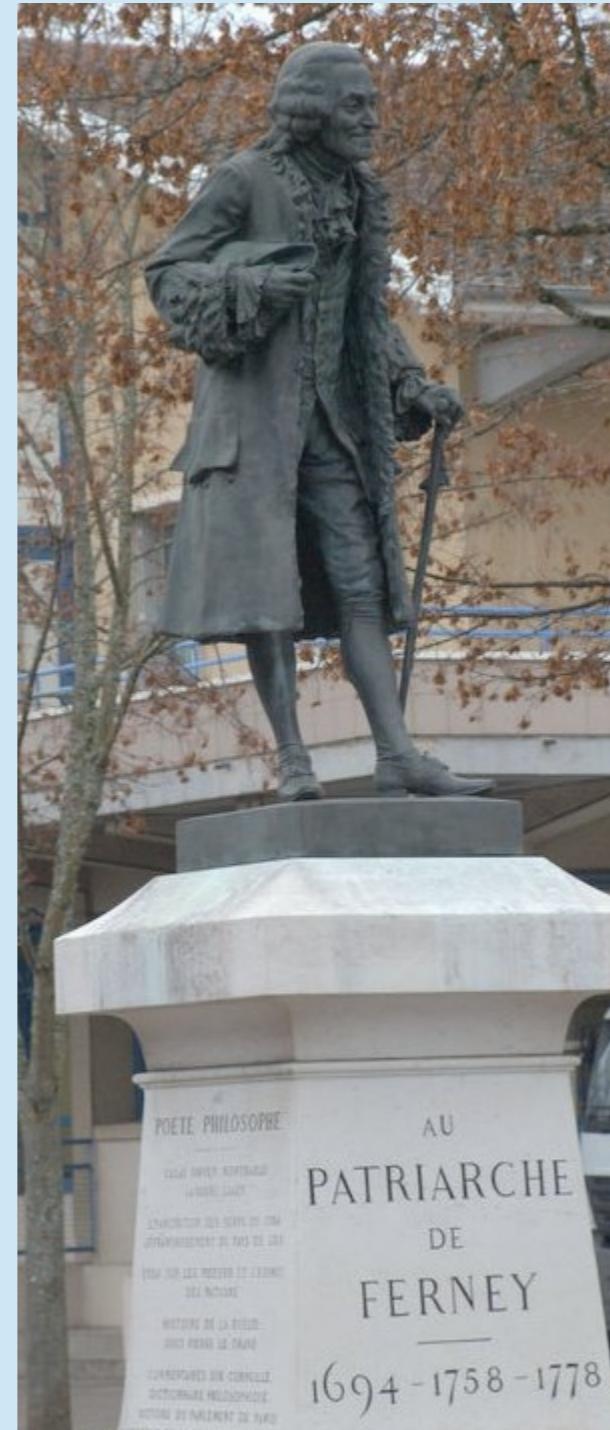


Candide et les barres d'erreurs cosmologiques

Fabien Lacasa
Université de Genève

Colloque national “Dark Energy”
Laboratoire de l'accélérateur Linéaire,
Orsay



Voltaire

Lacasa & Rosenfeld 2016 arXiv:1603.00918
Lacasa, Lima & Aguena 2017 arXiv:1612.05958
Lacasa & Kunz 2017 arXiv:1703.03337
Lacasa in prep 2017

fabien.lacasa@unige.ch

Covariances des observables de la structure à grande échelle

Pangloss : tout est **Gaussien** dans le meilleur des mondes possibles

Martin : il faut des milliers de **simulations** à N corps, à haute résolution, avec traçage de rayons, physique baryonique, neutrinos etc

Cette présentation montrera que la non-Gaussianité :

- est importante, et impacte les contraintes cosmologiques
- est mal estimée par simulations, mais peut être calculée analytiquement pour cas réaliste
- nécessite vite modèle non-perturbatif
=> modèle de halo

CANDIDE,
OU
L'OPTIMISME,
TRADUIT DE L'ALLEMAND
DE
MR. LE DOCTEUR RALPH.



M D C C L I X.

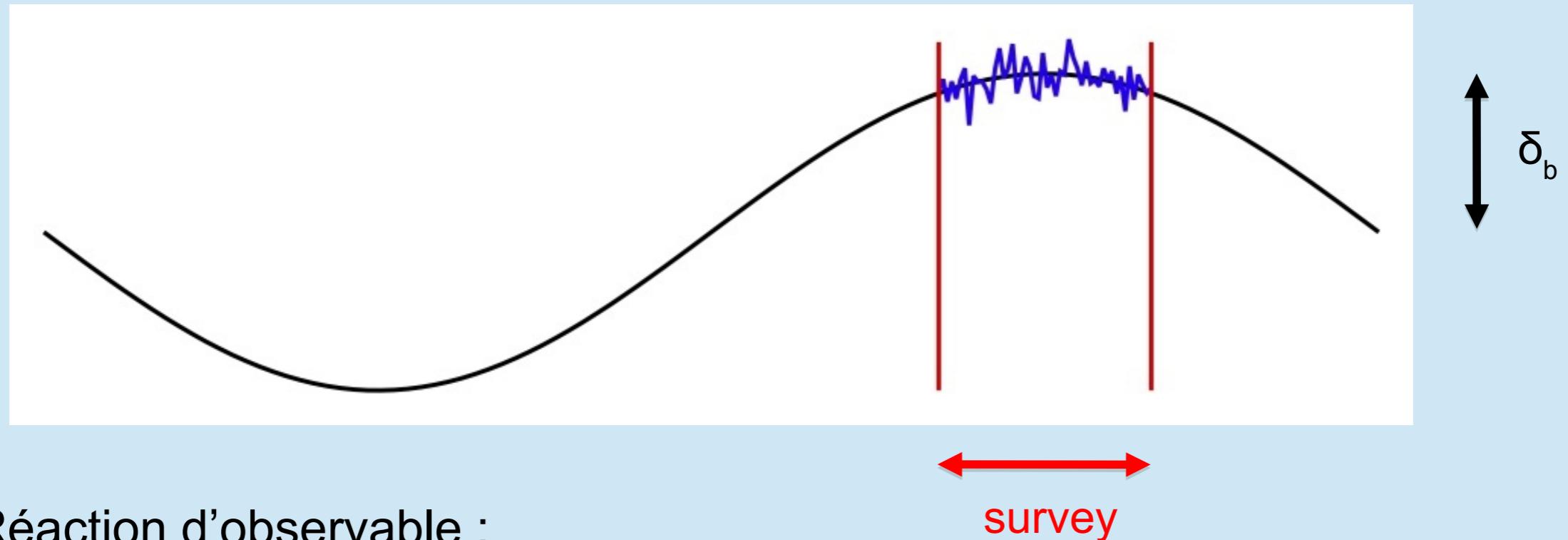
Non-linéarité et covariances

- Evolution non-linéaire => génération de non-Gaussianité
- Présence de NG => couplage de mesures qui seraient indépendantes autrement
 - Exemples :
 - Covariance entre comptages et spectre de puissance : fonction à 3 pts / bispectre
 - Couplage du spectre entre modes de Fourier différents : fonction à 4 pts / trispectre
- Etat de l'art : modélisation analytique
 - Modèle de halo (termes 1h, 2h1+3) et covariance super-relevé (super-sample covariance, SSC)
 - Exemples :
 - KiDS-450 : Hildebrandt et al. 2017
 - DES combinaison de sondes : [arXiv:1706.09359](https://arxiv.org/abs/1706.09359) (méthodologie), [arXiv:1708.01530](https://arxiv.org/abs/1708.01530) (résultats Y1)

Covariance super-relevé (SSC)

- La SSC est juste une contribution au spectre/bispectre/trispectre qui source la covariance considérée

Comptages d'amas Hu & Kravtsov 2003, spectre de matière Takada & Hu 2013



$$\frac{\partial P_{\text{gal}}(k)}{\partial \delta_b} = \left(\frac{68}{21} b_1^2 + 2b_1 b_2 \right) P(k) + I_2^1(k, k) + b_1 / \bar{n}_{\text{gal}}(z)$$

Takada & Hu 2013

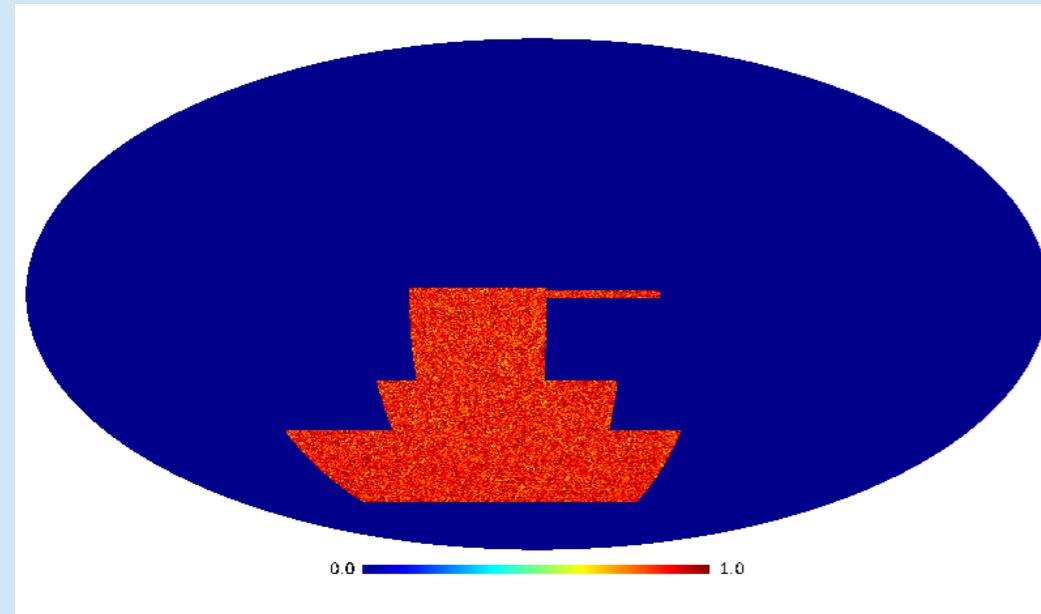
Lacasa & Rosenfeld 2016

- Pour une observable : la SSC couple tous points de mesure
Analyse multi-sonde : la SSC couple toutes les sondes

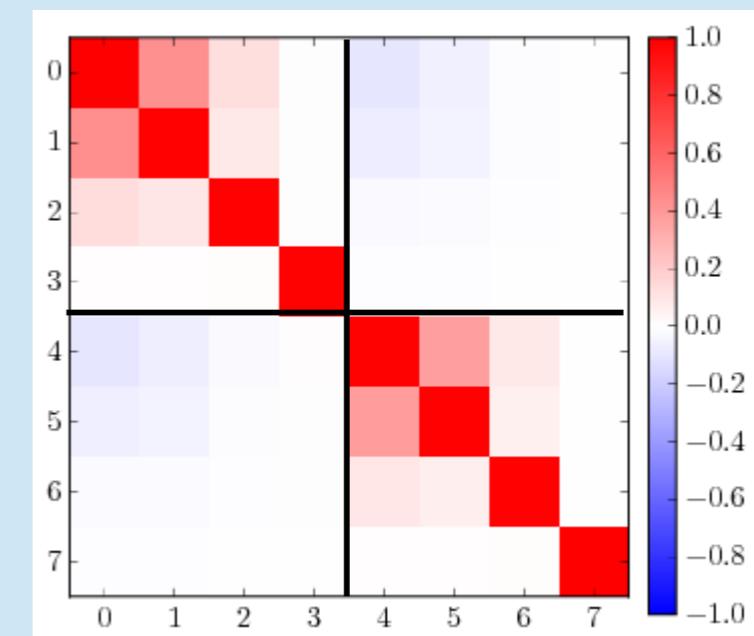
SSC en ciel masqué

$$\text{Cov}^{\text{SSC}} = \sum_{\ell} \frac{2\ell + 1}{4\pi} C_{\ell}(W) \text{Cov}_{\ell}^{\text{SSC}}$$

Géometrie :
spectre de puissance du masque

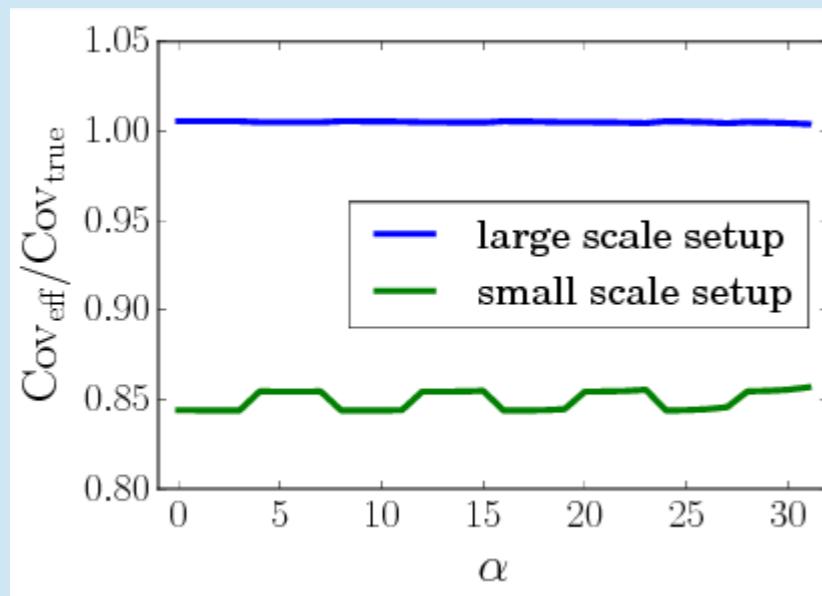
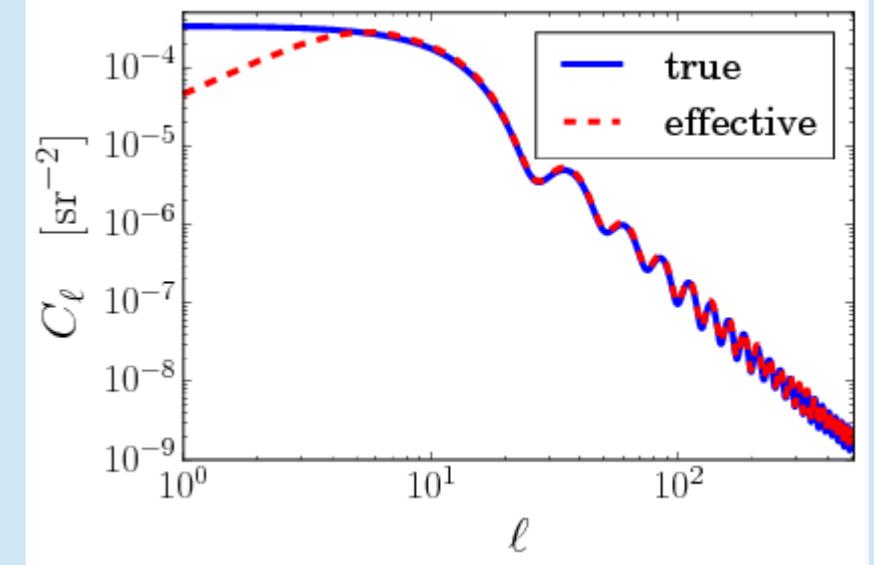
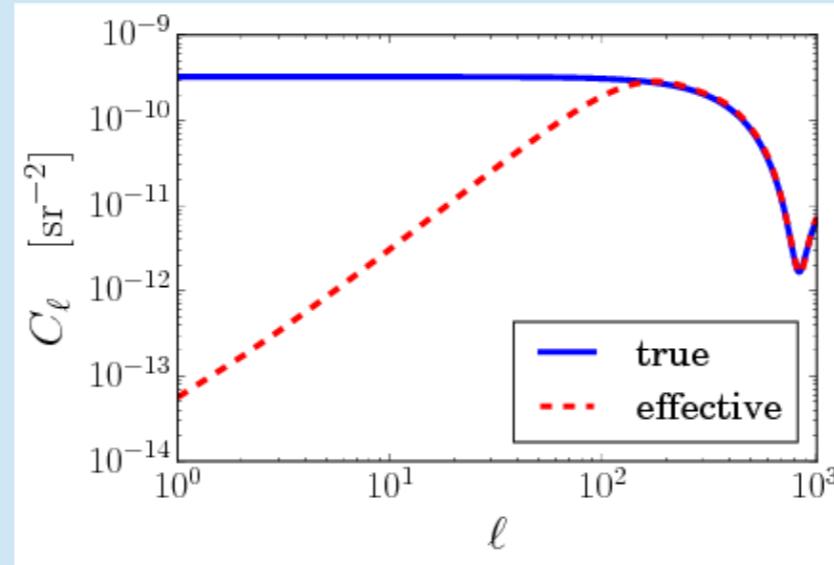
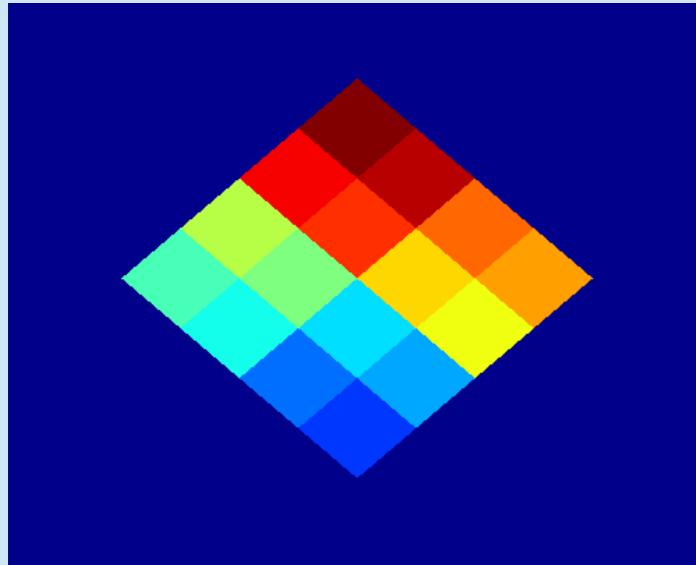


Physique :
réaction de l'observable
convoluée avec le spectre de
puissance de matière

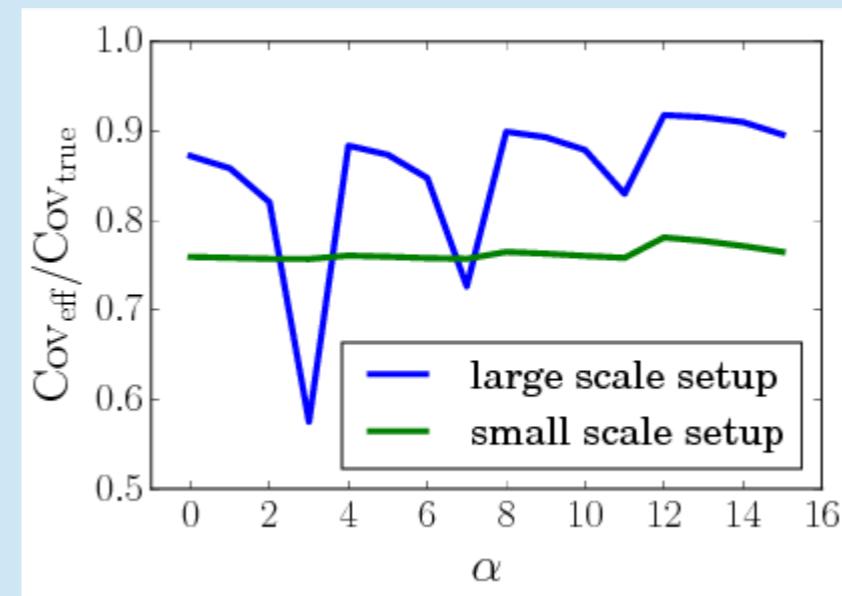


- Trous dans le masque (e.g. étoiles) n'affectent pas la SSC
- Jusqu'à ~10% d'anti-correlation entre les redshifts ($Dz=0.1$)

Estimée de SSC avec simulation(s)



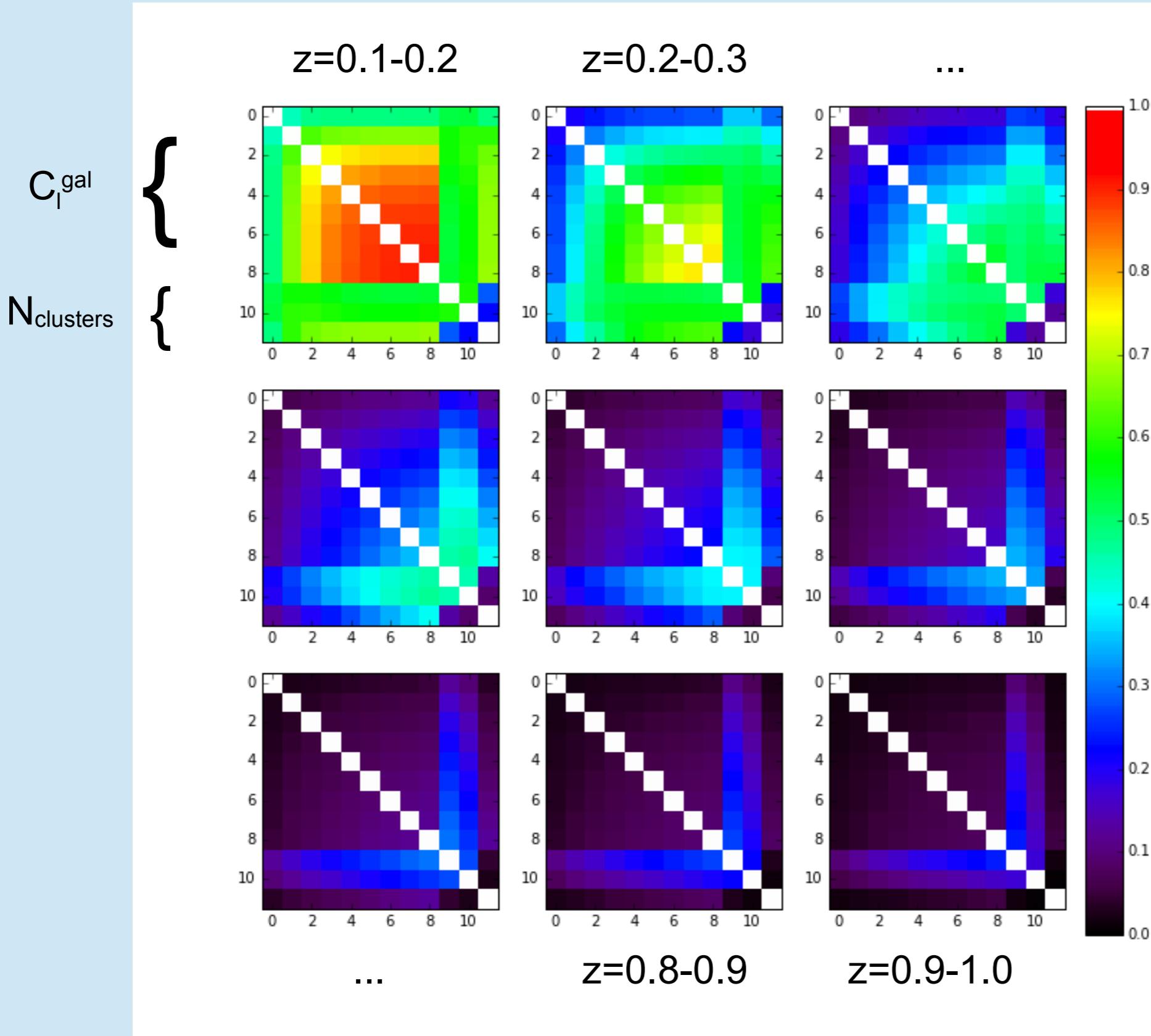
Ratio subsampling/true
auto-redshift



Ratio subsampling/true
cross-redshift

Lacasa & Kunz 2017
arXiv:1703.03337

Impact de la non-linéarité I : covariance DES



Spécifications
semblables à Dark
Energy Survey

Matrice de
corrélation :
 $C_{ij}/\sqrt{C_{ii}^*C_{jj}}$

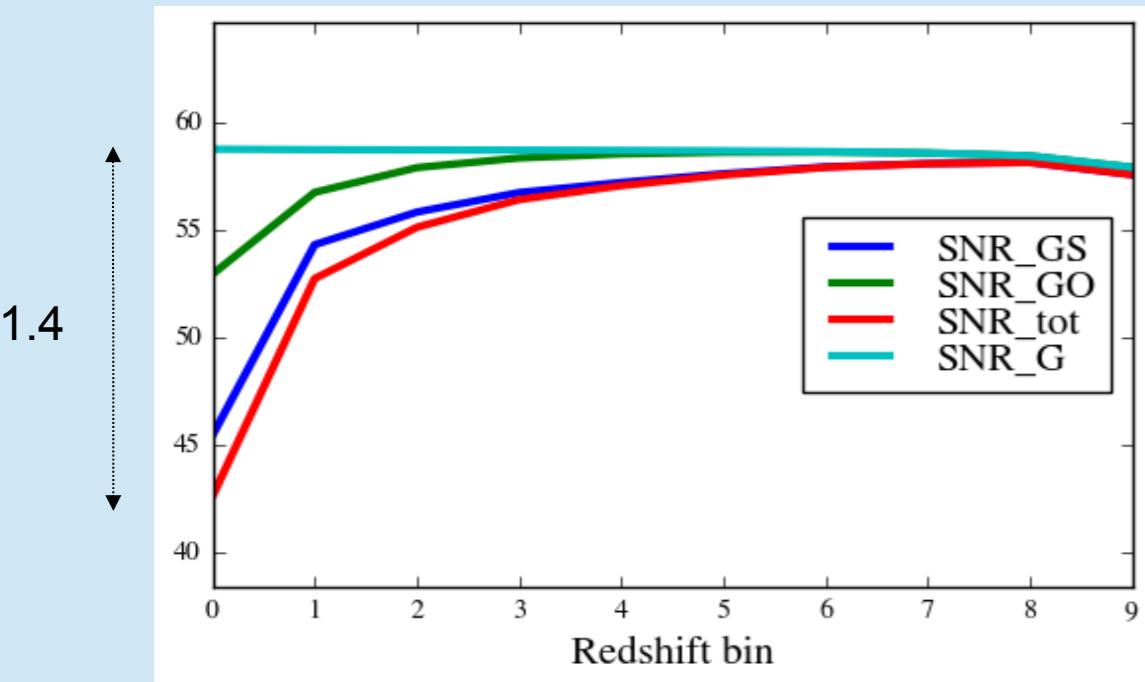
Cross-covariance est
importante à tous les
redshifts.

$\ell\ell=30-300$
($\theta=0.7-7$ deg)
i.e. très conservatif

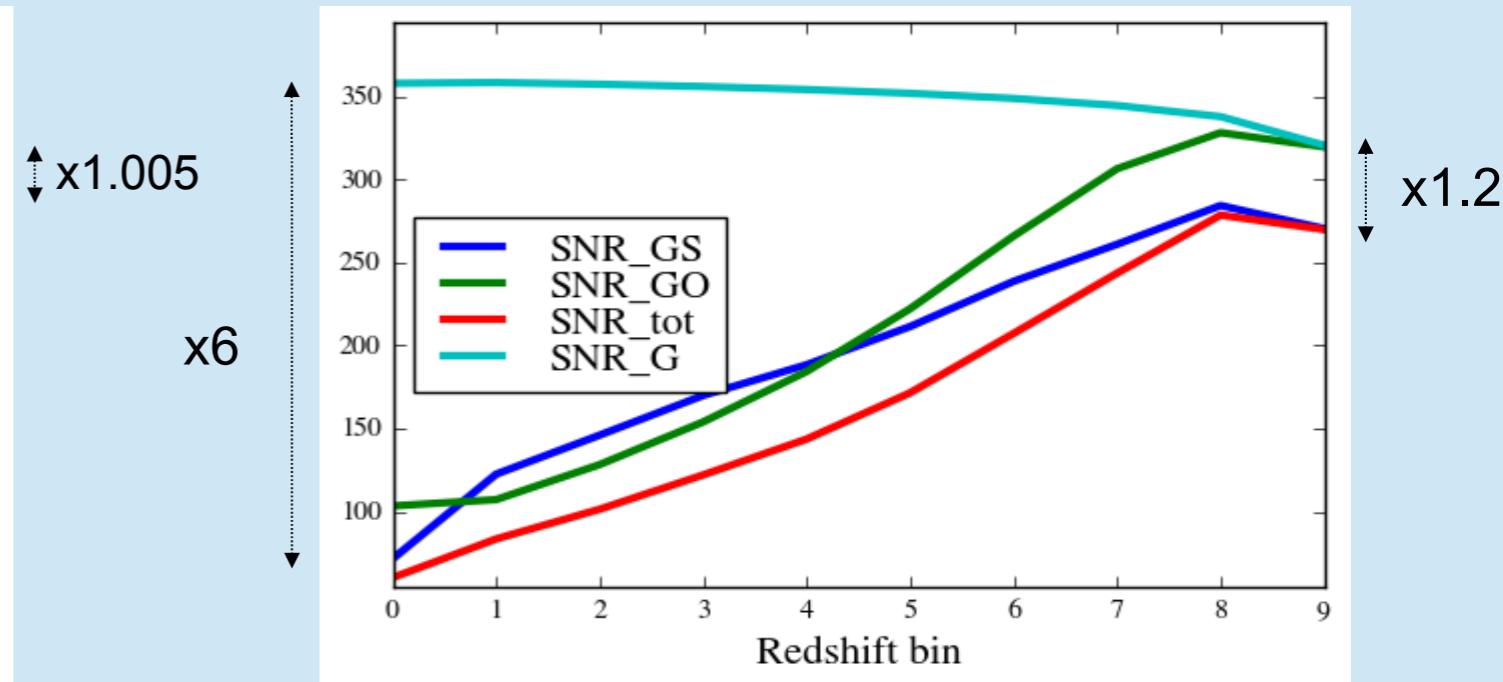
Lacasa & Rosenfeld 2016
arXiv:1603.00918

Impact de la non-linéarité II : signal sur bruit Euclid

$\text{Imax}=300$ (trop conservatif)



$\text{Imax}=1000$

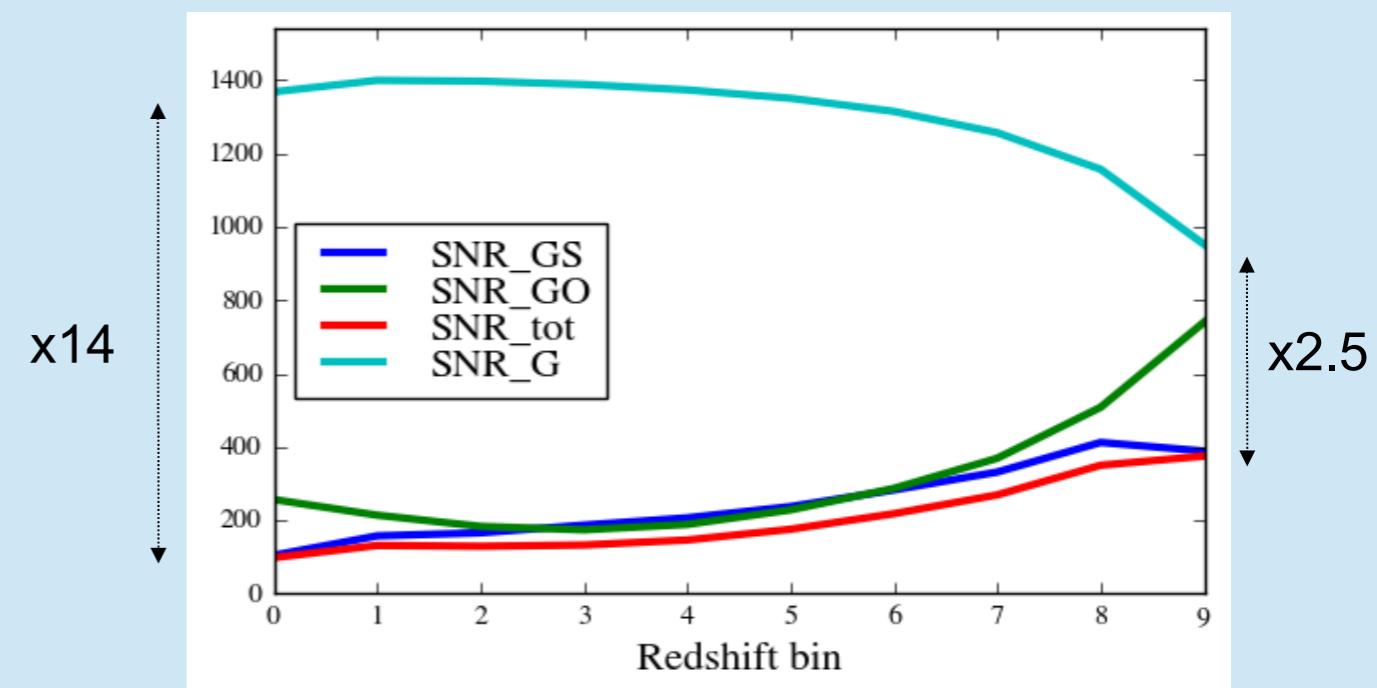


Rapport S/N de C(l) galaxies
en fonction du redshift
(10 bins, $z=0-2.5$, Euclid-like)

G = Gaussien

GS = Gauss + SSC

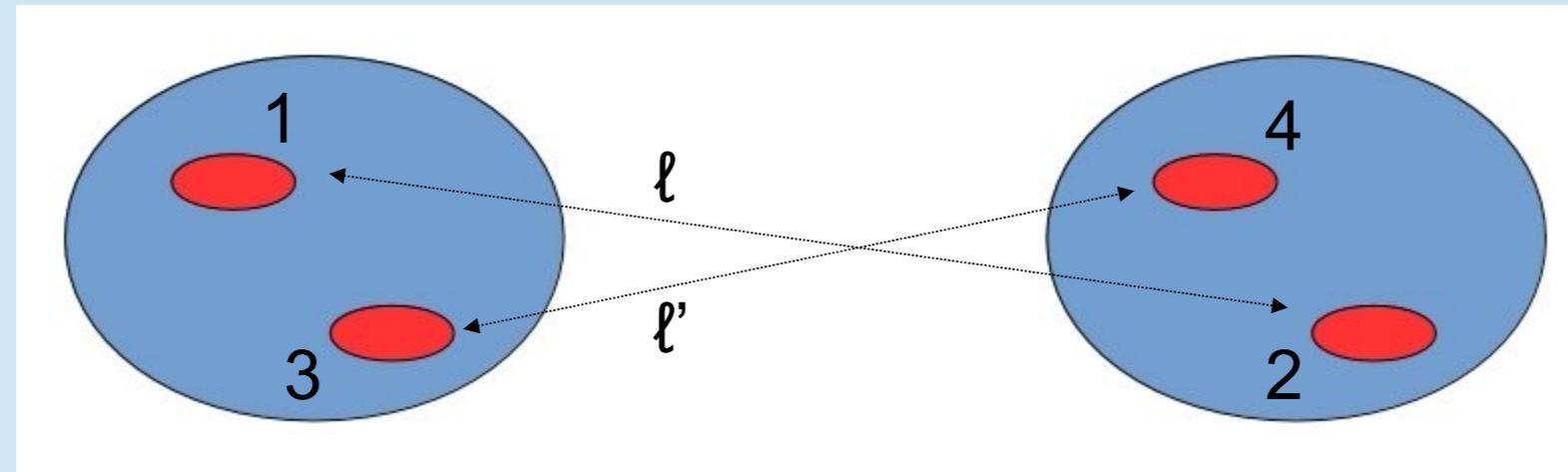
GO = Gauss + autre NG (non SSC)



$\text{Imax}=2500$ (optimiste)

Covariance du spectre de galaxies : nouveaux effets non-linéaires

La modélisation actuelle ne contient que certains termes de la non-linéarité, car elle n'a pas été développée de manière systématique



Travail en cours :

Découverte de nombreux autres termes : théorie des perturbations et biais des halos à l'ordre 3, effet non-local du tenseur de marée...

En particulier termes de tresse, a priori aussi ou plus importants que SSC pour des relevés larges et profonds comme Euclid/LSST

Conclusions

- La non-linéarité impacte fortement les covariances des observables
 - Elle ne peut pas être estimée à l'aide des données elle-mêmes (bootstrap, jackknife), et difficilement avec des simulations
[Lacasa & Kunz 2017](#)
 - Une modélisation analytique est possible.
Elle est utilisée par les relevés actuels (KiDS, DES), avec approximations.
J'ai développé les outils pour la modélisation de covariances réalistes et exactes
[Lacasa & Rosenfeld 2016](#), [Lacasa, Lima & Aguena 2017](#)
 - L'inclusion de la non-linéarité dans les prévisions de contraintes est critique pour obtenir des erreurs réalistes
 - Il est possible de mitiger l'impact des effets non-linéaires grâce aux comptages d'amas
[Lacasa & Rosenfeld 2016](#)
 - Il y a encore besoin de travail pour la covariance du spectre des galaxies / lentillage gravitationnel : nouveaux termes non-Gaussiens
[Lacasa 2017, in prep](#)
- “Il faut cultiver notre jardin”*
(Candide, chap. XXX)

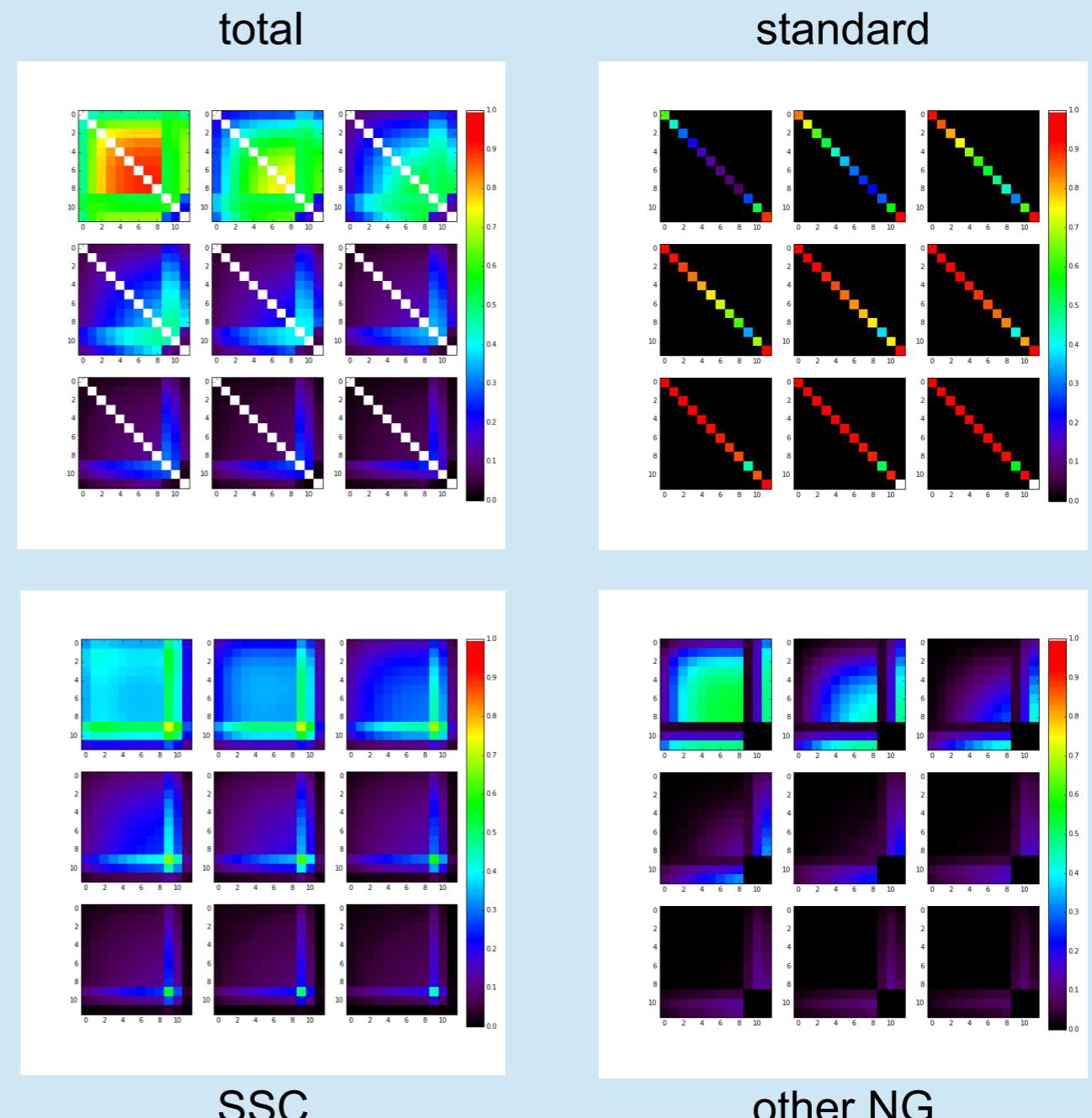
Thanks for your attention

Importance of SSC : combining galaxy C(l) and cluster counts

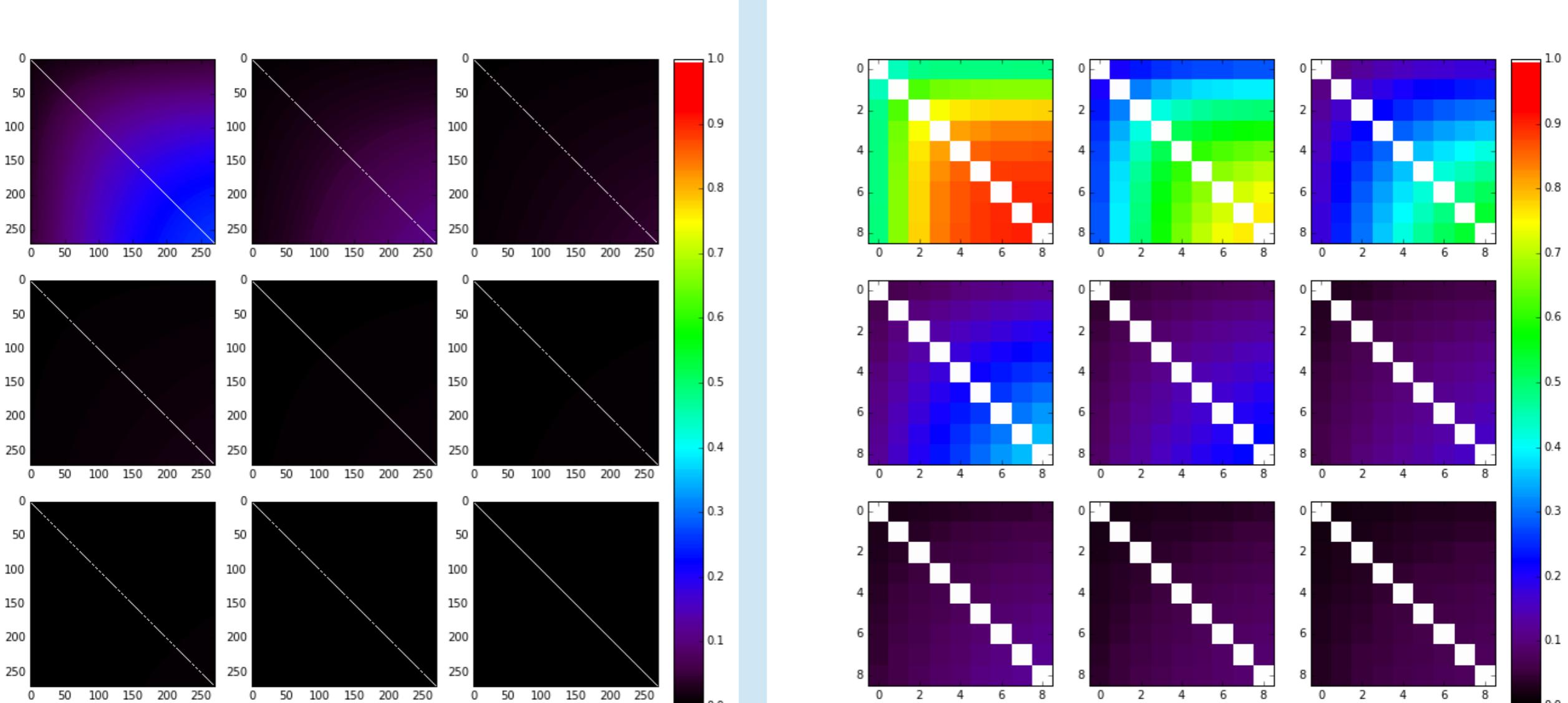
Saturation of the information content at trans-linear scales (though fully non-linear scales can recover information) : Rimes & Hamilton (2005, 2006), Neyrinck et al. (2006, 2007), Carron et al. (2015)

$$\text{Cov}(\mathbf{X}, \mathbf{X}) = \begin{pmatrix} \text{Cov}(C_\ell^{\text{gal}}, C_\ell^{\text{gal}}) & \text{Cov}(C_\ell^{\text{gal}}, N_{\text{cl}}) \\ \text{Cov}(N_{\text{cl}}, C_\ell^{\text{gal}}) & \text{Cov}(N_{\text{cl}}, N_{\text{cl}}) \end{pmatrix}$$

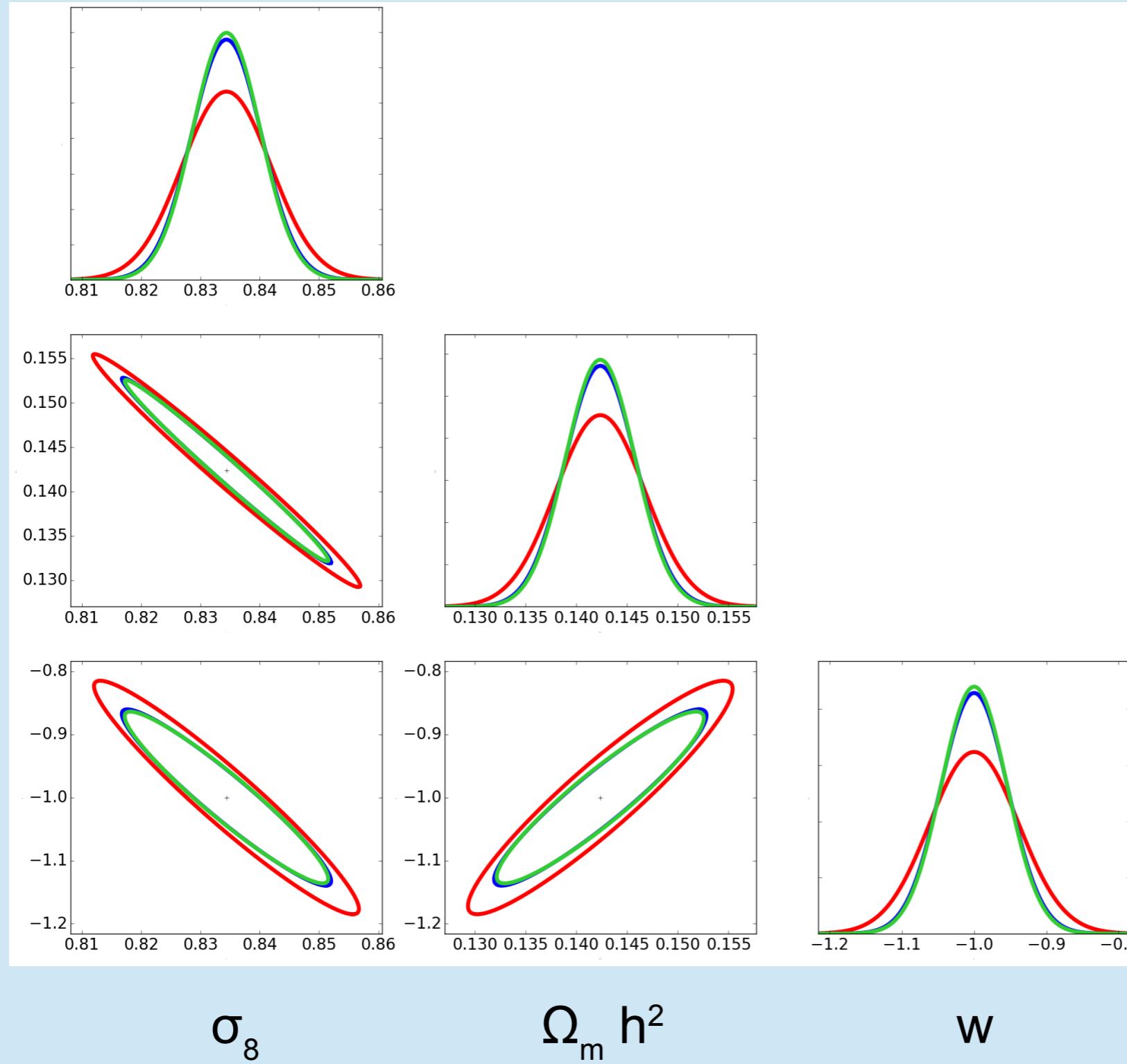
- 9 redshift bins (hence 9 subplots)
z=0.1-1 with Dz=0.1
- 3 mass bins
 $\log M = 14-15.5$ with DlogM=0.5
- 9 multipole bins
 $\ell=30-300$ $D\ell=30$
- Standard = Gaussian for C_l ,
Poissonian for N_{cl}
- Correlation matrices (normalised to 1=white on the diagonal)



Importance de hors-diagonalité



Impact de la non-linéarité : contraintes cosmologiques DES



Termes
standards

NG sans SSC

total

Augmentation des
barres d'erreur

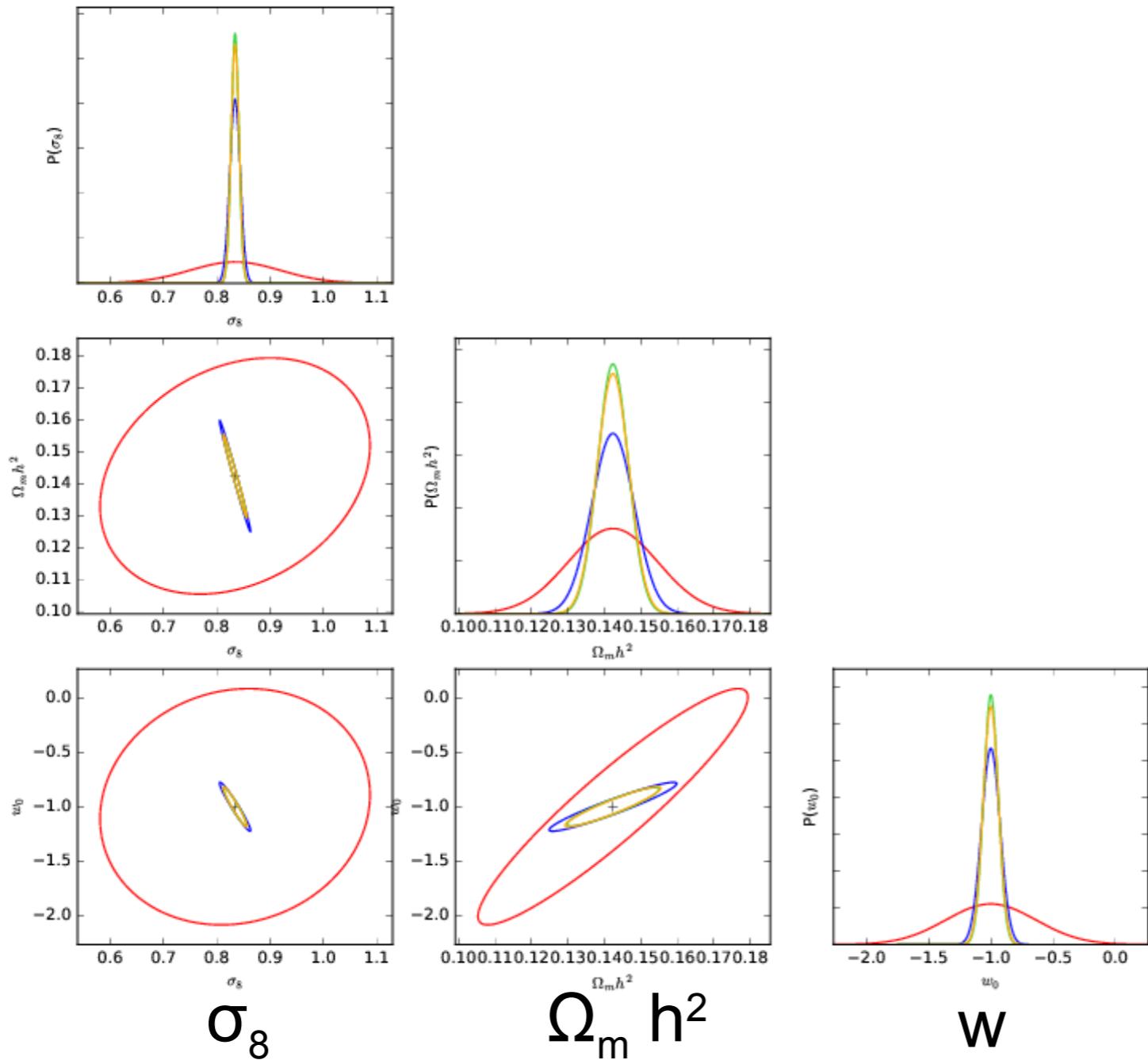
σ_8 : 31%

$\Omega_m h^2$: 29%

w : 36%

FoM augmente
d'un facteur 2.2

Cosmological case



C(l) constraints

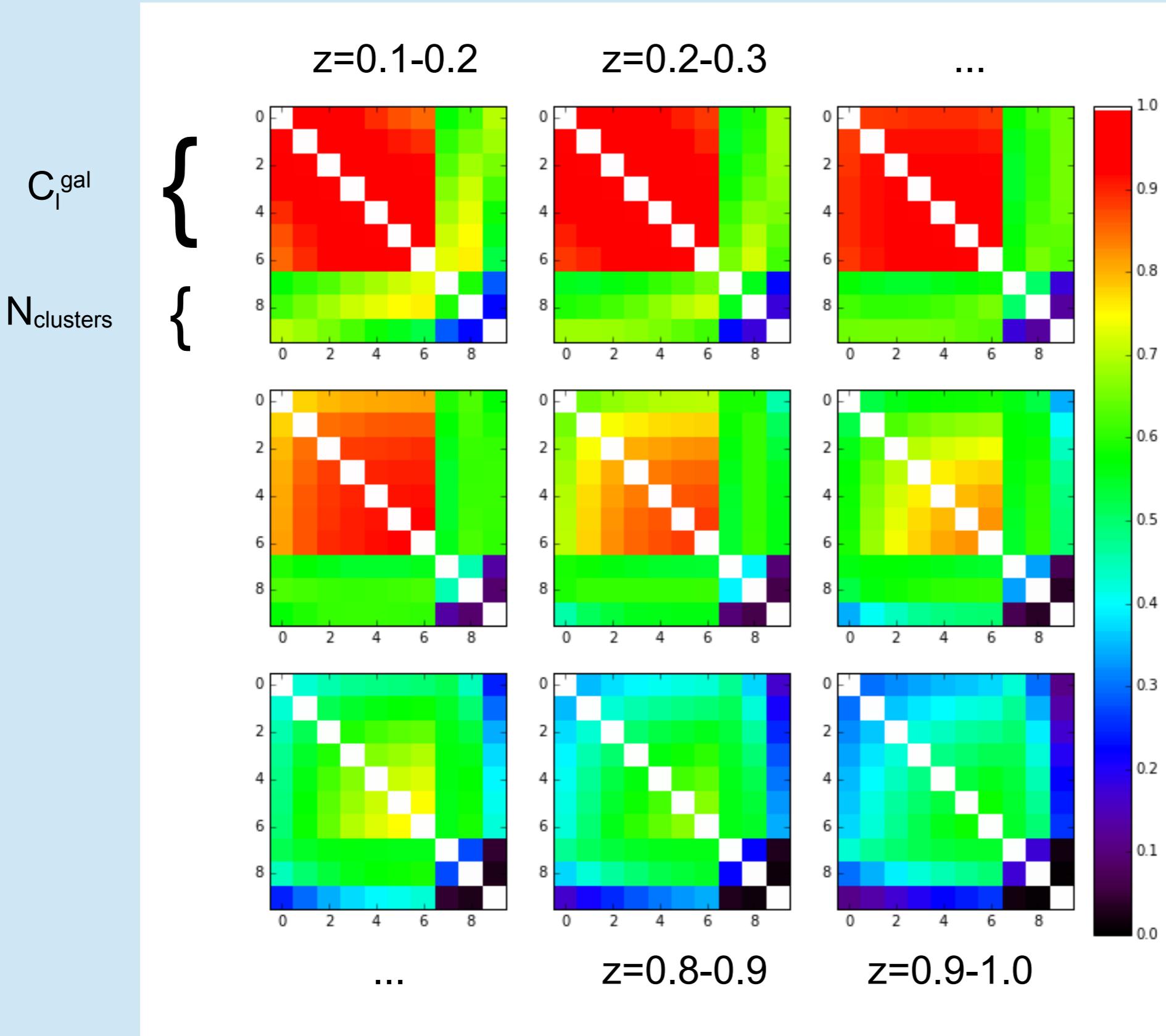
Ncl constraints

Joint without cross-cov
= naive

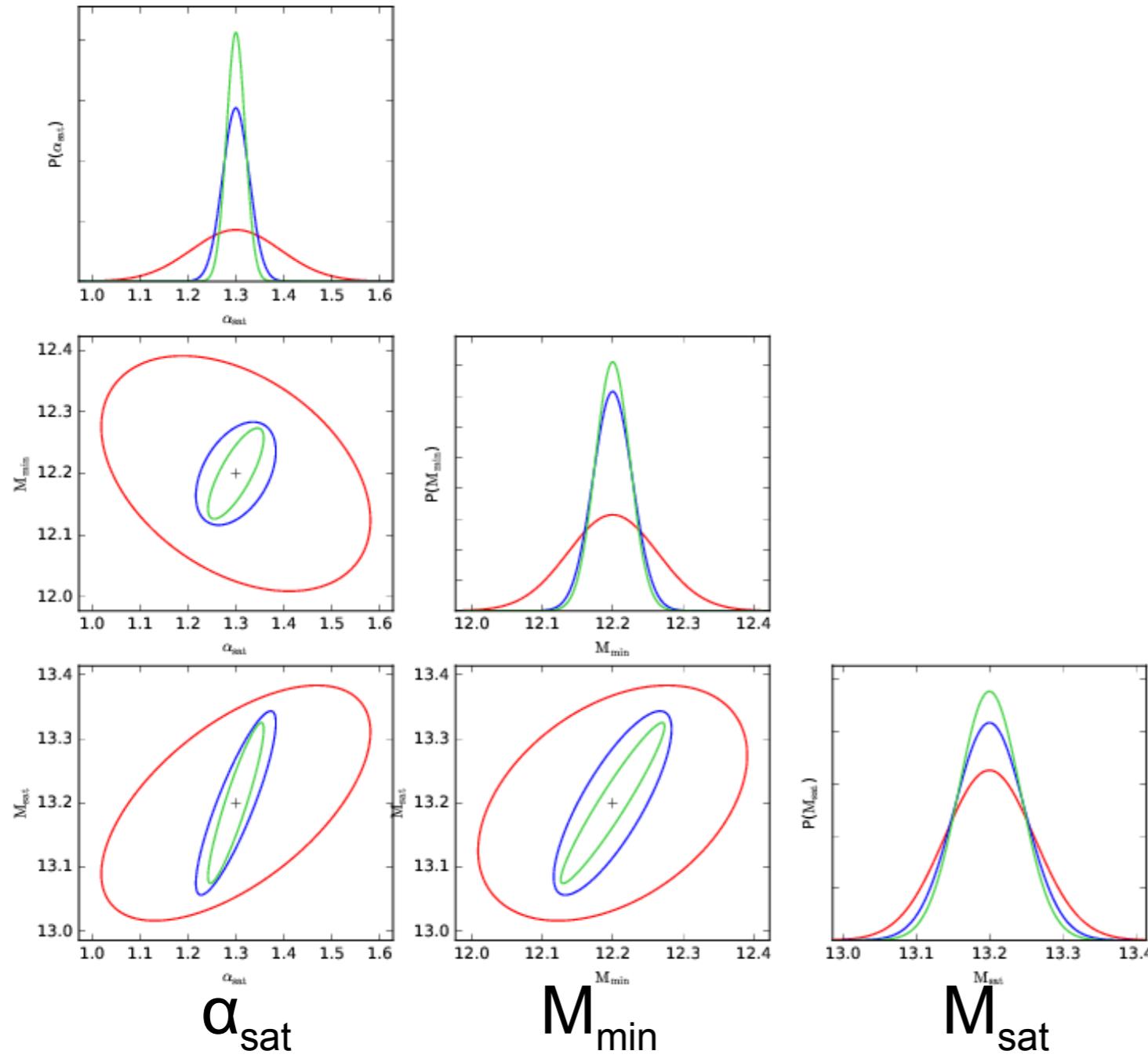
Joint with cross-cov
= realist

small difference with or
without cross-cov

Covariance DES-like à petite échelles



HOD case



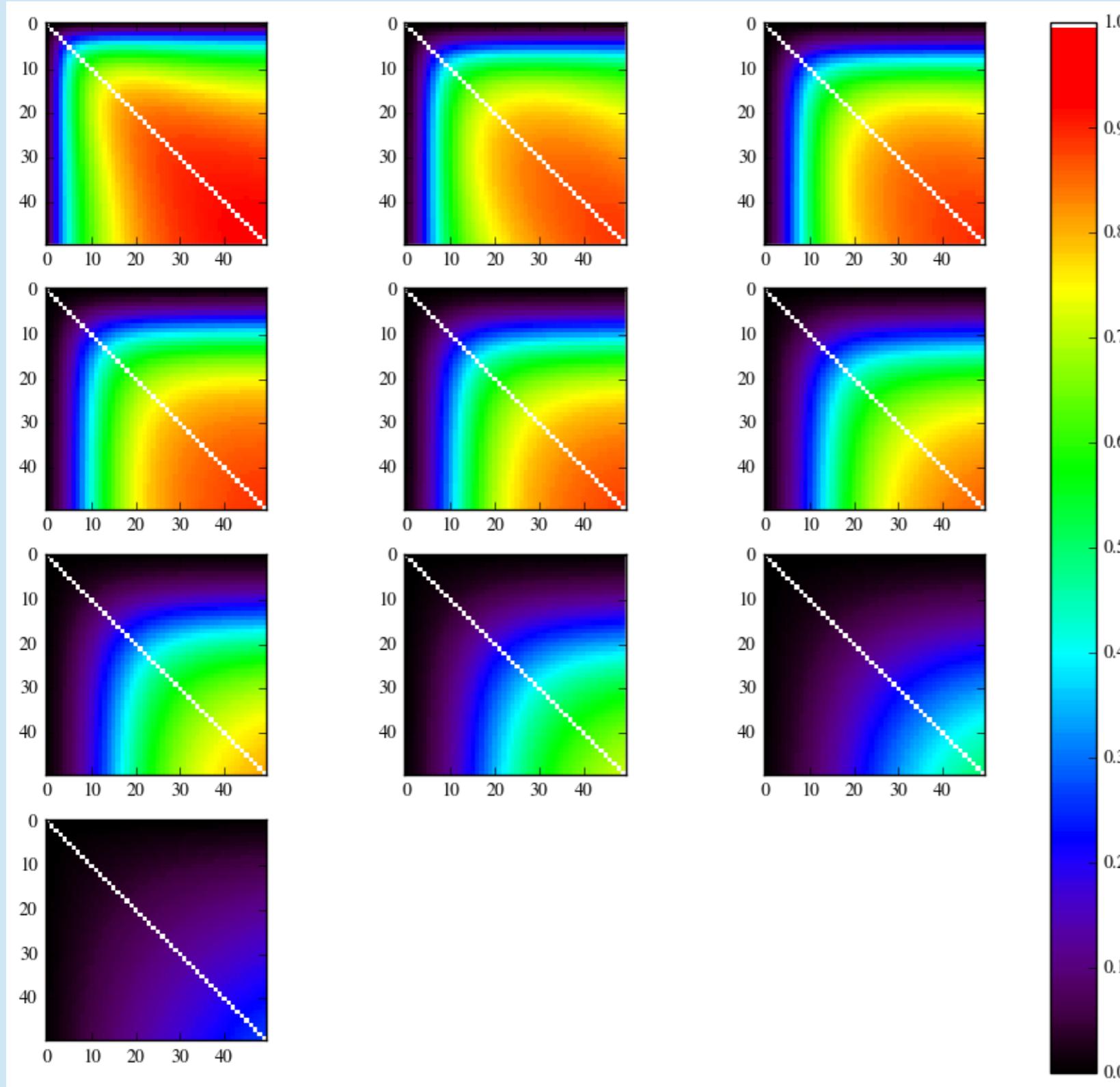
C(l) constraints

Joint without cross-cov
= naive

Joint with cross-cov
= realist

Better with than without

Covariance Euclid-like



Matrice de
corrélation :
 $C_{ij}/\sqrt{C_{ii} * C_{jj}}$

$\ell\text{ll}=30-2500$
Bins DI=50

$z=0-2.5$
10 bins à Ngal
constant

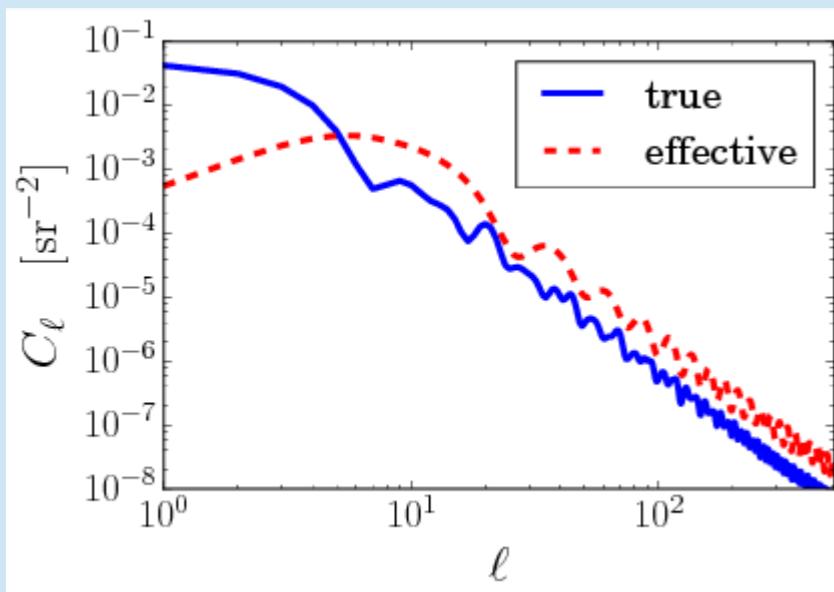
HOD ajustée en
fonction de z pour
reproduire $n(z)$

Internal covariance estimation

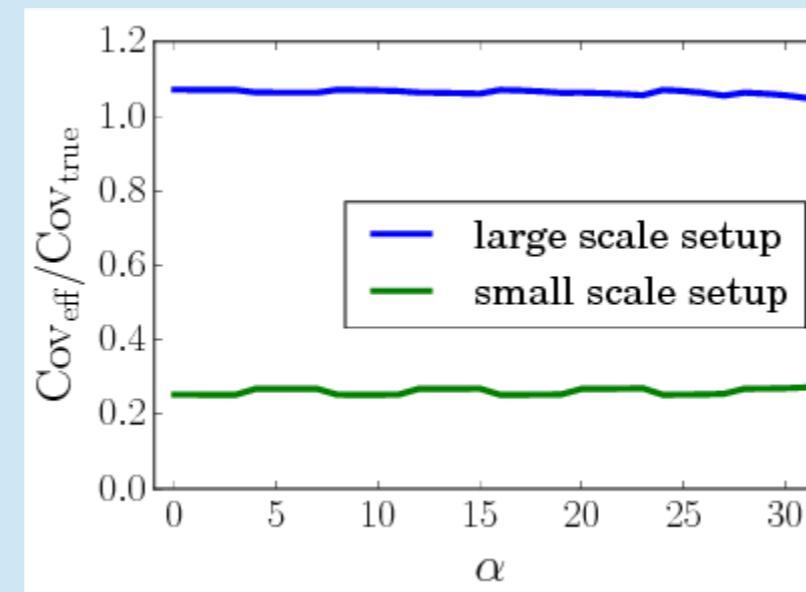
$$\langle \widehat{\text{Cov}} \rangle = \sum_{\ell} \frac{2\ell + 1}{4\pi} C_{\ell}^{\text{eff}} \text{Cov}_{\ell}^{\text{SSC}}$$

Jackknife/bootstrap is a rescaling of the estimate for the covariance of the subsample
 \Rightarrow unbiased only if subsamples are independent
 which is not the case with SSC

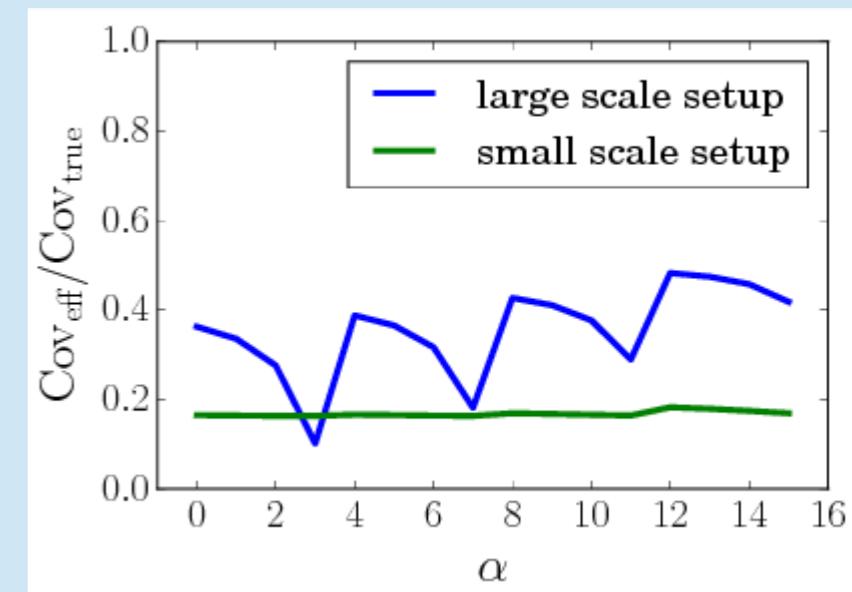
Lacasa & Kunz
 arXiv:1703.03337



Mask power spectrum
 vs effective from jackknife

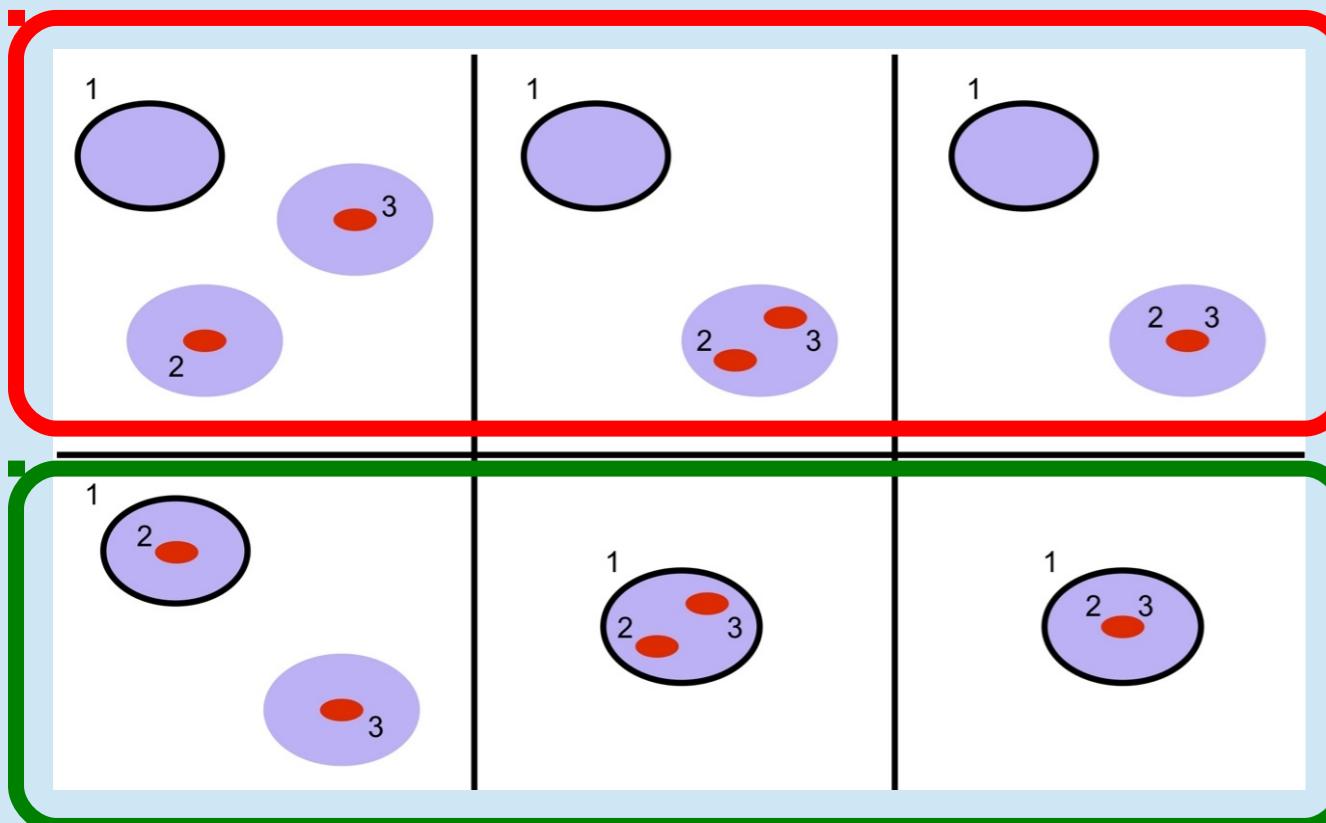


Ratio jackknife/true
 auto-redshift



Ratio jackknife/true
 cross-redshift

Diagrammatic



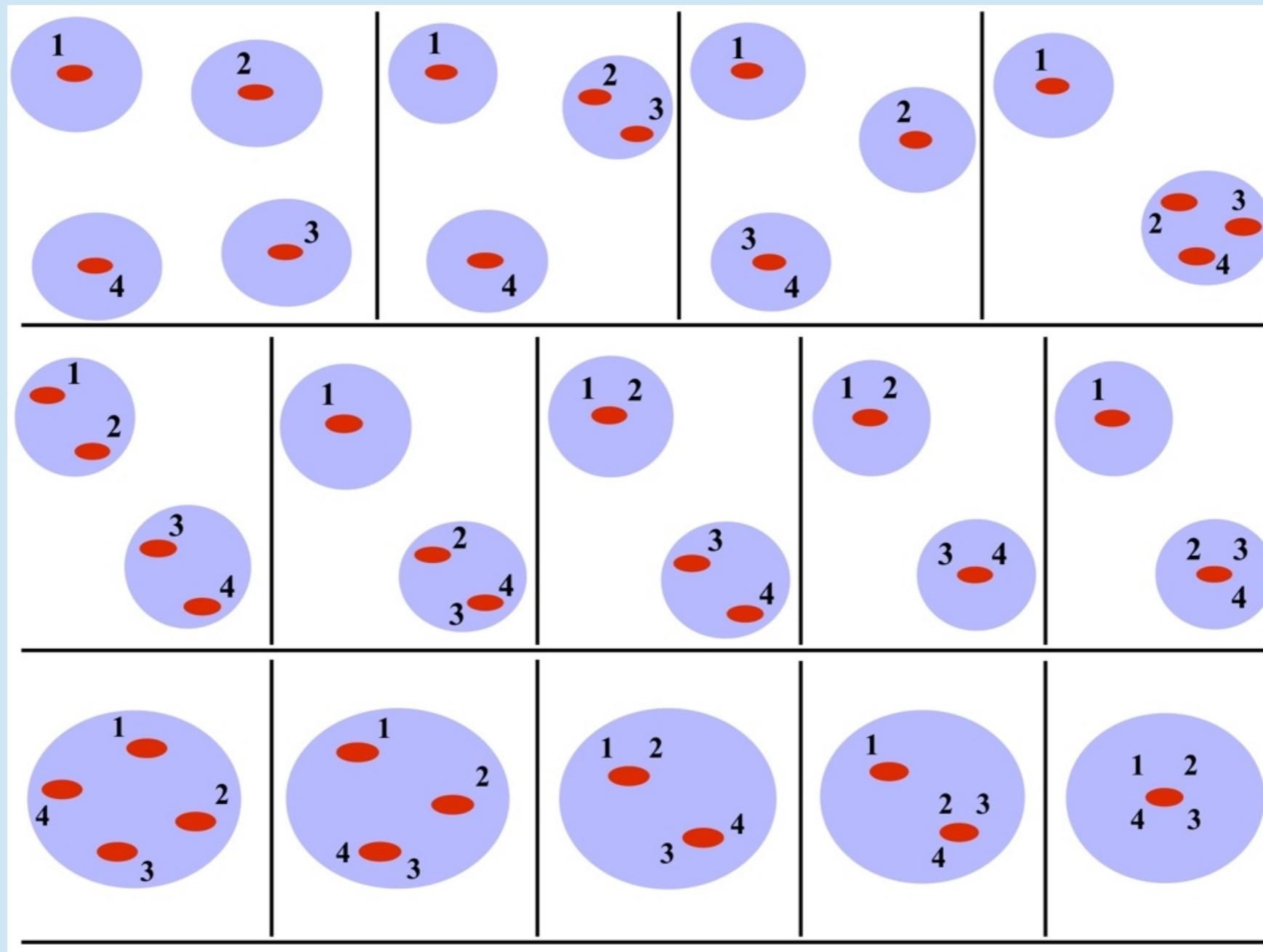
Super-sample covariance (SSC)
How observables fluctuate together
as they are modulated by large
scale structure.

How the clusters source the galaxy
power spectrum
Sensitive to the Halo Occupation
Distribution.

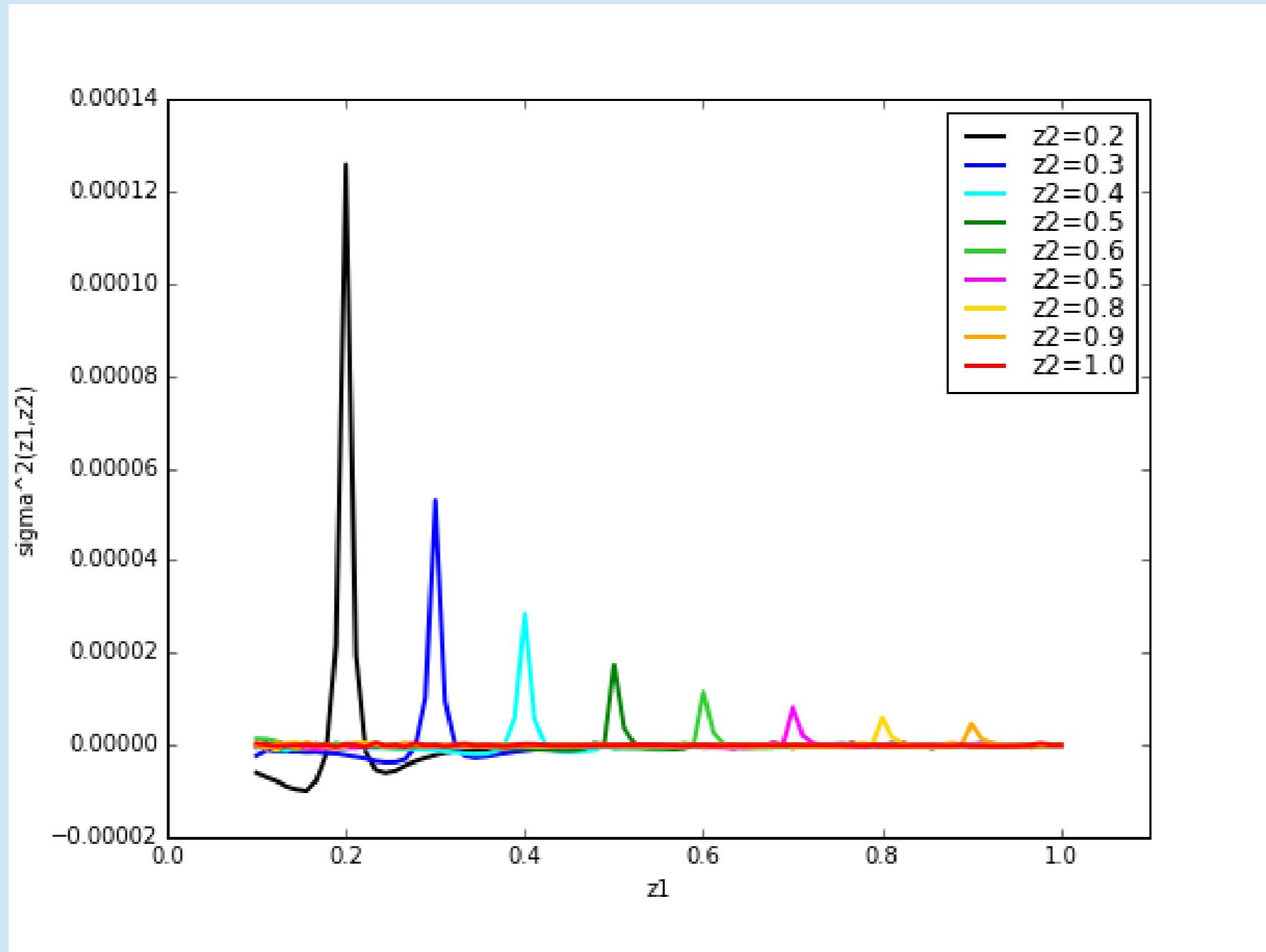
Each diagram → a term of the halo-galaxy-galaxy 3-point function
→ a term of the cross-covariance

3-halo term splits into contributions from
- perturbation theory (2PT)
- non-linear halo bias (b_2)

Diagrams for the galaxy trispectrum

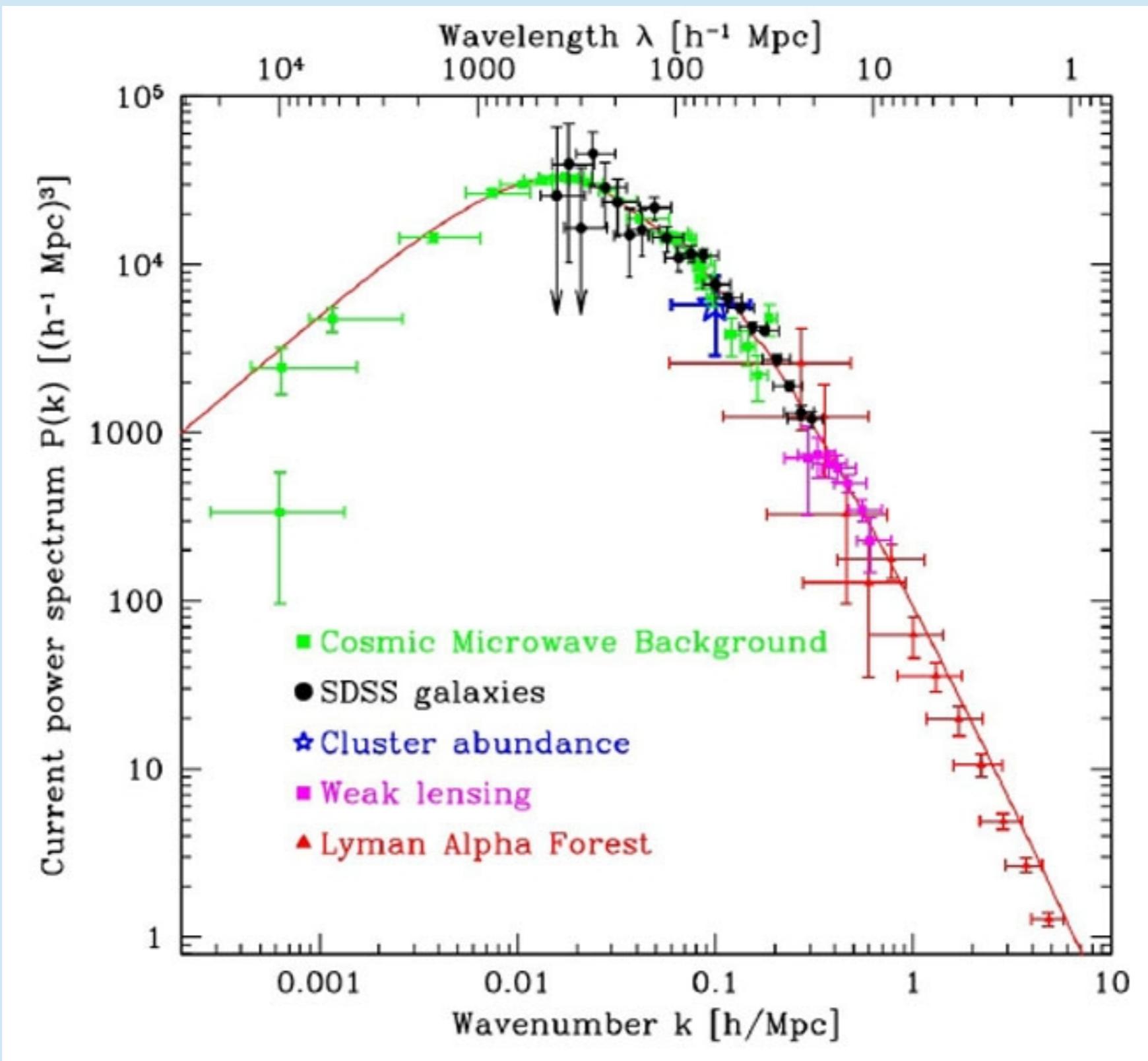


$$\sigma^2(z_1, z_2)$$

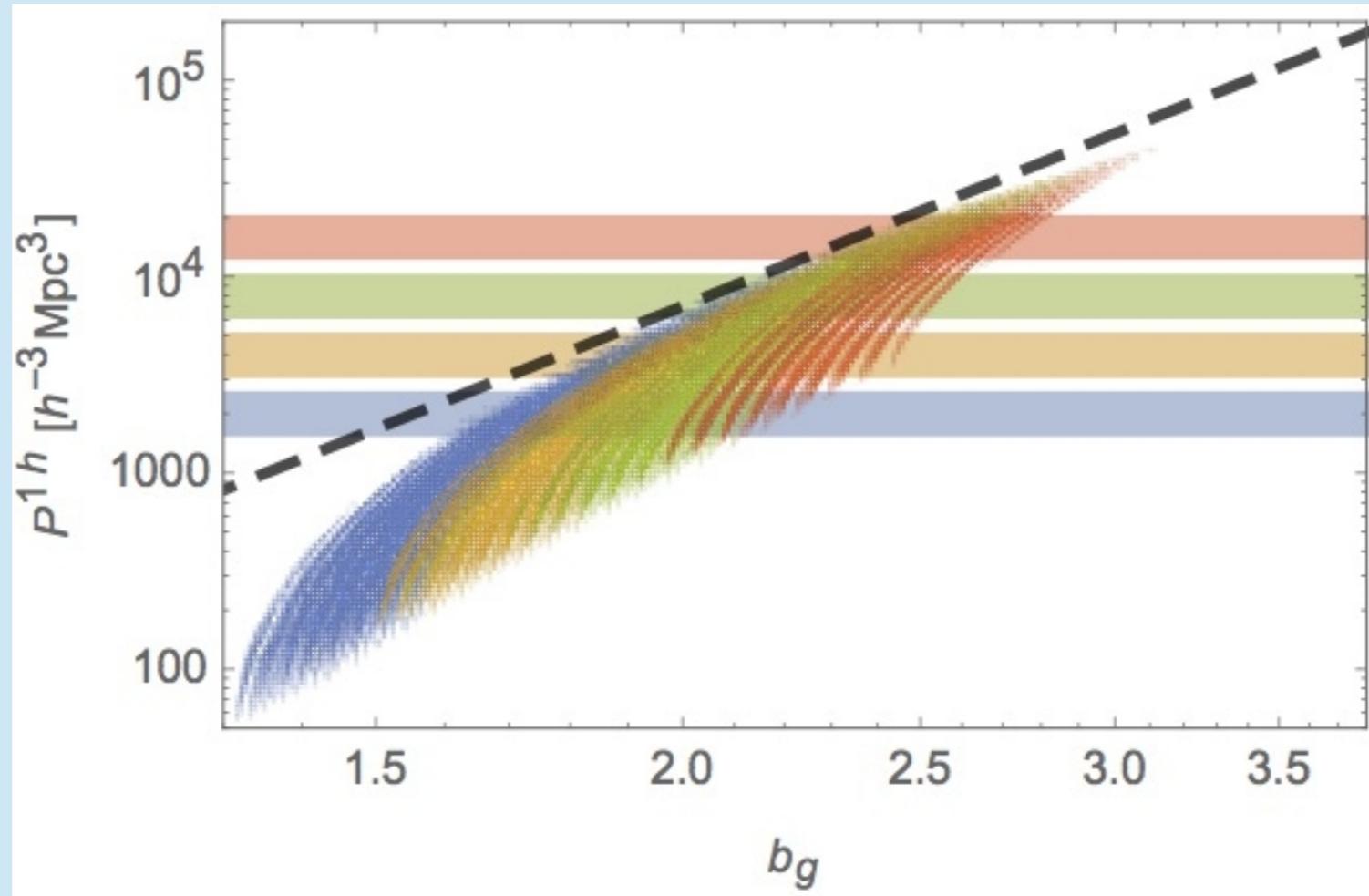


Covariance of the matter average density in the redshift shells z_1 and z_2

$P(k)$



Non-linear galaxy power spectrum



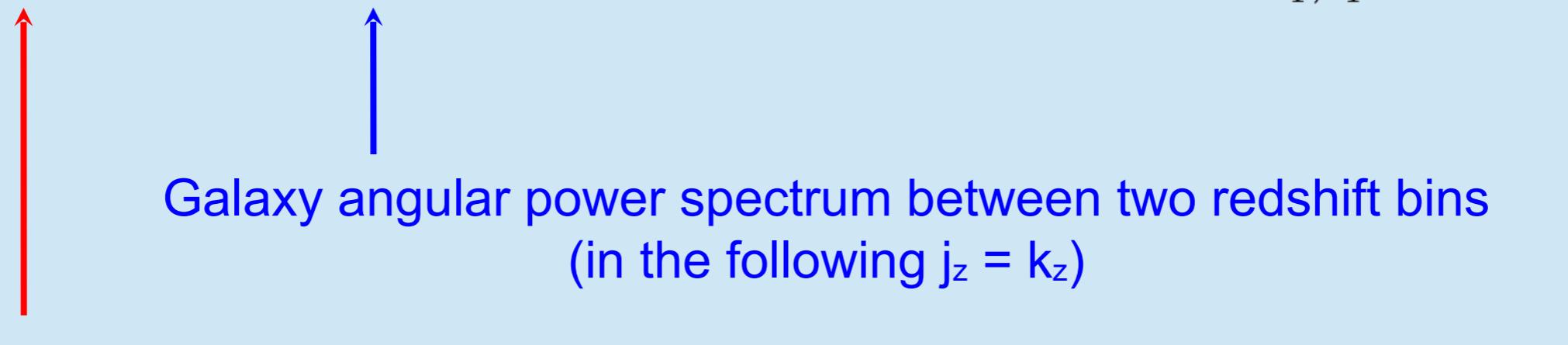
Amplitude of non-linearity depends on
galaxy sample selection
Does not scale as b^2 like $P_2h(k)$

Covariance of the galaxy spectrum and cluster counts

Cluster count is the monopole of the halo density field

$$\hat{N}_{\text{cl}}(i_M, i_z) = \overline{N}_{\text{cl}}(i_M, i_z) + \frac{1}{\Omega_S} \int dM d^2\hat{n} dz r^2 \frac{dr}{dz} \frac{d^2n_h}{dM dV} \delta_{\text{cl}}(\mathbf{x}, z | M, z)$$

$$\text{Cov} \left(\hat{N}_{\text{cl}}(i_M, i_z), \hat{C}_\ell^{\text{gal}}(j_z, k_z) \right) = \int \frac{dM_1 dz_{123}}{4\pi} \frac{dV}{dz_1} \left. \frac{d^2n_h}{dM dV} \right|_{M_1, z_1} b_{0\ell\ell}^{\text{hgg}}(M_1, z_{123})$$



Cluster count in a bin of mass (i_M) and redshift (i_z)

Halo-galaxy-galaxy angular bispectrum

Halo-galaxy-galaxy bispectrum : from 3D to 2D

$$b_{0\ell\ell}^{\text{hgg}}(M_1, z_{123}) = \frac{\delta(z_2 - z_3)}{r_2^2 \frac{dr}{dz_2}} \frac{2}{\pi} \int k_1^2 dk_1 B_{\text{hgg}}(k_1, k_2^*, k_2^* | M_1, z_1, z_2, z_3) j_0(k_1 r_1) j_0(k_1 r_2) \quad \text{with} \quad k_2^* = \frac{\ell + 1/2}{r(z_2)}$$

angular bispectrum

3D bispectrum

Bessel functions

Limber's approximation on k_2 and k_3
(bispectrum varies slowly compared to bessel's oscillations)

Ingredients

$$B_{\text{hgg}}^{2h-1h2g}(k_{123}|M_1, z_{123}) = \frac{\delta_{z_2, z_3}}{\bar{n}_{\text{gal}}^2(z_2)} \int dM \frac{d^2 n_h}{dM dV} \langle N_{\text{gal}}(N_{\text{gal}} - 1)(M) \rangle u(k_2|M) u(k_3|M) P_{\text{halo}}(k_1|M_1, M, z_1, z_2)$$

halo mass function
(Sheth&Tormen or Tinker)

Halo Occupation Distribution
(Tinker&Wetzel 2010)

halo profile
(NFW)

halo bias
(1 & 2, Tinker or Sheth&Tormen)

+ cosmology
(growth function, comoving volume...)

matter power spectrum
(Eisenstein&Hu 98)