

Prévisions cosmologiques avec le cisaillement gravitationnel

Ivan DEBONO
(Service d'Astrophysique - CEA Saclay)

Directeur de thèse : Alexandre RÉFRÉGIER

le 10 décembre 2009, CEA Saclay

Plan de la présentation

I. Introduction

- Modèle Cosmologique de Concordance
- Cisaillement gravitationnel (weak lensing)
- Objectifs de la thèse

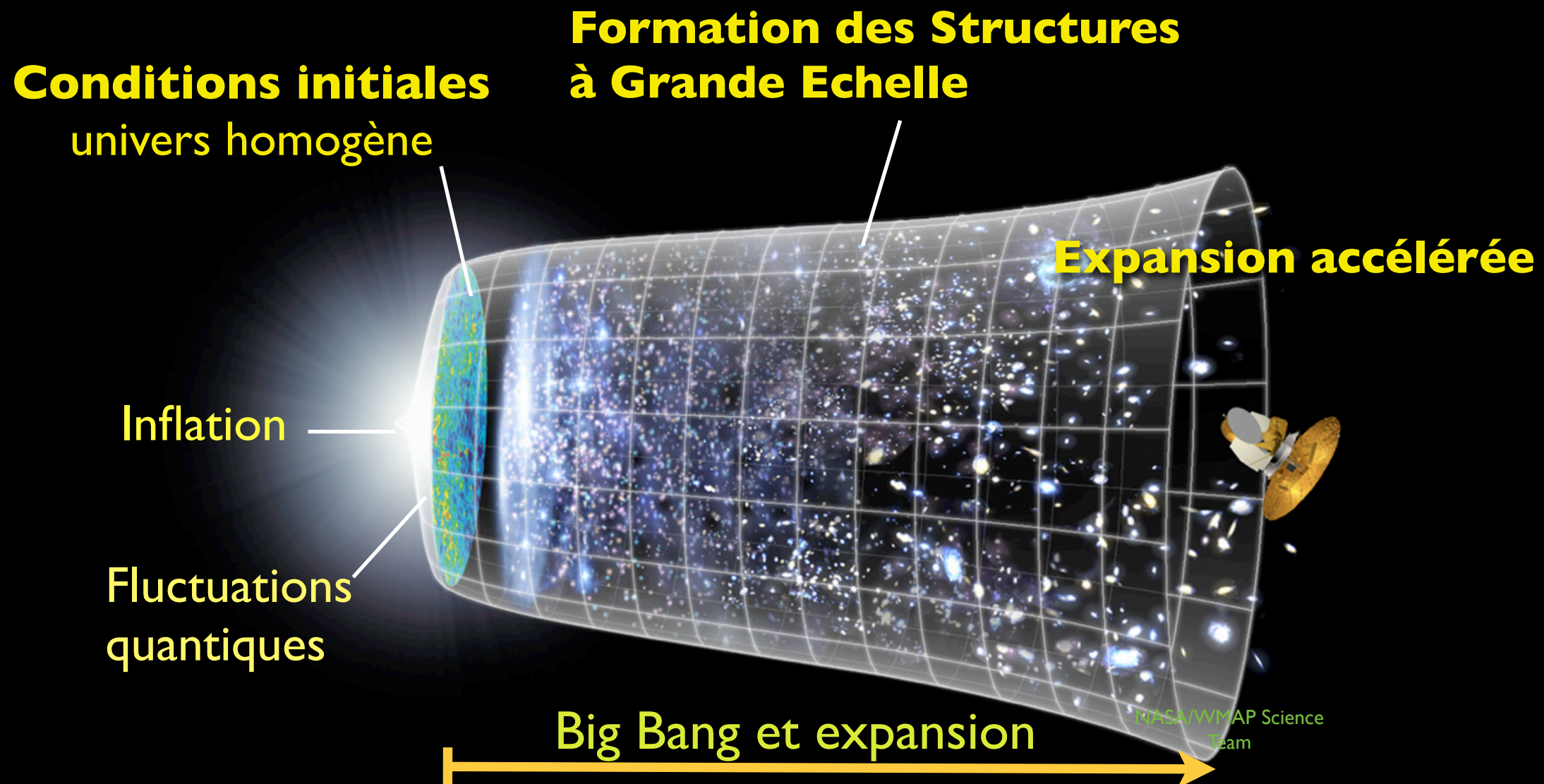
II. Résultats

- Prévisions des contraintes cosmologiques
- Élargissement du modèle
- Optimisation du relevé

III. Conclusions et perspectives

Modèle de Concordance Cosmologique

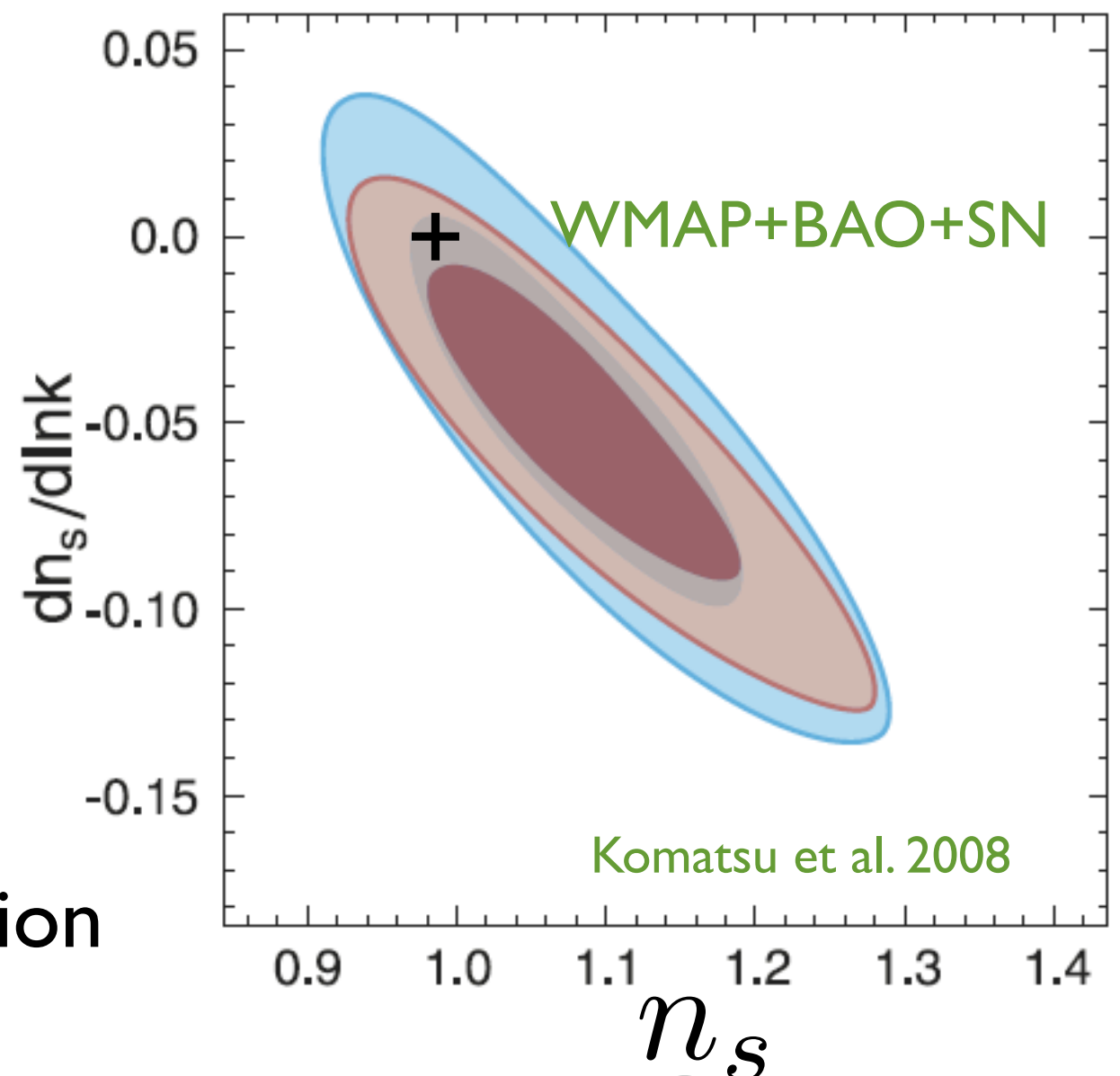
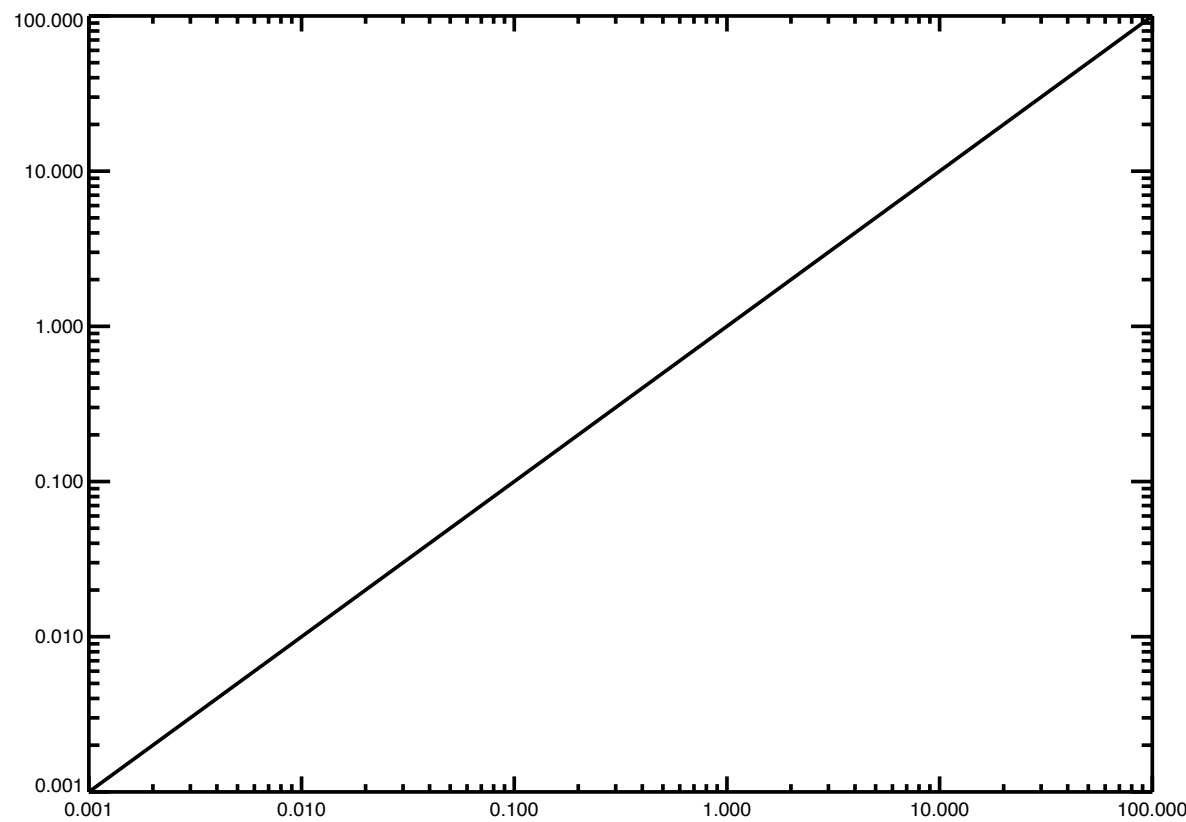
- Gravité : Relativité Générale
- Conditions initiales : Inflation
- Contenu : Matière, radiation, énergie noire



Conditions initiales : Spectre de fluctuations primordiales

Loi de puissance : indice spectral initial $P_{\text{prim}}(k) = A_s k^{n_s}$

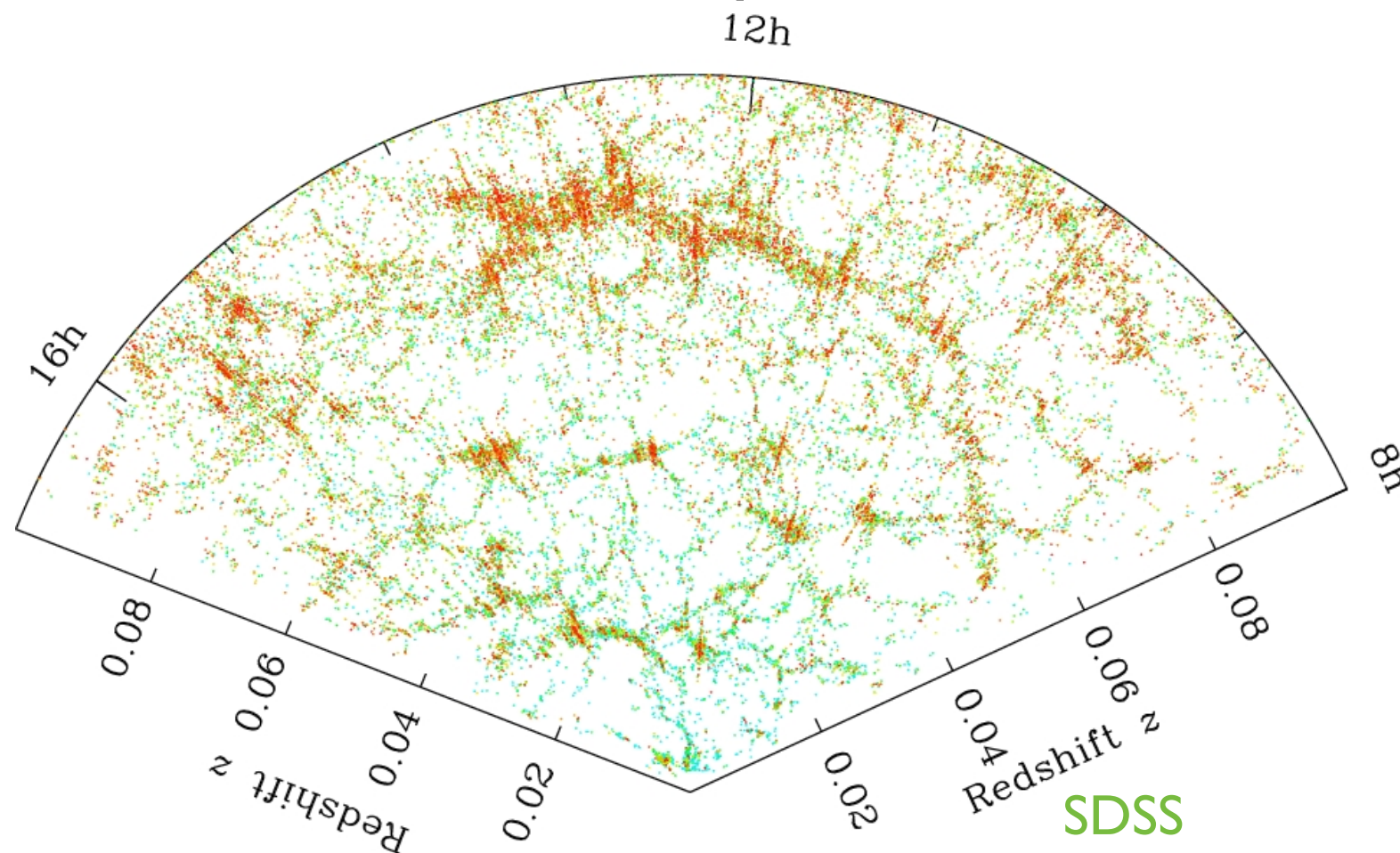
Deux paramètres : l'amplitude et la pente



- Motivée par la théorie de l'inflation
- En accord avec les observations

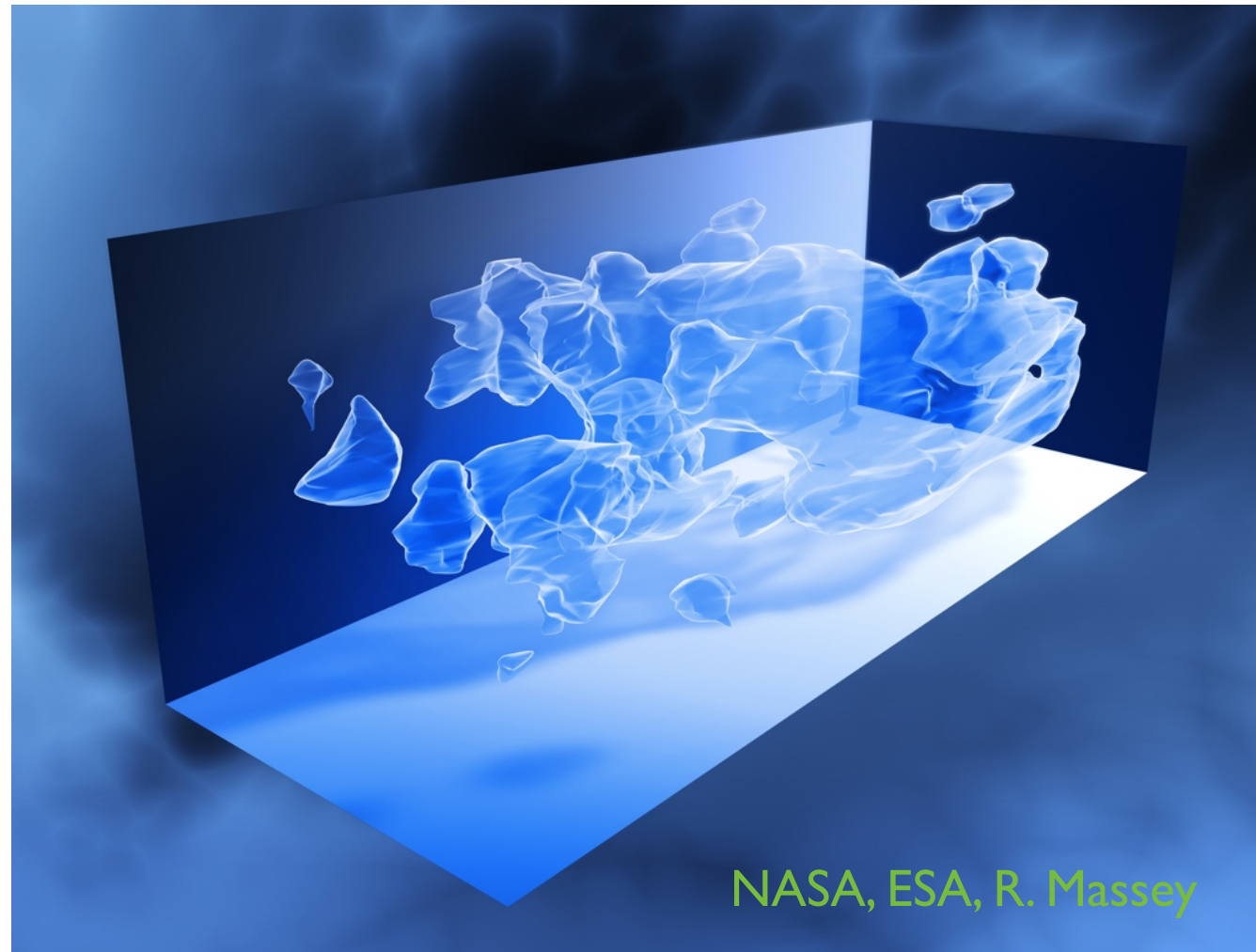
matière baryonique Ω_b

- Matière ordinaire
- Densité donnée par la nucléosynthèse primordiale
- Participent à la formation de structures
- 5% de l'Univers est composée de matière ordinaire



matière noire

- ‘Masse cachée’
- Composante non-lumineuse (Cold Dark Matter - CDM)
- Seule interaction avec matière ordinaire : gravitation
- Domine la formation de structures
- 25% de l'Univers est composée de matière noire



NASA, ESA, R. Massey

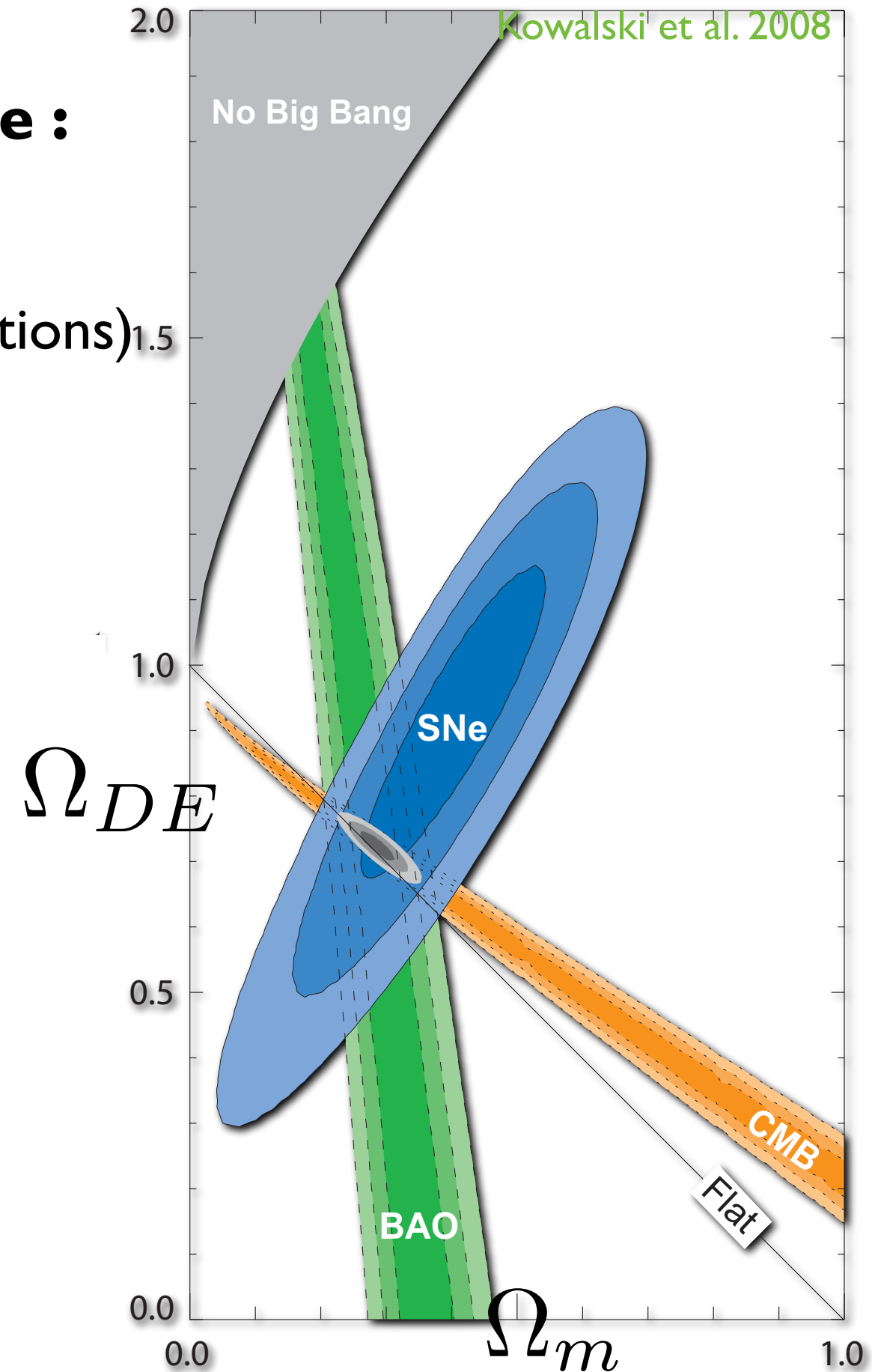
énergie noire

Évidence pour une autre composante :

- Accélération de l'expansion
- Supernovae, amas de galaxies
- Univers plat (théorie de l'inflation ; observations)

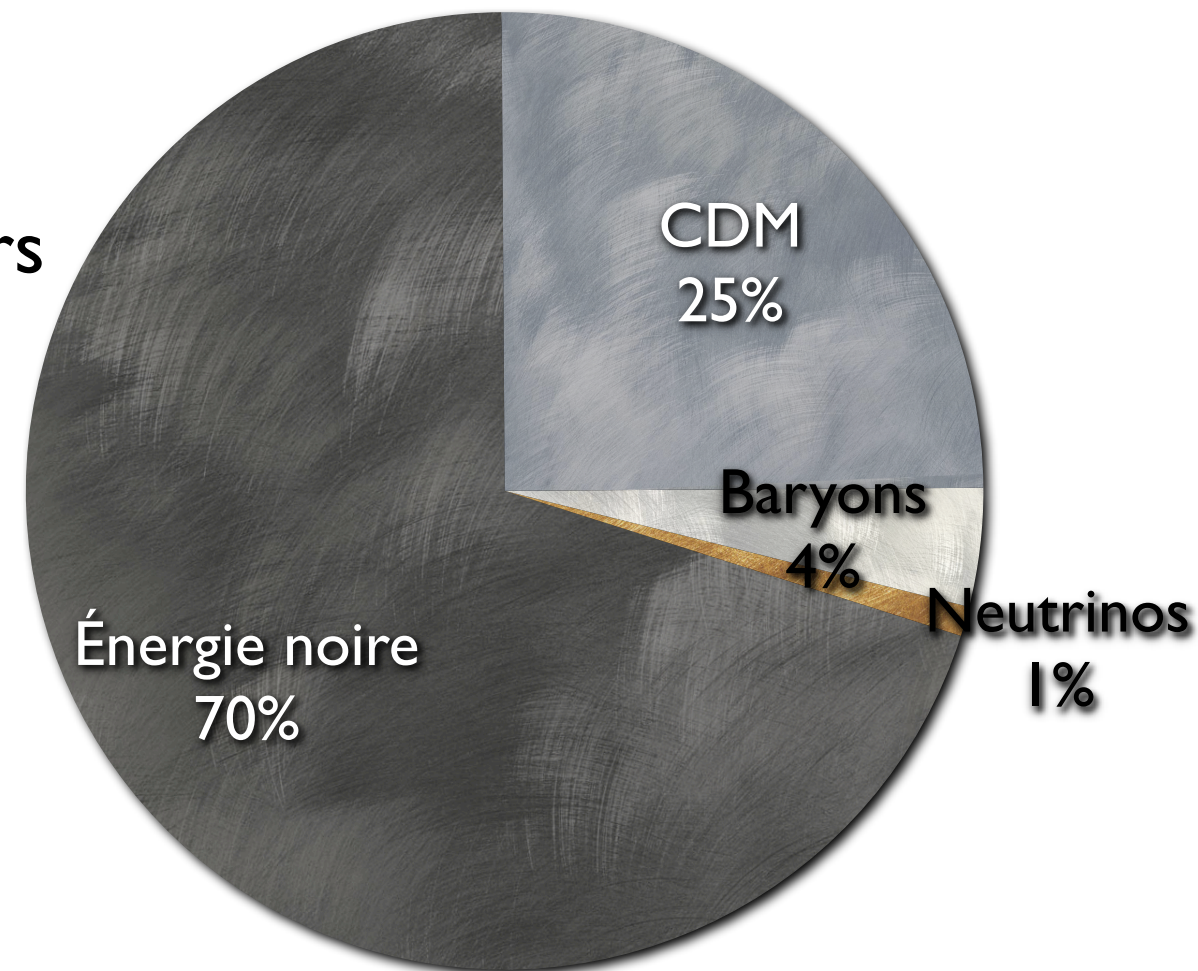
$$\Omega_m = 0.3$$

$$\Omega_{\text{tot}} = \Omega_m + \Omega_{DE}$$

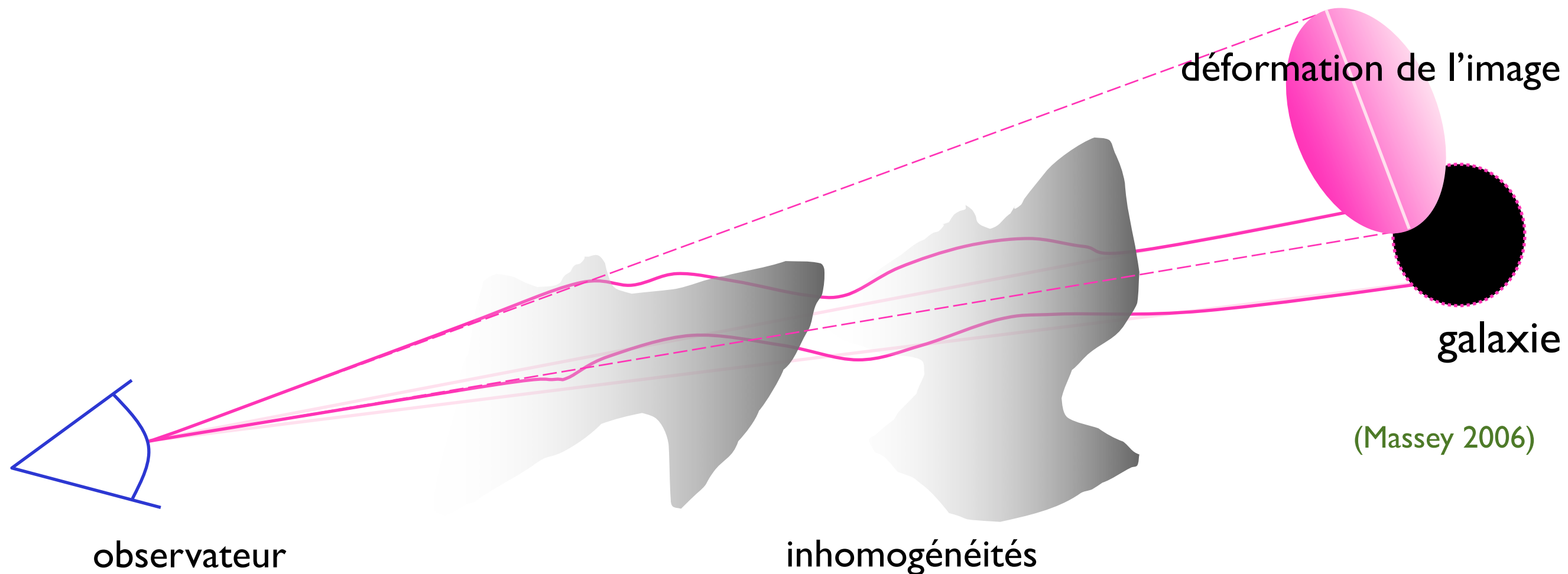


énergie noire Ω_{DE}

- Composante avec pression négative
- Contribution à la densité d'énergie
- **Explications possibles :**
 - Constante cosmologique Λ compatible avec la Relativité Générale
 - Modèles dynamiques (Quintessence)
 - Modifications de la Relativité Générale
 - Univers inhomogène (Backreaction)
- 70% du contenu d'énergie dans l'Univers

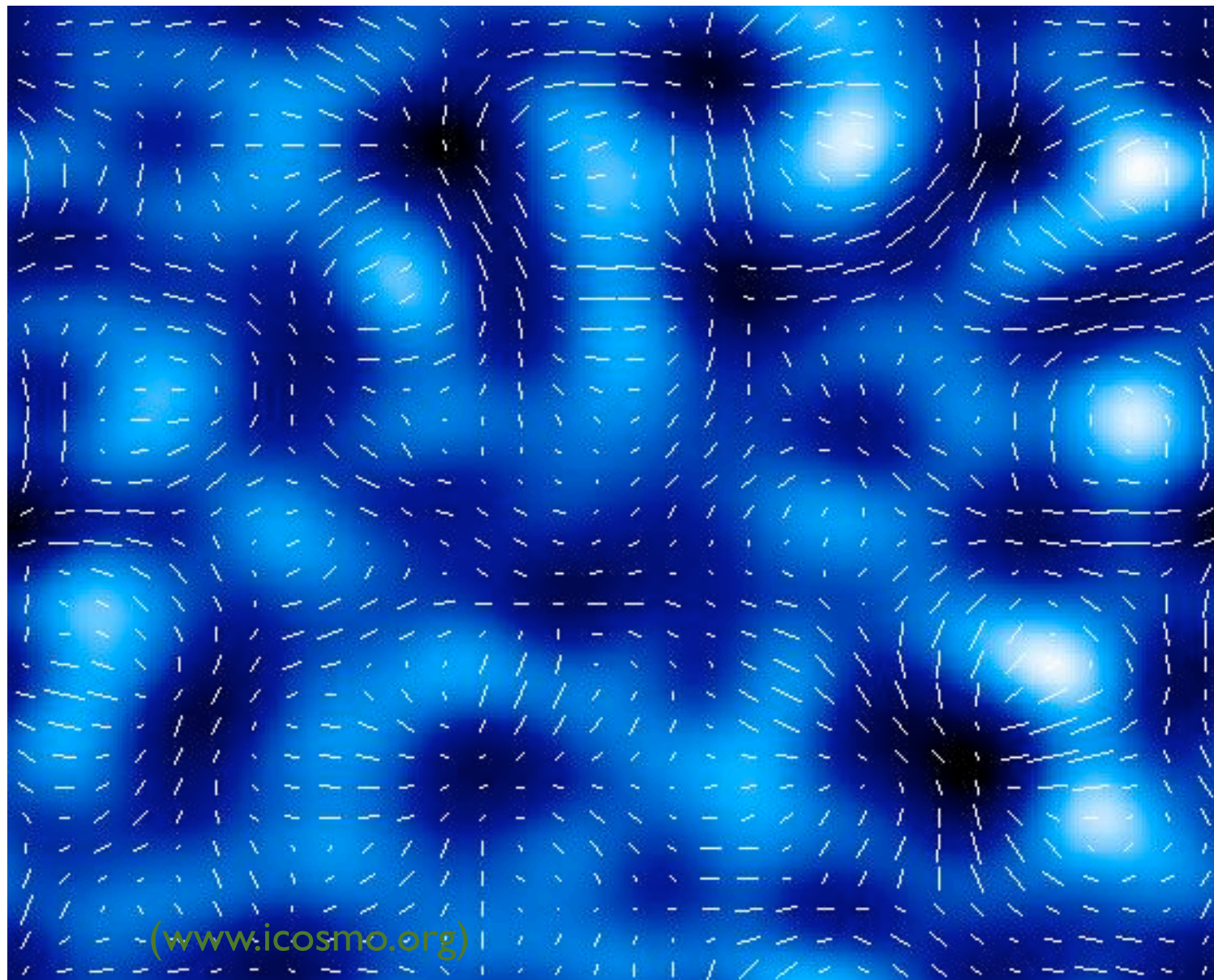


Méthode : Cisaillement gravitationnel



théorie

Mesure directe de la **distribution de masse** dans l'univers sans hypothèse sur les propriétés de la matière



Cartographie de la distribution de toute la masse dans l'Univers

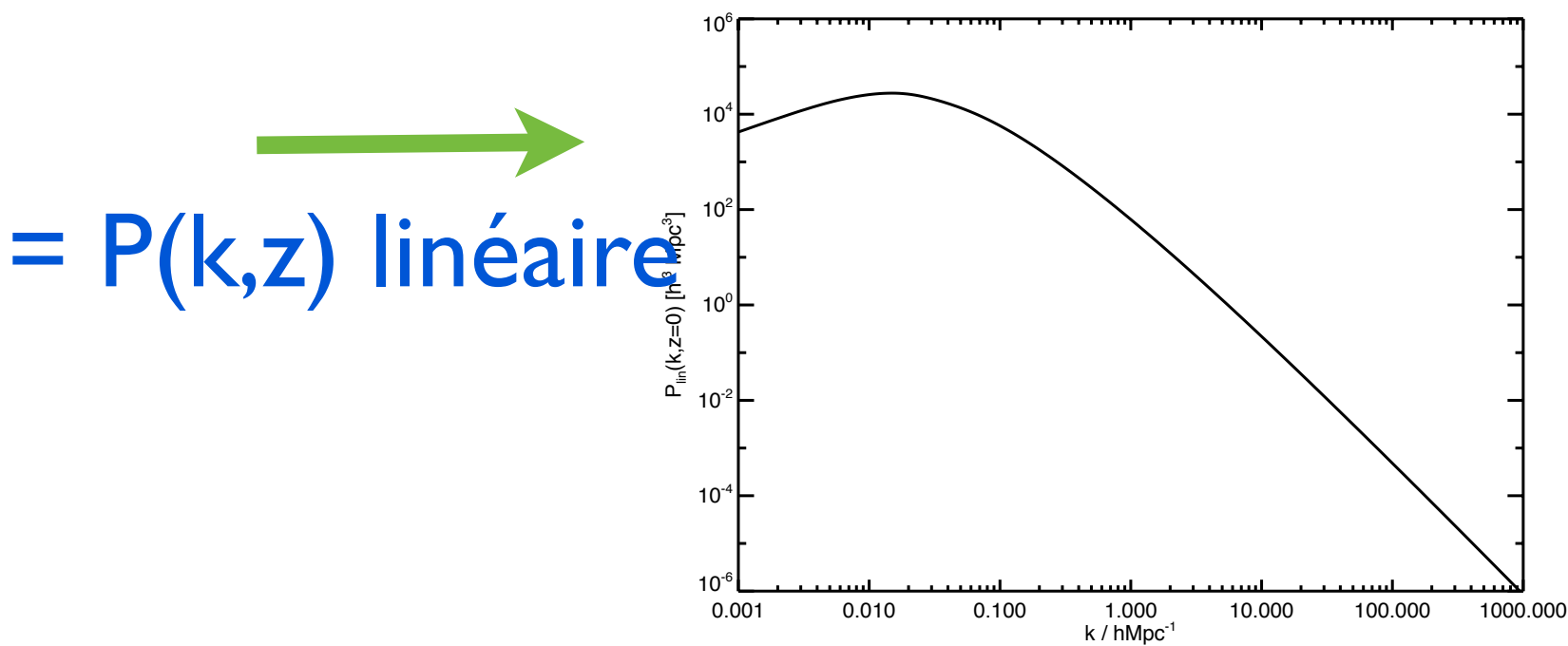
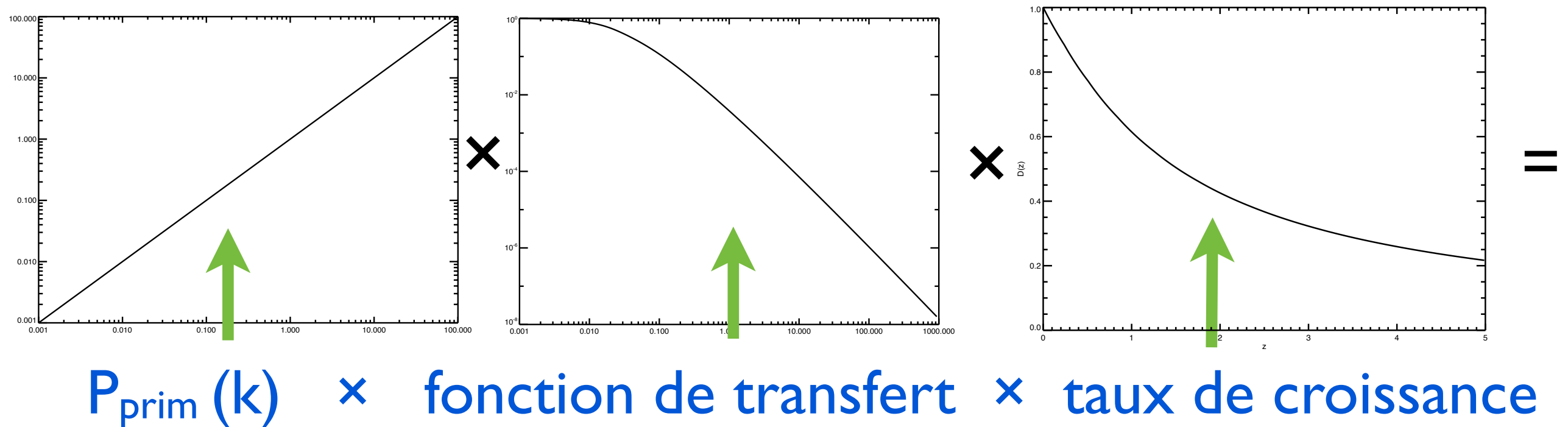
Permet de cartographier la matière noire

Cette distribution de masse est donnée par le **spectre de puissance de la matière...**

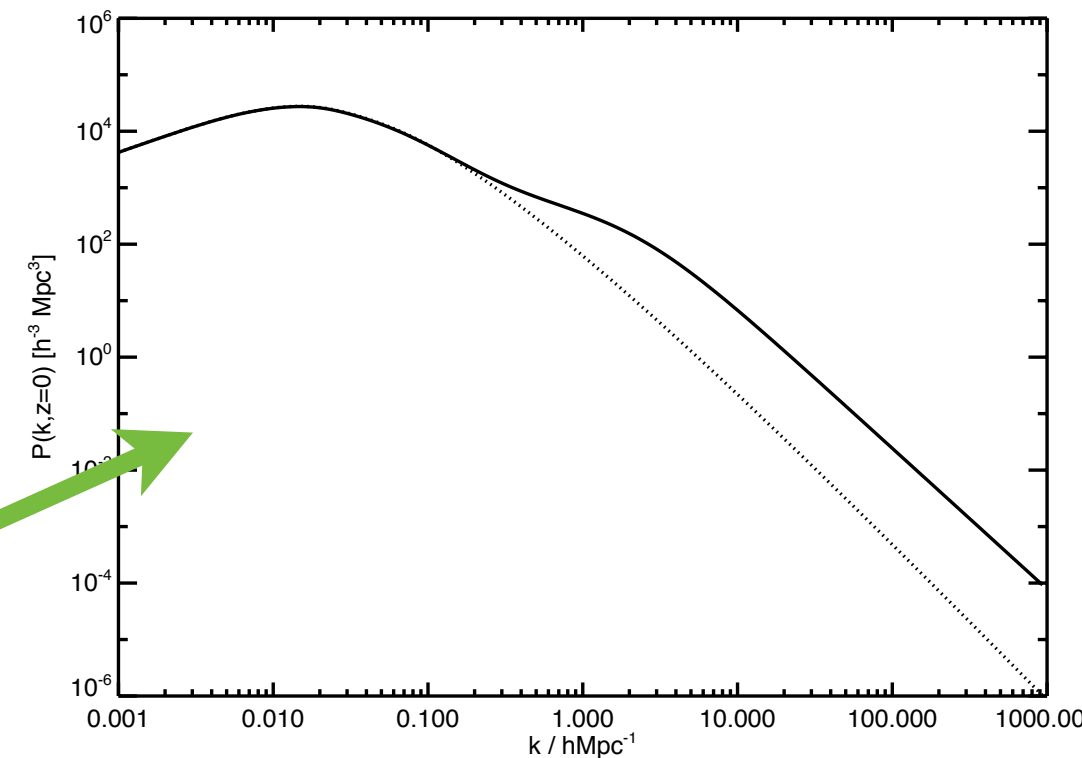
... qui dépend du modèle cosmologique

Observation $\longleftrightarrow$ Théorie

Le spectre de puissance de la matière



$\rightarrow$ corrections non-linéaires = $P(k, z)$



Spectre de puissance du cisaillement

$$C_\ell = \int dz \frac{H}{D_A^2} W^2(z) P(k = \ell / D_A, z)$$

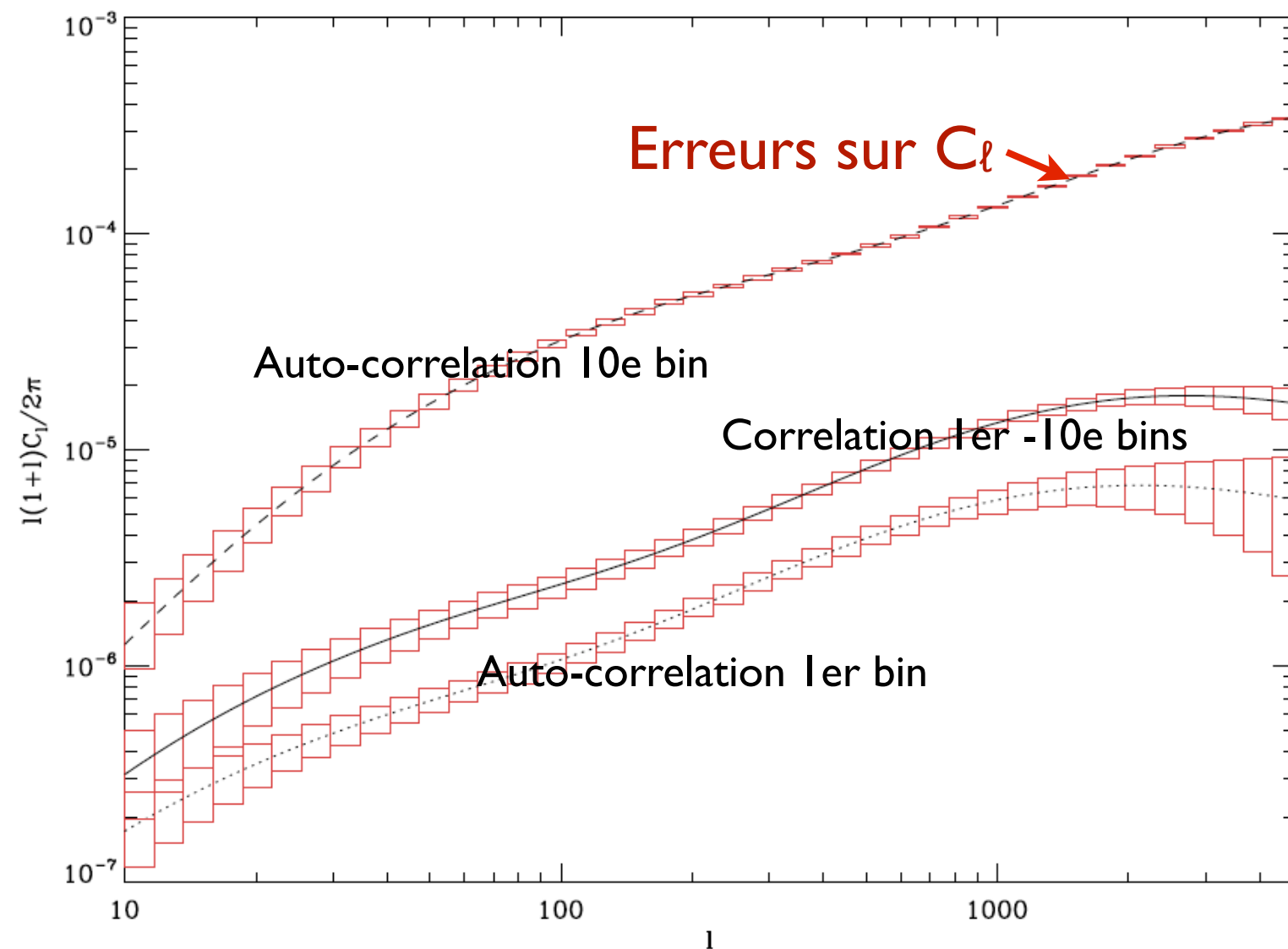
Projection de $P(k)$ sur la ligne de visée

Distance
angulaire

Spectre de puissance
de la matière

$$D_A(z) = (1 + z)^{-1} S_k \int_0^z \frac{cdz'}{H(z')}$$

Géométrie
de l'Univers



Fonction de poids

$$W(z) = \frac{3}{2} \Omega_m \frac{H_0}{H} \frac{H_0 D_d}{a} \int_z^\infty dz' \frac{D_s}{D_{ds}} n(z')$$

Distribution des galaxies

La précision des mesures : L'analyse de Fisher

- Prévisions des erreurs sur les mesures avec un relevé donné
- Seuls paramètres utilisés :
 - ▶ paramètres du relevé
 - ▶ ensemble de paramètres cosmologique p_α (modèle central)

Vraisemblance (Gaussienne)

- Matrice de Fisher

$$F_{\alpha\beta} = - \left\langle \frac{\partial^2 \ln \mathcal{L}}{\partial p_\alpha \partial p_\beta} \right\rangle = \sum_{\ell} \left(\frac{1}{\Delta C_\ell} \right)^2 \frac{\partial C_\ell}{\partial p_\alpha} \frac{\partial C_\ell}{\partial p_\beta}$$

Erreur sur les mesures

Variation autour du modèle central

- Limite inférieure pour erreur sur un paramètre $\Delta p_\alpha \geq \sqrt{F_{\alpha\alpha}^{-1}}$
- Contraintes jointes de 2 sondes : addition des matrices

$$\mathbf{F}_{\text{joint}} = \mathbf{F}_{\text{lensing}} + \mathbf{F}_{\text{CMB}}$$

Objectifs de la thèse

- Prévisions pour les contraintes avec un relevé du cisaillement gravitationnel de tout le ciel
- Modèle est élargi dans trois secteurs :
énergie noire, neutrinos, spectre de puissance primordial
- Les contraintes attendues dépendent-elles de :
 - ▶ ajout de paramètres libres ?
 - ▶ variations du modèle central ?
 - ▶ ajout d'information du CMB ?
 - ▶ variations des paramètres du relevé ?

Élargir le modèle : Énergie noire

Constante cosmologique $w = \frac{p}{\rho} = -1 = \text{constant}$

Énergie noire dynamique $w(a) = w_0 + (1 - a)w_a$

(Chevallier & Polarski, 2001 ; Linder, 2003)

Équation d'état peut dépendre du redshift

$$a = 1/(1 + z)$$

$$w(a) = w_n + (a_n - a)w_a$$

Redshift pivot : contraintes maximales sur w_n

Quantifier la précision (DETF)

$$\text{Figure of Merit} = \frac{1}{\Delta w_n \Delta w_a}$$

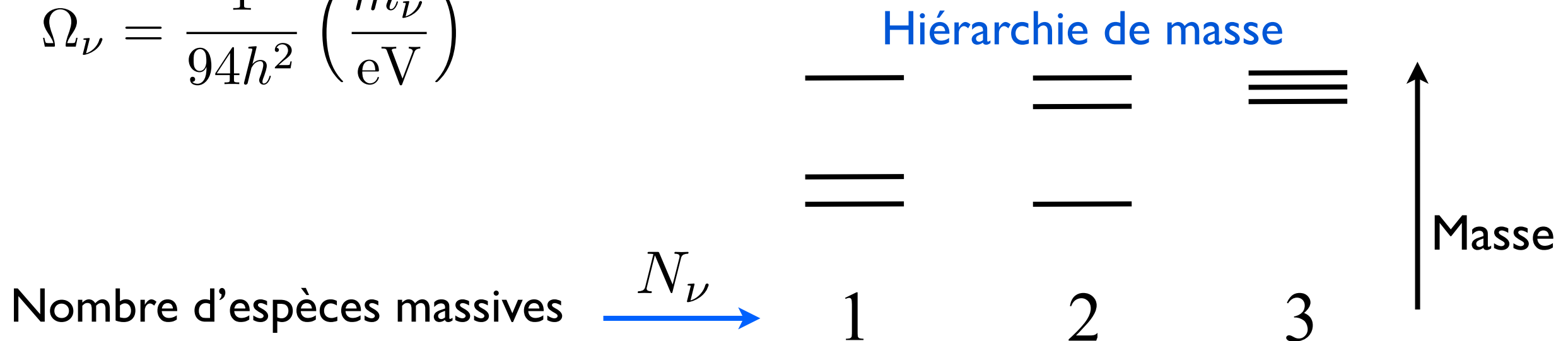
Élargir le modèle : Neutrinos

- Particule dans le Modèle Standard, observée
 - Super-KamiokaNDE (1998) : Les neutrinos ont une masse
 - **Effet sur la formation de structure :**
 - à une vitesse relativiste, ils peuvent s'échapper des puits de potentiel
 - Résultat : moins de surdensité à petite échelle
- ➡ La formation de Structures à Grande Échelle est sensible à la masse totale
- ➡ et le nombre d'espèces massives
- ➡ **Contraintes cosmologiques** sur la masse du neutrino

Lensing : $m_\nu < 3.3 \text{ eV}$ (Tereno et al. 2008)

Densité de neutrinos

$$\Omega_\nu = \frac{1}{94h^2} \left(\frac{m_\nu}{\text{eV}} \right)$$



Élargir le modèle : Spectre de puissance primordial

Loi de puissance : amplitude et indice spectral initial n_s

Pente + dérivée :

Dérivée de l'indice:
courbure du spectre de puissance primordial

$$\alpha = \left. \frac{dn_s}{d \ln k} \right|_{k_0} \quad n_s(k) = n_s(k_0) + \frac{1}{2!} \alpha \ln \left(\frac{k}{k_0} \right) + \frac{1}{3!} \beta \ln \left(\frac{k}{k_0} \right)^2$$

Point pivot

Paramétrisation plus générale : la dérivée seconde

$$\beta = \left. \frac{d^2 n_s}{d \ln k^2} \right|_{k_0}$$

Variation de l'espace d'hypothèses

- Ajout de paramètres libres au même modèle central
- Modèle de Concordance : 7 paramètres

8 paramètres libres

	énergie noire			matière		Hubble	spectre primordial				neutrinos	
Parameters	w_0	w_a	Ω_{DE}	Ω_m	Ω_b	h	σ_8	n_s	α	β	m_ν	N_ν
Eiducial values	-0.95	0	0.7	0.3	0.045	0.7	0.8	1	0	0	0.66	3
QCDM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	×	×
QCDM + α	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	×
QCDM + α + β	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
ν QCDM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	✓	✓
ν QCDM + α	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓
ν QCDM + α + β	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

12 paramètres libres

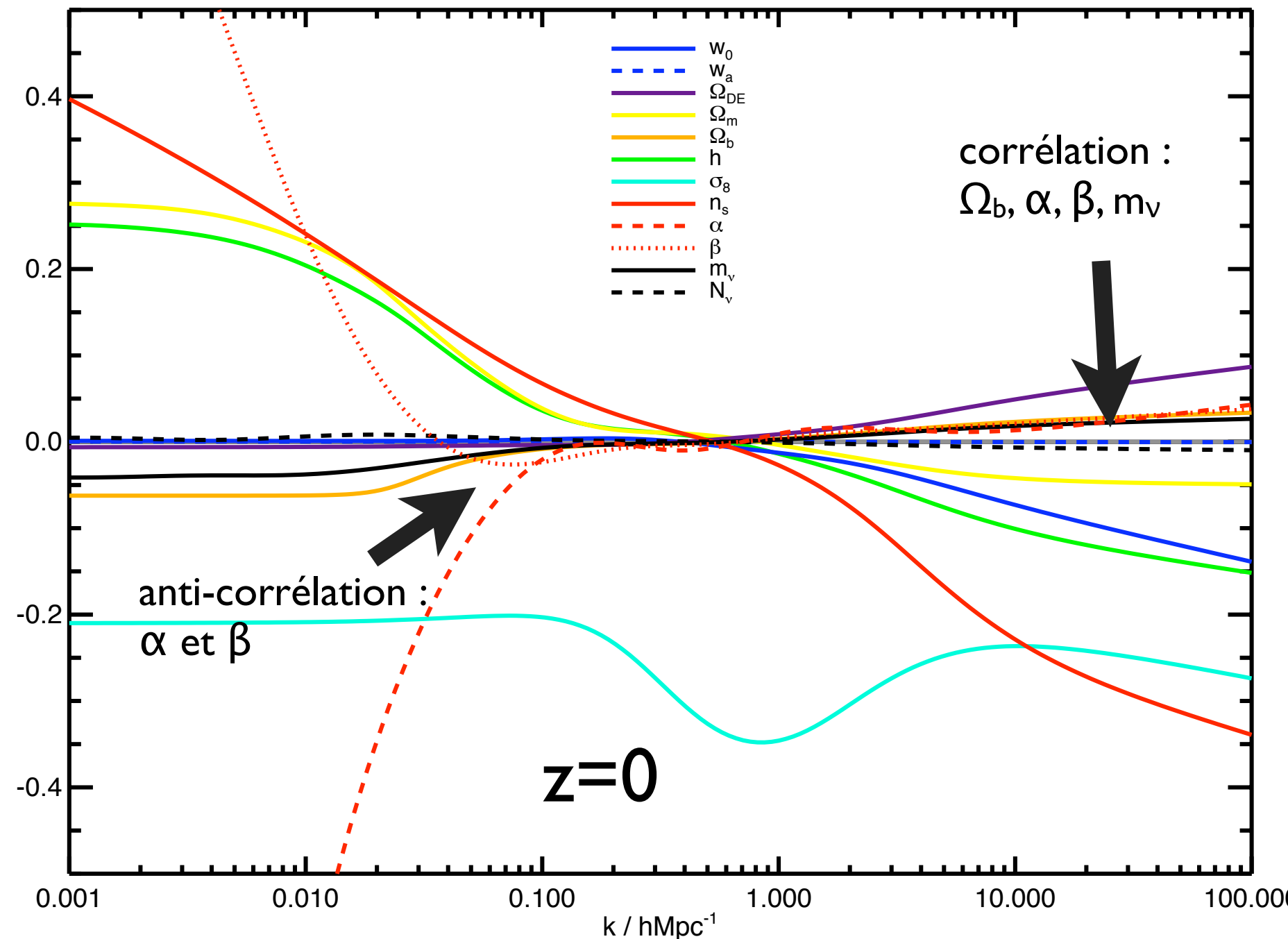
Effet des paramètres sur $P(k)$

12 paramètres :

w_0 w_a Ω_{DE} Ω_m Ω_b h σ_8 n_s α β m_ν N_ν

$$\text{Fractional change} = \frac{P(k)_{\text{fid}} - P(k)}{P(k)_{\text{fid}}}$$

Variation de +10% sur
chaque paramètre

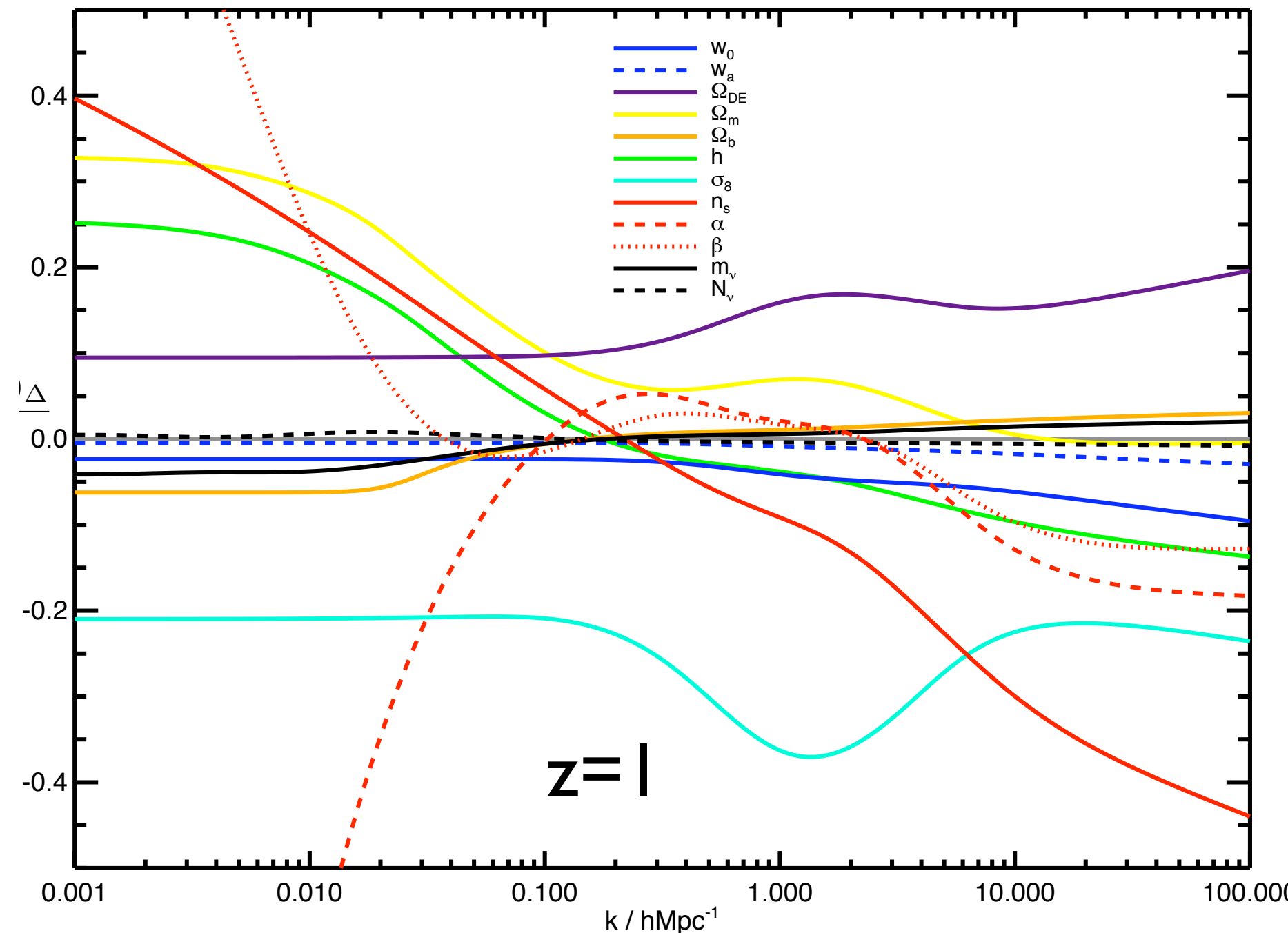


Effet des paramètres sur $P(k)$

Effet à
différentes
échelles et
redshifts

$$\text{Fractional change} = \frac{P(k)_{\text{fid}} - P}{P(k)_{\text{fid}}}$$

Variation de +10% sur
chaque paramètre



Erreurs marginalisées

erreurs sur un paramètre sans hypothèse sur les autres paramètres

Paramètres QCDM:
énergie noire,
matière noire
baryons

Espace d'hypothèse élargi



Parameter	QCDM	ν QCDM	QCDM $+\alpha$	QCDM $+\alpha + \beta$	ν QCDM $+\alpha$	ν QCDM $+\alpha + \beta$
w_0	0.05633	0.06443	0.05740	0.06583	0.08099	0.09608
w_a	0.19297	0.23674	0.21567	0.24988	0.32904	0.48144
Ω_{DE}	0.05214	0.05841	0.05287	0.05297	0.05842	0.05856
Ω_m	0.00731	0.00742	0.00731	0.00752	0.00749	0.00756
Ω_b	0.02411	0.02558	0.02544	0.02981	0.03200	0.03201
m_ν/eV		1.10229			1.19614	1.51694
N_ν		3.27380			3.81643	11.12214
h	0.11337	0.23176	0.18660	0.24691	0.41999	0.53253
σ_8	0.01184	0.01230	0.01185	0.01268	0.01307	0.01319
n_s	0.02904	0.03038	0.08662	0.11158	0.11969	0.12003
α			0.04378	0.05661	0.06556	0.07137
β				0.02574		0.08479
FOM	130.99	79.69	114.86	97.59	56.36	38.02

**Lensing
seul**

Ajout d'information du CMB

Lensing seul

Lensing + CMB

Parameter	QCDM	QCDM
w_0	0.05633	0.04942
w_a	0.19297	0.17943
Ω_{DE}	0.05214	0.00644
Ω_m	0.00731	0.00389
Ω_b	0.02411	0.00091
m_ν/eV		
N_ν		
h	0.11337	0.00599
σ_8	0.01184	0.00461
n_s	0.02904	0.00332
α		
β		
FOM	130.99	357.12

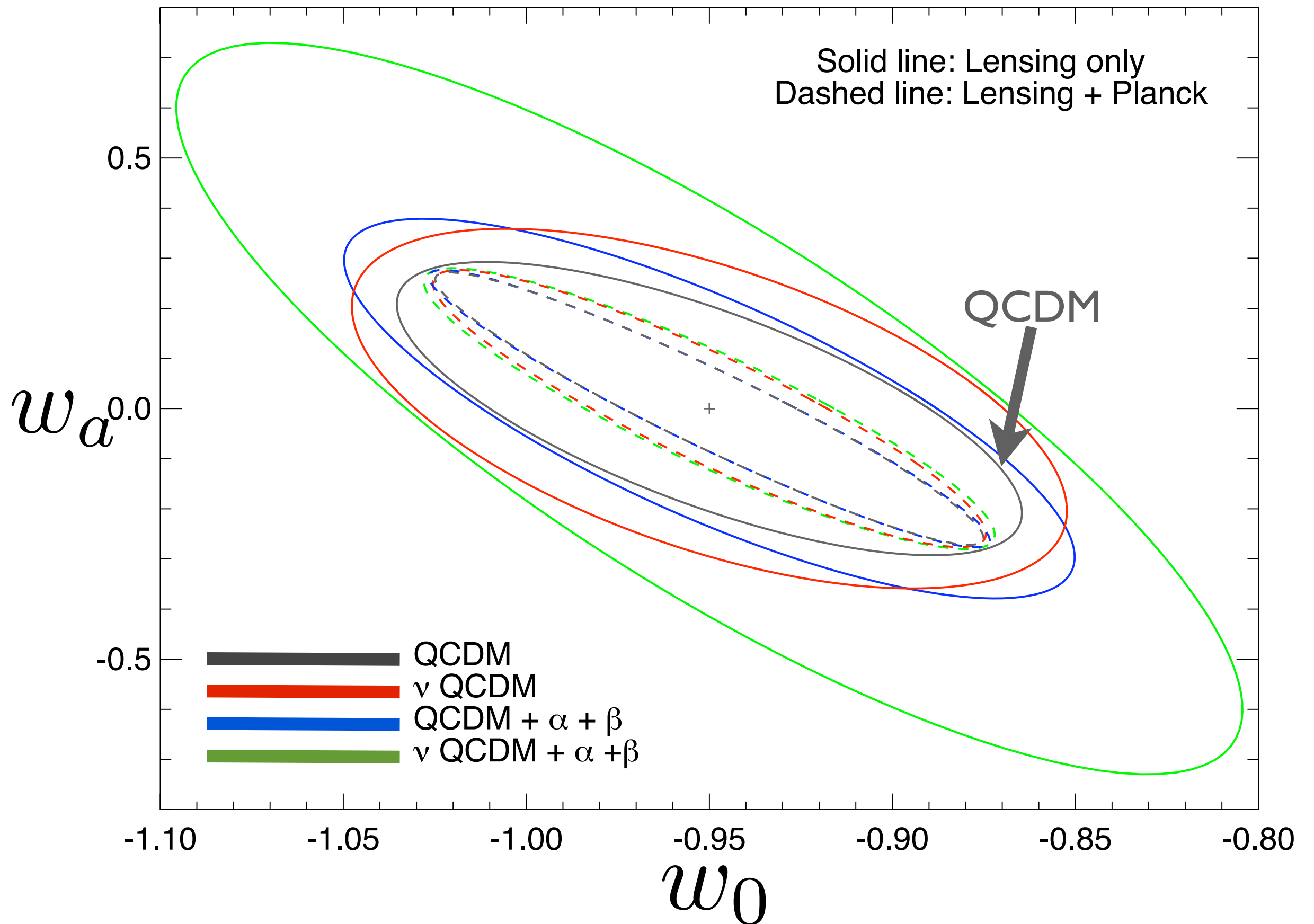


énergie noire



spectre primordial

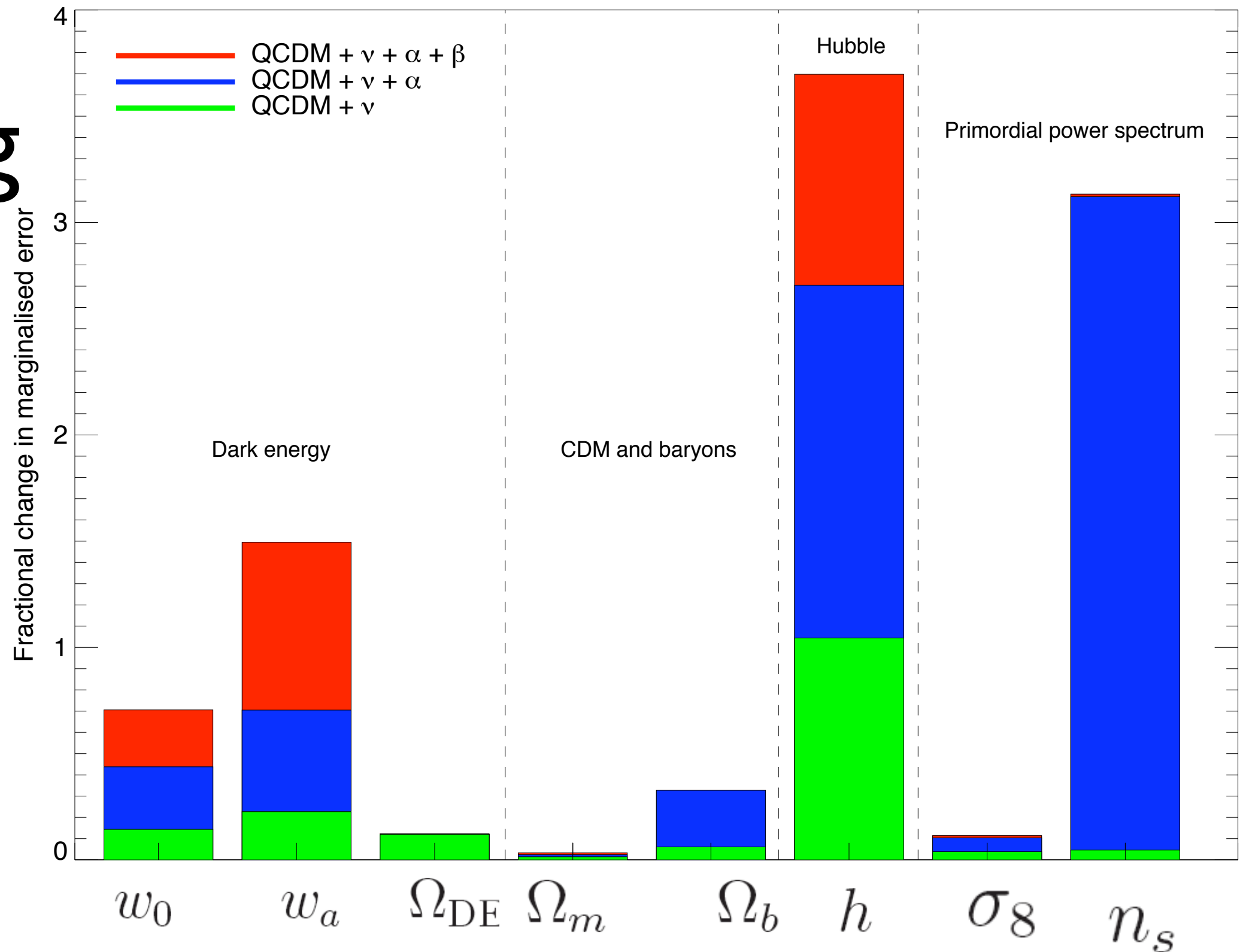
Contraintes sur l'équation d'état de l'énergie noire



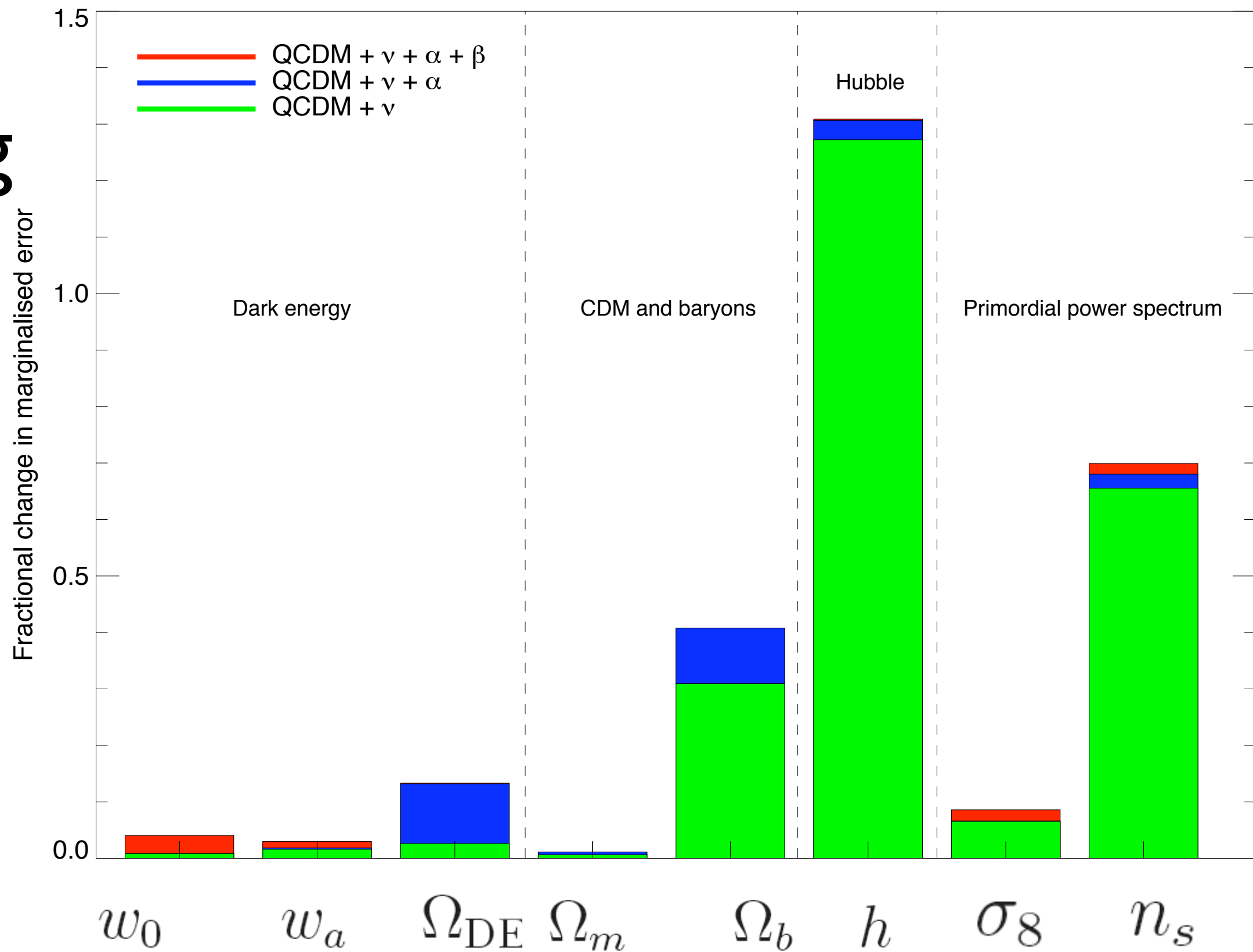
Quantifier la variation dans la précision sur un paramètre

$$\text{Fractional change in error} = \frac{\Delta p_{\text{ext}} - \Delta p_{\text{QCDM}}}{\Delta p_{\text{QCDM}}}$$

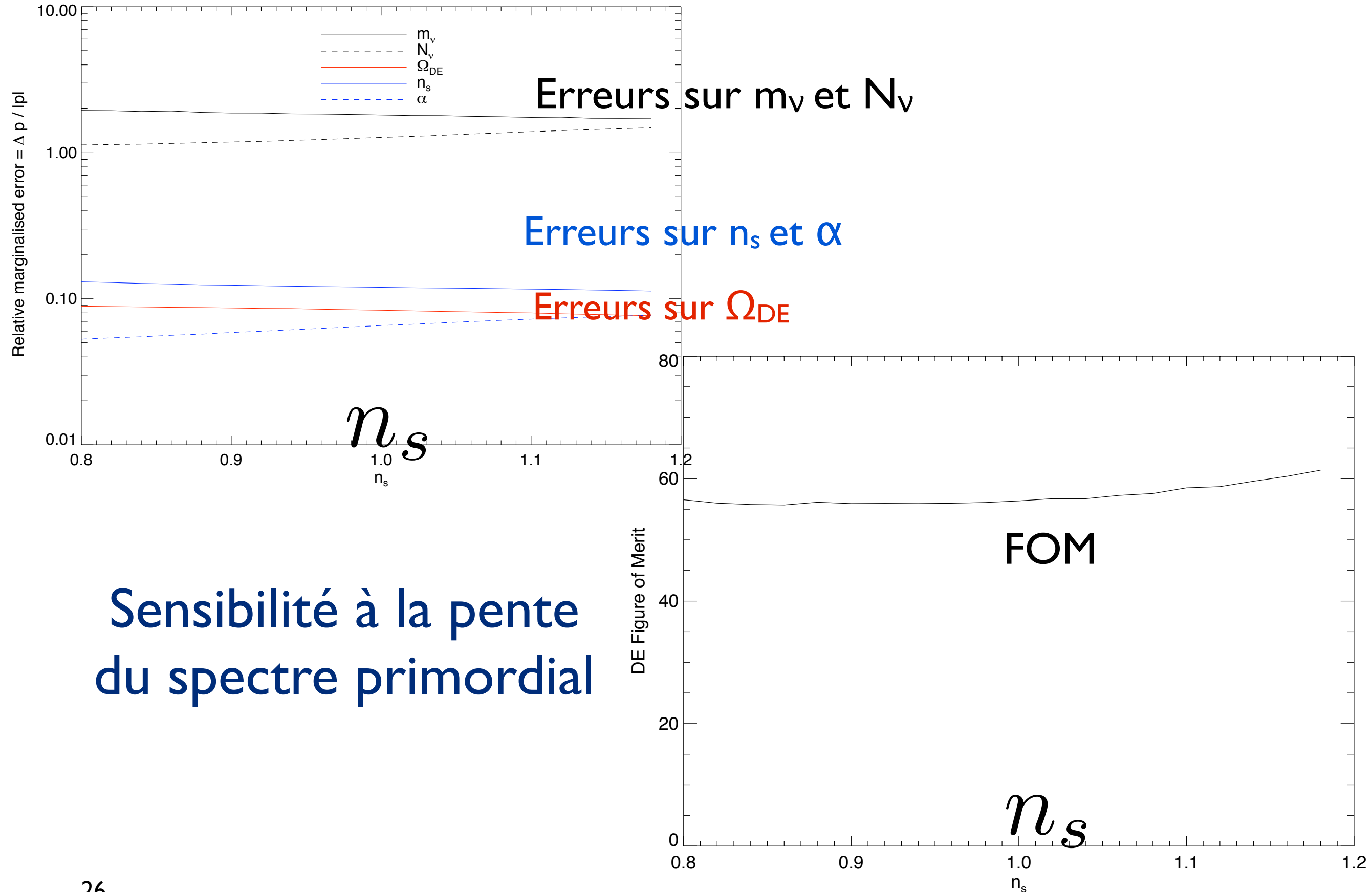
Lensing

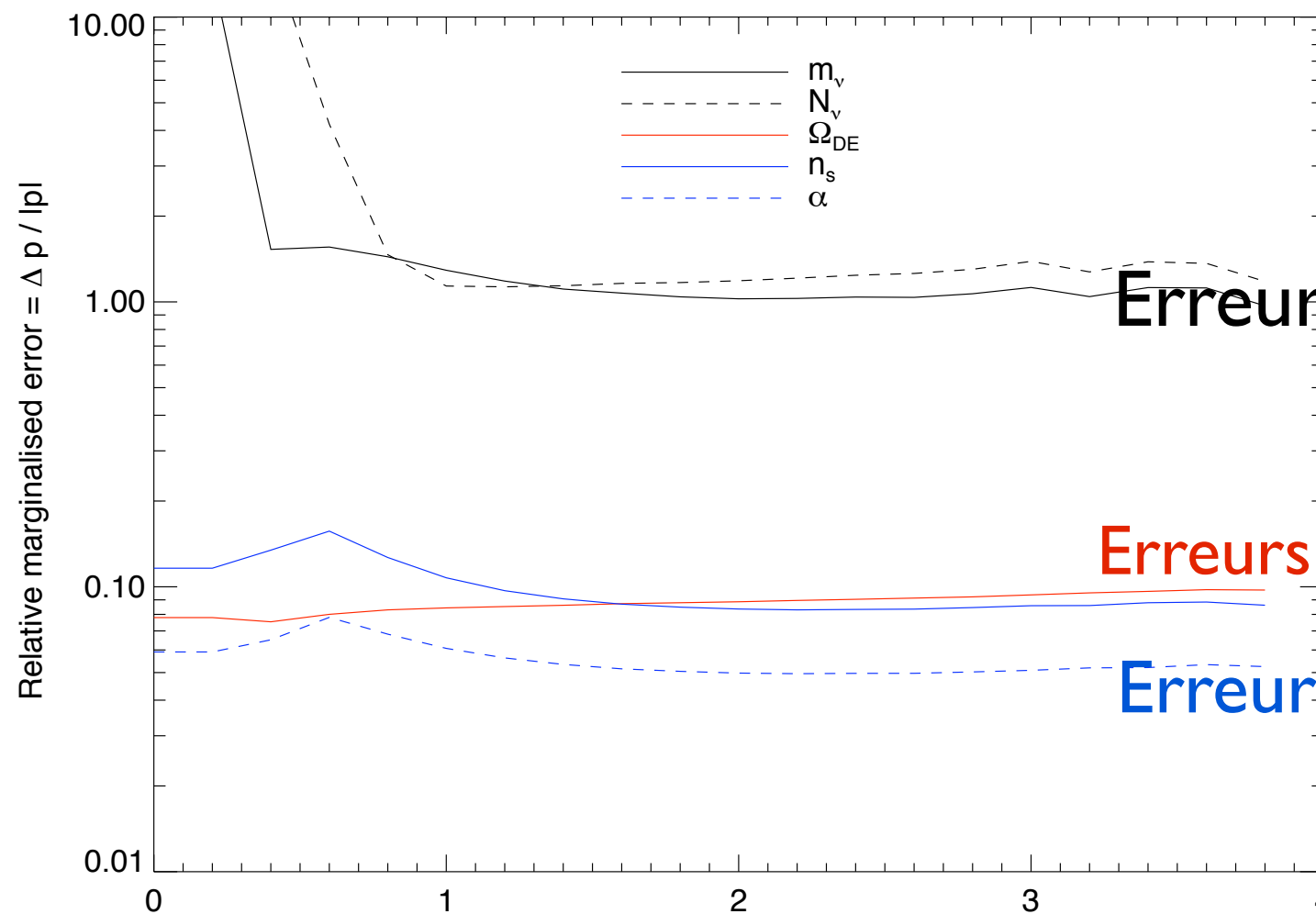


Lensing + CMB



Variation du modèle central



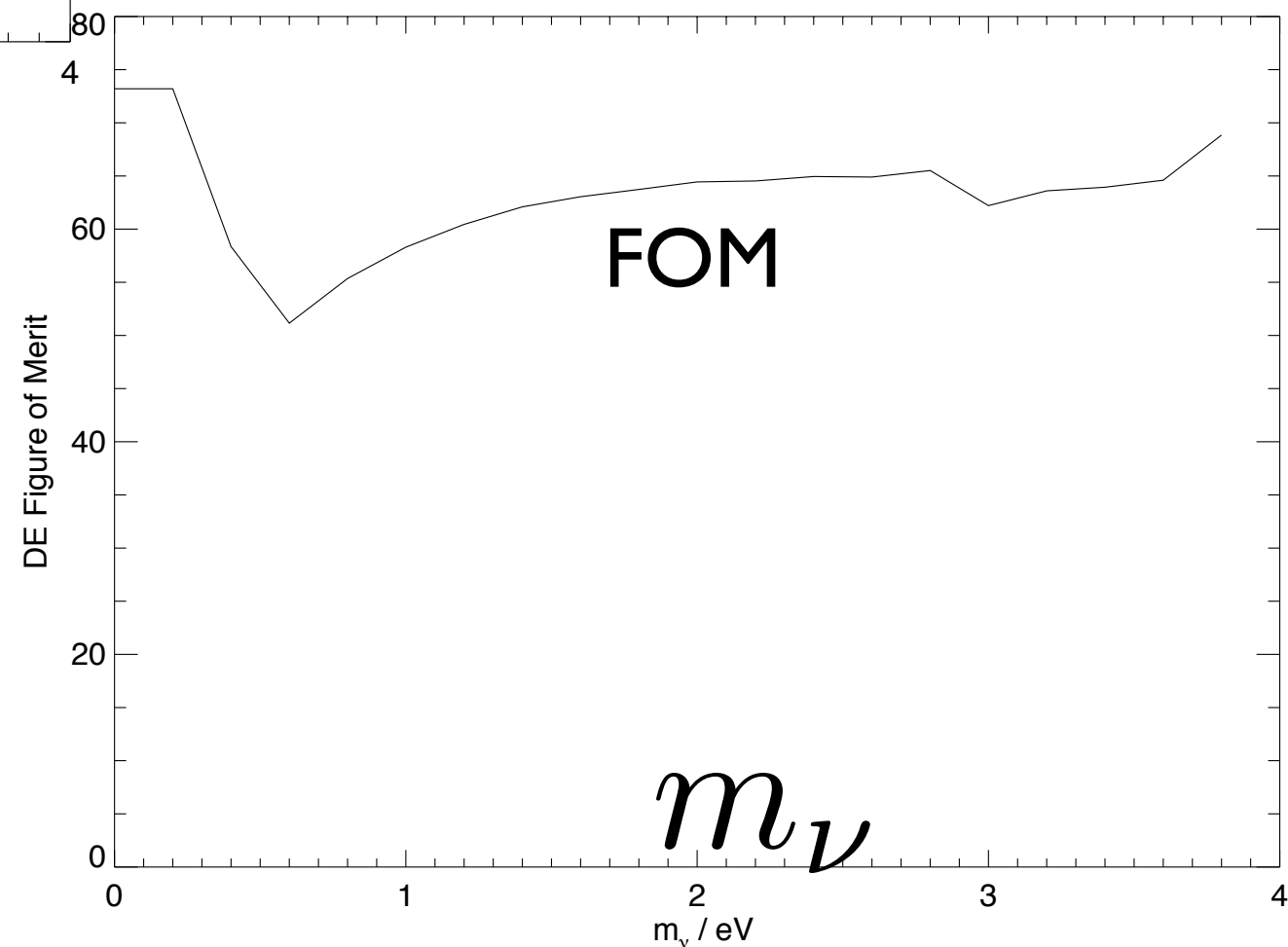


Erreurs sur m_ν et N_ν

Erreurs sur Ω_{DE}

Erreurs sur n_s et α

m_ν



m_ν

Sensibilité à la masse
totale des neutrinos

Variation des caractéristiques du relevé

- Quel caractéristiques du relevé choisir pour maximiser les contraintes sur un ou plusieurs paramètres ?
- Stratégie d'optimisation

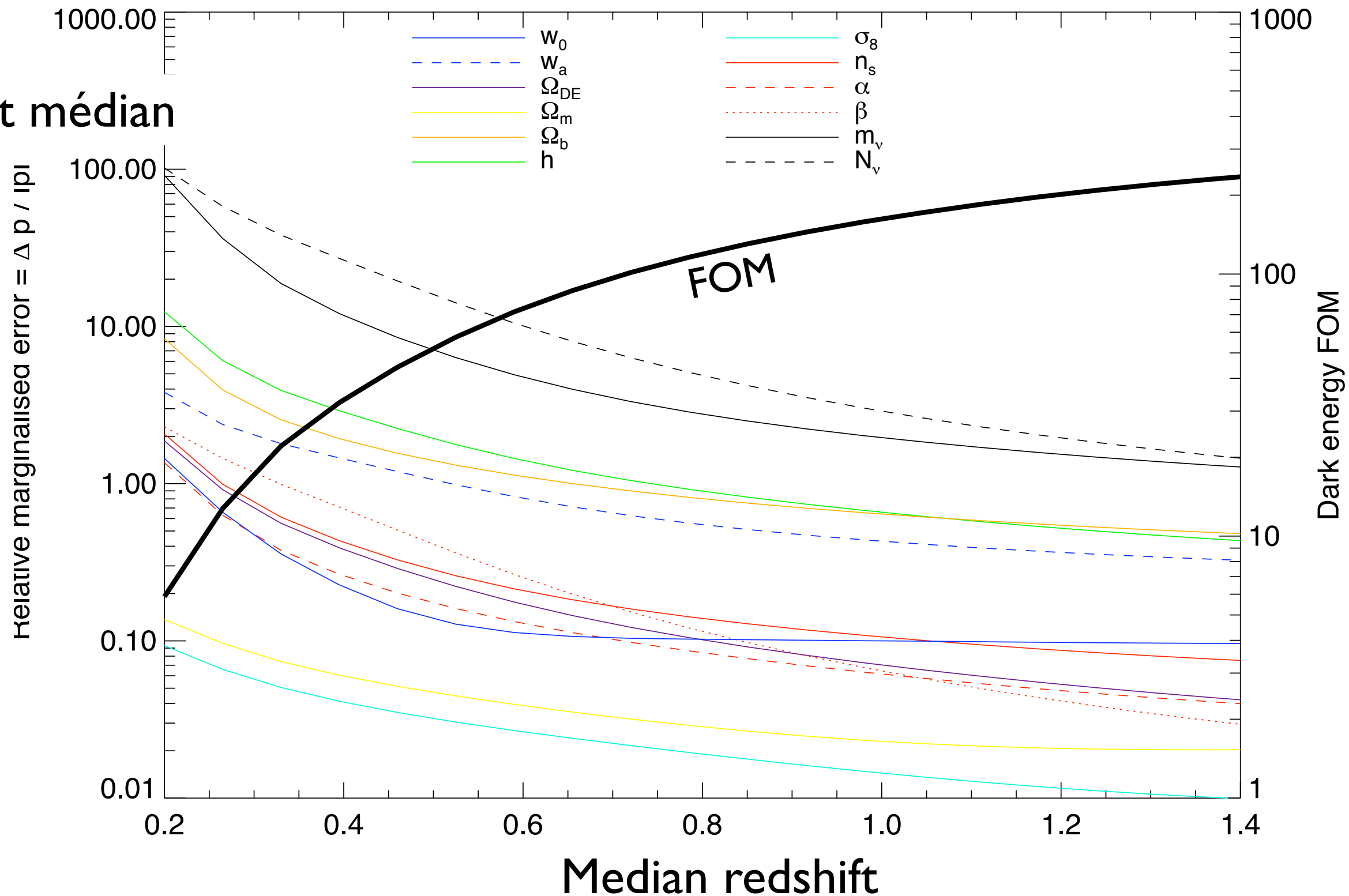
Caractéristiques du relevé

A_s	20 000 sq deg	← étendue
z_{median}	0.9	← redshift médian
ℓ_{max}	5000	← multipôle maximal

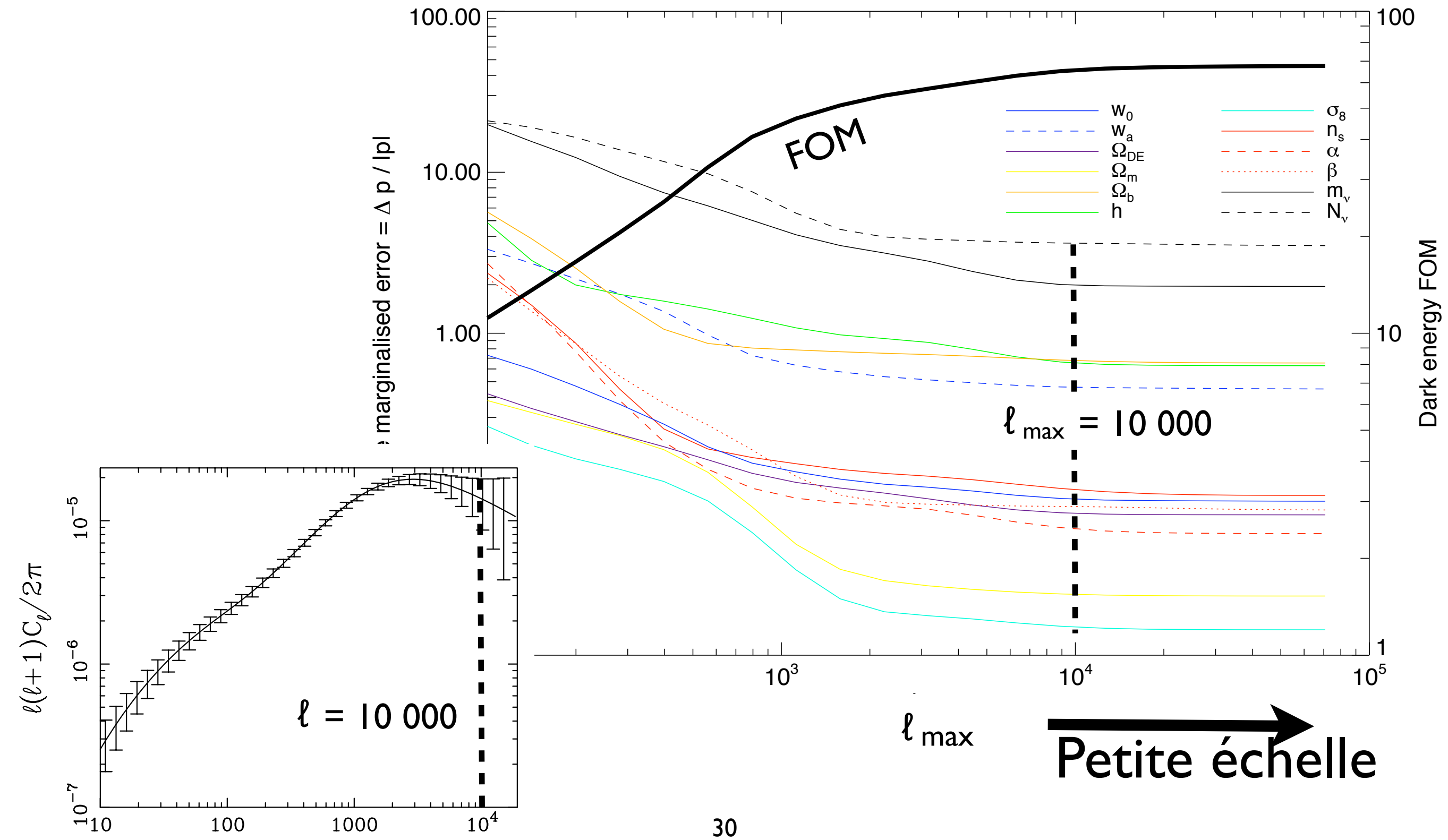
Variation de la géométrie du relevé

•étendue $\Delta p = \frac{1}{\sqrt{A_s}}$

•Redshift médian



Variation de l'intervalle de multipôles



Conclusions

- **Prévisions pour les contraintes sur les paramètres cosmologiques**
 - Cisaillement gravitationnel donne des contraintes fortes sur tous les paramètres du modèle
 - Contraintes sont stables aux variations
 - de l'espace d'hypothèses
 - du modèle central
 - L'addition des *a priori* du CMB
 - donne des contraintes plus fortes
 - augmente la stabilité des contraintes, même avec l'ajout de paramètres dans tous les secteurs du modèle

● **Optimisation**

- La précision sur tous les paramètres évolue de la même manière
- Cette variation est largement indépendante du nombre de paramètres libres
- Stratégie d'optimisation :
 - ▶ maximiser l'étendue du relevé
 - ▶ utiliser intervalle de multipôles jusqu'à $\ell_{\max} \sim 10^4$
- Généralisation de Amara et Réfrégier (2007)
- La stratégie d'optimisation est valable pour l'énergie noire ainsi que les autres paramètres

Perspectives

Spectre de puissance de la matière :

- Utilisation de codes Boltzmann
- Calcul plus précis de la partie non-linéaire du spectre
- Paramétrisation plus générale de la hiérarchie masses des espèces de neutrinos

Cisaillement gravitationnel :

- Ajout des effets systematiques
- Comparaison avec cisaillement 3D
- Contraintes jointes avec d'autres sondes

Espace de paramètres :

- Spectre primordial : Autres paramétrisations, paramètres de l'inflation