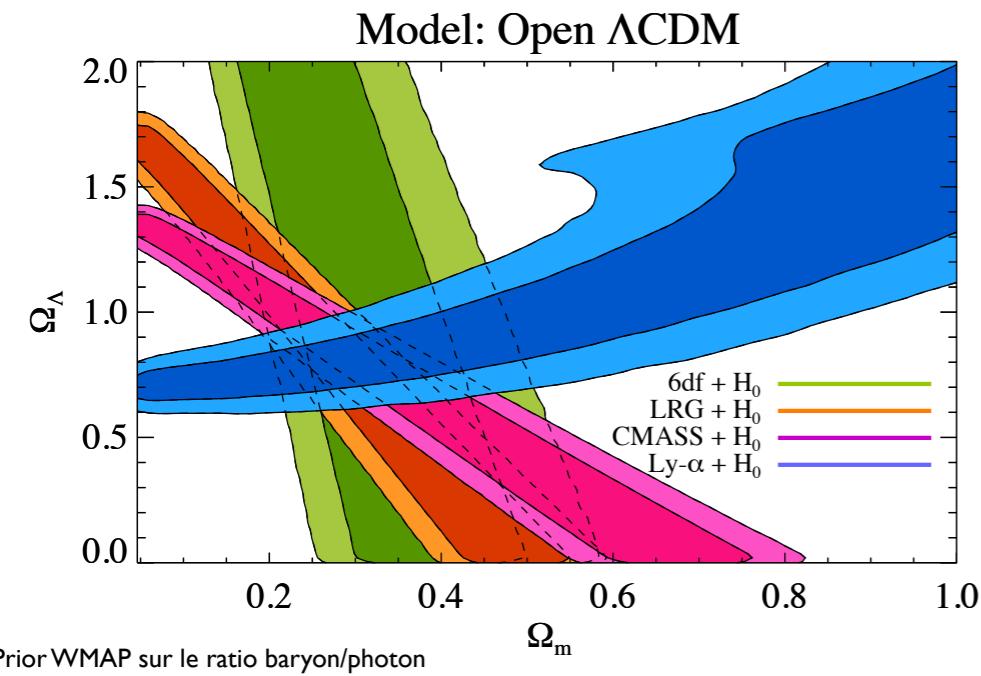


# SDSS-III sur les galaxies

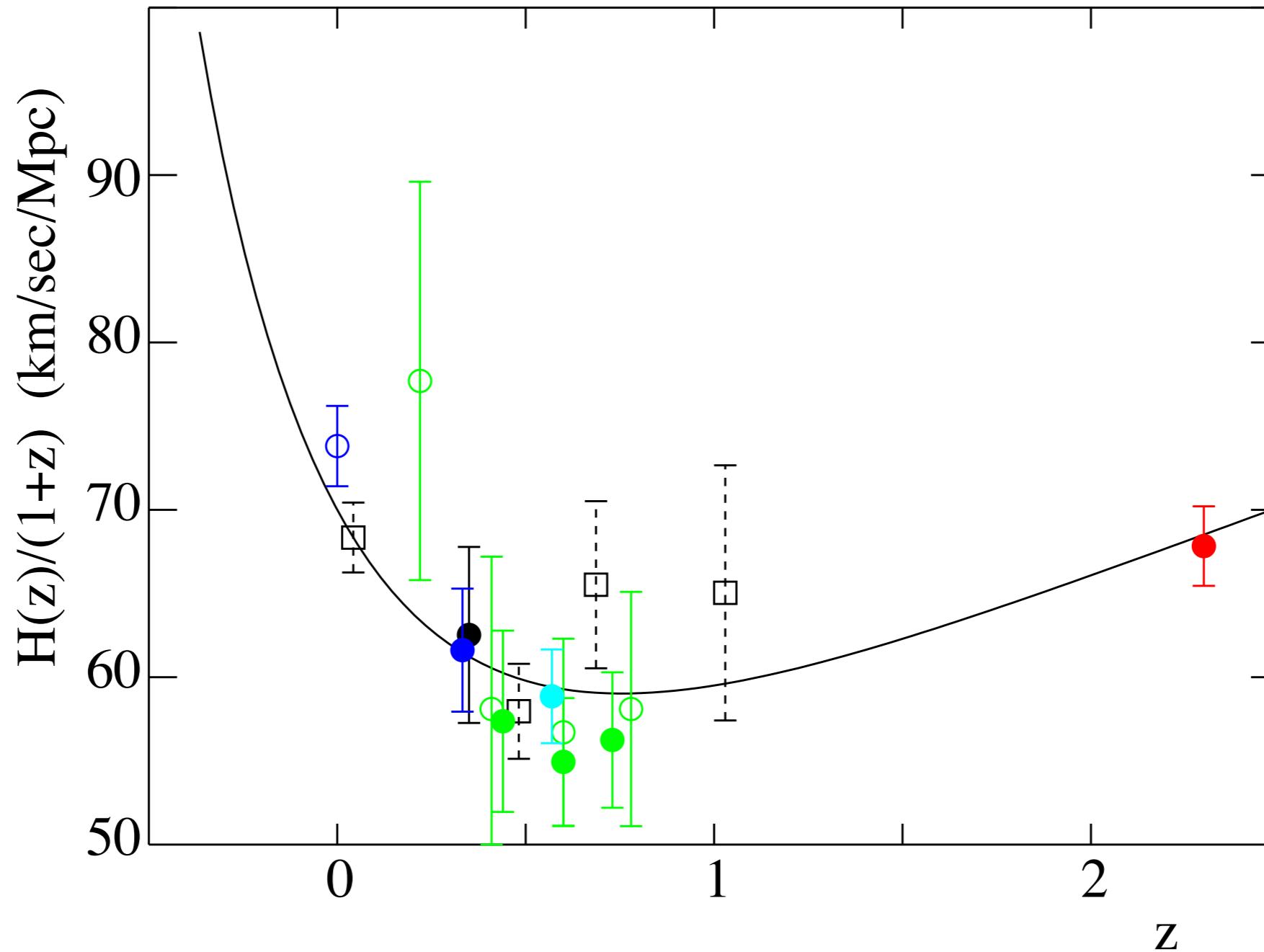


# SDSS-III sur la forêt Lyman- $\alpha$

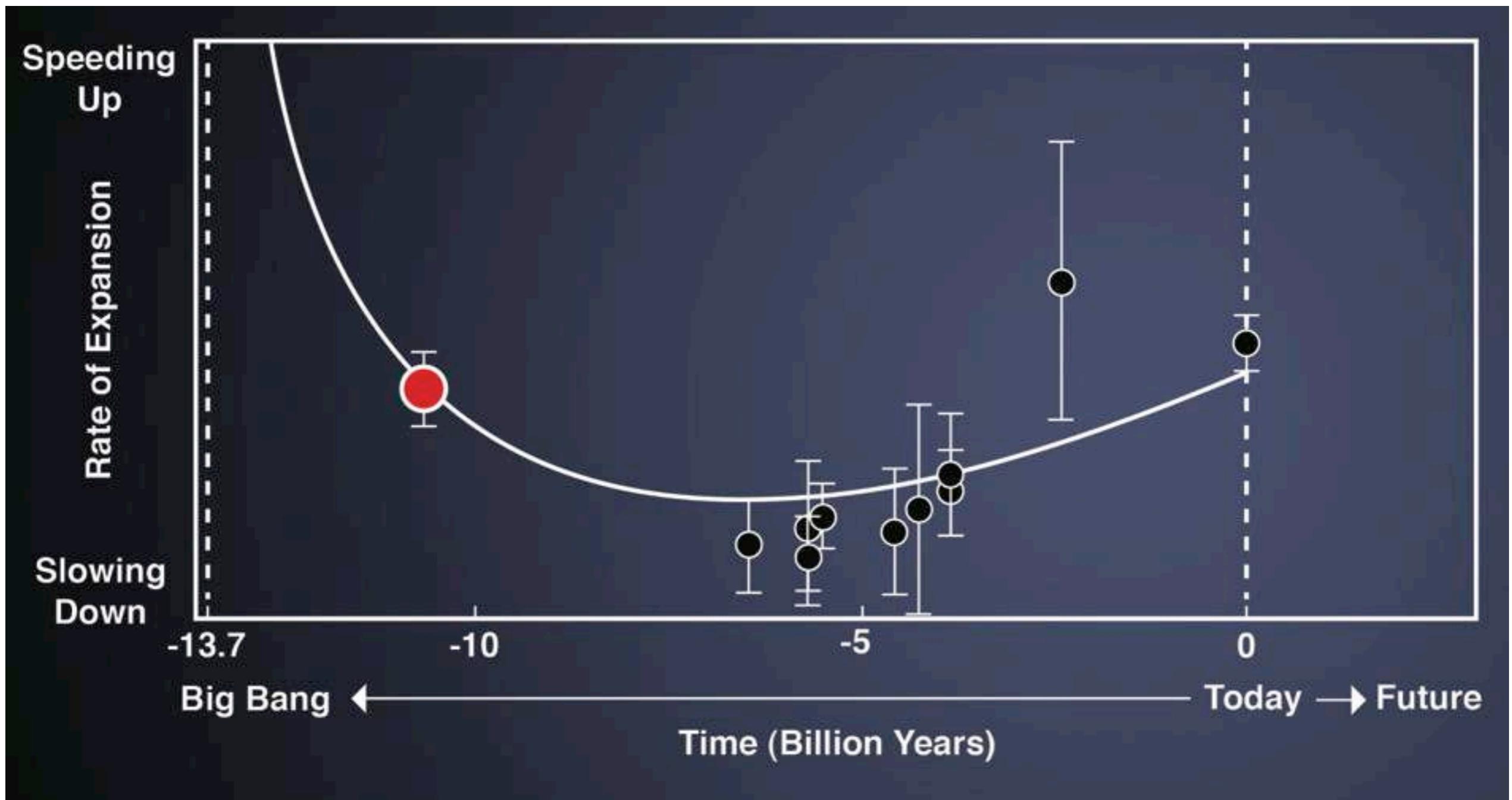
Première détection : Busca et al. 2013  
 48,640 QSO  $2.1 < z < 3.5$



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

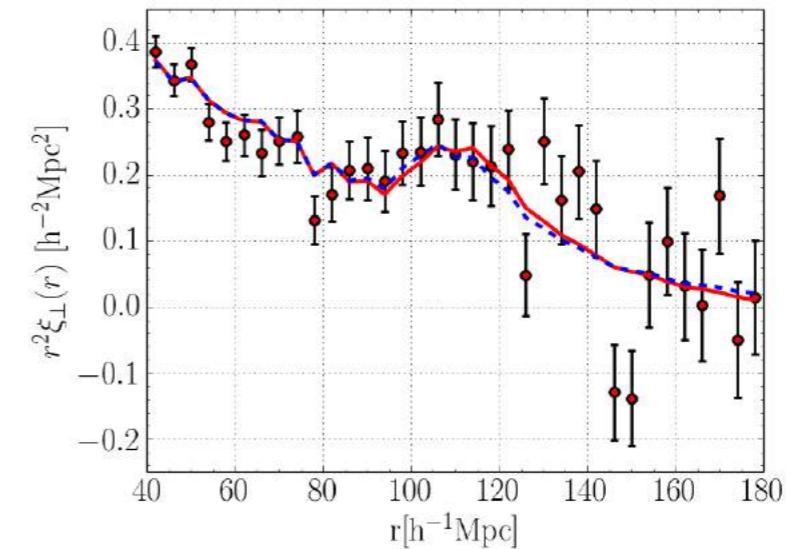
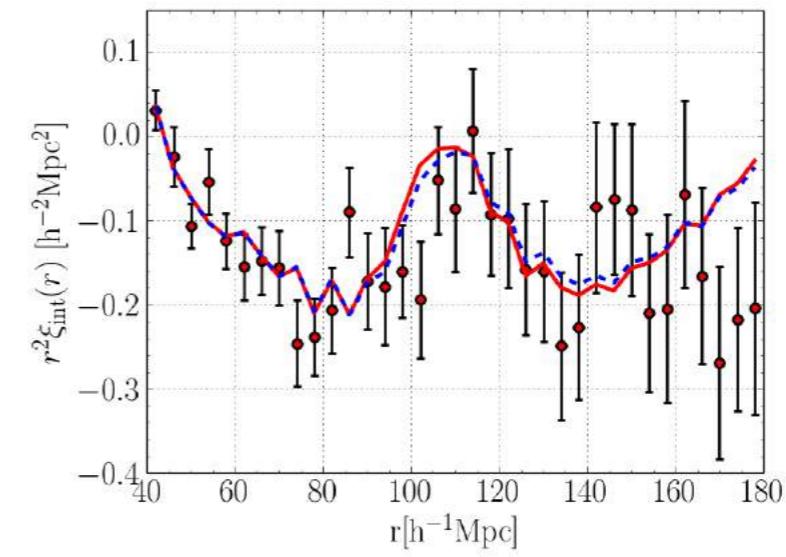
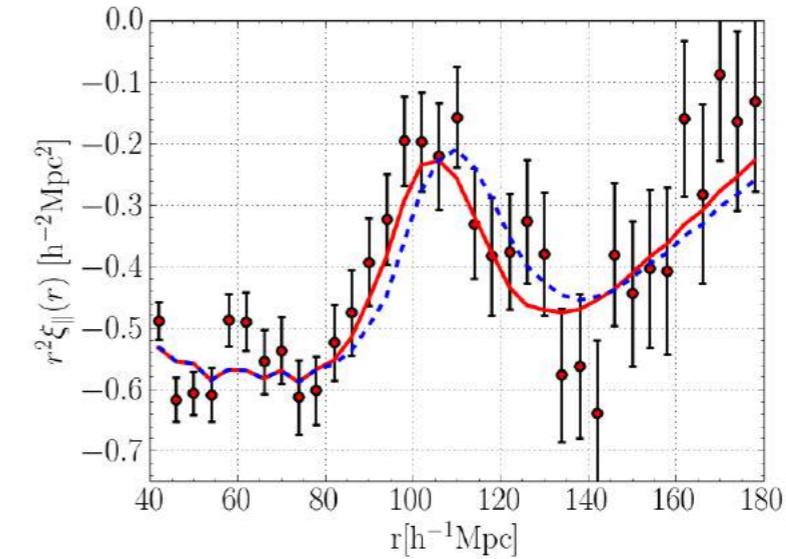
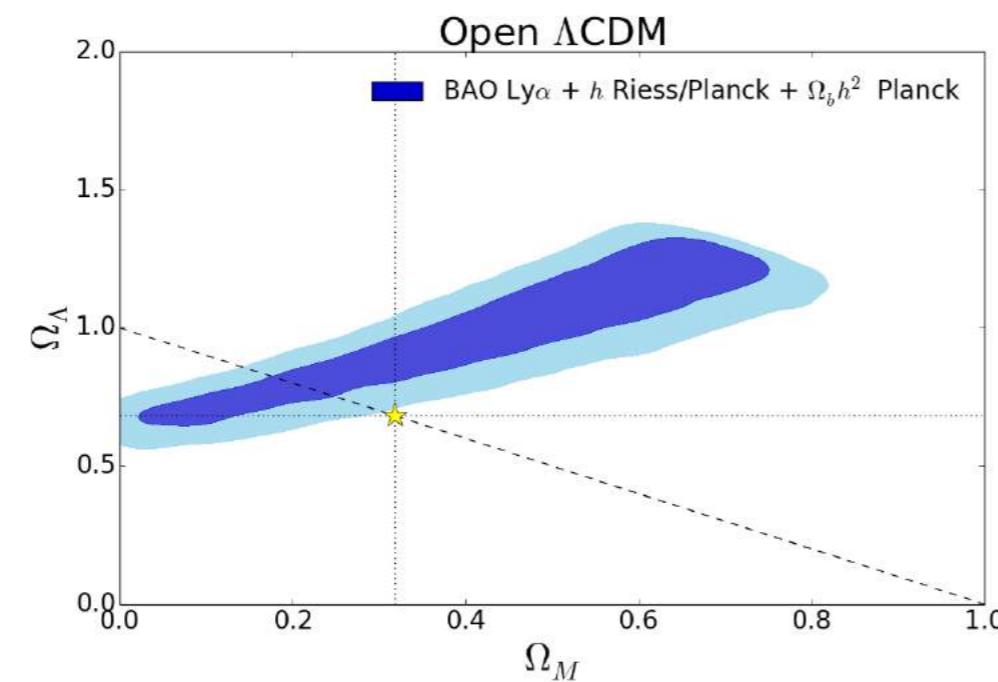
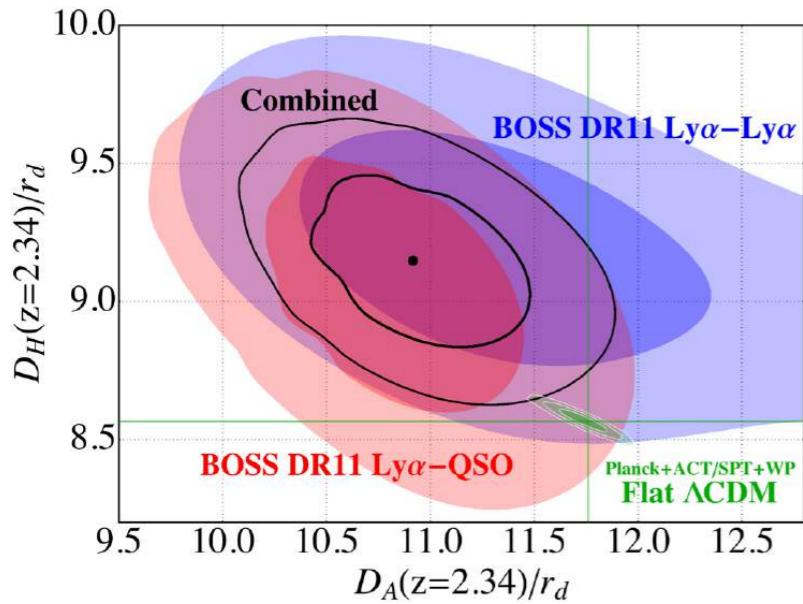


# SDSS-III sur la forêt Lyman- $\alpha$



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

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



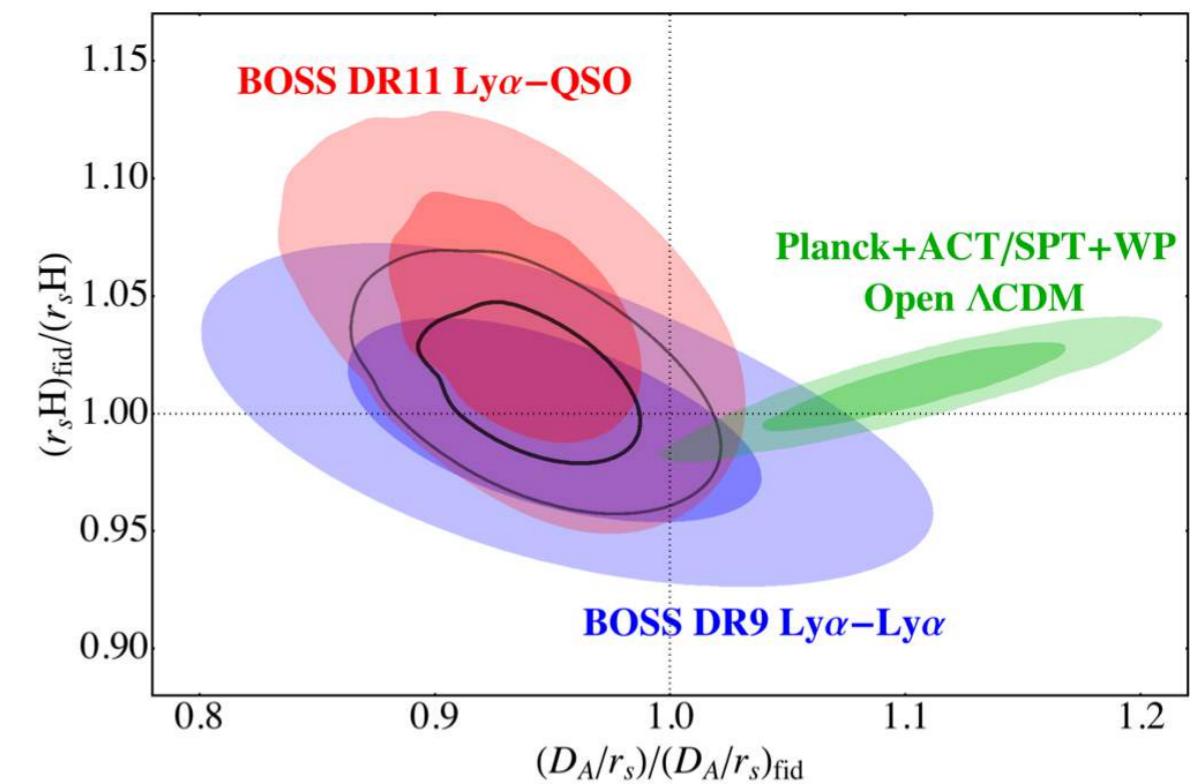
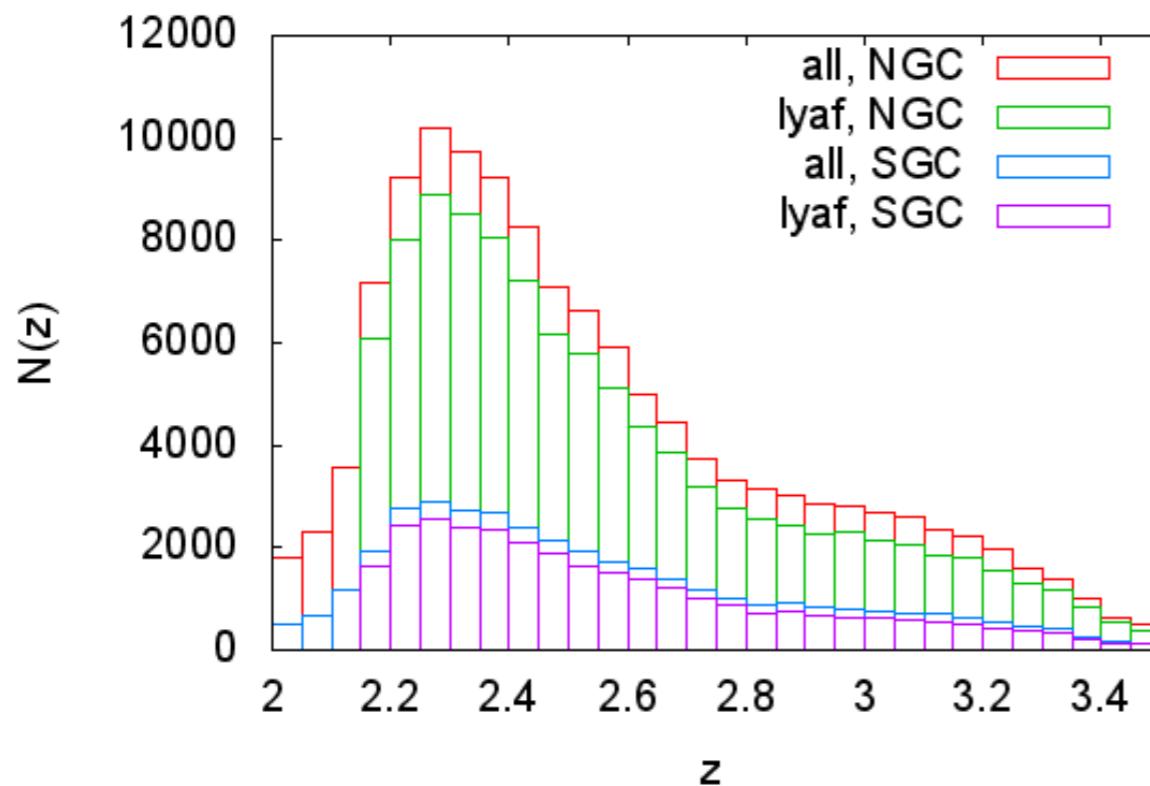
# SDSS-III sur QSO x Lyman- $\alpha$

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

Font-Ribeira et al. 2014

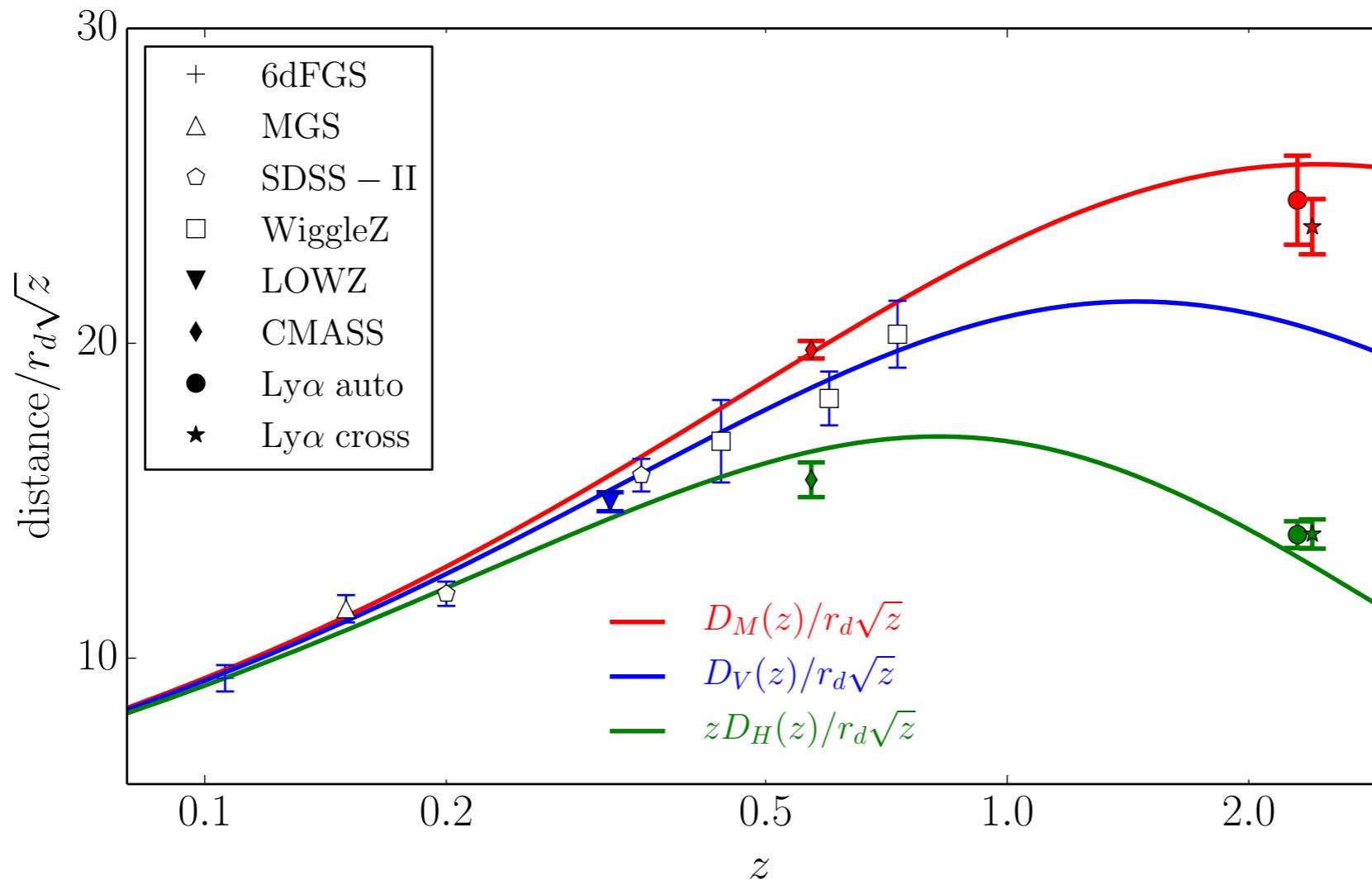
164 017 QSO comme traceurs, 130 820 pour Lyman- $\alpha$ .

Plus de corrélations parasites dues au continuum.



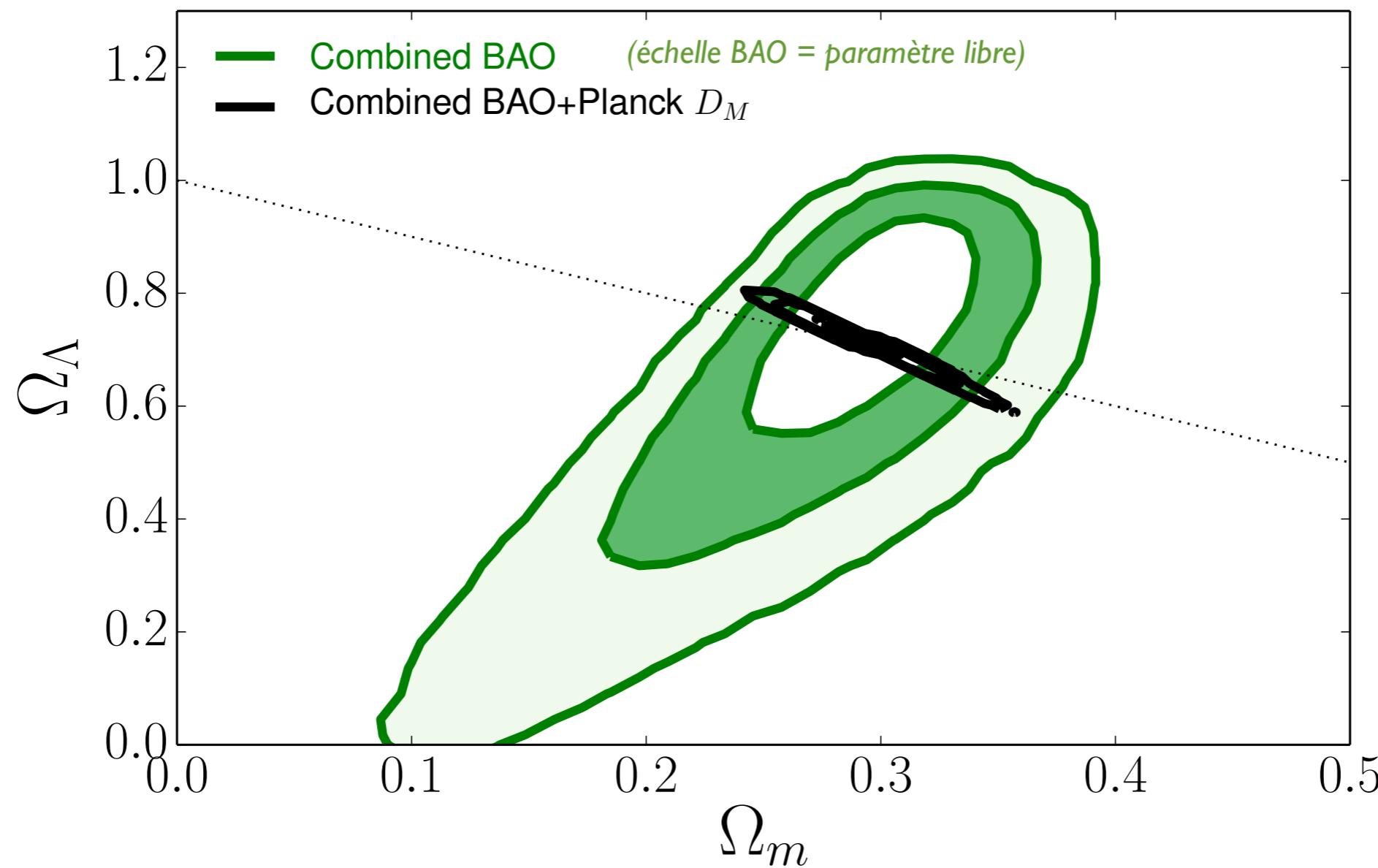
# SDSS-III : combinaison

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

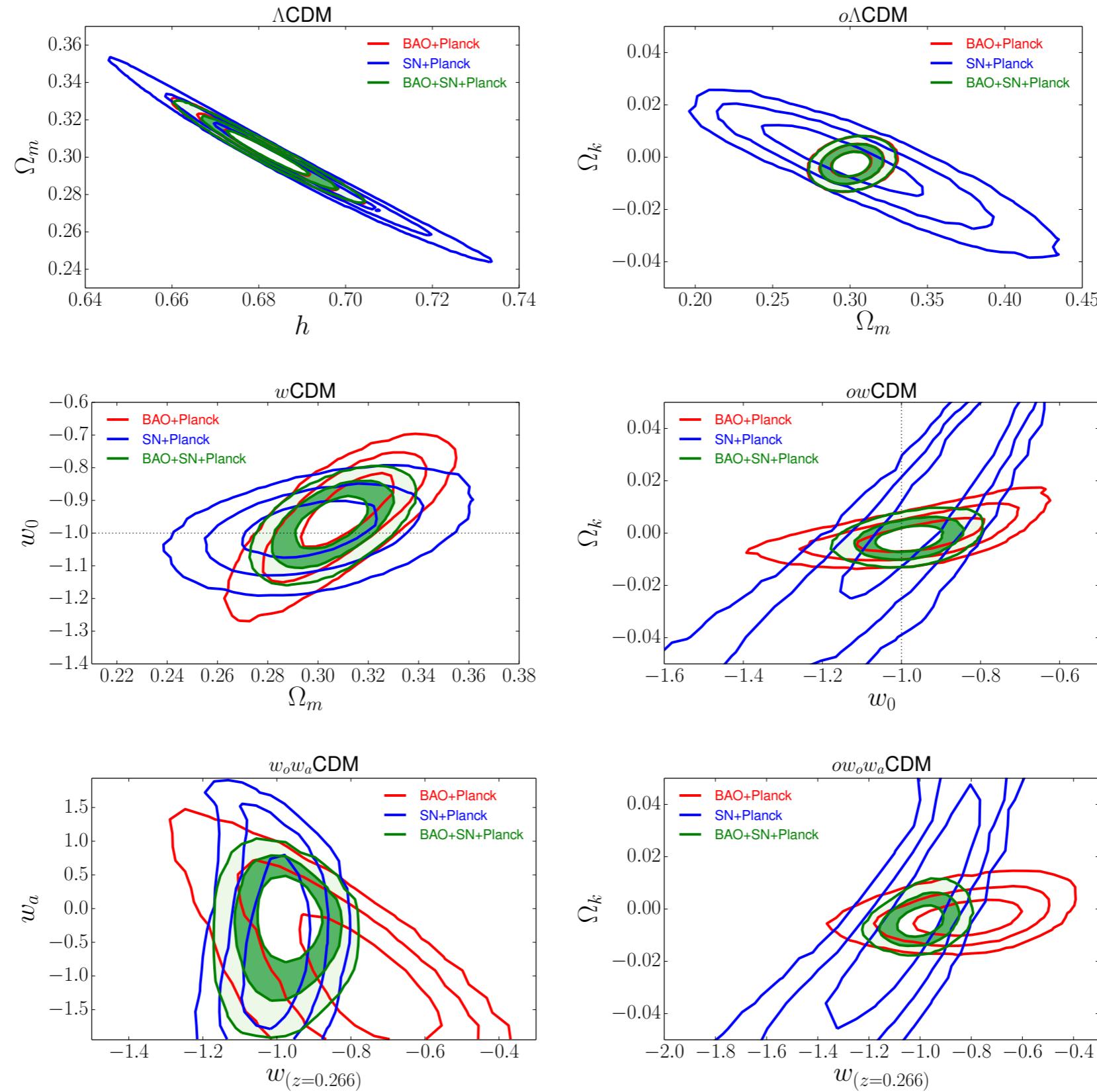


# SDSS-III : cosmologie

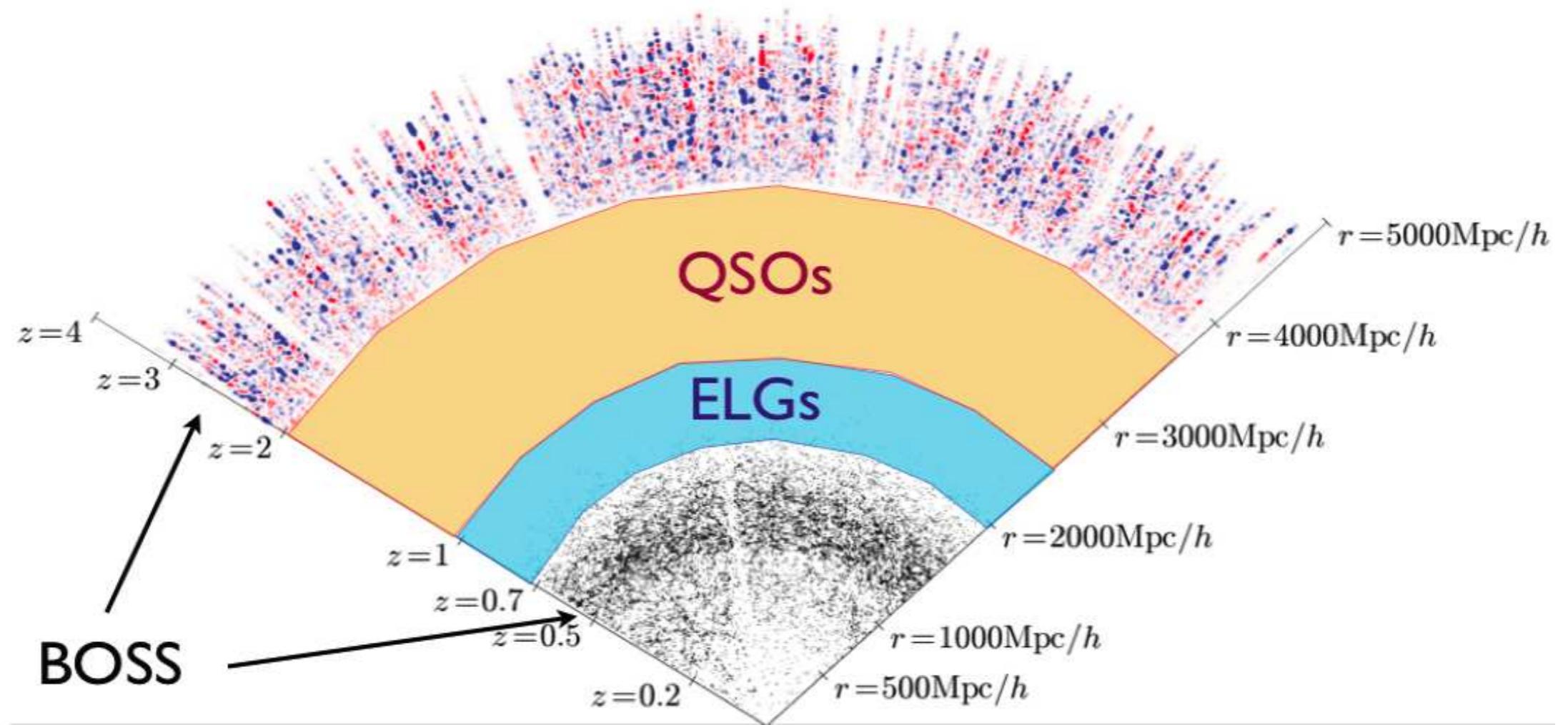
Les BAO seuls prouvent l'existence de l'énergie noire



# SDSS-III : cosmologie



# SDSS-IV & eBOSS



Relevé et analyses en cours...

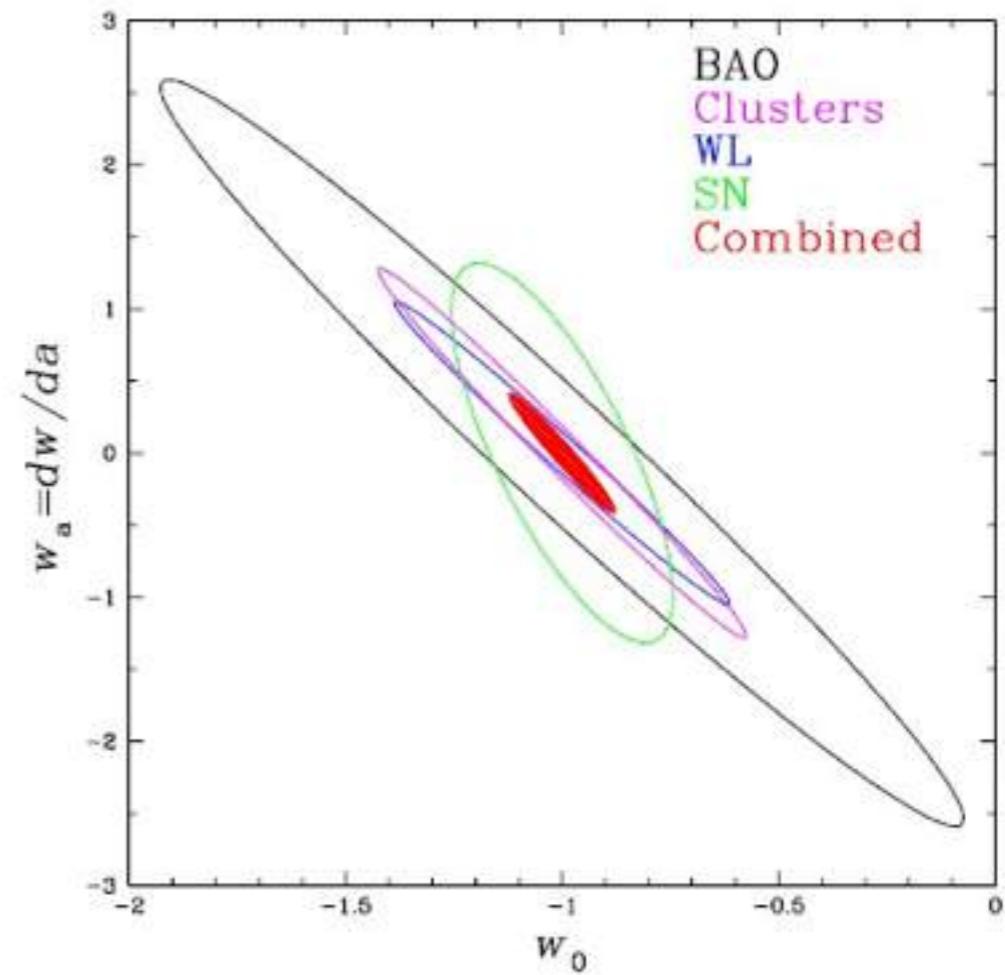
# Dark Energy Survey

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  $z < 1.4$ .



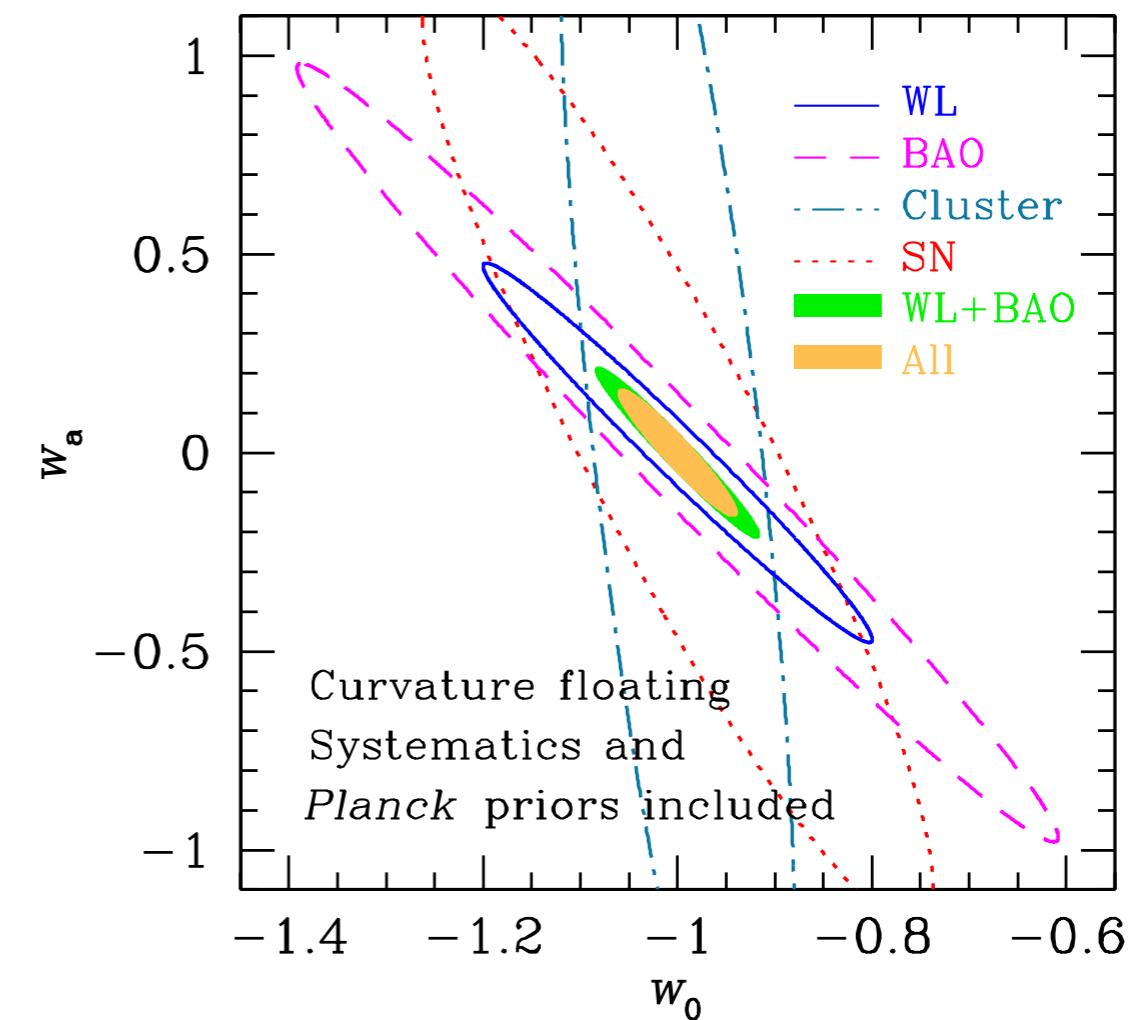
# LSST

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.

PFS devrait être installé en 2019. 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.

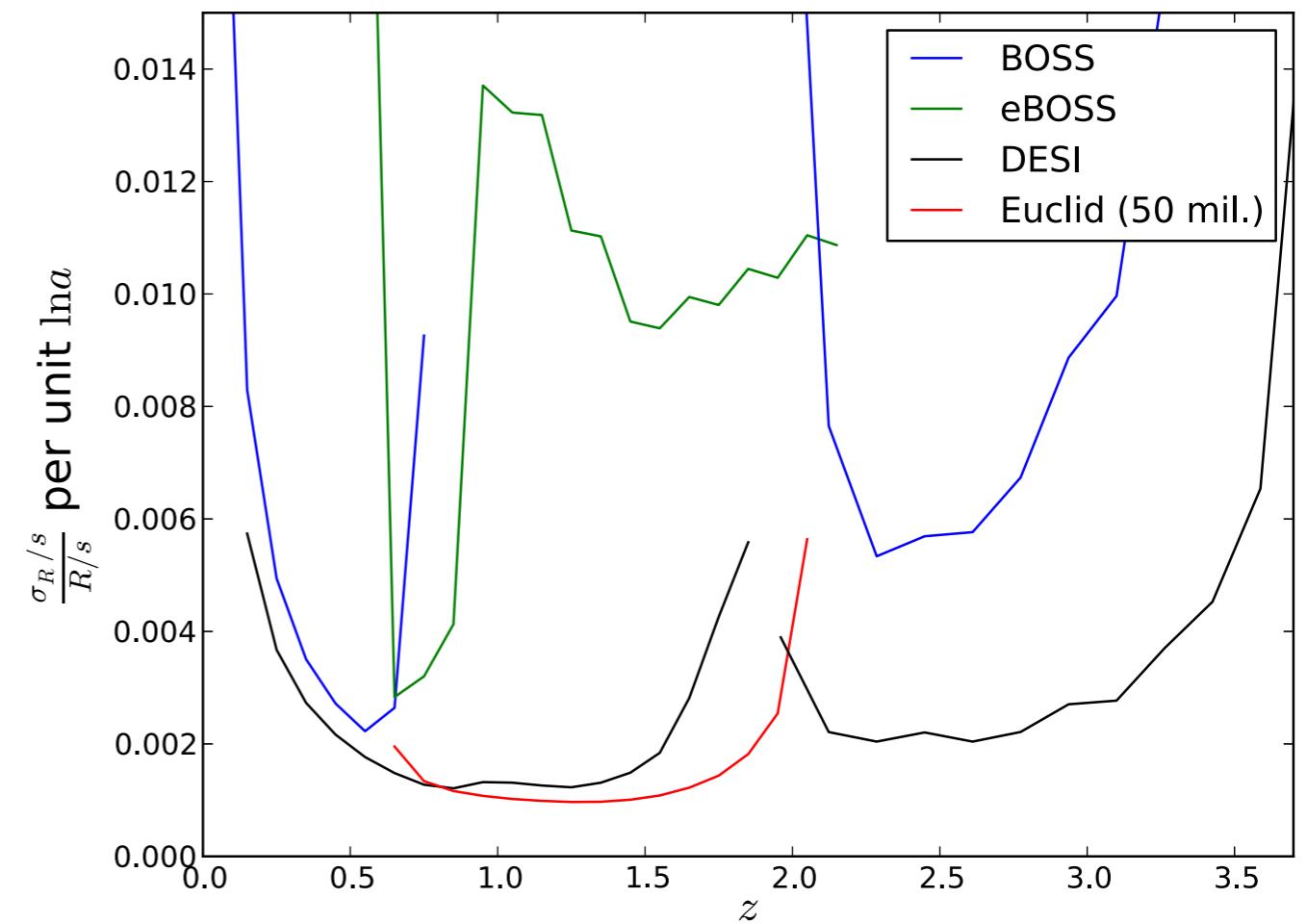
# DESI (ex-BigBOSS)

Dark Energy Spectroscopic Instrument

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

20M gal+qso, 800k Ly-a, 14000 degrés carrés

Début en 2019



# Euclid

---

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

Relevé en 2022.

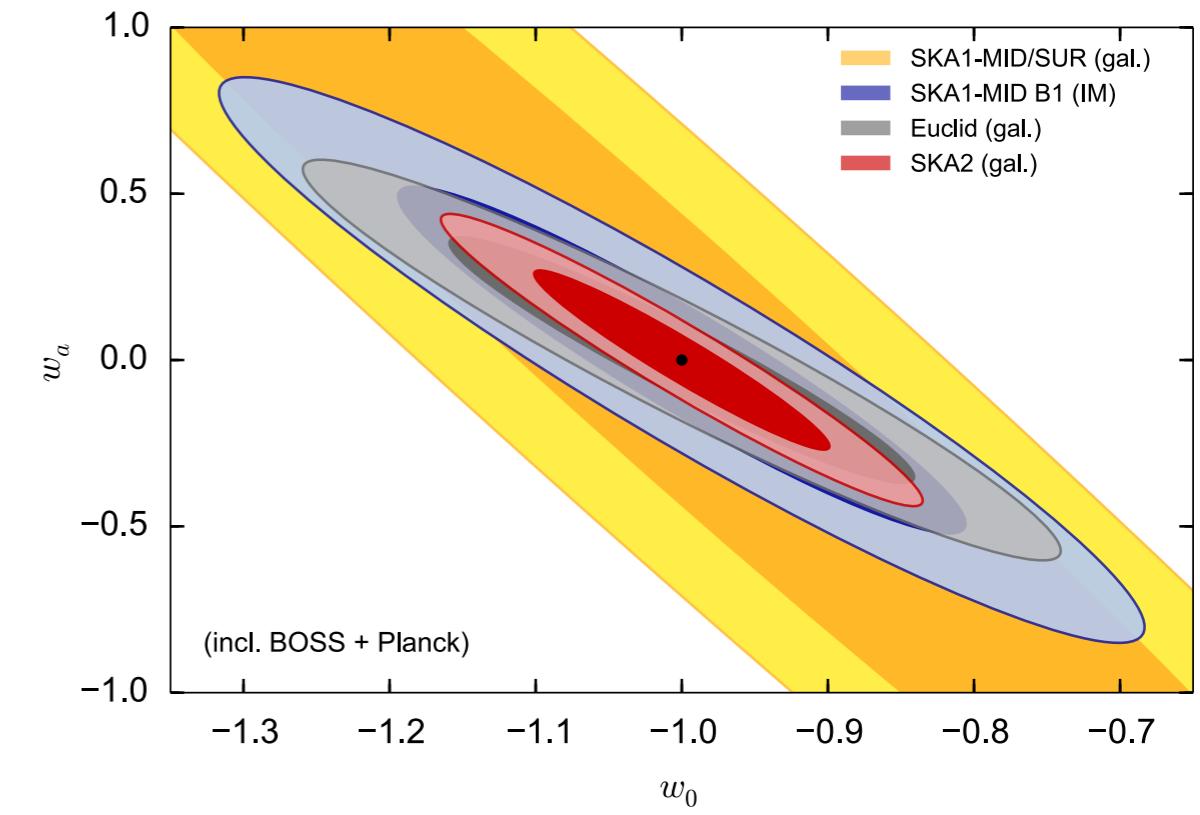
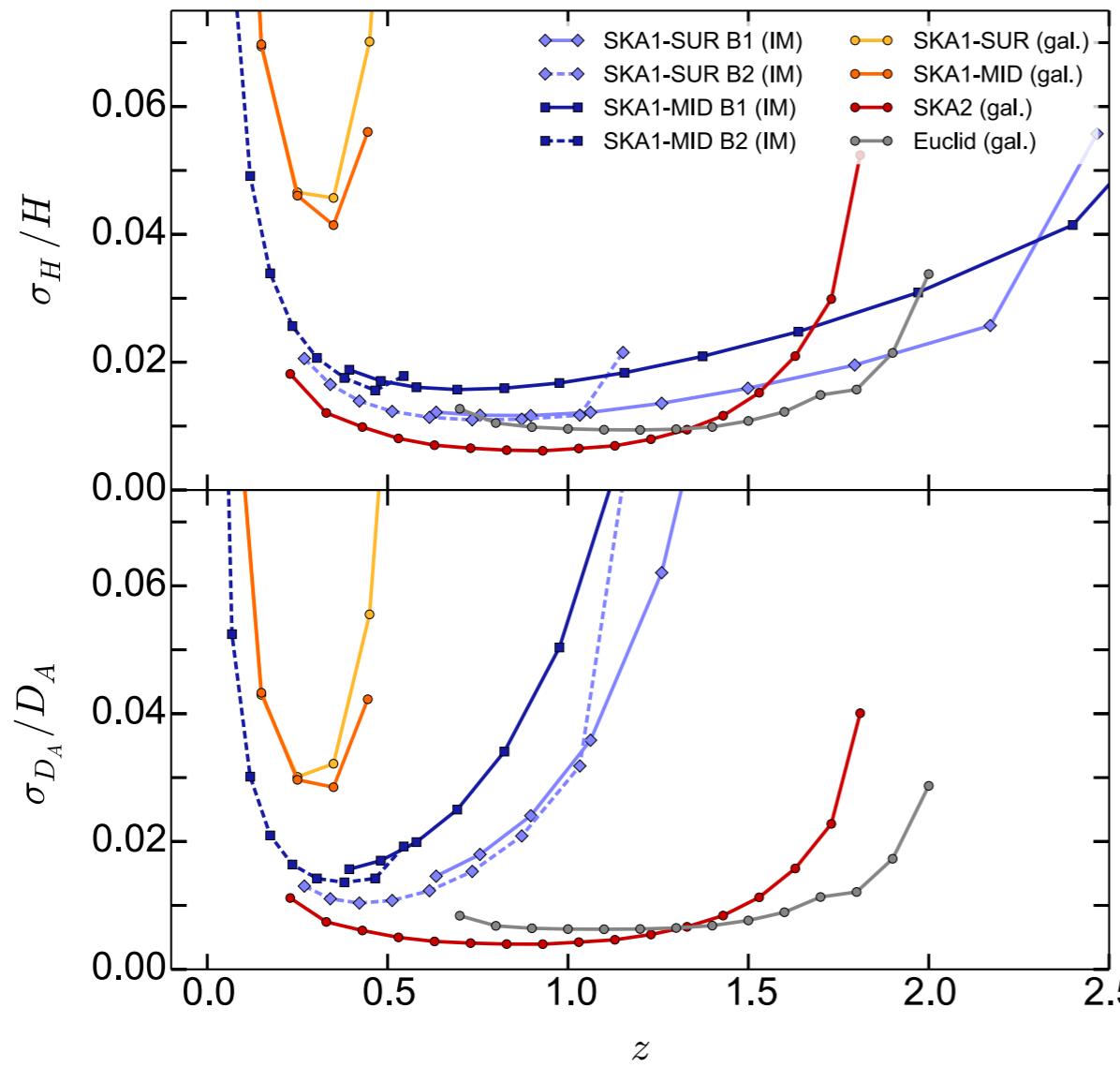
Imagerie visible (lentilles gravitationnelles), imagerie infrarouge (photo-z), spectrographie sans fente dans le proche infrarouge (BAO).

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, or bien via la mesure de l'intensité de l'absorption par 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.