

Cosmologie avec les oscillations de baryons : Projets BOSS/eBOSS et DESI

Julien Guy

Conseil Scientifique de l'IN2P3, 22/10/2015

Plan

- 1) Oscillations de baryons & forêt Lyman-alpha
- 2) Résultats BOSS
- 3) eBOSS
- 4) DESI

baryons

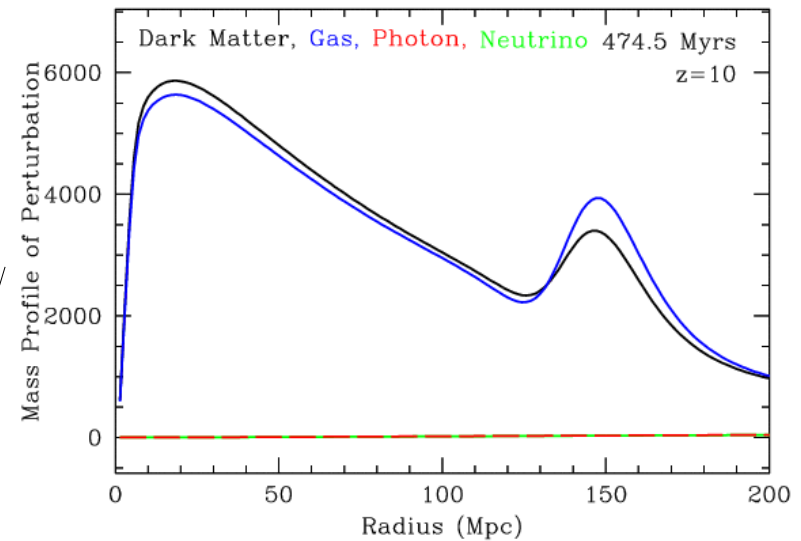
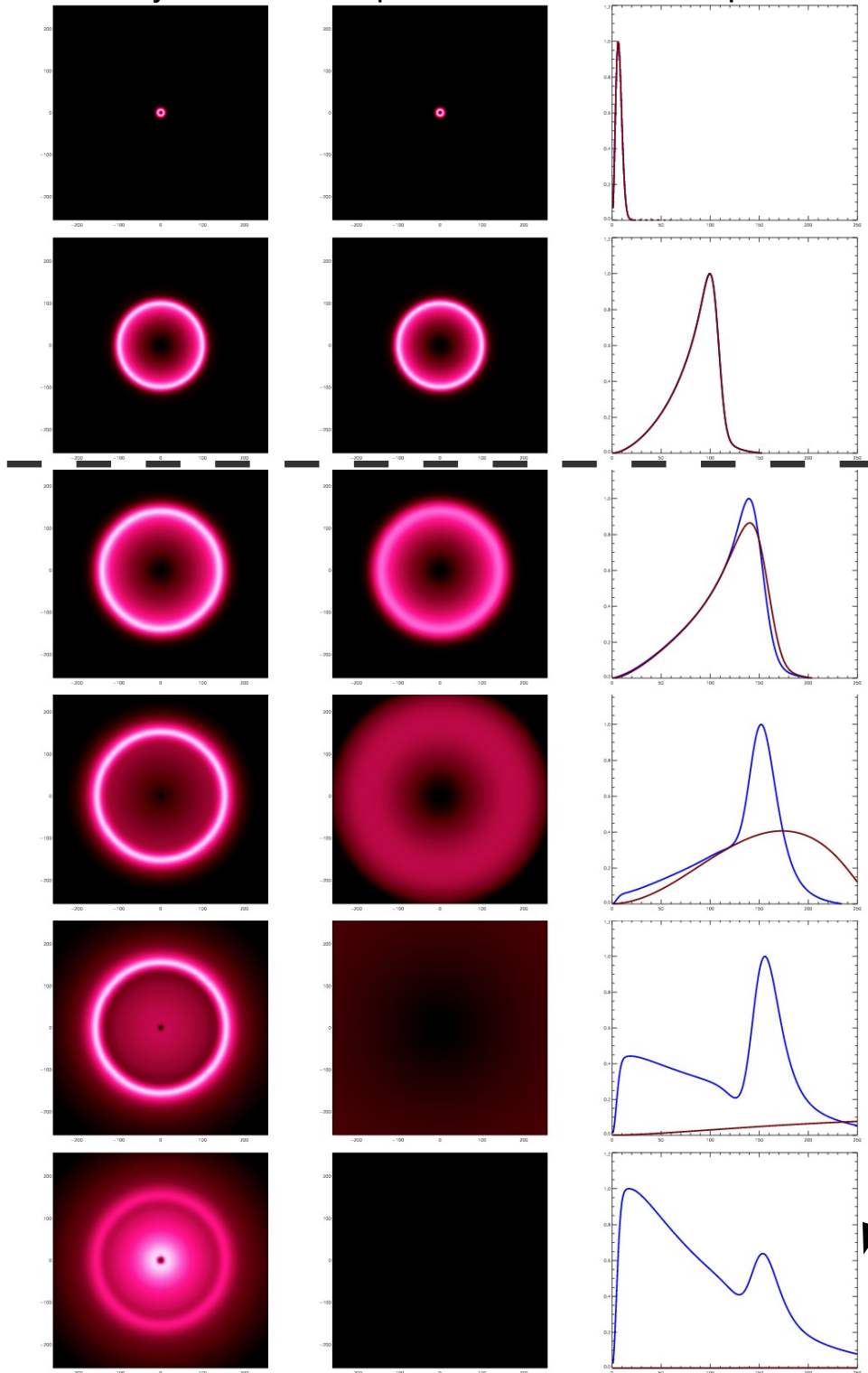
photons

mass profile

Oscillations acoustiques de baryons (BAO)

- onde de plasma gelée à la recombinaison
- propagation pendant un temps fini
- distance = f(vitesse du son, expansion, époque de la recombinaison)

recombinaison (p+e -> H)

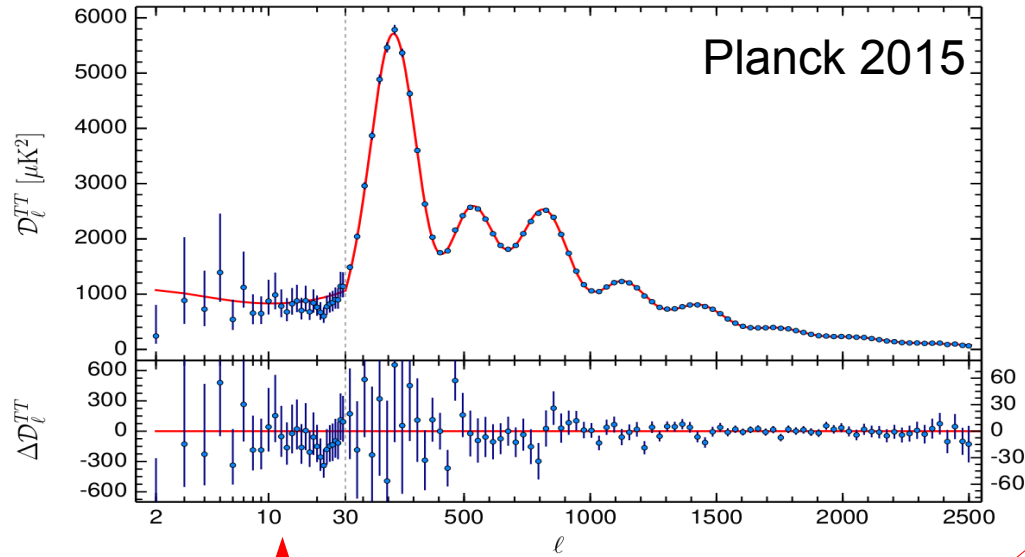


pic de corrélation à r~150 Mpc
(en coordonnées comobiles)

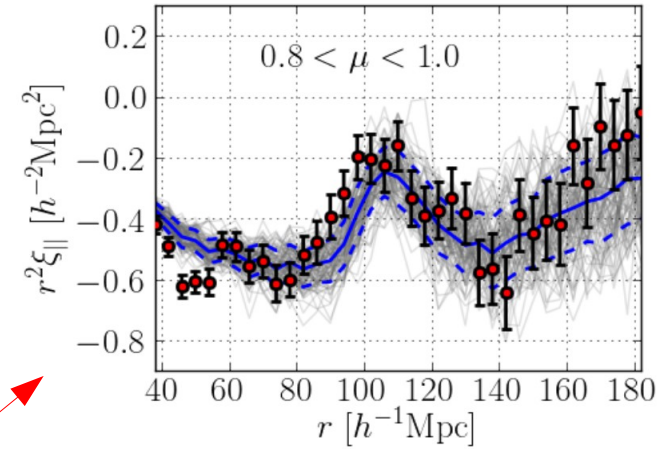
(from M. White, D. Eisenstein)

Oscillations acoustiques de baryons

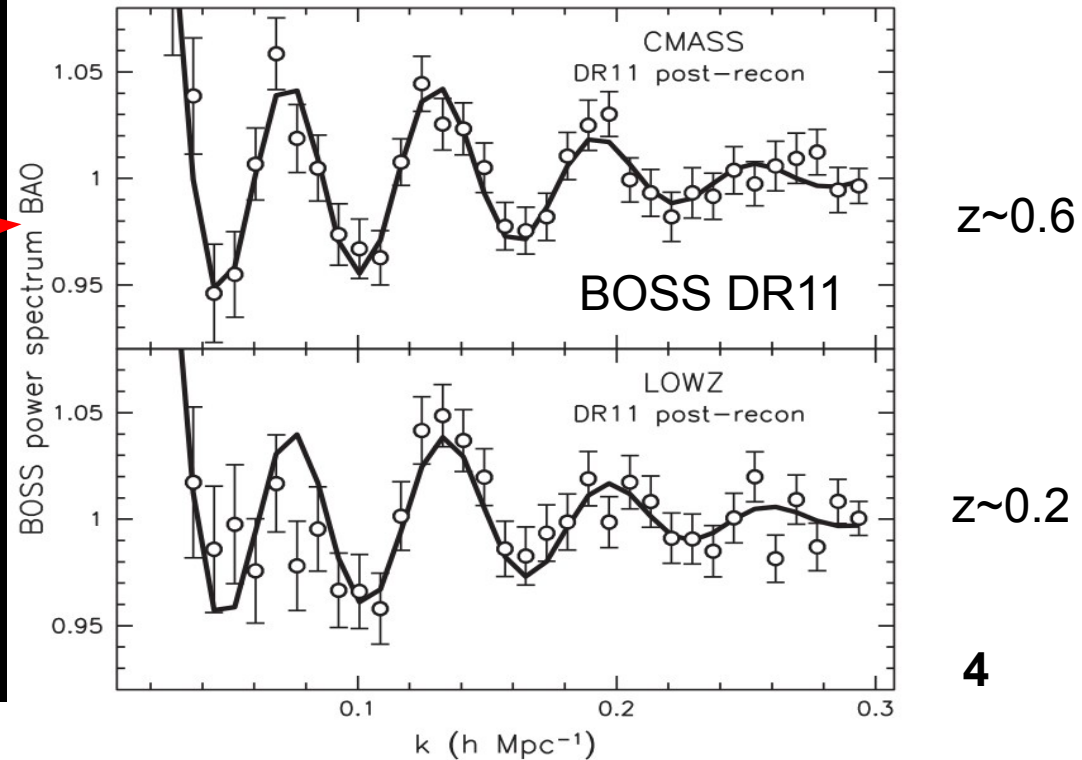
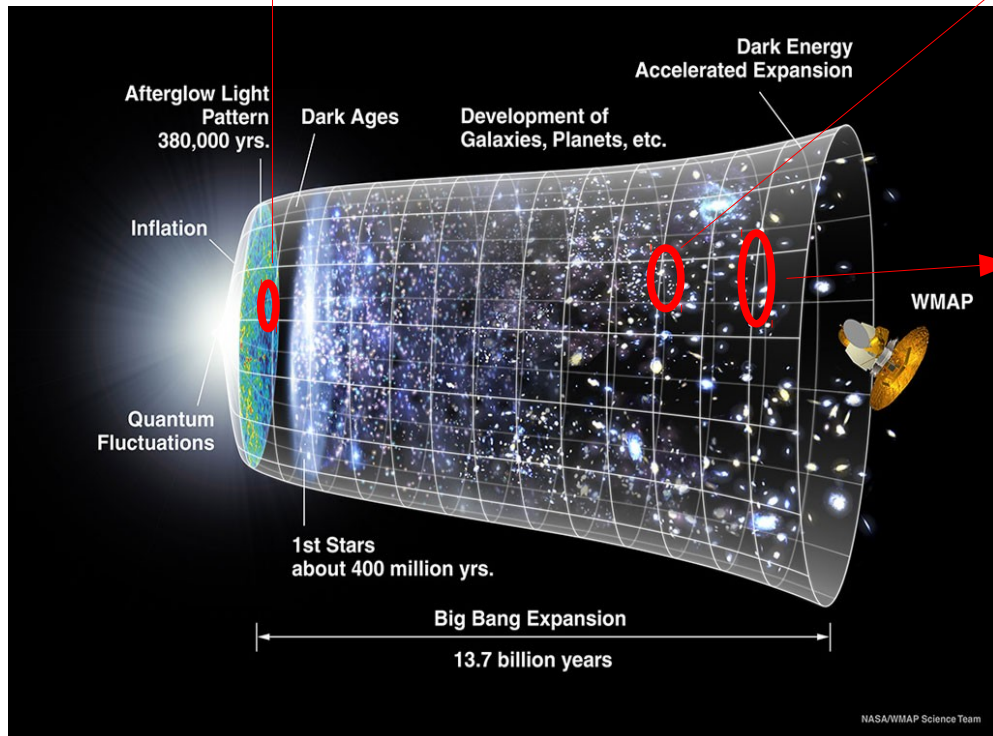
dans le CMB à $z \sim 1000$



dans la forêt Lyman-alpha à $z \sim 2.3$



dans le champ de densité des galaxies

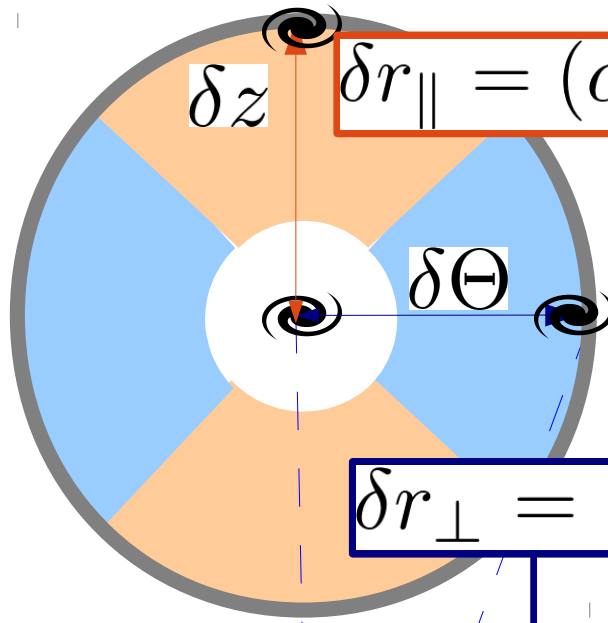


Oscillations acoustiques de baryons

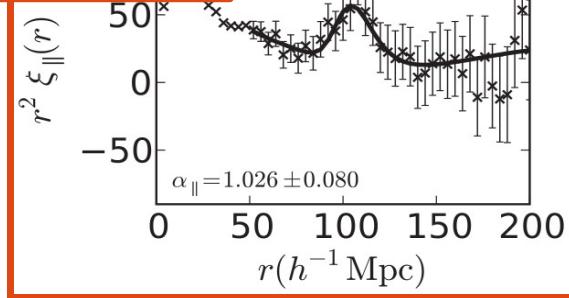
$r \sim 150$ Mpc : sonde cosmologique

2 mesures

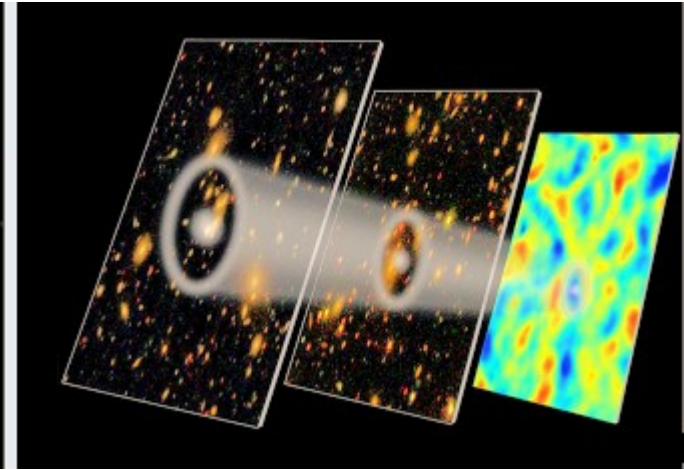
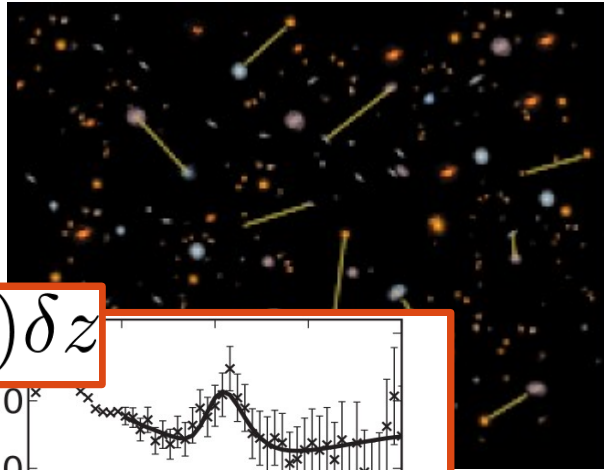
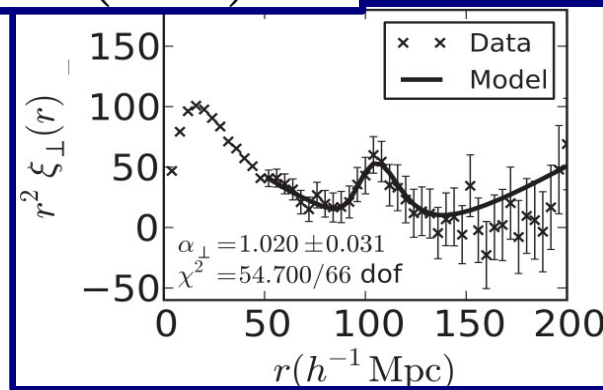
- angulaire (transverse)
- redshift (radial)



$$\delta r_{\parallel} = (c/H)\delta z$$



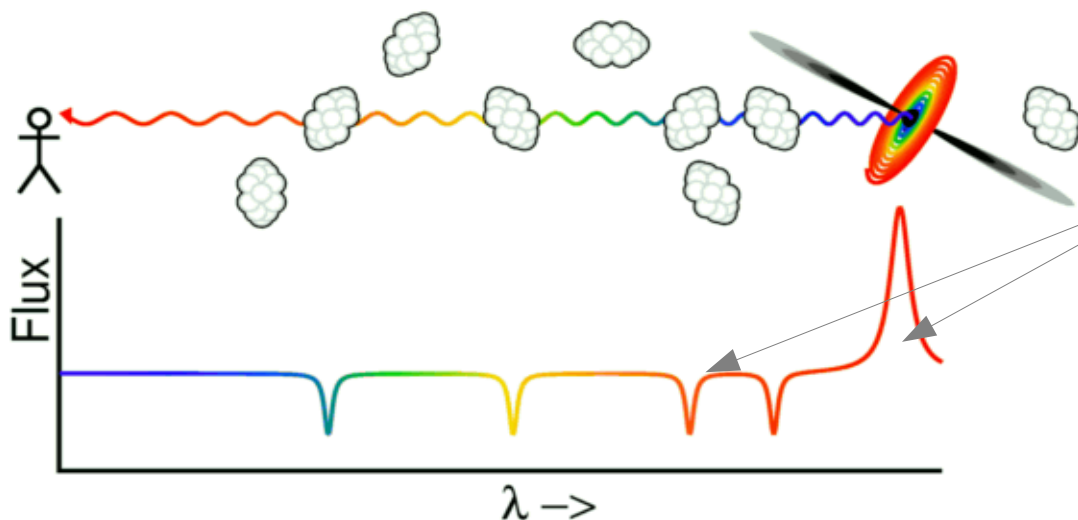
$$\delta r_{\perp} = (D_a)\delta \Theta$$



observateur

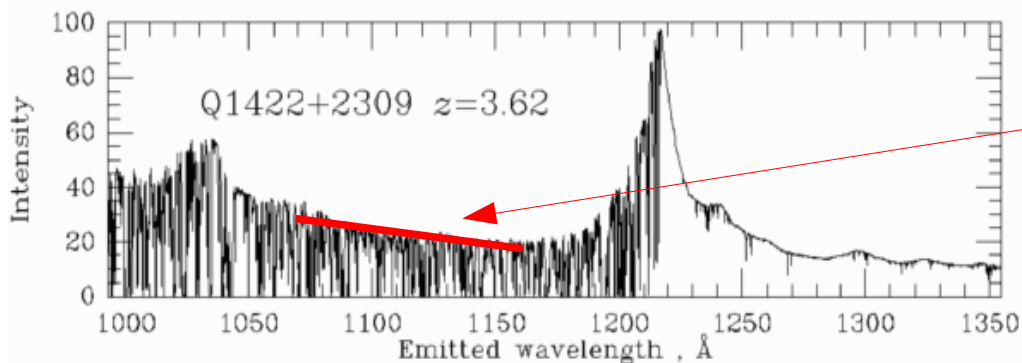
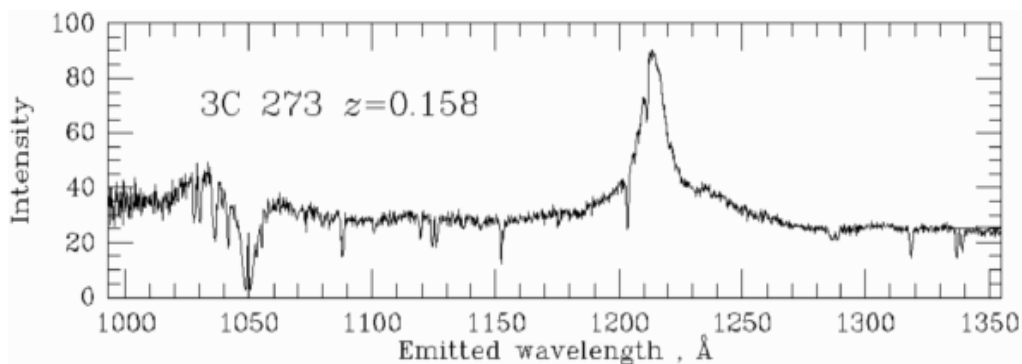
Forêt Lyman-alpha

Absorption H neutre le long de la ligne de visée de quasars à haut redshift



$$\lambda_{Ly\alpha} = 121 \text{ nm}$$

$$\lambda_{obs} = (1 + z)\lambda_{Ly\alpha}$$



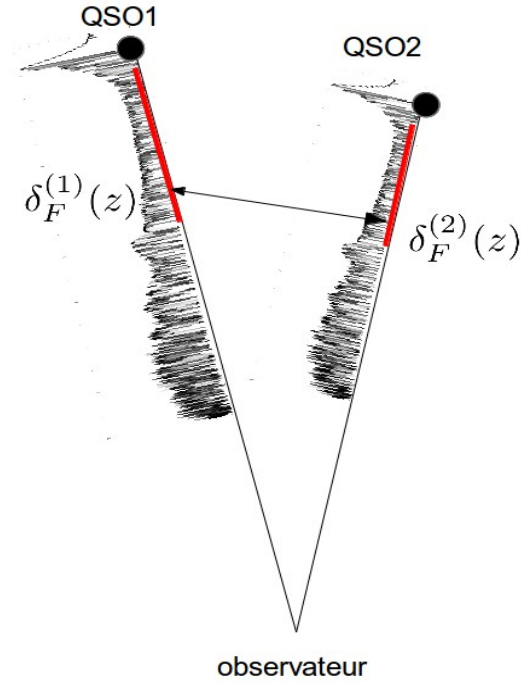
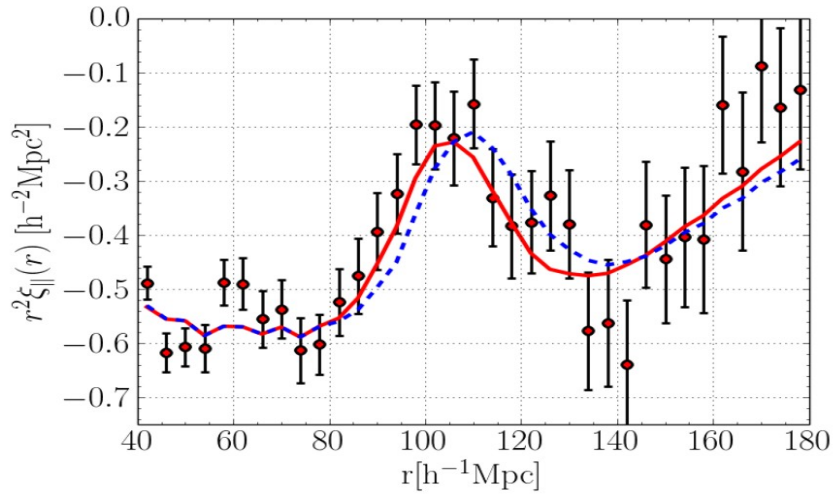
Décroissement de flux :

$$F(\lambda) \equiv \frac{f(\lambda)}{Continuum(\lambda)} = e^{-\tau(n_{HI})}$$

$$\delta_F(\lambda) = \frac{F(\lambda)}{\bar{F}(\lambda)} - 1$$

Fonction d'auto-corrélation Lyman-alpha

Delubac et al. 2014

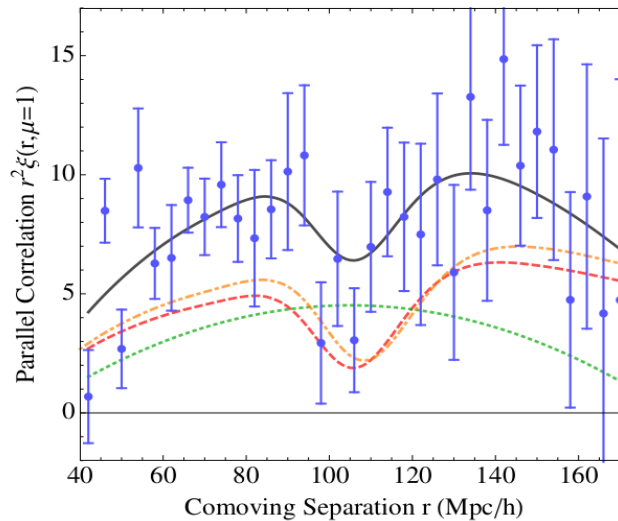
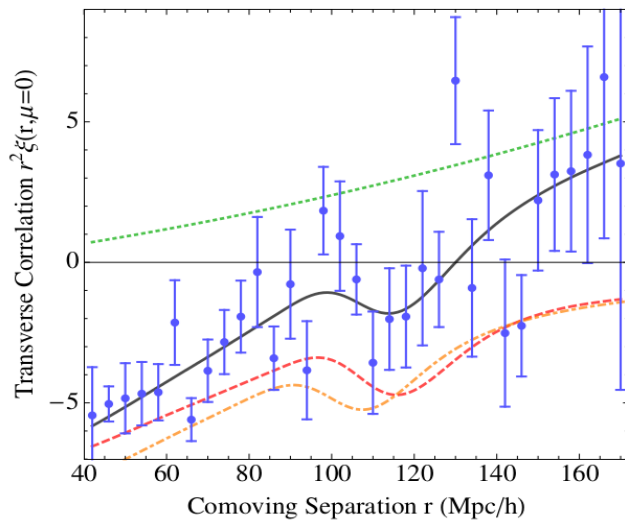
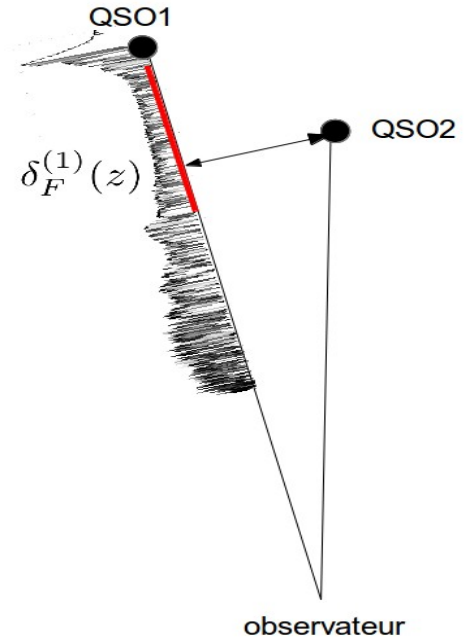


$$\xi(r_{\parallel}, r_{\perp}) = \langle \delta_1 \delta_2 \rangle (\Delta r_{1,2} \in r \text{ bin})$$

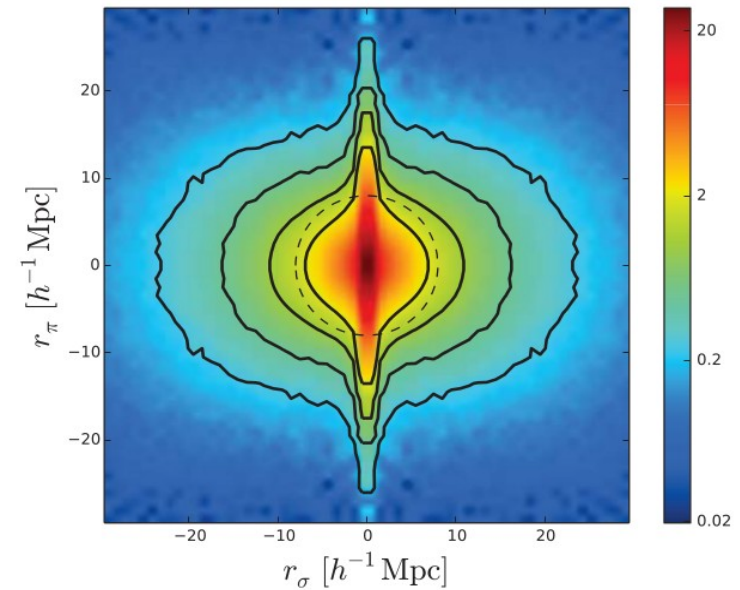
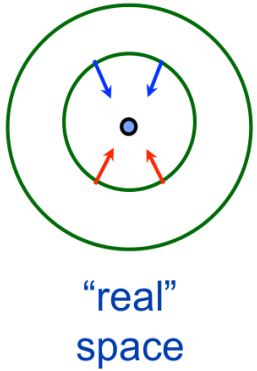
$$(\theta_{12}, z_1, z_2) \rightarrow (r_{\perp}, r_{\parallel})$$

Cross-corrélation QSO Lyman-alpha

Font-Ribera et al 2014



Autres mesures : distorsions de redshift (RSD)



BOSS DR11 - Reid et al. (2014)

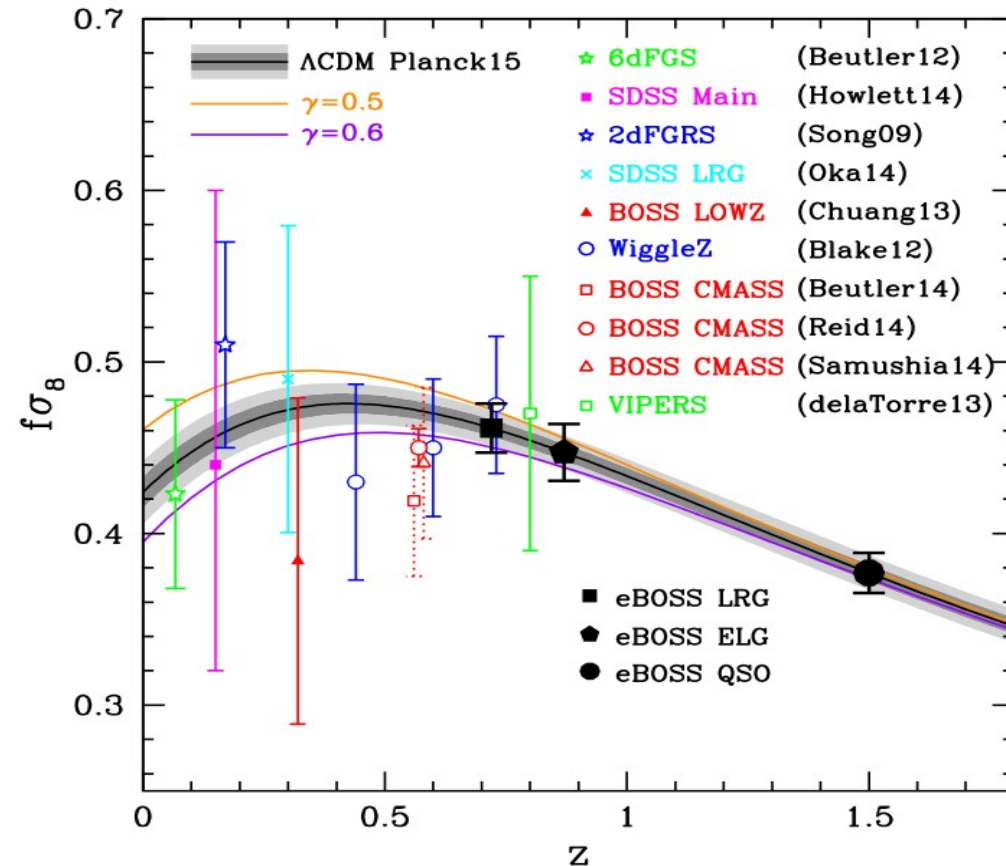
$$\delta_{gal,k}^{redshift} = b \left(1 + \frac{f}{b} \cos^2 \theta \right) \delta_{matter,k}^{real}$$

f est le taux de croissance des structures,
b le « biais » du traceur de densité de matière.

$$f \equiv \frac{d \ln D(a)}{d \ln a}$$

$$D(a) \equiv \delta(x, a = 1) / \delta(r, a)$$

Test de la relativité générale, et une contrainte
indépendante sur Omega_m



Plan

1) Oscillations de baryons & forêt Lyman-alpha

2) Résultats BOSS

3) eBOSS

4) DESI

Résultats BOSS DR11 (90% des données)

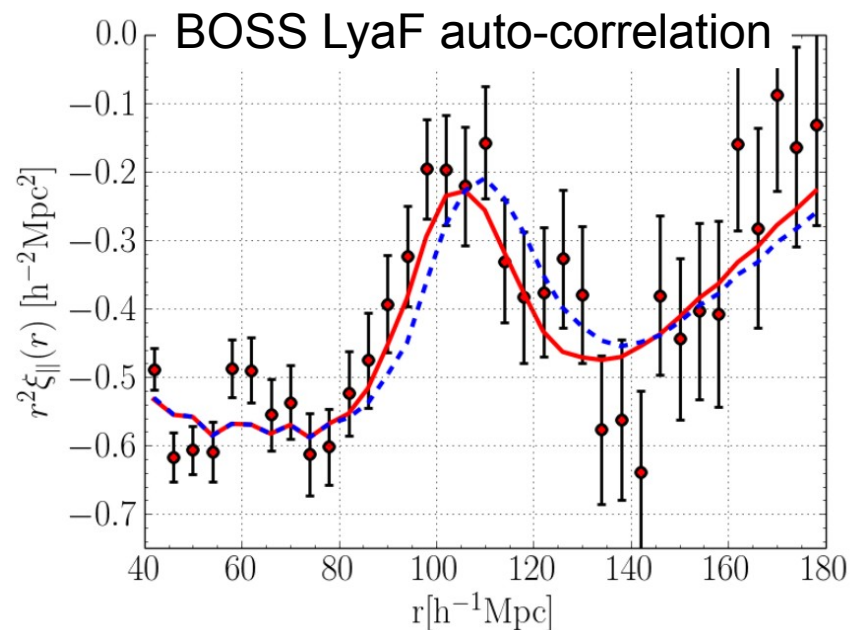
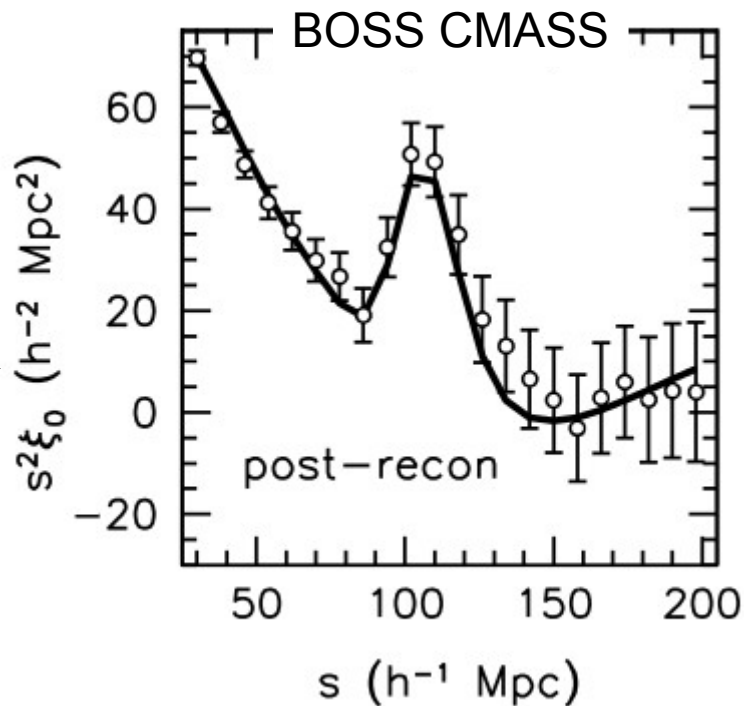
(les résultats DR12 pour les LRG sont très similaires)

$$\alpha_{\perp} \equiv [D_A/r_d] \cdot [r_d/D_A]_{fid}$$

$$\alpha_{\parallel} \equiv [1/(r_d H)] [r_d H]_{fid}$$

incertitudes statistiques ($\alpha_{iso} = f(\alpha_{\perp}, \alpha_{\parallel})$)

BOSS DR11 sub-sample	z	α_{iso}	α_{\perp}	α_{\parallel}	$corr(\alpha_{\perp}, \alpha_{\parallel})$
BOSS LOWZ sample	0.32	0.020
BOSS CMASS sample	0.57	0.010	0.014	0.035	-0.52
LyaF auto-correlation	2.34	0.021	0.055	0.031	-0.43
LyaF-QSO cross correlation	2.36	0.019	0.037	0.033	-0.39
Combined LyaF	2.34	0.013	0.032	0.022	-0.48

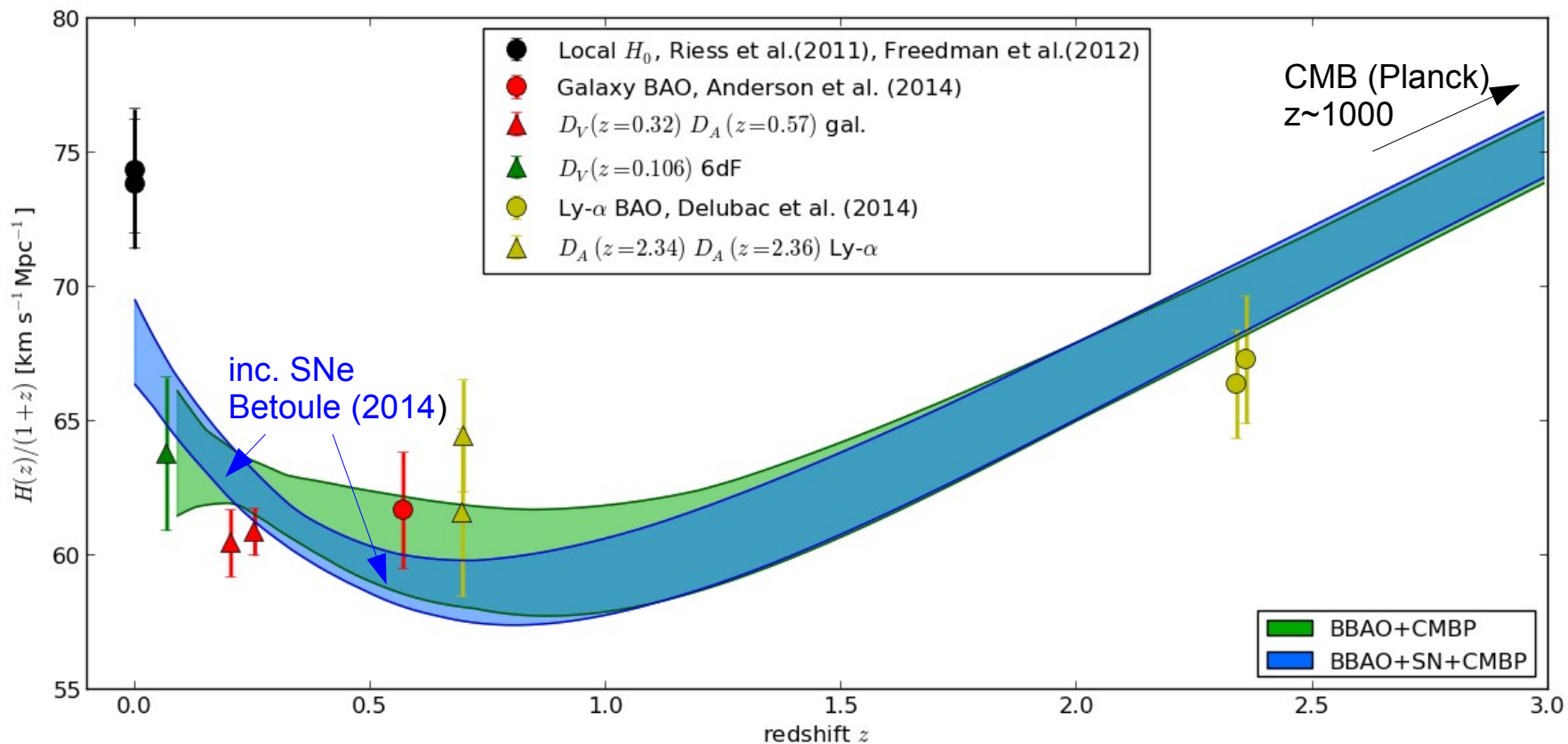


Contraintes sur un modèle avec $\Omega_m, \Omega_k, w_0, w_a$ libres

BOSS DR11 (90% des données) + SNe (Betoule 2014) + Planck (1st release)

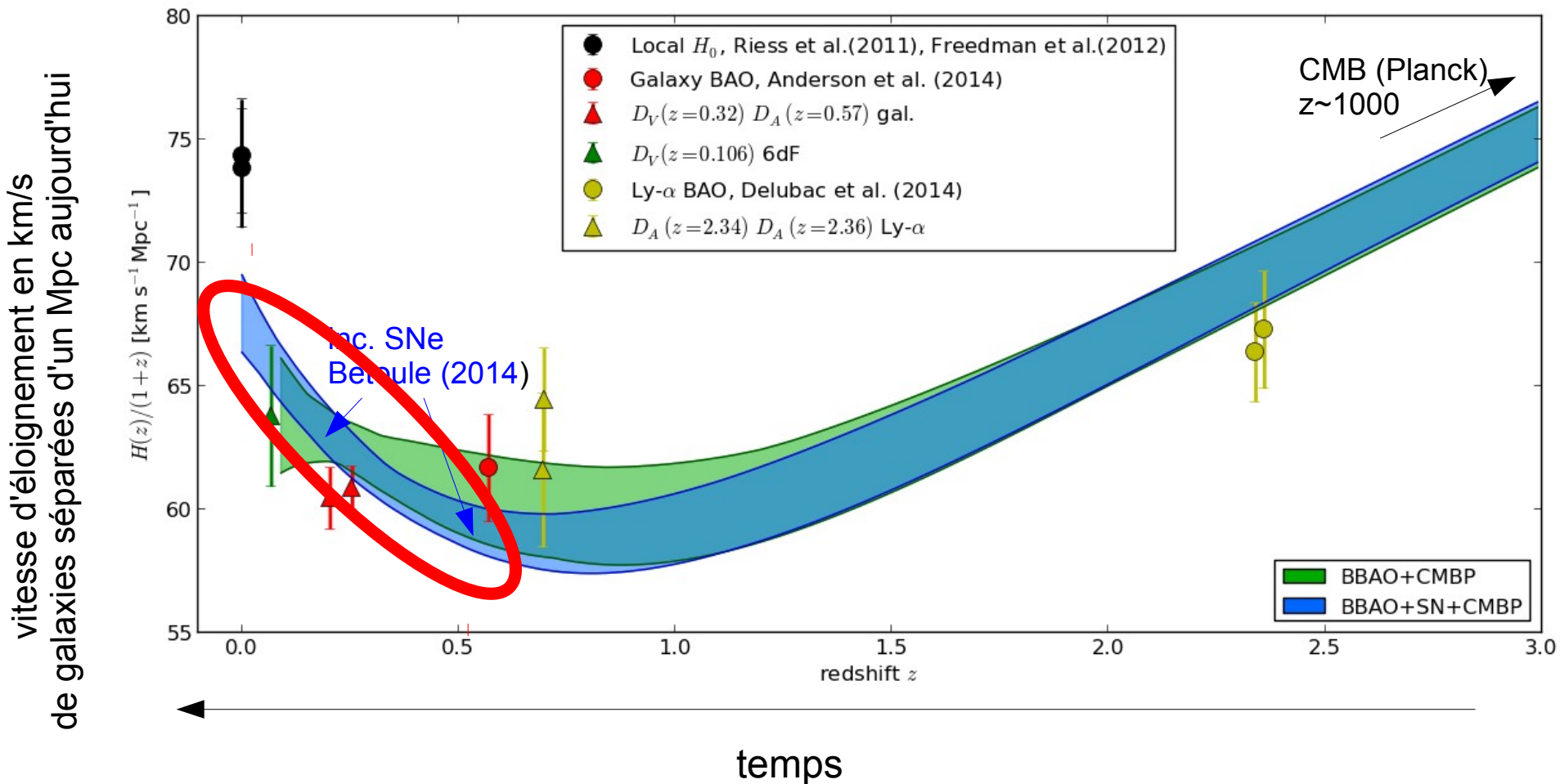
($D_A(z)$ et $D_V(z)$ sont représentés graphiquement par une mesure effective de $H(z' < z)$)

vitesse d'éloignement en km/s
de galaxies séparées d'un Mpc aujourd'hui



Contraintes sur un modèle avec $\Omega_m, \Omega_k, w_0, w_a$ libres

BOSS DR11 (90% des données) + SNe (Betoule 2014) + Planck (1st release)
($D_A(z)$ et $D_V(z)$ sont représentés graphiquement par une mesure effective de $H(z' < z)$)

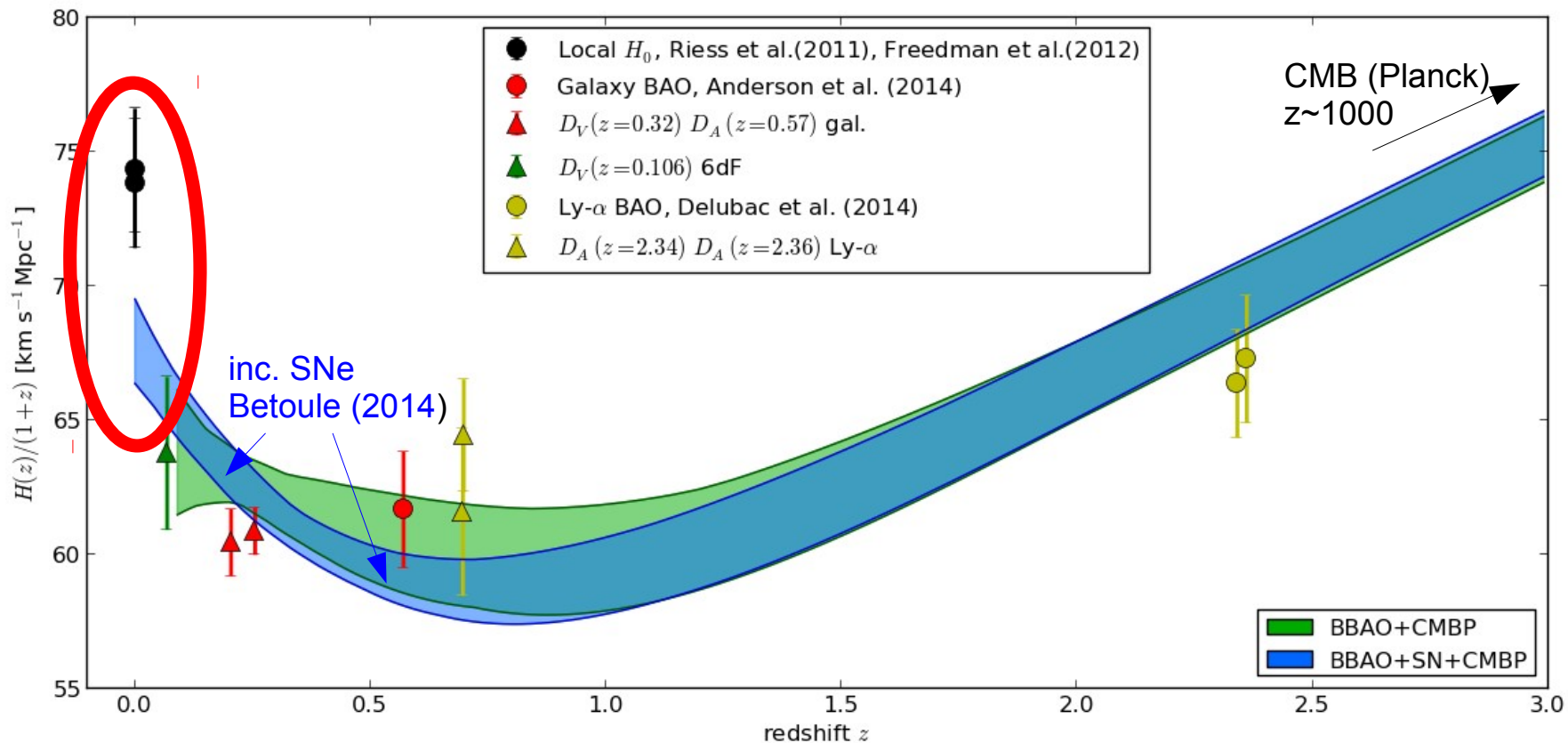


**Confirmation de l'accélération de l'expansion avec CMB+BAO
découverte avec les SNe Ia**

Contraintes sur un modèle avec $\Omega_m, \Omega_k, w_0, w_a$ libres

BOSS DR11 (90% des données) + SNe (Betoule 2014) + Planck (1st release)
 ($D_A(z)$ et $D_V(z)$ sont représentés graphiquement par une mesure effective de $H(z'<z)$)

vitesse d'éloignement en km/s
de galaxies séparées d'un Mpc aujourd'hui

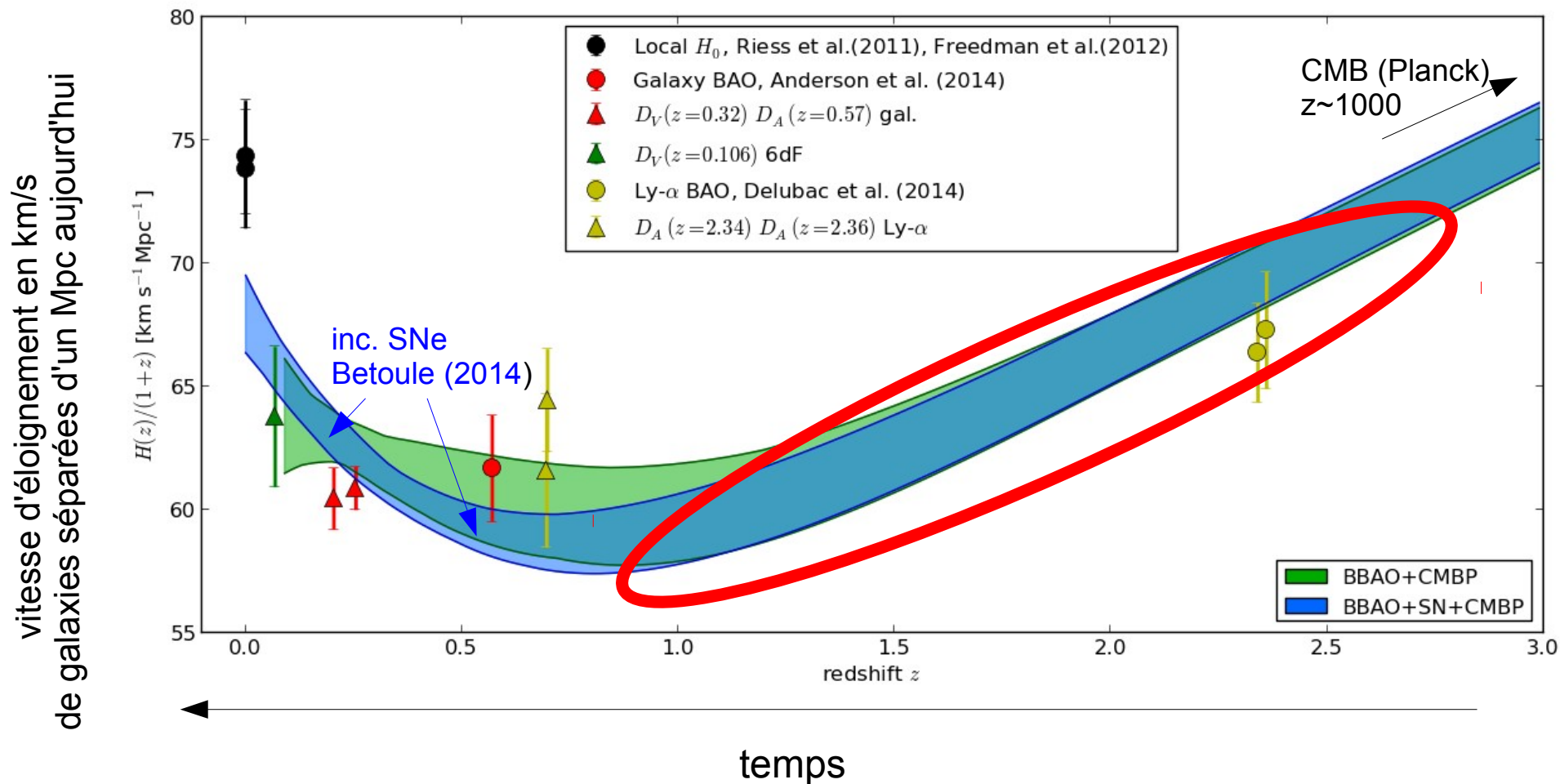


Mesure de H_0 avec une échelle de distance inversée (SNe<-BAO<-CMB)
 comparée avec échelle de distance traditionnelle (Maser->Cepheids->SNe)

Contraintes sur un modèle avec $\Omega_m, \Omega_k, w_0, w_a$ libres

BOSS DR11 (90% des données) + SNe (Betoule 2014) + Planck (1st release)

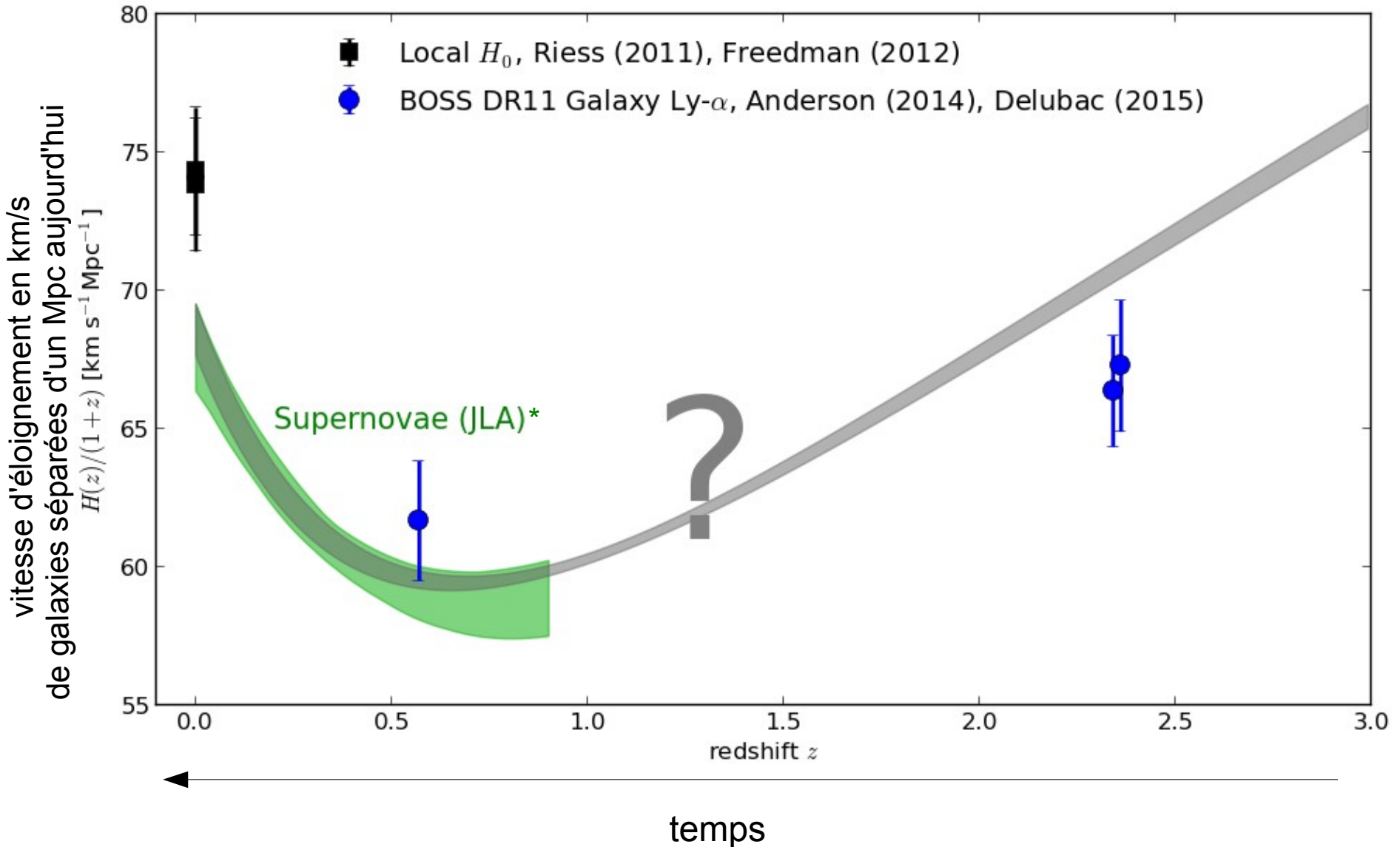
$D_A(z)$ et $D_V(z)$ sont représentés graphiquement par une mesure effective de $H(z' < z)$ qui fournit la même contrainte Ω_m, Ω_k



Décélération de l'expansion à $z > 0.7$: Lyman-alpha (sinon extrapolation jusqu'au CMB)
 $H(z) \sim H_0 \Omega_m^{1/2} (1+z)^{3/2}$

Contraintes sur $H(z)$

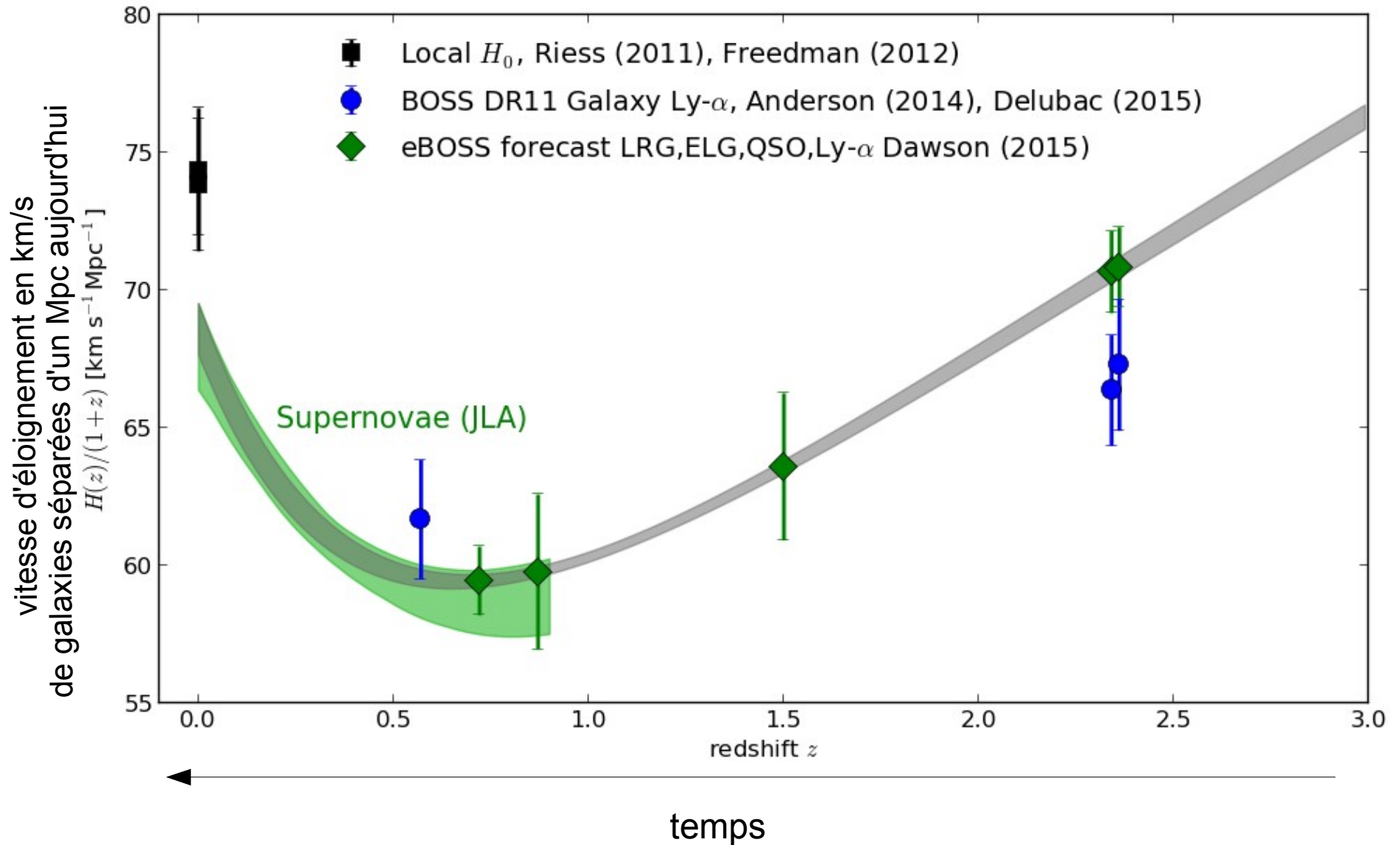
BOSS



(*) Supernovae JLA, Betoule (2014), normalisées par les BAO+CMB, voir Aubourg (2015)

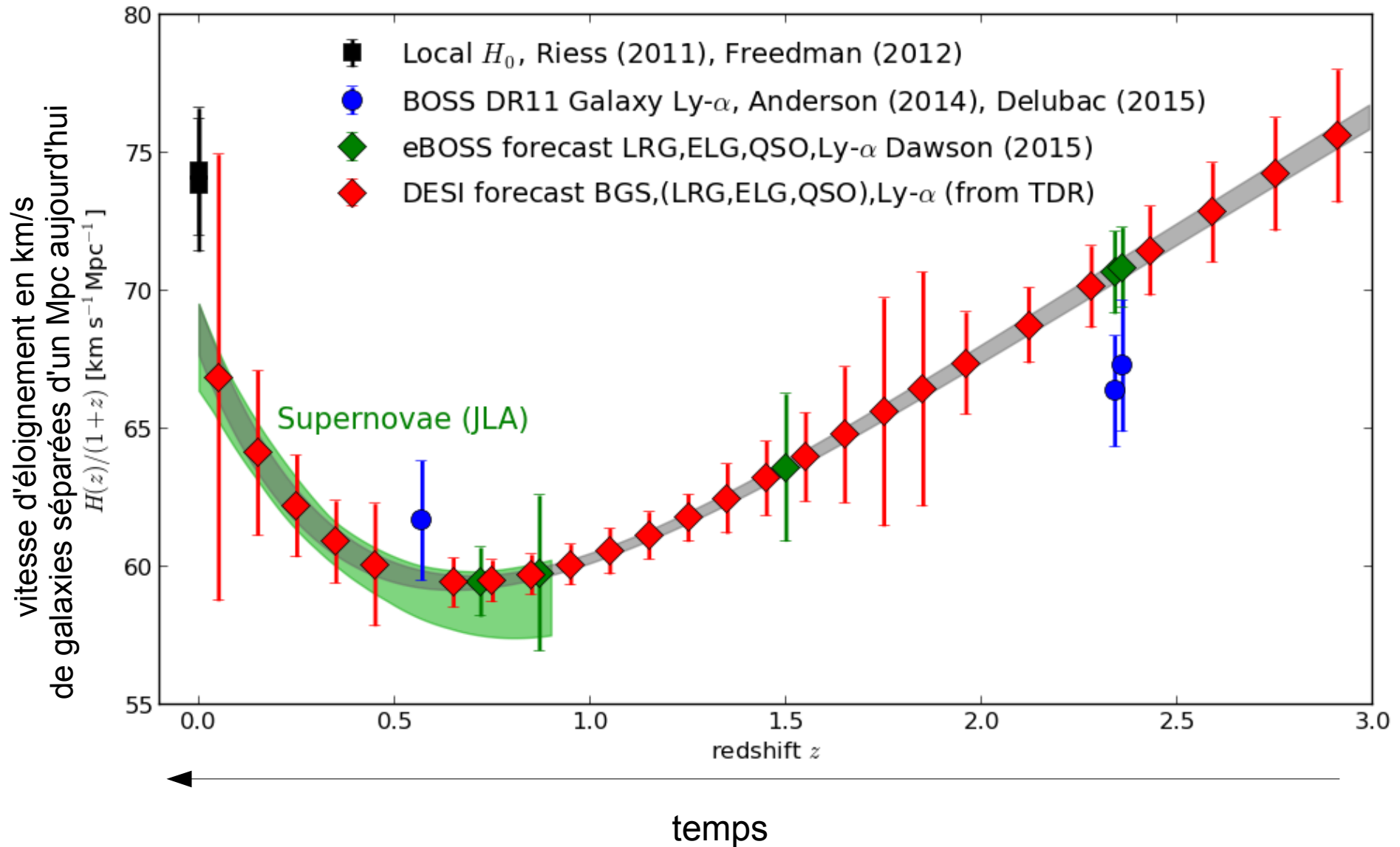
Contraintes sur $H(z)$

BOSS+eBOSS



Contraintes sur $H(z)$

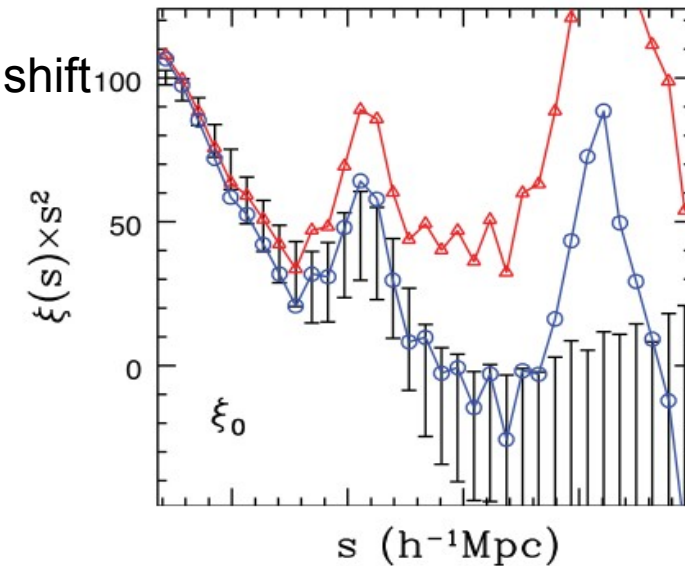
BOSS+eBOSS+DESI



BAO: faibles incertitudes systématiques

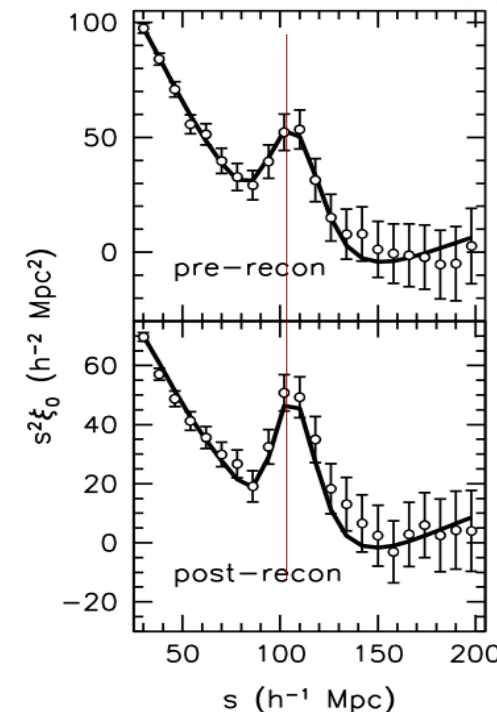
Incertitudes de mesure d'un pic de corrélation angulaire et en redshift

- pour les galaxies :
 - variations d'efficacité du « targeting » et mesure de redshift
 - « collisions » de fibres (galaxies trop proches)
 - incertitude sur le pic BAO négligeable $\sim 0.1\%$
(Ross 2012, Anderson 2012)
- pour la forêt Lyman-alpha :
 - plusieurs sources de bruit instrumentaux corrélés
 - incertitudes $< 0.5\%$ (DR12 paper in prep.)



Incertitudes d'interprétation des mesures

- pour les galaxies :
 - faible impact des aspects non-linéaires de la formation des structures
 - correction $\sim 0.3\%$ sur la position du pic
- pour la forêt Lyman-alpha :
 - pollution du signal par des absorptions par d'autres éléments (Si-II Si-III C).
 - correction $\sim 1\%$ (DR12 paper in prep.)



Galaxies systématiques (connues) $< 0.3\%$, Lya $< 1\%$

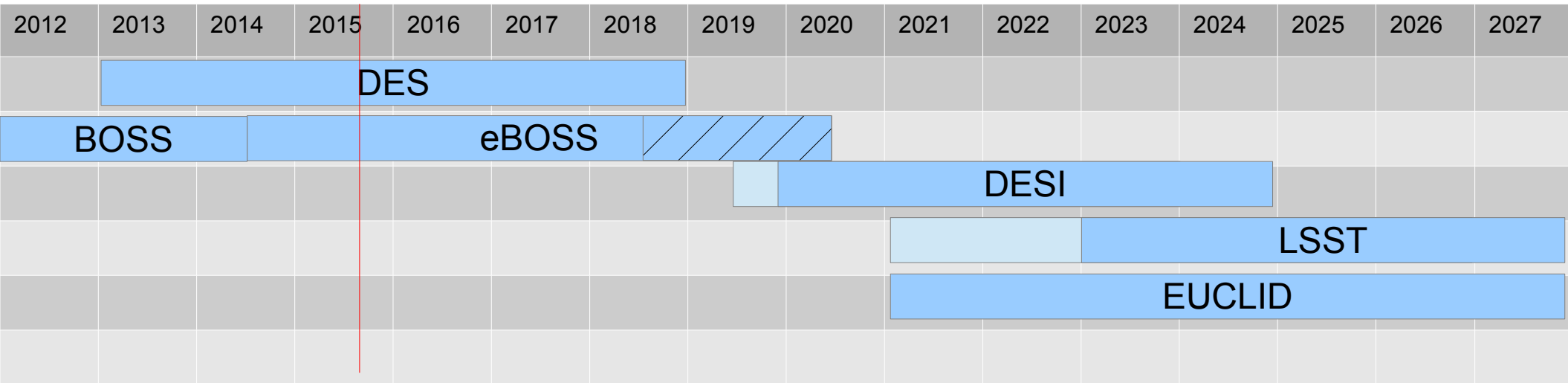
**A titre de comparaison, pour les SNe, incertitude de calibration $\sim 2.5\%$
sur les distances entre $z=0$ et $z=1$.**

Résumé :

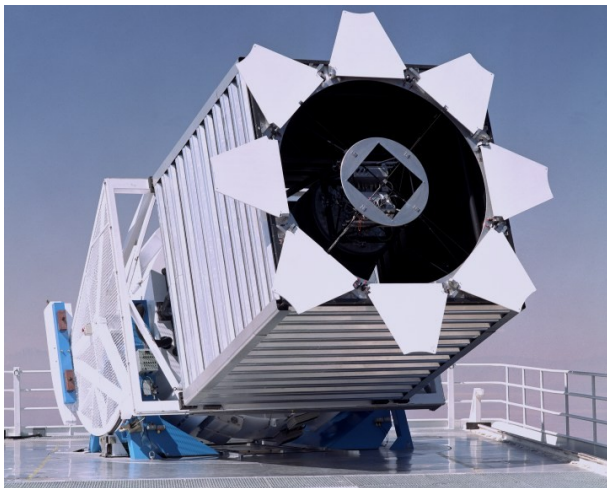
Les BAO sont une sonde incontournable pour la physique l'Energie Noire.

- sonde complémentaire aux SNe Ia :
 - mesure absolue de distance (avec CMB)
 - mesure « instantanée » du taux d'expansion $H(z)$
 - précision statistique plus faible que les SNe à bas z ($z < 0.2$)
 - **plus performant à $z > 0.8$** (pour les projets envisagées aujourd'hui)
- les BAO dans les forêts Lyman-alpha des quasars donne accès aux $z > 2$
- les BAO ont de faibles incertitudes systématiques qui rendent les projections très crédibles.
- les grands relevés spectroscopiques offrent d'autres observables :
 - **les distorsions de redshift permettent de tester la relativité générale**
 - contraintes sur la masse des neutrinos
(avec le clustering des galaxies et Lyman-alpha)

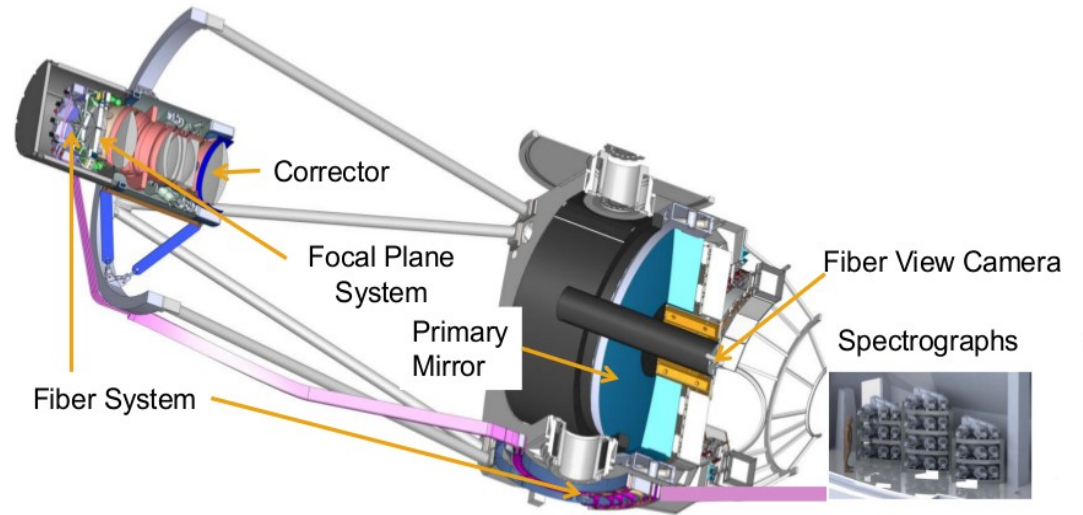
Projets eBOSS & DESI



eBOSS (as BOSS)
 1000 fibres
 Télescope SDSS 2.5m



DESI : 5000 fibres, 3 voies, télescope Mayall de 4m



Plan

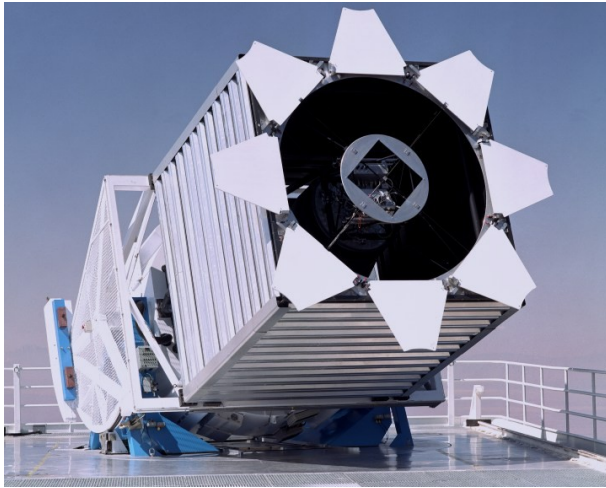
1) Oscillations de baryons & forêt Lyman-alpha

2) Résultats BOSS

3) eBOSS

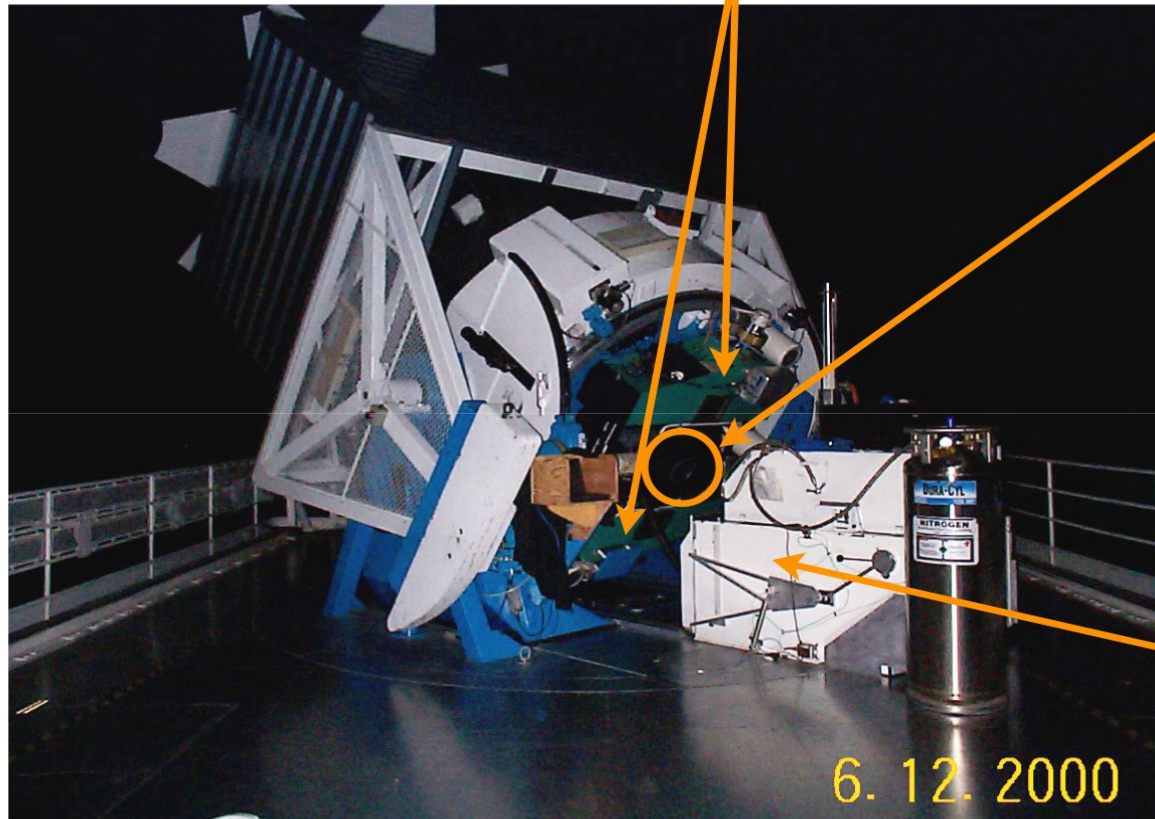
4) DESI

BOSS/eBOSS instrumentation



- SDSS, Apache Point, Nouveau Mexique, **2.5m** de diamètre
- Plaque percée accueillant **1000 fibres** au plan focal Cassegrain
- 2 spectrographes (500 fibres chacun), 2 bras bleu et rouge
- Couverture spectrale 360nm - 1micron

Two double-spectrographs
(permanently mounted)



3° focal plane:
Either imaging camera
or 1 of 8 spectro cartridges
(swapped during night)



“Doghouse”:
Stores imaging camera
when not in use

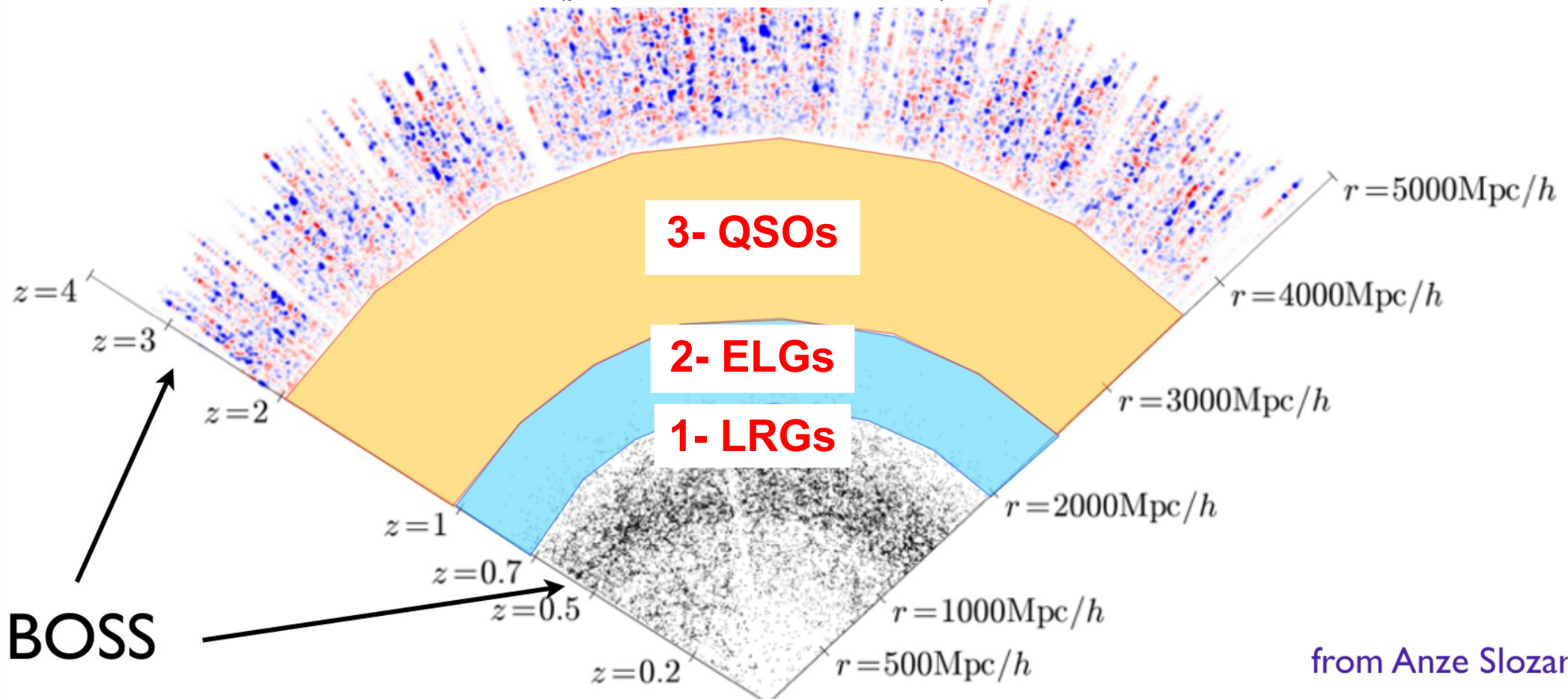
eBOSS

- même instrument que BOSS
- d'autres cibles
- 2014-2019

Premier grand relevé spectroscopique à $0.7 < z < 2$

4- Forêt Lyman-alpha

(plus de QSO, meilleur S/B)



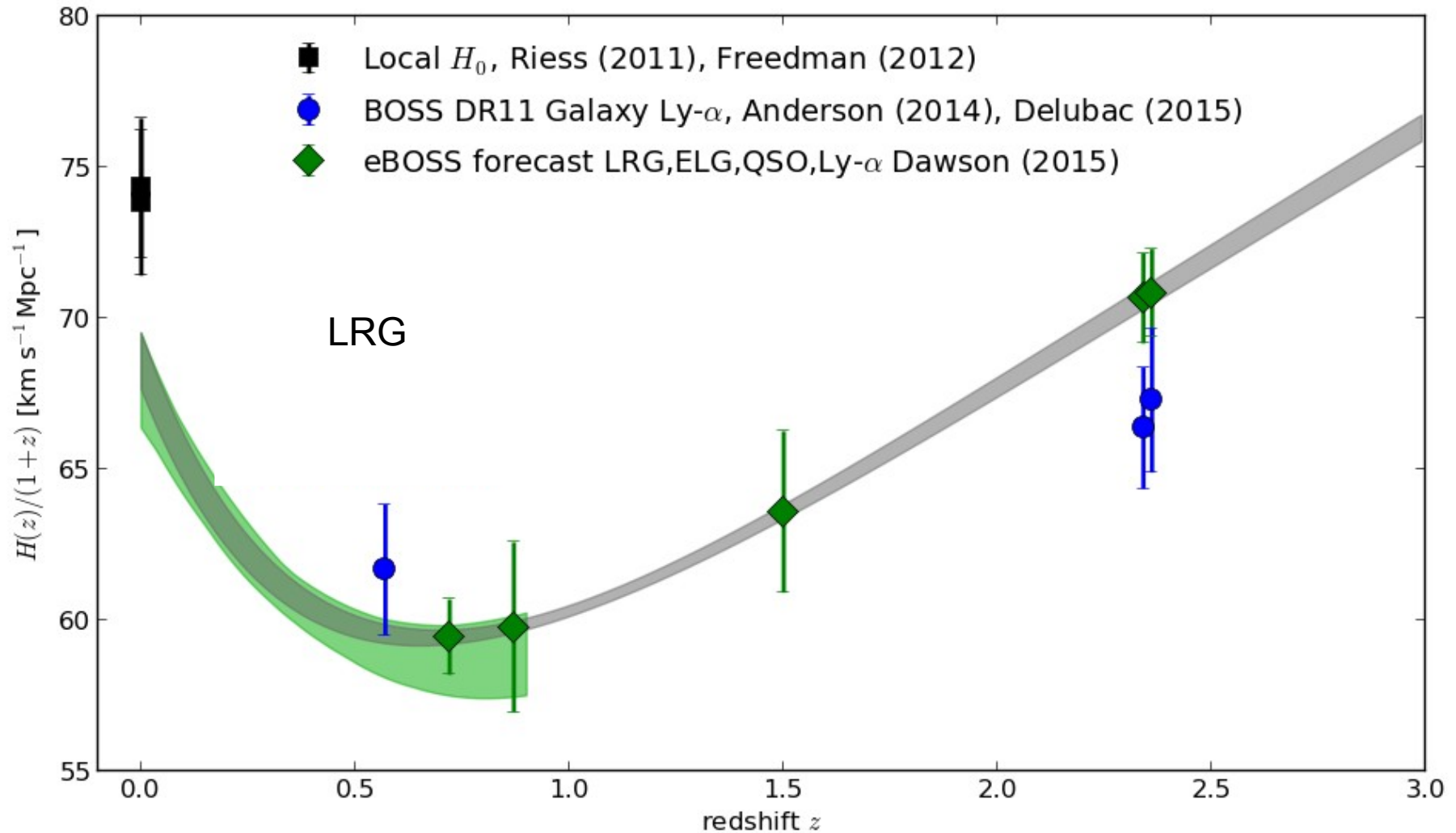
LRG = Galaxies rouges et lumineuses (massives et passives)

ELG = Galaxies à raies d'émission (plus facile à détecter en spectroscopie à haut redshift)

eBOSS Objectifs scientifiques BAO

		($D_a(z), H(z)$) (%)
LRG	$z \sim 0.72$	(1.2, 2.4)
ELG	$z \sim 0.87$	(3.1, 4.7)
QSO	$0.9 < z < 2.2$	(2.8, 4.2)
Ly α	$z \sim 2.4$	(2.2, 1.5)

+ distorsions de redshift,
non-gaussianités, masse
des neutrinos ...



eBOSS : collaboration

- * Large collaboration internationale
(dominante US, mais aussi UK, Espagne, France)
- * En France : Organisation autour d'un « French Participation Group » qui permet une réduction des running costs.

20 personnes (chercheurs+post-docs)
IN2P3 : LPNHE(2) , APC(2) , CPPM(3)
INSU : IAP(2) , LAM(4)
CEA : 7

MoU signé en Juillet 2015

Sources de financement variées

BOSS : forte visibilité des groupes français

- targeting QSO (CEA), ELG (CPPM)
- Lyman-alpha (APC,CEA,IAP)

- * Busca et al (2013) : découverte des BAO en Ly α
- * Delubac et al (2015) : H(z=2.3) à 2.2%
- * Papier DR12 en préparation, avec LPNHE

eBOSS : activités à l'IN2P3 : APC, CPPM, LPNHE

- Poursuite de l'analyse Lyman-alpha

(estimateur optimal à définir, meilleure modélisation des distorsions induites par la mesure, meilleure modélisation de la contamination par les transitions Si C, poursuite de l'étude des systématiques instrumentales)

objectif : mesure combinée des BAO à 1% à z=2.3

(auto-corrélation et cross-corrélation avec densité des quasars, radiale et transversale)

- Analyse clustering QSO

- Analyse du galaxy clustering (BAO, redshift space distortions) à Marseille

- Contribution in-kind au pipeline de données spectroscopie

Plan

1) Oscillations de baryons & forêt Lyman-alpha

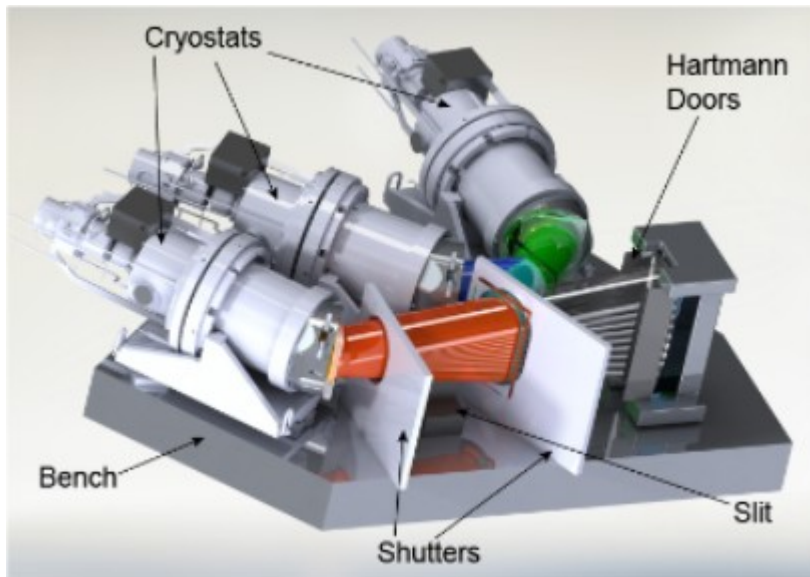
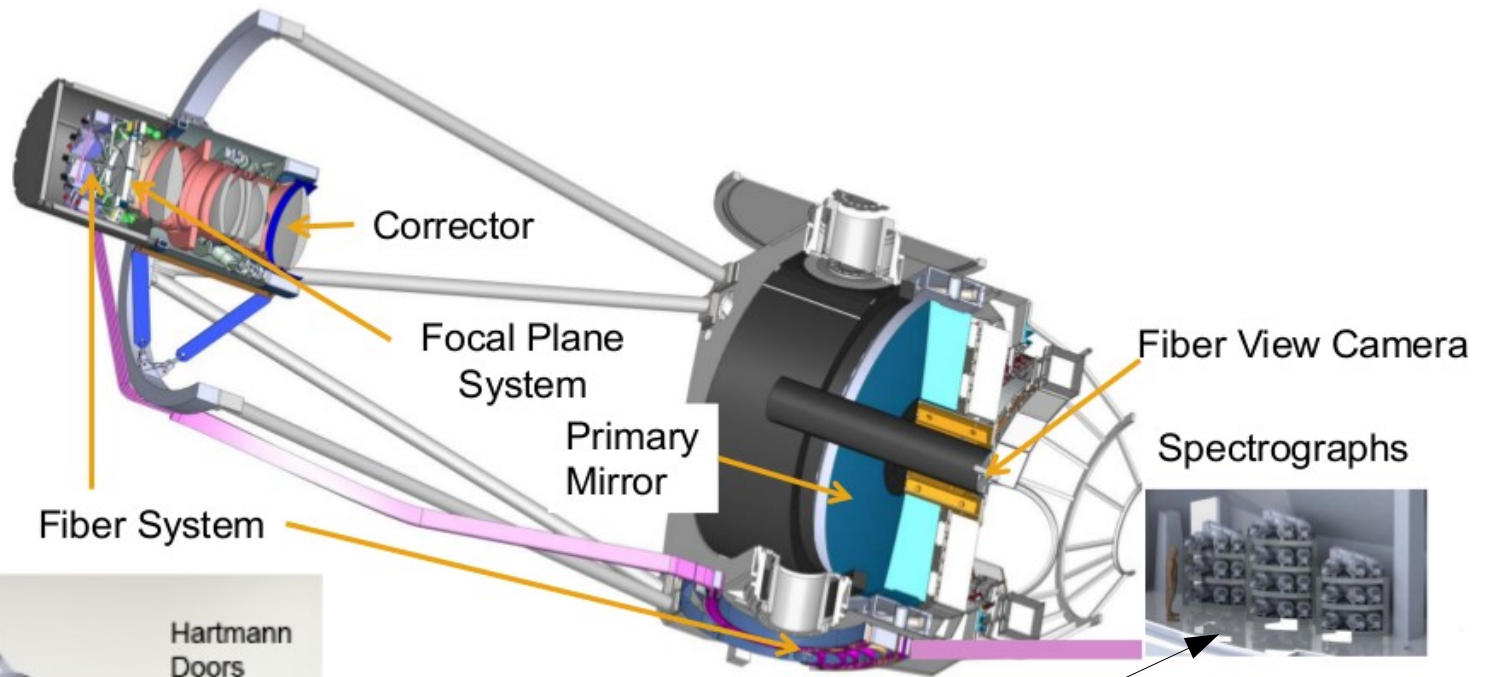
2) Résultats BOSS

3) eBOSS

4) DESI

DESI

- Projet porté par le DOE , première lumière 2019
- Positionneur de 5000 fibres au foyer primaire du Mayall (4m) à Kitt Peak
- 10 spectrographes de 500 fibres avec 3 voies de lecture (30 cameras, CCDs) dans une pièce dédiée avec contrôle de température (assure la stabilité de l'optique)



x10

DESI a passé la revue CD2 en Juillet, design avancé, de nombreux éléments sont en fabrication

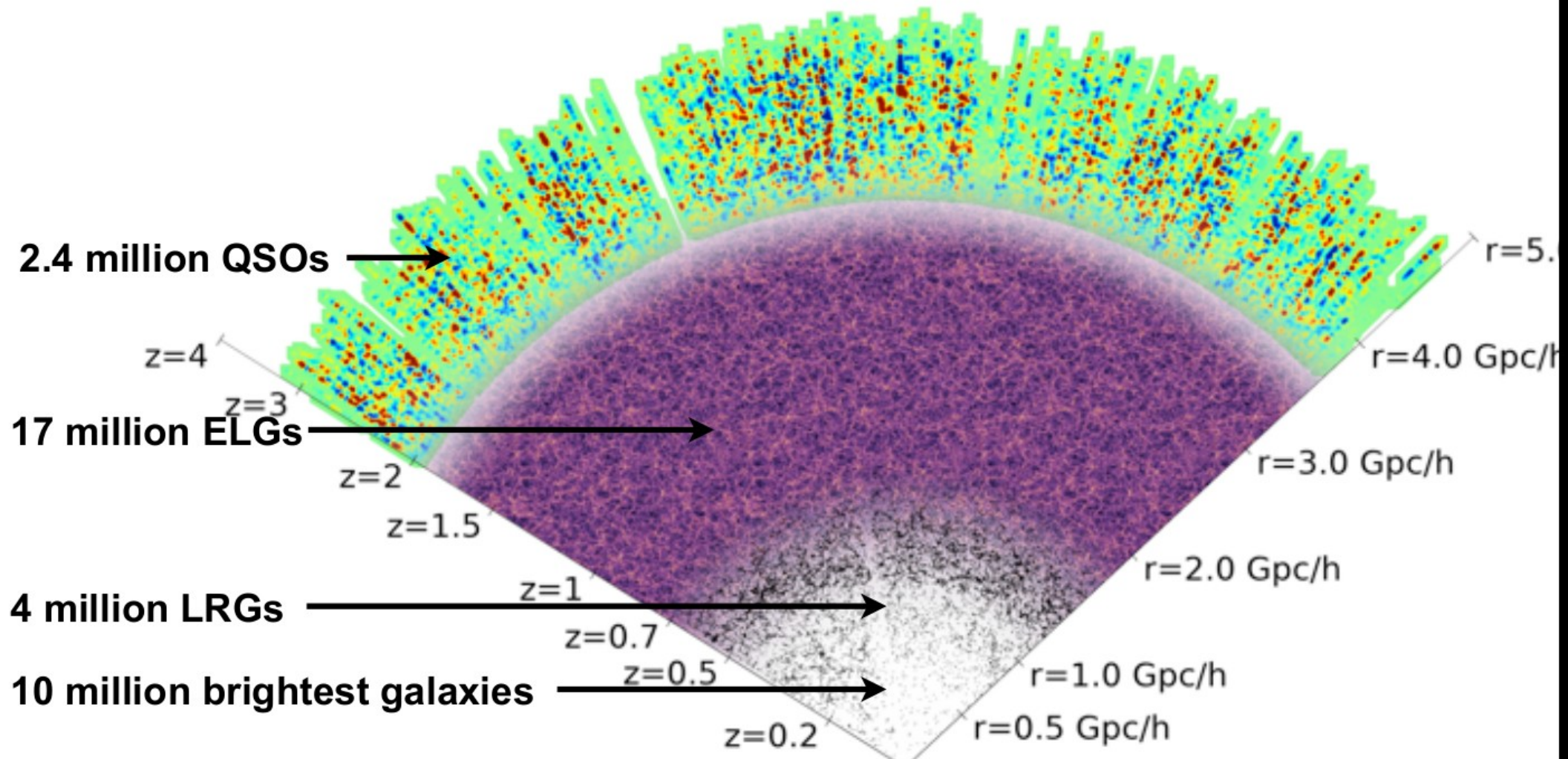
- plan de financement détaillé : signé mi-septembre 2015 par le DOE
- revue CD3, Mai 2016, **commissioning mi-2019, début du survey fin-2019**

WBS	Description	Scheduled Finish
1.6	L2: Prototype Detectors and Front-End Electronics Delivered to Cryostat Supplier	Dec-15
1.5	L2: 50 Km Fiber Received and Verified	Feb-16
1.1	L2: All Interface Control Documents Completed and Approved	Apr-16
1.2	L2: Fused Silica Lenses Ground and polished	May-16
1.2	L2: Fused Silica lenses Coated	Aug-16
1.8	L2: Preliminary Spectro pipeline running end-to-end on DESI Sims	Oct-16
1.6	L2: EM Spectrograph Fully Verified	Nov-16
1.2	L2: Lenses polished and delivered to FNAT	Dec-16
1.2	L2: Lenses Coated	Jan-17
1.3	L2: Lenses Ground and Polished	Feb-17
1.2	L2: Lenses Coated	Mar-17
1.6	L2: All DOE Equipment Delivered and Verified	Aug-19
1.5	L2: All Commissioning Tasks Complete	Oct-19
1.4	L2: Lenses Coated	Nov-17
1.5	L2: First Science Slithead (with fiber from cable) Fabrication	Sep-17
1.5	L2: PFA manufacture Complete	Sep-17
1.7	L2: ICS Prototype Development Complete	Sep-17
1.2	L2: Lens Installation into Cells Complete	Oct-17
1.2	L2: Lens Alignment in Barrel Complete	Oct-17
1.9	L2: Mayall Shutdown Begins	Nov-17
1.3	L2: Full Assembly and Verification of Ring, Cage and Barrel or Prototype Barrel	Jan-18
1.9	L2: Mayall Facility Preparations Complete	Jan-18

WBS	Description	Scheduled Finish
1.9	L2: All DOE Equipment Delivered and Verified	Aug-19
1.9	L2: All Commissioning Tasks Complete	Oct-19

DESI spectroscopic survey 14000 deg²

SDSS $\sim 2h^{-3}\text{Gpc}^3$ \rightarrow BOSS $\sim 6h^{-3}\text{Gpc}^3$ \rightarrow DESI $50h^{-3}\text{Gpc}^3$



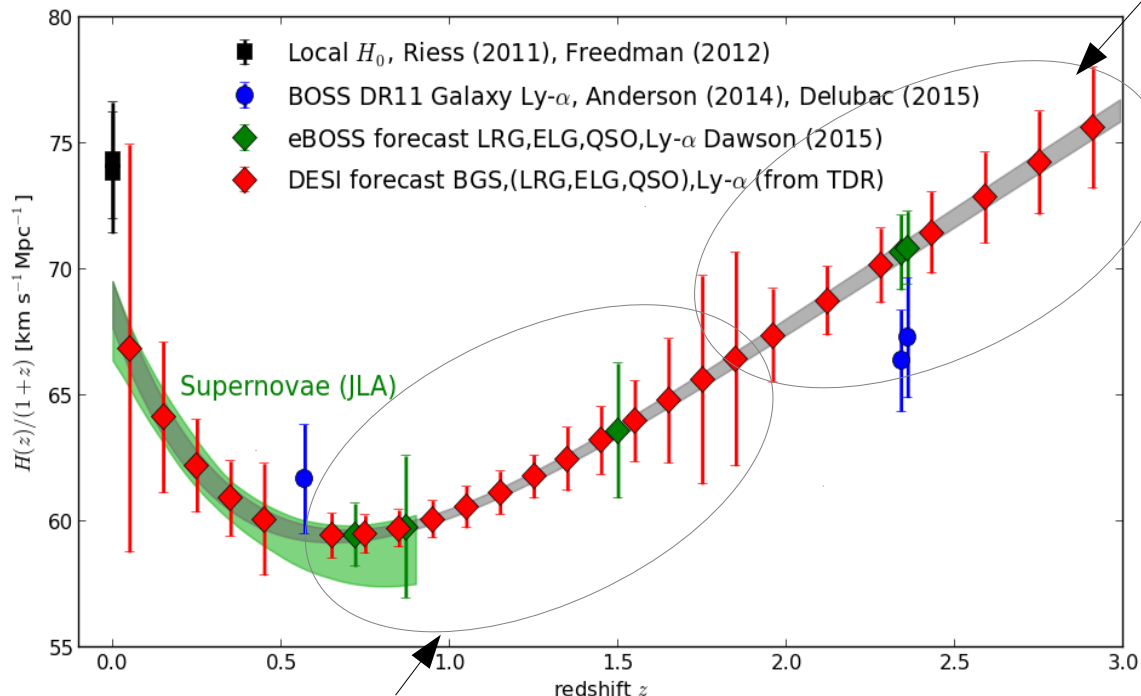
+ imaging survey :

14000 deg² in g,r,z at a depth of 24, 23.6, 23.0 mags

Prédictions pour DESI

(Technical Design report <http://desi.lbl.gov/tdr>)

Lyman-alpha (auto-correlation)

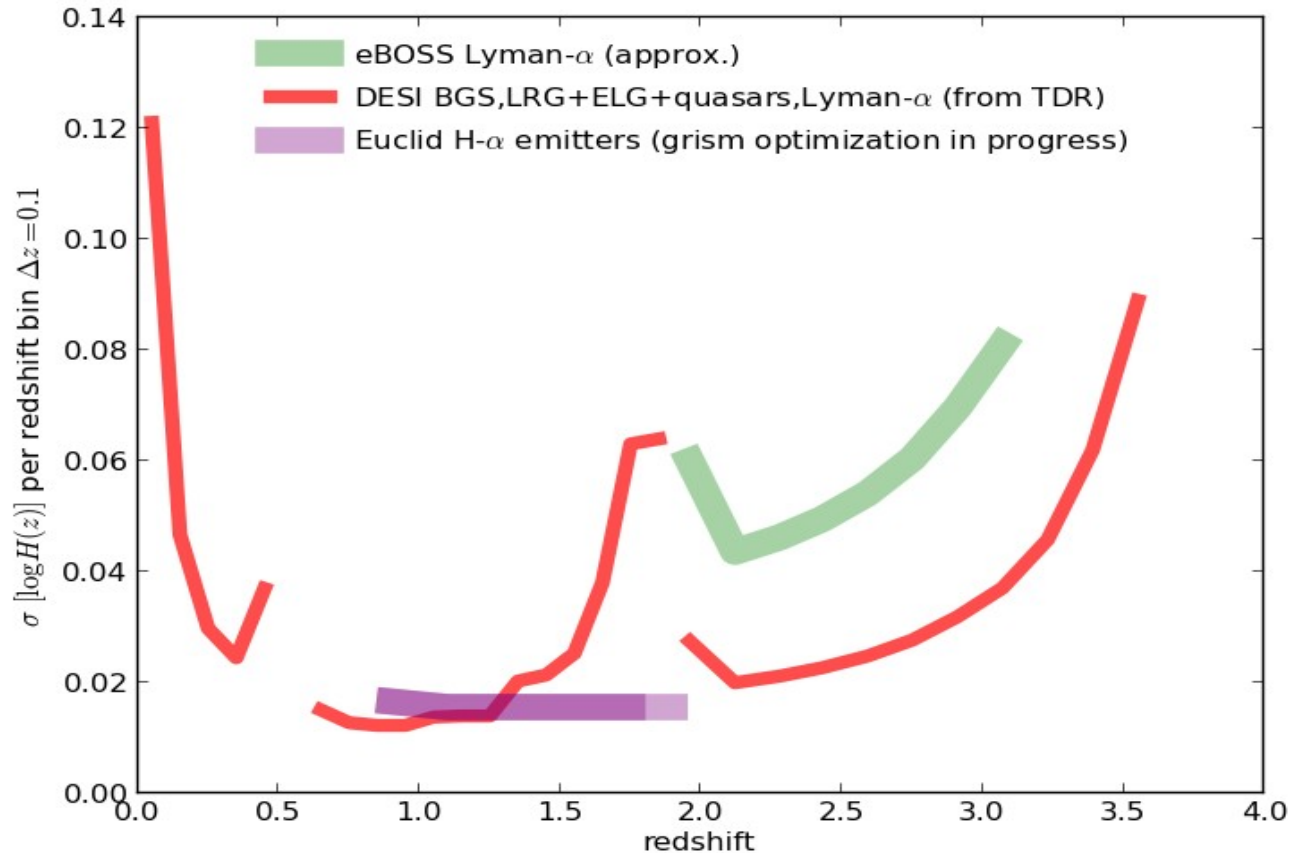


z	$\frac{\sigma_{R/s}}{R/s}$ (%)	$\frac{\sigma_{D_A/s}}{D_A/s}$ (%)	$\frac{\sigma_{H_s}}{H_s}$ (%)	$\frac{dN_{QSO}}{dz ddeg^2}$
1.96	1.43	2.69	2.74	82
2.12	1.02	1.95	1.99	69
2.28	1.09	2.18	2.11	53
2.43	1.20	2.46	2.26	43
2.59	1.34	2.86	2.47	37
2.75	1.53	3.40	2.76	31
2.91	1.81	4.21	3.18	26
3.07	2.16	5.29	3.70	21
3.23	2.75	7.10	4.57	16
3.39	3.86	10.46	6.19	13
3.55	5.72	15.91	8.89	9
3.70	-	-	-	7
3.86	-	-	-	5
4.02	-	-	-	3

Galaxies (dont QSOs)

z	$\frac{\sigma_{R/s}}{R/s}$ %	$\frac{\sigma_{D_A/s}}{D_A/s}$ %	$\frac{\sigma_{H_s}}{H_s}$ %	$\bar{n}P_{0.2,0}$	$\bar{n}P_{0.14,0.6}$	V [$h^{-1}Gpc^3$]	$\frac{dN_{ELG}}{dz ddeg^2}$	$\frac{dN_{LRG}}{dz ddeg^2}$	$\frac{dN_{QSO}}{dz ddeg^2}$	$\frac{\sigma_{f\sigma_{0.1}}}{f\sigma_{0.1}}$ %	$\frac{\sigma_{f\sigma_{0.2}}}{f\sigma_{0.2}}$ %
0.65	0.57	0.82	1.50	2.59	6.23	2.63	309	832	47	3.31	1.57
0.75	0.48	0.69	1.27	3.63	9.25	3.15	2269	986	55	2.10	1.01
0.85	0.47	0.69	1.22	2.33	5.98	3.65	1923	662	61	2.12	1.01
0.95	0.49	0.73	1.22	1.45	3.88	4.10	2094	272	67	2.09	0.99
1.05	0.58	0.89	1.37	0.71	1.95	4.52	1441	51	72	2.23	1.11
1.15	0.60	0.94	1.39	0.58	1.59	4.89	1353	17	76	2.25	1.14
1.25	0.61	0.96	1.39	0.51	1.41	5.22	1337	0	80	2.25	1.16
1.35	0.92	1.50	2.02	0.22	0.61	5.50	523	0	83	2.90	1.73
1.45	0.98	1.59	2.13	0.20	0.53	5.75	466	0	85	3.06	1.87
1.55	1.16	1.90	2.52	0.15	0.40	5.97	329	0	87	3.53	2.27
1.65	1.76	2.88	3.80	0.09	0.22	6.15	126	0	87	5.10	3.61
1.75	2.88	4.64	6.30	0.05	0.12	6.30	0	0	87	8.91	6.81
1.85	2.92	4.71	6.39	0.05	0.12	6.43	0	0	86	9.25	7.07

Complémentarité avec Euclid



- Euclid plus précis que DESI à $1.X < z < 2$
- Fort potentiel DESI à $z > 2$ avec les forêts Lyman-alpha
- Incertitudes sur les populations de galaxies à grand redshift
- DESI : cibles par imagerie, visible, Euclid : grisms IR
 - + pas besoin de cibles
 - gamme en redshift limitée, confusion

DESI : collaboration

- Grande collaboration internationale
- Projet porté par le LBNL, Berkeley.
- Spokespersons D. Eisenstein (Harvard), R. Wechsler (Stanford)

Participation française dans sa configuration actuelle :

CEA :

fournissent la cryogénie des 30 cameras
groupe important

Marseille (LAM+CPPM) :

tests sur banc des spectrographes dans salle de montage
(6 FTE pendant 2 ans puis 2 FTE/an)
4 chercheurs permanents au LAM, 3 au CPPM
(spectros assemblés à WINLIGHT, région de Marseille)

LPNHE :

développement logiciel
1 chercheur permanent

DESI : projet de développement à l'IN2P3

- APC (2 chercheurs permanents)
- CPPM (3 chercheurs permanents)
- LPNHE (3 chercheurs permanents)

Activités techniques

- 1) Tests des spectrographes à Marseille (**début des tests mars 2016**)
- 2) Système de Calibration du télescope sur site
- 3) Développement software du pipeline DESI

Activités scientifiques

Aujourd'hui 2 voies principales :

- Lyman-alpha BAO (LPNHE, APC)
- Clustering LRG & ELG : distorsions de redshift (CPPM)

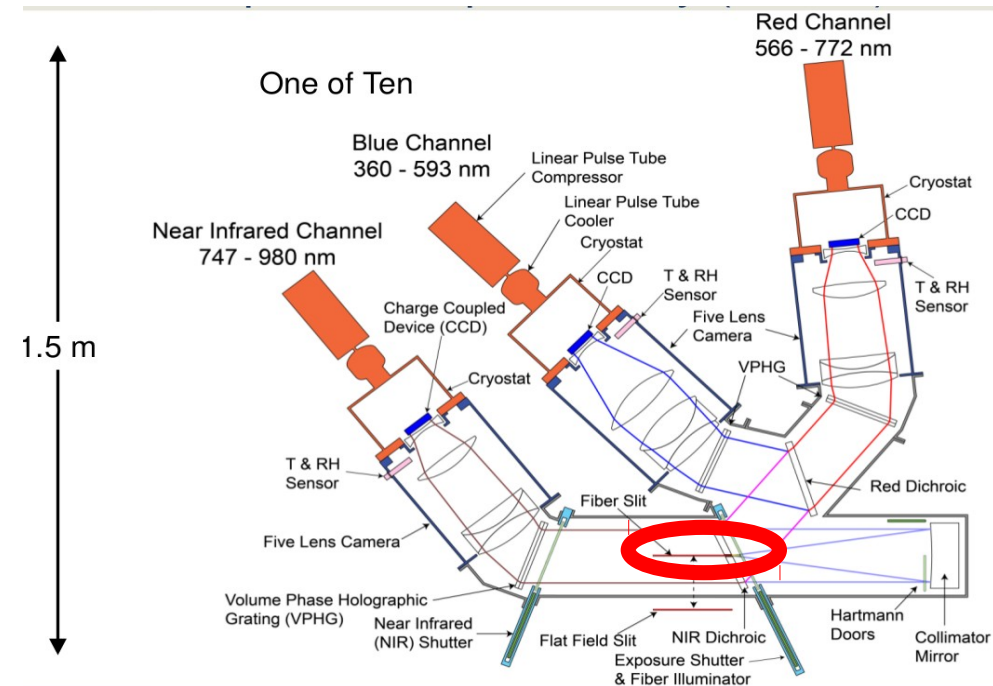
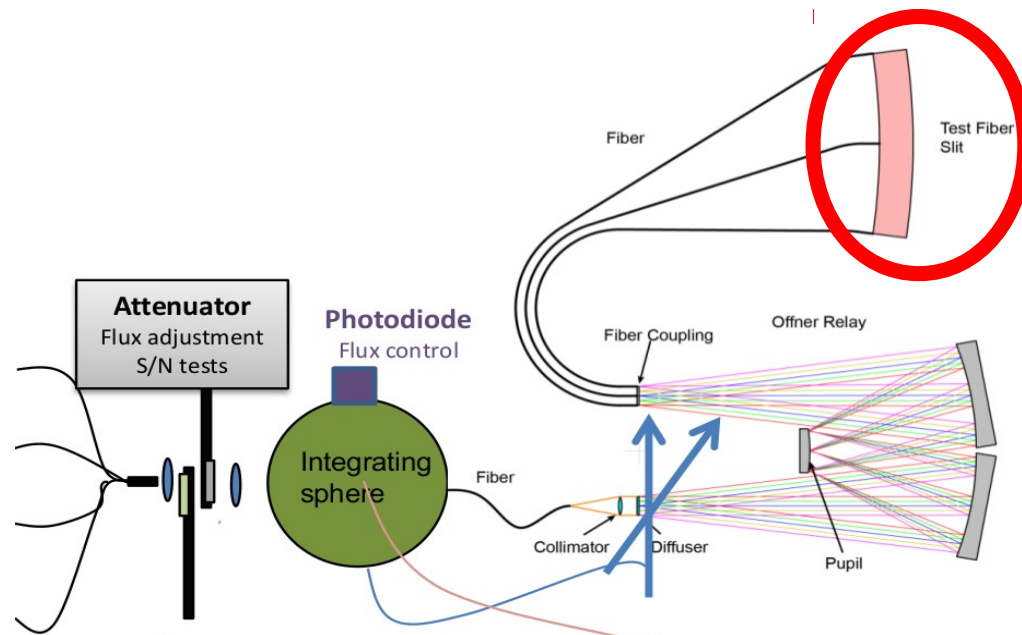
Activités techniques DESI à l'IN2P3

1) Tests des spectrographes à Marseille

Enjeu :

- les premiers à caractériser un élément essentiel de l'instrument
- forte visibilité dans la collaboration
- contribution in-kind au projet
- test important de la qualité de l'optique :
 - résolution, cross-talk entre fibres, lumière diffusée, second ordre, transmission
 - **stabilité** ! (cruciale pour la soustraction du ciel et la mesure de redshift des ELGs)

Début: mars 2016



Activités techniques DESI à l'IN2P3

2) Calibration du télescope sur site

Enjeu :

Augmenter la contribution in-kind au projet

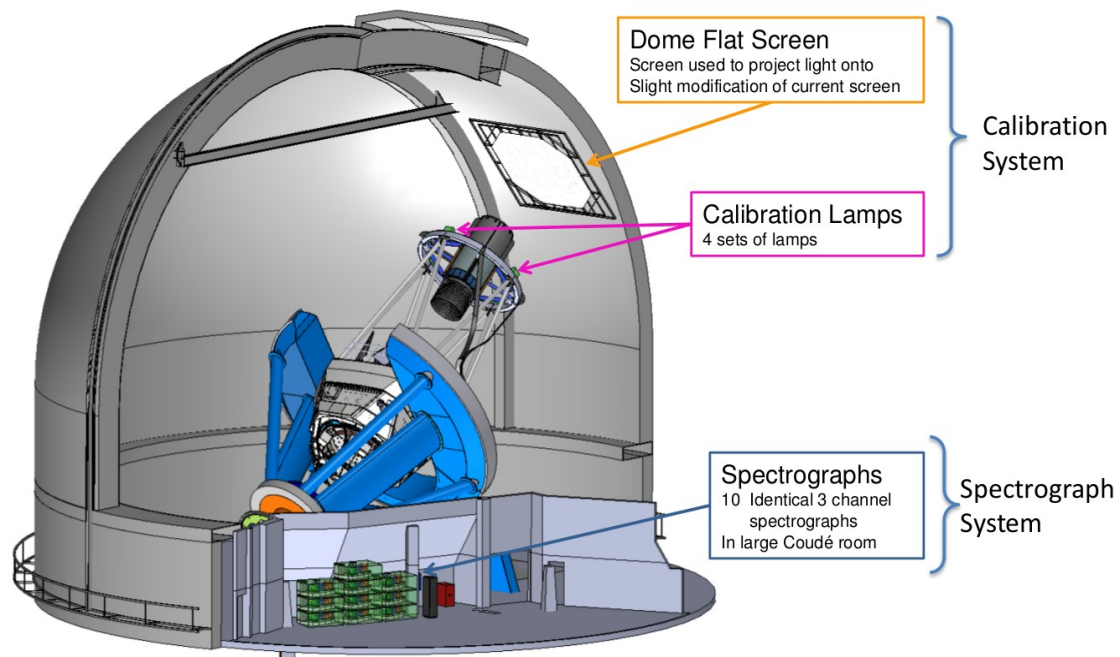
fenêtre d'opportunité ~6 mois

exploitation de l'expertise développée en calibration au LPNHE

visibilité importante en conjonction avec software et caractérisation des spectros

- Coût évalué par LBNL ~150k\$

- Projet ~ moyen terme : installation sur télescope fin 2018 - début 2019



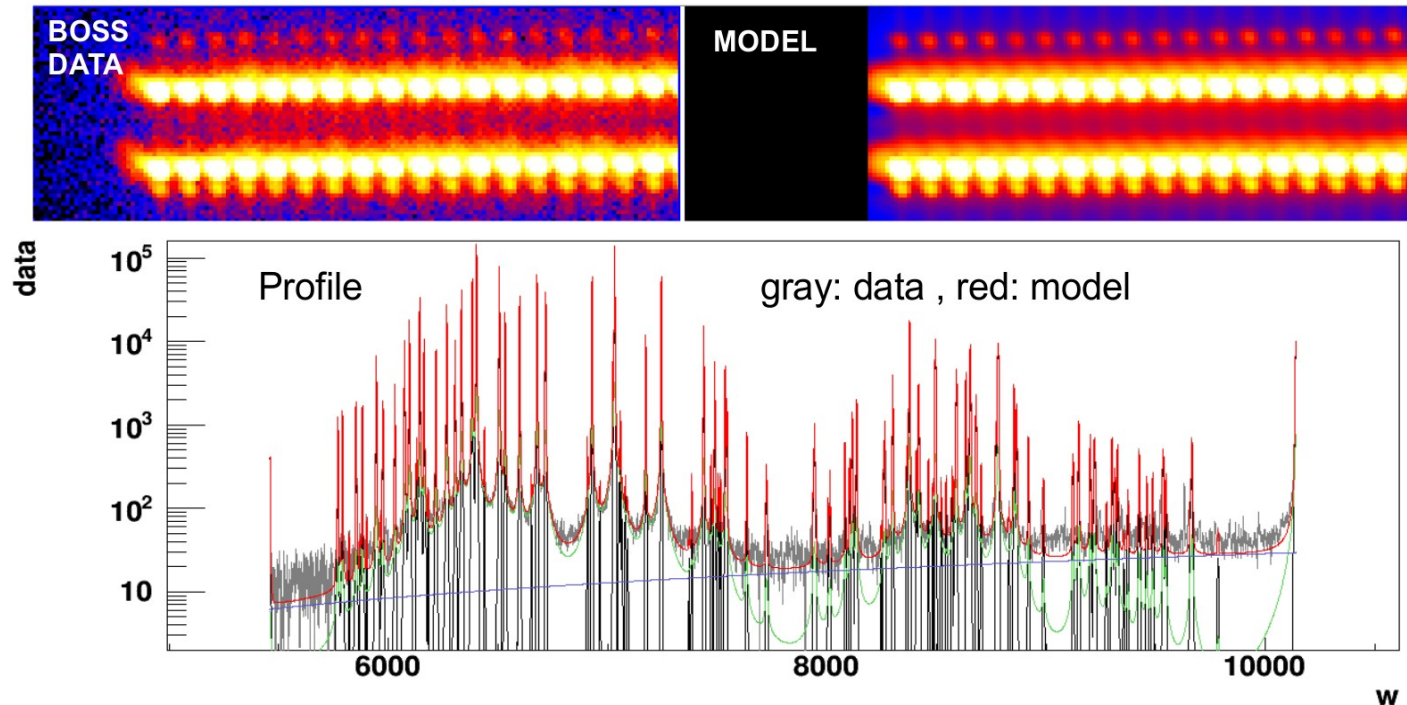
fourniture :

- écran (écran existant trop petit)
- lampes (Halogen, Ne/Ar, Hg/Cd)
- électronique de contrôle

Activités techniques DESI à l'IN2P3

3) Développement software du pipeline d'analyse des images CCDs

- preprocessing (cosmic-rays,...)
- caractérisation de la PSF (dont calibration en longueur d'onde)
- fiber-flat fielding
- soustraction du spectre du ciel
- calibration photométrique
- redshifts



Conclusion 1/2

- Les BAO sont une observable majeure de la physique de l'Energie Noire
 - faibles systématiques
 - extension du diagramme de Hubble à haut redshift

- Les grands relevés spectroscopiques optimisés pour les BAO donnent accès à d'autres observables :
 - taux de croissance des structures avec les distorsions de redshift (test de la relativité générale)
 - contraintes sur la masse des neutrinos, warm dark matter ...

- Activités BAO existantes à l'IN2P3 dans BOSS/eBOSS et DESI à l'APC, CPPM et LPNHE
 - + INSU (IAP,LAM) et CEA

- Grande visibilité des groupes français en Lyman-alpha
 - découverte des BAO Lyman-alpha en 2013
 - mesure de $H(z=2.3)$ à 2.2% en 2015

Conclusion 2/2

Projet de développement de l'activité BAO/RSD avant Euclid (2021)

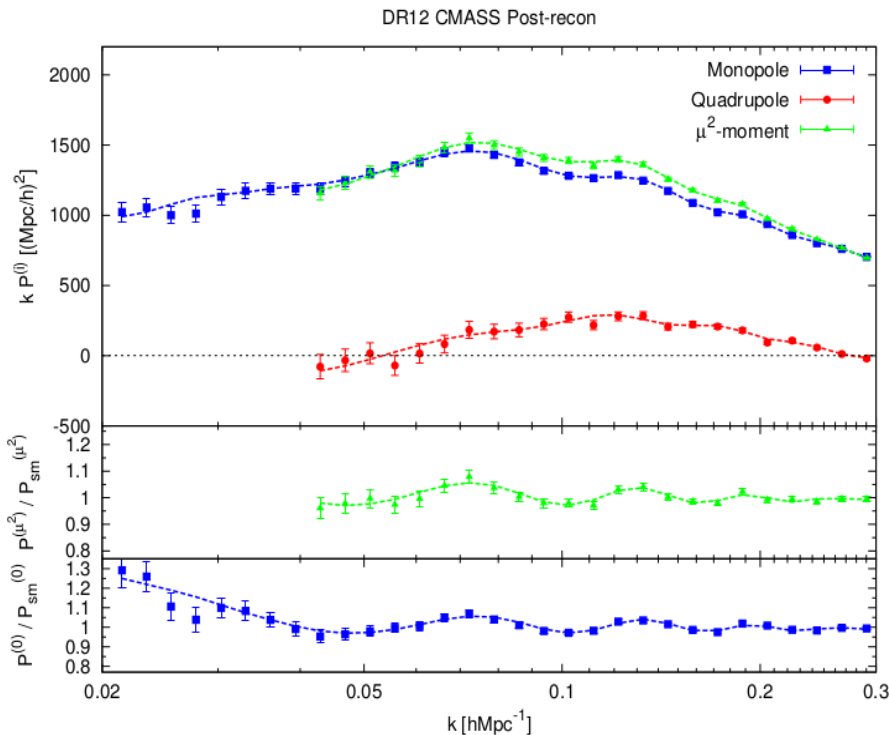
- A court terme : participation à eBOSS
 - poursuite de l'effort Lyman-alpha
 - développement expertise clustering, distorsions de redshift
 - eBOSS prend des données :
 - essentiel pour la formation de doctorants et recrutement de post-docs.
- A moyen terme : DESI ($> eBOSS \times 10$)
 - complémentaire à LSST : spectroscopie
 - complémentaire à Euclid-BAO : gamme en redshift, stratégie
 - CD2 (juill. 2015), CD3 (mai 2016), prise de données fin 2019
- Proposition de renforcement/soutien de l'activité DESI à l'IN2P3
 - dans 3 laboratoires IN2P3
 - participation technique ciblée, de moindre coût
 - assure la participation 'in-kind' des chercheurs intéressés
 - objectif de 8 chercheurs IN2P3 sur le projet (+post-docs/doctorants)

Il est nécessaire de développer l'activité BAO/RSD à l'IN2P3 dans un environnement international très compétitif.

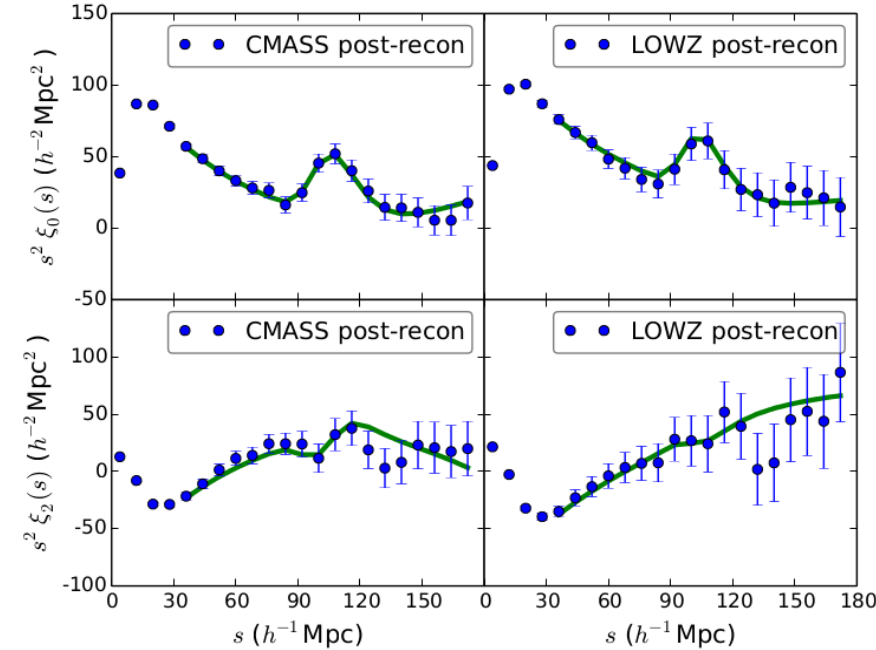
Backup slides

Résultats BOSS : analyse de l'ensemble des données galaxies première publication DR12 en septembre

- * Redshift Space Distortions : Gil-Marín et al 2015a
- * BAO galaxy correlation function : Cuesta et al 2015
- * BAO galaxy power spectrum : Gil-Marín et al 2015b



Précision de mesure du pic BAO :
 1.8% à $z=0.2$ ('LOWZ')
 0.9% à $z=0.57$ ('CMASS')

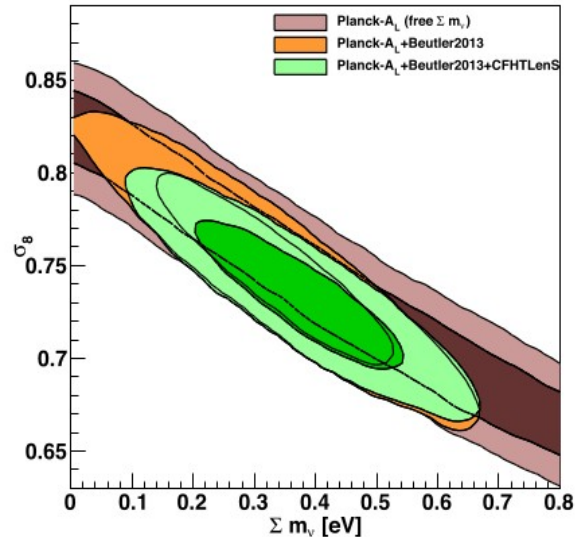
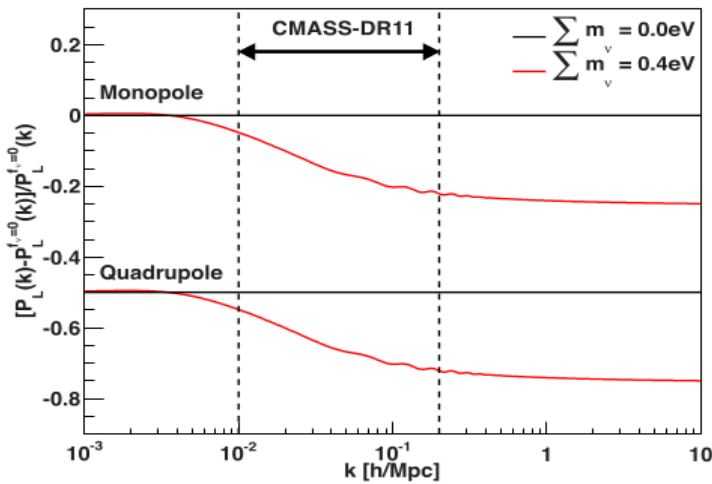


Estimator	α	χ^2/dof
DR12 LOWZ		
Consensus $P(k) + \xi(s)$	1.0368 ± 0.0173	
combined $\xi(s)$	1.0246 ± 0.0172	
post-recon $P(k)$	1.0489 ± 0.0183	
post-recon $\xi(s)$	1.0224 ± 0.0173	10/18
pre-recon $P(k)$	1.0061 ± 0.0306	
pre-recon $\xi(s)$	1.0090 ± 0.0284	13/18
DR12 CMASS		
Consensus $P(k) + \xi(s)$	1.0047 ± 0.0090	
combined $\xi(s)$	1.0064 ± 0.0096	
post-recon $P(k)$	1.0029 ± 0.0088	
post-recon $\xi(s)$	1.0093 ± 0.0097	26/18
pre-recon $P(k)$	1.0101 ± 0.0152	
pre-recon $\xi(s)$	1.0153 ± 0.0134	12/18

Autres mesures : contraintes sur la somme des masses des neutrinos

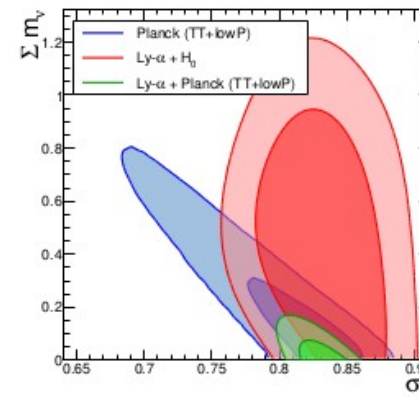
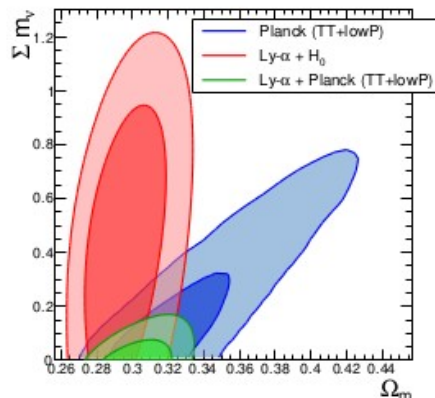
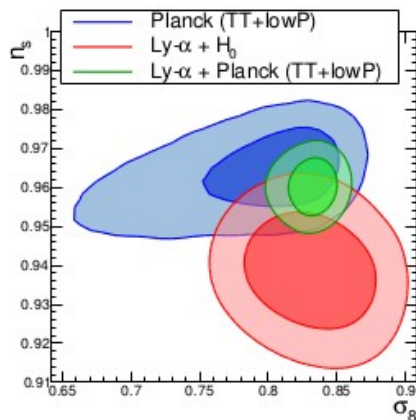
avec le spectre de puissance 3D des galaxies
Beutler 2014 :
sum $m_{\nu} = 0.34 \pm 0.14$ eV (68% CL)

! ce résultat se base sur une modélisation
du spectre de puissance non-linéaire
jusqu'à $k=0.2$ h Mpc⁻¹

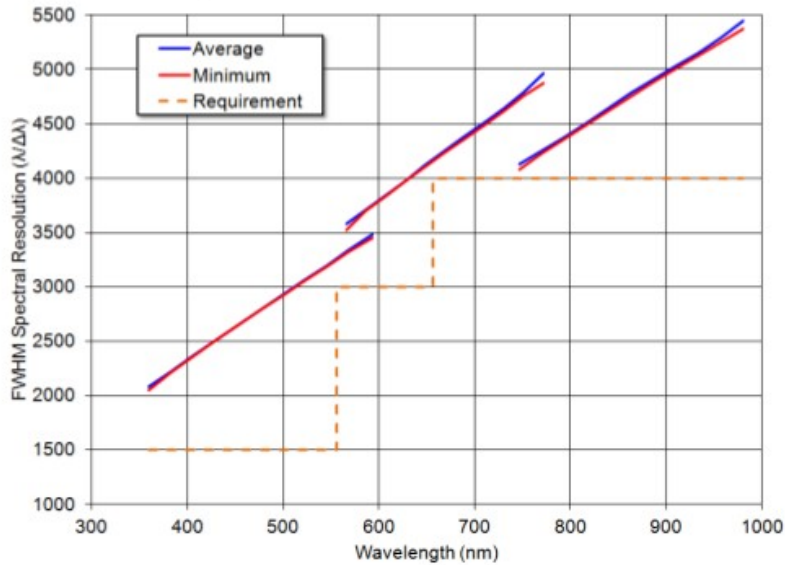


avec le spectre de puissance 1D des forêts Lyman-alpha
Palanque-Delabrouille 2015 :
sum $m_{\nu} < 0.12$ eV (95% CL)

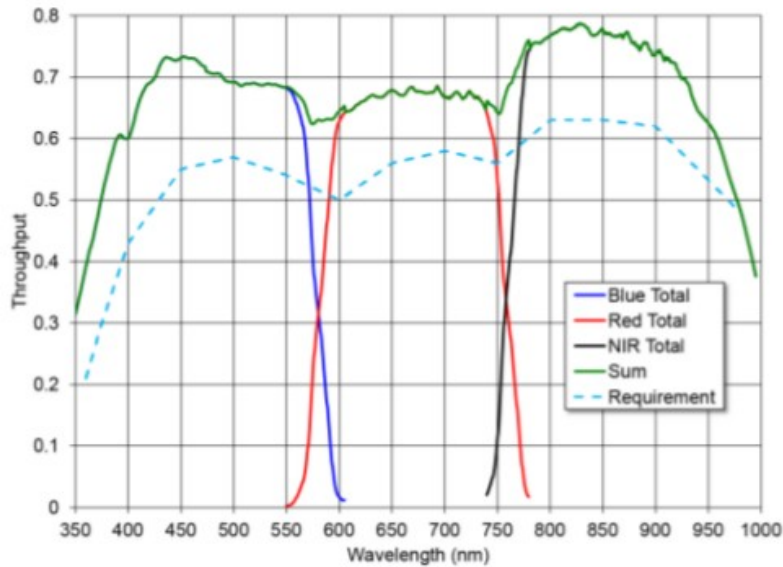
! ce résultat se base
sur des simulations hydro



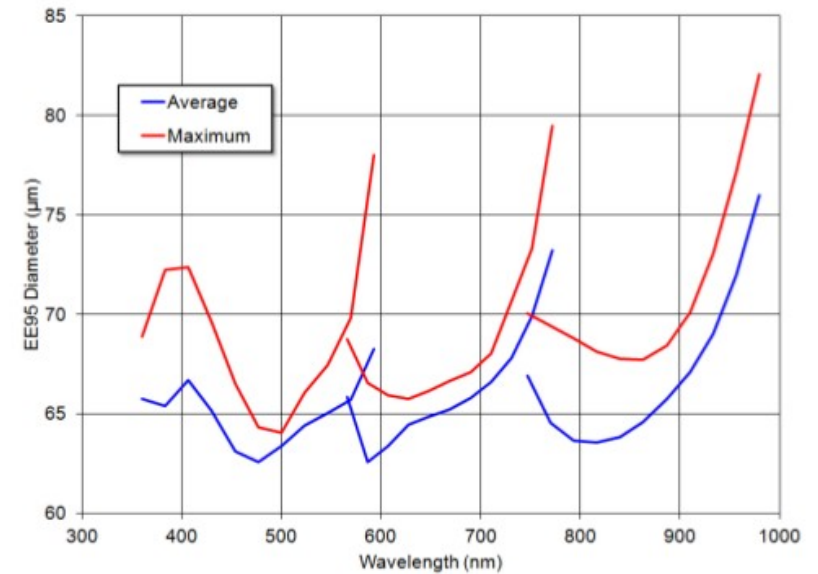
Spectral Resolution



Throughput



95% Encircled Energy (EE) Diameter (requirement < 110 μm)



- Expected performance based on measurements, prototype performance and detailed optical and detector simulation

WBS	Name	Description
1.6.1	Spectrograph Subassembly Management - OSU	OSU Management activities
1.6.2	Spectrograph Requirements and Management	Developing the high level requirements & LBNL Management
1.6.3	Spectrograph Components and Procurement	Design of the optics
1.6.4	Engineering Requirements & ICD's	Flowdown of the requirements to subsystems
1.6.5	EM Spectrograph Subassemblies - OSU	Design, manufacture and testing of the EM subassemblies
1.6.6	Spectrograph Production Unit Subassemblies - OSU	Manufacture of the production spectrograph subassemblies
1.6.7	Spectrograph Production Units Fabrication and I&T	Fabrication, Assembly, testing and calibration of the production spectrographs
1.6.8	Cryostats	Design, manufacture, alignment, and verification of Cryostats
1.6.9	Detector & Electronics	Design, procurement and testing, of the CCDs and their FEE Units.
1.6.10	Calibration System	Requirements, design, fabrication and testing of the calibration system
1.6.11	Spectrograph Support Rack	Design, manufacture and testing of the spectrograph support racks and environmental enclosure
1.6.12	Shipping & Handling Equipment	Design, manufacture and testing of the handling and test equipment
1.6.13	Spectrograph Test Equipment	The test and calibration equipment for subsystems
1.6.14	Ship to and verify at Telescope	Shipping equipment and verifying function at Mayall telescope

L3 managers are organized by institutional deliverables, captured in appropriate agreements

